

Metaverse in Medicine

ISSN 3006-4236

元宇宙医学



元宇宙医学

二〇二六年三月 第三卷第一期



2026年3月 第3卷第1期

科技赋能呼吸守护，健康管理迈入智能新纪元

——《AI 赋能防治呼吸病》即将重磅面世

《AI 赋能防治呼吸病》是一部面向公众与基层医务人员的呼吸健康科普及管理佳作。本书立足“健康中国”战略擘画的时代蓝图，紧扣全民健康素养提升的现实需求，聚焦呼吸系统疾病防治中最普遍、最易困扰患者，且极易滋生认知误区、导致诊疗延误的关键问题，致力于将艰深的专业医学知识，转化为通俗易懂、可践可行且易于坚持的健康行动指南。

全书以呼吸健康全程管理为主线，将疾病认知、风险识别、规范就医、合理用药、康复训练、长期随访及生活方式干预等核心内容熔于一炉，助力读者在日常场景中，以科学视角认知并妥善管理呼吸健康问题。为赋予知识传播更强的连贯性与实用性，本书匠心独运，引入 BAIMGPT（数字人医学专家 GPT）作为线上呼吸健康顾问，在医生规范诊疗之外，为读者提供专业的疾病解读、贴心的用药提醒、细致的随访支持、科学的康复指导及个性化的健康管理建议。

本书特别厘清，BAIMGPT 的定位是“赋能 + 分流”的家庭健康助手，可承担健康答疑、知识普及、风险提示与学习支持等多元功能，但绝不能替代临床医生作出最终诊断与治疗决策。这一精准定位，既彰显了人工智能在健康管理领域的独特辅助价值，亦清晰划定了其在医学应用领域的边界与底线。

相较于一般通用型 GPT，本书依托的 BAIMGPT 独创“四改”策略：改数据清洗为数据精选，于海量信息中淬炼真知；改简单咨询为直面分身，让交互体验更具针对性；改盲目信赖为质控核对，以严谨态度保障信息可靠；改单纯循证为循证与专家经验相融，让专业建议更贴合临床实际。与此同时，其背后搭建起体量恢弘的呼吸专病知识库，围绕呼吸系统疾病及相关基础理论、检查技术、诊疗流程、康复管理等近百个专题，系统梳理海量高频问题与权威标准答案。本书正文虽仅有 27 万余字，背后却有近 1 亿字的标准化知识体系作为坚实支撑，为内容的专业性、规范性与准确性筑牢根基。

兼具科学性、通俗性与实用性的《AI 赋能防治呼吸病》，既是普通公众守护呼吸健康的案头手边书，亦可为基层医务人员、健康管理人员及医学科普工作者提供专业参考。



元宇宙医学

YUAN YU ZHOU YIXUE



季刊

2024 年创刊

第 3 卷第 1 期 (总第 9 期)

2026 年 3 月 30 日出版

主 办

复旦大学附属中山医院

编 辑

《元宇宙医学》编辑委员会

200032, 上海市枫林路 179 号

电话: (021) 51217570

网址: www.zentimepublishing.com

E-mail: metamedsh@vip.163.com

主 编

白春学

顾建英

副主编 (按拼音排序)

Nels H. Chavannes

陈荣昌

高承实

贾泽军

刘 雷

连 勇

Charles A. Powell

潘 毅

宋振举

Christoph Thüemmler

王伟林

杨达伟

编辑部主任

贾泽军

联合出版

《元宇宙医学》编辑部;

Zentime Publishing Corporation
Limited

ISSN 3006-4236

2026 年版权归复旦大学附属中山医院《元宇宙医学》编辑部所有

本刊刊出的文章除特别声明外, 不代表主办单位和本刊编委会的观点。本刊如有印装质量问题, 请向本刊编辑部调换。

目 次

专家述评

Hospital at home: from international evidence to a China-oriented pathway——building an integrated hospital-community-home model for respiratory home hospitalization coordinated with cloud outpatient care, with evaluation of clinical safety, environmental footprint, social benefit, and economic value.....
..... Bai Chunxue, Song Yuanlin, Yang Dawei (1)

医学 GPT 研发的挑战与解决方案 白春学 (11)

液态生命与数字围栏: 元宇宙健康数据的治理困境与范式重构
..... 高承实, 程元骏 (16)

综 述

AI+数字病理与分子检测 白春学, 纪 元 (38)

医学教育

面向全周期医学教育培训与管理的“复旦中山惠生智育”元宇宙平台: 设计思路与早期实践 张 雯, 张 敏, 马畅畅, 等 (47)

神经科教学中的元宇宙革命: 技术基础设施、临床应用与教育效能
..... 林继先, 薛 珉, 黄露艳, 等 (52)

产学研融合

AI+多模态融合在肺结节良恶性鉴别中的应用..... 童 琳,白春学(64)

深度学习辅助精细评估肺结节影像 白春学,朱 煜(72)

本期执行主编 白春学

本期责任编辑 翟铖铖,孙梦瑶,臧天茹

本期责任校对 姬静芳,王 迪,殷 悦

METaverse IN MEDICINE

Established in 2024; Volume 3, Number 1, March 30, 2026

Sponsor

Zhongshan Hospital, Fudan University

Editor

Editorial Committee of *Metaverse in Medicine*
179 Fenglin Road, Shanghai 200032, China
Tel: (86)21-51217570
http: www.zentimepublishing.com
E-mail: metamedsh@vip.163.com

Editor in Chief

BAI Chunxue
GU Jianying

Associate Editor

Nels H. Chavannes
CHEN Rongchang
GAO Chengshi
JIA Zejun
LIU Lei
LIAN Yong
Charles A. Powell
PAN Yi
SONG Zhenju
Christoph Thüemmler
WANG Weilin
YANG Dawei

Editorial Director

JIA Zejun

Co-publishing

Editorial Office of *Metaverse in Medicine* & Zentime Publishing Corporation Limited

ISSN 3006-4236

Copyright © 2026, Zhongshan Hospital, Fudan University

CONTENTS IN BRIEF

Commentary

Hospital at home: from international evidence to a China-oriented pathway —building an integrated hospital-community-home model for respiratory home hospitalization coordinated with cloud outpatient care, with evaluation of clinical safety, environmental footprint, social benefit, and economic value Bai Chunxue, Song Yuanlin, Yang Dawei (1)

Challenges and solutions for the development of medical GPTs Bai Chunxue (11)

Liquid life and digital fence: governance dilemma and paradigm reconstruction of metaverse health data Gao Chengshi, Cheng Yuanjun (16)

Review

AI-enabled digital pathology and molecular testing Bai Chunxue, Ji Yuan (38)

Medical education

A metaverse platform (“Huisheng Intelligent Education”) for full-cycle medical education, training, and management: design rationale and early practice Zhang Wen, Zhang Min, Ma Changchang, et al (47)

The metaverse revolution in neurological education: technical infrastructure, clinical applications, and educational efficacy Lin Jixian, Xue Min, Huang Luyan, et al (52)

Integration of IUR

Application of AI and multimodal fusion in the differential diagnosis of benign and malignant pulmonary nodules Tong Lin, Bai Chunxue(64)

Deep learning-assisted fine assessment of pulmonary nodule images Bai Chunxue, Zhu Yu(72)

Acquisitions editor BAI Chunxue

Executive editors ZHAI Chengcheng, SUN Mengyao, ZANG Tianru

Executive proofreaders JI Jingfang, WANG Di, YIN Yue

DOI: 10.61189/510826xogeww

· 专家述评 ·



Hospital at home: from international evidence to a China-oriented pathway ——building an integrated hospital–community–home model for respiratory home hospitalization coordinated with cloud outpatient care, with evaluation of clinical safety, environmental footprint, social benefit, and economic value

Bai Chunxue*, Song Yuanlin, Yang Dawei

Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

[Abstract] **Objective** To synthesize the international evidence, implementation models, and barriers related to Hospital at Home (HaH), and to propose a China-oriented pathway for respiratory HaH by integrating family bed services, internet hospitals, internet-based medical services, Internet Plus Nursing Services, and community health services. Contemporary evidence suggests that HaH has evolved beyond a simple substitute for inpatient admission and is increasingly understood as a composite model of hospital-level acute care delivered outside the hospital through remote monitoring, virtual review, in-home nursing, home-based treatment, and rapid escalation pathways. **Methods** This review draws on recent systematic reviews, randomized trials, real-world studies, implementation research, and national and local policy documents. The analysis focuses on conceptual boundaries, the international evidence base, key respiratory indications, digital infrastructure, nursing and community coordination, and multidimensional evaluation across clinical safety, environmental footprint, social benefit, and economic value. **Results** Among appropriately selected patients, HaH appears comparable or superior to conventional inpatient care with respect to mortality, readmission, patient experience, functional recovery, and some cost-related outcomes. Respiratory conditions, particularly post-exacerbation management of chronic obstructive pulmonary disease, home oxygen therapy, home noninvasive ventilation, post-pneumonia transitional care, and intensified post-discharge follow-up, represent high-priority and operationally feasible scenarios for HaH. China already has several institutional components relevant to HaH, including family bed services, internet hospitals, internet-based diagnosis and treatment, Internet Plus Nursing Services, and community health services. However, these components remain only partially connected and require specialty-led integration, digital coordination, nursing execution, and community continuity to form an operational, evaluable, and scalable pathway. Environmental gains should not be assumed; instead, transport, hospital bed utilization, household energy use, consumables, waste, and digital infrastructure should all be assessed within a full-pathway framework. **Conclusions** HaH has developed into a model of hospital-level care outside the hospital that integrates remote monitoring, virtual rounds, in-home nursing, home-based treatment, and rapid escalation and referral. For China, the key issue is not whether HaH is conceptually feasible, but how existing institutional mechanisms can be reorganized into an integrated hospital – community – home pathway for respiratory care. Future implementation should be evaluated across four domains: clinical safety, environmental footprint, social benefit, and economic value.

[Key Words] hospital at home; home hospitalization; respiratory disease; family bed services; internet hospital; Internet plus nursing services; environmental footprint; social benefit; economic value

1 Introduction

Population ageing, multimorbidity, and increasing pressure on inpatient capacity are challenging the sustainability of acute care models centered on physical hospital beds. Some patients in the acute or subacute phase no longer require intensive

in-hospital monitoring, yet still need relatively close specialist review, medication adjustment, oxygen support, nursing interventions, and symptom surveillance. At the same time, repeated hospital attendance and recurrent admissions increase bed occupancy and system strain while also imposing substantial transport, caregiving, productivity, and

[Date of reception] 2026-03-15

[Date of acceptance] 2026-03-29

[Funding] 四大慢病重大专项 (2024ZD0529300). Supported by Noncommunicable Chronic Diseases–National Science and Technology Major Project (2024ZD0529300).

[First Author] 白春学, 博士, 主任医师、教授. E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

* Corresponding author. E-mail: cxbai@fudan.edu.cn

daily-life costs on patients and families^[1-4].

Against this background, Hospital at Home (HaH) has moved from an exploratory “substitute for admission” model towards a broader reorganization of hospital-level care delivered in the home^[1,3,5-9]. Its defining feature is not early discharge alone, but the delivery of time-limited, proactive, and continuous hospital-level care in the home through combinations of remote monitoring, virtual wards, cloud-based clinical orders, in-home nursing, home treatment, and escalation pathways^[1,6-9]. Recent systematic reviews and randomized trials suggest that, in carefully selected populations, HaH can achieve outcomes similar to or better than those of conventional inpatient care with respect to mortality, readmission, patient experience, and selected economic outcomes^[1,3-7].

Respiratory medicine is among the most promising specialties for HaH implementation. Acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease (COPD), recovery after pneumonia, home oxygen therapy, noninvasive ventilation, sleep-disordered breathing device management, and supportive care after lung cancer treatment all share features that make them well suited to this model: a clear need for intensified post-discharge management, measurable home monitoring parameters, and high value from specialty-led continuity of care^[10-17]. Importantly, China is not developing HaH from an institutional vacuum. Family bed services, internet hospitals, internet-based diagnosis and treatment, Internet Plus Nursing Services, and community health services already provide a policy and organizational foundation for out-of-hospital care^[18-21]. The central question, therefore, is not whether China can implement HaH, but how these existing components can be integrated into a locally feasible pathway led by specialists, supported by digital platforms, operationalized through nursing services, and sustained by community-based continuity of care^[22-27].

This article reviews the conceptual basis, international evidence, respiratory application scenarios, implementation requirements, and evaluation framework of HaH, and proposes an integrated hospital - community - home model for

respiratory home hospitalization coordinated with cloud outpatient care, with the aim of informing future Chinese practice and research^[1-40].

2 Main text

2.1 Conceptual evolution and terminological boundaries of Hospital at Home

The evolution of HaH reflects a broader shift in healthcare delivery from location-based to capability-based models of care. Earlier forms of HaH were typically framed as either admission avoidance or early supported discharge, with the principal aim of transferring selected patients from hospital to home for time-limited treatment, thereby reducing inpatient bed use, limiting hospital-associated complications, and improving patient experience^[1,4]. The 2024 Cochrane update defined admission avoidance hospital at home as the provision of active hospital-level treatment at home for patients who would otherwise require acute inpatient admission^[1]. More recently, the 2025 BMJ Open scoping review argued that HaH should no longer be understood as a single substitution strategy, but rather as a composite service model integrating remote monitoring, virtual care, command platforms, in-home nursing, home treatment, and rapid escalation capability^[3].

This shift is important because HaH should not be defined solely by where care is delivered, but by what level of care is delivered and how it is organized. What determines whether HaH is truly present is not whether the patient is physically at home, but whether hospital-comparable assessment, treatment, monitoring, risk recognition, and escalation support can be delivered safely in that setting^[1,5-6,9]. A 2021 systematic review and meta-analysis in JAMA Network Open found that hospital-at-home interventions for patients with chronic disease presenting to emergency departments were associated with outcomes comparable to or better than those of inpatient care^[4]. Randomized trials have also shown that home hospital models may reduce overall costs, increase physical activity, and improve aspects of patient experience, while remote physician review can be non-inferior to in-home physician review under defined conditions^[5-6]. Taken together, these findings

support the view that HaH has evolved from an extension of post-discharge support into a reconfiguration of acute hospital-level care in the home^[1,3,9].

However, important variation remains in how HaH is defined across studies and health systems, limiting comparability and wider implementation^[1,3,9]. The Cochrane framework distinguishes between admission avoidance hospital at home, in which patients who would otherwise be admitted receive hospital-level care directly at home, and early discharge hospital at home, in which patients are discharged earlier after initial stabilization and continue hospital-level care at home^[1]. The 2025 BMJ Open review similarly highlighted the need for more consistent definitions to improve both evidence synthesis and policy translation^[3].

Related terms include virtual ward, home hospital, advanced care at home, and hospital-level care at home^[1,5-9]. In many settings, virtual ward refers primarily to remote surveillance, virtual review, and platform coordination, and does not necessarily meet the full threshold of hospital-level substitution^[1,9]. By contrast, home hospital and hospital-level care at home more explicitly imply relocation of key acute inpatient functions into the home^[5-9]. A 2024 systematic review in BMC Medicine showed that many interventions labelled as virtual wards or hospital-at-home are in fact complex multicomponent interventions, and that effectiveness depends substantially on whether they include in-home execution, continuous monitoring, and rapid escalation capacity^[9]. In this article, HaH is therefore defined in a relatively strict sense as a hospital-led, time-limited, hospital-level model of care delivered in the home to patients who would otherwise require admission or continued inpatient management, rather than routine teleconsultation or general home nursing^[1,9,22-24].

2.2 International evidence base At the level of overall feasibility, the evidence base for HaH is now relatively mature^[1,3-4]. The 2024 Cochrane review and the 2021 JAMA Network Open systematic review both concluded that, among appropriately selected patients, HaH is a viable alternative to inpatient

admission and is at least non-inferior across several major outcomes^[1,4]. The 2025 BMJ Open scoping review suggested that the field has now moved beyond asking whether HaH can work, and towards more practical questions concerning scale, standardization, and implementation barriers^[3].

An important complementary review from npj Digital Medicine further argues that HaH in the USA has evolved from an admission-substitution model into a digitally enabled acute care ecosystem that integrates remote monitoring, virtual clinician review, home-based services, and escalation capability, while also underscoring that future scale-up depends on payment reform, operational standardization, and platform integration^[33].

Randomized evidence has reinforced these conclusions. In a 2020 trial published in *Annals of Internal Medicine*, hospital-level care at home was associated with lower total costs, greater physical activity, and a favorable trend in readmissions compared with usual inpatient care^[5]. A 2022 randomized trial in *JAMA Network Open* further found that remote physician visits, within a home hospital model, were non-inferior to in-home physician visits with respect to safety and patient experience, though this does not imply that in-person clinical capacity can be eliminated^[6]. A subsequent 2025 trial in rural settings suggested that hospital-level care at home was also feasible outside metropolitan environments and was strongly preferred by patients, although delayed initiation may reduce potential gains in cost and readmission^[7]. These findings underscore that timing of initiation and pathway design may be as important as the model itself.

Patient acceptance is generally favorable, but it is not universal^[2,20]. A systematic review of reasons for refusing hospital-at-home identified several recurrent concerns, including safety of home-based care, caregiver burden, unsuitability of the household environment, and uncertainty about available hospital support^[20]. This suggests that HaH should not be evaluated solely in terms of admission substitution or health service outcomes. Patient preference, caregiver experience, and home suitability should also be considered central implementation and outcome

domains^[2,20].

Implementation research has further shown that current barriers to HaH are less often purely clinical and increasingly organizational. Key challenges include identifying suitable patients, coordinating multidisciplinary teams, ensuring efficient home-based service delivery, redesigning workflows, supporting nursing practice, and establishing viable reimbursement pathways^[2-3,8-9,20]. A 2025 commentary in JAMA Network Open noted that attempts to scale HaH beyond original research settings frequently encounter questions about limited eligible population size, inefficient cross-disciplinary home visiting, and high dependence on local organizational capacity^[8]. As a result, robust clinical evidence alone is insufficient. Sustainable HaH implementation also requires parallel development of delivery models, quality assurance systems, and payment mechanisms^[2-3,8,18].

2.3 Core components of HaH Safe HaH depends first on appropriate patient identification and risk stratification. Suitable patients generally need to have relatively stable or stabilizing conditions, vital signs that can be monitored safely at home, manageable comorbidity burden, a home environment compatible with treatment delivery, available caregiving support, adequate digital access, and a clear pathway for rapid escalation when deterioration occurs^[1,8-10]. High baseline risk does not necessarily preclude HaH, but it does require greater monitoring intensity and lower thresholds for hospital transfer. High-quality HaH programmes are therefore likely to require a combination of electronic prescreening, rule-based triggers, and multidisciplinary clinical review, rather than relying only on individual bedside judgment^[1,8-10].

Equally important, HaH should be understood not as transferring the patient home alone, but as transferring hospital-level functions into the home. A mature HaH package should include remote physician review, in-home nursing, medication management, provision of intravenous or nebulized treatment when indicated, vital sign monitoring, access to urgent laboratory testing or imaging, 24/7 response to abnormalities, escalation and referral pathways, and training for patients and caregivers^[5-6,9-10]. Without these core functions, the model is better described as

remote follow-up than hospital-level care at home^[5-6,9].

Digital infrastructure is fundamental to HaH rather than optional. Remote monitoring, virtual review, data integration, and alert systems provide the operational backbone for hospital-level care outside the hospital. Reviews of home-based physiological monitoring indicate that continuous or near-continuous monitoring may improve safety, support decision making, and facilitate earlier recognition of deterioration, although alarm burden, technological usability, and workflow integration remain important limitations^[9]. At a minimum, the digital platform for HaH should include remote monitoring devices, virtual review or cloud outpatient functionality, task coordination systems, and rules for data return and risk alerting. In China, the most natural institutional vehicle for this digital infrastructure is the internet hospital and internet-based medical service platform^[22-24].

A 2024 systematic review in *npj Digital Medicine* examined 29 studies from 16 countries and found that remote patient monitoring during transitions from hospital to home showed positive effects on patient safety and adherence, improved mobility and functional status, and a downward trend in readmission, length of stay, outpatient visits, and non-hospitalisation costs^[34]. These findings reinforce the view that digital monitoring is not a peripheral add-on to HaH, but a core enabling infrastructure. In parallel, a 2023 *npj Digital Medicine* review on surgical home hospital programs suggested that remote patient monitoring, risk prediction models, and interoperable virtual platforms may help identify patients better suited to home-based hospital-level care and anticipate complications, indicating that AI-enabled risk stratification may become increasingly important as HaH expands across specialties^[37].

Among all operational elements, in-home nursing and multidisciplinary coordination are particularly decisive. Without in-home nursing, HaH risks being reduced to telemonitoring. Without multidisciplinary coordination, continuity in medication adjustment, rehabilitation, nutrition, symptom management, and caregiver support is difficult to sustain. International experience therefore

indicates that the central challenge is not only whether clinicians can see patients remotely, but whether hospital work can be reproduced safely and reliably in the home^[2-3, 20, 23-24].

2.4 Priority respiratory indications Respiratory medicine is one of the specialties in which HaH is most likely to achieve early operational maturity. Transitional care after acute exacerbation of COPD is currently one of the best-supported scenarios. Previous systematic reviews and Cochrane analyses have shown that selected patients with COPD exacerbation may be managed through early discharge or hospital-at-home pathways with outcomes that are similar or superior to those of inpatient care in relation to readmission, quality of life, and patient preference^[10-17]. In practice, this means that respiratory HaH may often be most effective not as direct discharge from emergency departments, but as early transfer to intensified home-based management following short inpatient rehabilitation.

Home oxygen therapy, home noninvasive ventilation, and remote ventilation follow-up provide a critical capability base for respiratory HaH. Oxygen therapy requires far more than equipment delivery; it involves assessment of indications, titration of flow, home safety education, adherence review, and evaluation of therapeutic response. The American Thoracic Society guideline on home oxygen therapy provides a structured framework for these processes^[13]. Noninvasive ventilation likewise requires attention to timing of initiation, parameter adjustment, alarm thresholds, adverse event surveillance, and remote interpretation of usage data. In populations such as obstructive sleep apnoea, obesity hypoventilation syndrome, and COPD with hypercapnia, a pathway combining devices, remote monitoring, and structured cloud outpatient review is operationally meaningful^[10-13, 17].

Pneumonia recovery and short-term post-infectious support form another important transitional category. Not all patients with pneumonia are suitable for admission avoidance HaH, but a subset of patients who are clinically stabilised yet still require oxygen therapy, antimicrobial completion, and symptom monitoring may be particularly suitable for intensified

home-based management^[5-7]. Such pathways may reduce bed occupancy while maintaining continuity of care.

Supportive care after lung cancer treatment is another relevant application. Patients with lung cancer frequently experience dyspnoea, nutritional decline, pain, infection risk, and adherence challenges after discharge. A combined HaH and cloud outpatient model may strengthen outpatient symptom monitoring, improve continuity of supportive care, reduce avoidable hospital visits, and support earlier detection of deterioration^[3, 19].

Respiratory HaH should also be framed not only around acute safety, but around recovery and function. For many patients, post-discharge outcomes are influenced not only by medication continuation but also by declining physical activity, poor rehabilitation adherence, and functional deterioration. Incorporating pulmonary rehabilitation, nutritional support, exercise guidance, and symptom self-management into HaH may therefore extend hospital-level care into the recovery period in a clinically meaningful way^[10, 16].

For respiratory medicine, a multidisciplinary community respiratory team reported in npj Primary Care Respiratory Medicine was associated with a reduction in emergency admissions while managing chronic respiratory illness at home with extensive use of remote consultations, supporting the practical value of an integrated hospital – community – home pathway for respiratory HaH^[38]. Looking further ahead, a 2025 Cell Biomaterials perspective proposed that COPD home care may move beyond passive monitoring toward continuous sensing, automated decision-making, and closed-loop oxygen delivery, highlighting a possible future direction for intelligent respiratory HaH^[39].

2.5 A China-oriented pathway: from parallel policy modules to an integrated specialty model China's starting point for HaH is not the creation of an entirely new service architecture, but the integration of existing policy and care delivery components. In 2018, national regulations formally established the policy basis for internet-based diagnosis and treatment, internet hospitals, and telemedicine. These regulations emphasized that online care should be anchored to physical medical institutions, with clear professional

accountability and coordination between online and offline service capacity^[22]. This policy architecture suggests that China is not well suited to a purely platform-based HaH model detached from hospitals. Rather, it is more compatible with hospital-led care pathways supported by digital platforms and delivered into the home.

Within this architecture, Internet Plus Nursing Services provides a critical operational bridge. National pilot policies launched in 2019 and expanded in 2020 brought in-home nursing, digital scheduling, and structured home-based interventions into a more formal regulatory framework, particularly for older adults, post-discharge patients, and people in rehabilitation^[23–24]. This is highly relevant to HaH because procedures such as catheter care, dressing changes, medication guidance, specimen collection, rehabilitation support, health education, and recognition of deterioration depend on reliable nursing execution in the home. Without such capacity, remote monitoring alone cannot deliver hospital-level treatment.

Shanghai offers a particularly relevant local institutional interface. The 2025 Shanghai Standards for Family Bed Services define family bed services as standardised medical care provided in the home for people who require continuous treatment but have genuine difficulty attending medical institutions because of self-care limitations or impaired mobility^[26]. The 2025 municipal health work plan also calls for strengthening community inpatient services and expanding family bed and home nursing support for older adults under contracted care^[27]. Together, these policies suggest that family bed services in Shanghai are moving from a narrow adjunct to chronic care towards a broader platform capable of supporting continuous medical care at home, which aligns closely with the service logic of HaH.

From this perspective, the China-oriented pathway does not lie in replicating Western organizational forms, but in integrating family bed services, internet hospitals, internet-based diagnosis and treatment, Internet Plus Nursing Services, and community health services into a coordinated specialty pathway rather than leaving them as separate policy

modules. In such a pathway, tertiary-hospital specialty teams would be responsible for patient identification, risk stratification, clinical planning, and escalation decisions; internet hospital and cloud outpatient platforms would provide digital coordination, data return, and clinician – patient communication; Internet Plus Nursing Services would support in-home execution and selected treatment tasks; community health services would provide longer-term continuity, rehabilitation, and chronic disease follow-up; and family bed services would serve as the policy vehicle for time-limited continuous treatment. This is not a simple administrative aggregation of existing policies, but a functional reorganization of service delivery within current regulatory boundaries^[22–27].

For respiratory medicine, this integrated pathway is particularly practical. Home management of respiratory disease depends not only on remote consultation, but also on continuous physiological and symptom data, oxygen and ventilation parameters, education about equipment use, rehabilitation support, and timely reporting of abnormalities. A hospital – community – home closed loop can therefore transform respiratory HaH from a fragmented digital service into a specialty-led system of continuous care. If this model is further combined with theoretical work on metaverse medicine, new quality productive forces in medicine, and medical GPT, it may also enable broader use of digital twins, decision support, intelligent interaction, and multimodal data integration for patient education, risk prediction, and cross-setting coordination^[28–32].

Recent regulatory commentary also suggests that healthcare at home should not be understood as a mere outward extension of devices, but as a system-level issue involving interoperability, equitable access, regulatory pathways, and service integration^[36]. This perspective is highly relevant to China, where the key challenge is not the absence of isolated policy modules, but how to connect hospital, community, home, data, and payment mechanisms into an operational continuum.

2.6 Multidimensional evaluation of value The most frequently reported HaH outcomes remain mortality,

readmission, and emergency department return, but these metrics alone are insufficient to capture the full value of the model. Randomized trials and systematic reviews indicate that HaH can achieve comparable results to inpatient care across several major outcomes, and evidence of greater physical activity suggests that functional recovery should be considered alongside survival and readmission^[4–7]. For respiratory patients in particular, hospital-free days, exercise tolerance, rehabilitation adherence, symptom burden, and quality of life may be more directly informative indicators of whether patient-centred continuous care has actually been achieved.

Environmental footprint is another important but underdeveloped dimension. It is often assumed that HaH is environmentally preferable because it reduces inpatient stay and travel to hospital, but that assumption is too simplistic. A 2024 commentary in *npj Digital Medicine* argued that HaH may indeed offer environmental benefits, but these need to be measured rather than presumed^[19]. A meaningful assessment should include at least six elements: reduced travel by patients and family members, changes in hospital bed and building energy use, increased household electricity consumption, additional travel by visiting staff, changes in consumables and packaging, and the energy burden associated with digital devices and platforms. Without a full-pathway and life-cycle perspective, HaH may simply shift emissions from hospital infrastructure to households and logistics systems rather than reducing them overall^[19,21].

A 2024 perspective in *npj Digital Medicine* further cautioned that the environmental promise of HaH should not be assumed a priori: transportation substitution, household energy consumption, consumables, waste processing, and digital infrastructure all need to be incorporated into lifecycle assessment before claims of greener care can be made^[19].

Social benefit is similarly more complex than increased comfort alone. Implementation studies and patient refusal reviews show that HaH may improve patient preference and experience, but may also redistribute labor and caregiving burden to households^[2,20]. Social evaluation should therefore

include patient experience, caregiver burden, time costs, productivity loss, service equity, and digital inclusion. In China, this is particularly important for older adults, people with disability, those with limited digital literacy, and households with fewer resources. If these dimensions are neglected, HaH may benefit only relatively advantaged groups and fail to improve overall care equity^[2,20].

Economic value also requires a broader perspective than simple hospital accounting. A 2025 economic analysis in *JAMA Network Open* suggested that an all-virtual home-based acute care model may be advantageous from the payer perspective, but not necessarily from the provider perspective in the absence of appropriate reimbursement mechanisms.^[18] This highlights a central issue for HaH scale-up: not only whether it saves money, but whose costs are reduced, whose costs increase, and how payment is aligned. A more useful framework would therefore distinguish at least four economic perspectives: the hospital, the payer, the household, and society. This distinction is particularly relevant in China, where narrow provider-side accounting could obscure gains or burdens experienced by households in transport, caregiving, work absence, and home-based equipment use^[18].

2.7 Implementation barriers and future priorities
Despite growing evidence for safety and feasibility, several barriers continue to limit broader adoption of HaH. The first is patient selection and the definition of safety boundaries. Decisions about who should be enrolled, when HaH should start, and when escalation back to hospital is required are central to both safety and scalability. Overly broad inclusion may increase risk, whereas overly conservative selection may reduce the size and impact of the eligible population^[1–3,8].

The second major barrier is caregiver support and the digital divide. Many patients do not object to home-based care in principle, but are uncertain whether their household can manage the additional responsibilities it creates. Limited digital literacy, constrained caregiver time, restricted home space, complex equipment, and uncertainty about how to respond to deterioration may all undermine implementation^[2,20]. Future HaH pathways therefore

need to incorporate caregiver training, home suitability assessment, user-centred technology design, and tailored support for patients and families with limited digital capability.

The third barrier concerns payment and regulation. International experience suggests that HaH moves from innovation to routine service only when reimbursement systems are able to recognise and fund hospital-level care delivered outside hospital walls. China already has regulatory foundations in internet medical care, Internet Plus Nursing Services, and local family bed arrangements, but has not yet established a unified reimbursement framework for HaH as a defined model of care^[22–27]. In the near term, specialty-based pilots built on existing family bed, internet hospital, and nursing service mechanisms may therefore be more realistic than immediate national roll-out. Such pilots should generate evidence not only on clinical outcomes, but also on payment design, quality assurance, and cost allocation.

Future research should focus on at least six priorities: pragmatic large-scale trials to improve external validity; standardised reporting frameworks to improve comparability; AI-assisted patient identification and risk stratification; standardised life-cycle assessment of environmental footprint; family-friendly pathway design with explicit caregiver support; and real-world implementation and payment studies adapted to Chinese institutional conditions. The 2025 BMJ Open scoping review highlighted precisely these evidence gaps, making them especially relevant for future respiratory HaH research in China^[3,19,21].

At the same time, the digitalization of HaH creates new safety and governance requirements. A 2024 scenario analysis in *npj Digital Medicine* showed that a ransomware attack on a HaH platform could disrupt monitoring continuity, clinical response, and service reliability, implying that cybersecurity and digital resilience should be treated as core quality domains rather than technical afterthoughts^[35]. In addition, a 2026 observational study of a virtual hospital model for low back pain found no significant reduction in admissions but did report fewer 30-day emergency department re-presentations and better

physical function, suggesting that newer virtual hospital models may create value even when full admission substitution is not achieved^[40].

3 Conclusion

Hospital at Home has evolved from a narrow substitute for admission into a broader model of hospital-level care outside the hospital, combining remote monitoring, virtual review, in-home nursing, home-based treatment, and rapid escalation pathways. For carefully selected patients, available evidence supports its overall feasibility in terms of clinical safety, patient experience, and selected resource-use outcomes. Respiratory medicine, given its measurable home monitoring parameters, relatively established foundation in home oxygen and ventilation, and strong need for post-discharge intensification, is well positioned to serve as a priority field for HaH development in China^[1,3–7,10–17].

For China, the central issue is not whether HaH is theoretically possible, but how existing institutional components—family bed services, internet hospitals, internet-based diagnosis and treatment, Internet Plus Nursing Services, and community health services—can be reorganised into an integrated hospital – community – home pathway for specialty-led continuous care. HaH should not be judged solely by readmission rates or headline costs. Its longer-term value will depend on concurrent evaluation of clinical safety, environmental footprint, social benefit, and economic value. Only through such a multidimensional framework can HaH move from isolated pilots to standardised, scalable, and institutionally sustainable practice, and become a meaningful direction for the transformation of respiratory continuous care in China^[18–27].

Ethics approval Not applicable.

Competing interests The author declares no competing interests.

Author contributions Yuanlin Song, Dawei Yang and Chunxue Bai conceived the topic and overall framework of the manuscript, contributed to the conceptual development, interpretation of the literature, drafting and critical revision of the manuscript, and approved the final version for submission.

References

- [1] Edgar K, Iliffe S, Doll H A, et al. Admission avoidance hospital at home [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2024, 3 (3): CD007491.
- [2] Wallis J A, Shepperd S, Makela P, et al. Factors influencing the implementation of early discharge hospital at home and admission avoidance hospital at home: a qualitative evidence synthesis [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2024, 2024(3).
- [3] Sultani K, Smeulders M, de Vries R, et al. Transforming acute care: a scoping review on the effectiveness, safety and implementation challenges of Hospital-at-Home models [J]. *BMJ Open*, 2025, 15(8): e098411.
- [4] Arsenault-Lapierre G, Henein M, Gaid D, et al. Hospital-at-home interventions vs in-hospital stay for patients with chronic disease who present to the emergency department: a systematic review and meta-analysis [J]. *JAMA Netw Open*, 2021, 4(6): e2111568.
- [5] Levine D M, Ouchi K, Blanchfield B, et al. Hospital-level care at home for acutely ill adults: a randomized controlled trial [J]. *Ann Intern Med*, 2020, 172(2): 77–85.
- [6] Levine D M, Paz M, Burke K, et al. Remote vs in-home physician visits for hospital-level care at home: a randomized clinical trial [J]. *JAMA Netw Open*, 2022, 5(8): e2229067.
- [7] Levine D M, Desai M P, Findeisen S M, et al. Hospital-level care at home for adults living in rural settings: a randomized clinical trial [J]. *JAMA Netw Open*, 2025, 8(12): e2545712.
- [8] Truong T T, Siu A L. Scaling hospital at home beyond the original studies [J]. *JAMA Netw Open*, 2025, 8 (5) : e2510622.
- [9] Shi C H, Dumville J, Rubinstein F, et al. Inpatient-level care at home delivered by virtual wards and hospital at home: a systematic review and meta-analysis of complex interventions and their components [J]. *BMC Med*, 2024, 22(1): 145.
- [10] Khor Y H, Poberezhets V, Buhr R G, et al. Assessment of home-based monitoring in adults with chronic lung disease: an official American thoracic society research statement [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2025, 211(2): 174–193.
- [11] Roche N, Johansson K A. Home-based monitoring in chronic respiratory diseases: in search of *Panacea* [J]. *Lancet Respir Med*, 2025, 13(3): e17–e18.
- [12] Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease. Global Strategy for the Diagnosis, Management, and Prevention of Chronic Obstructive Pulmonary Disease: 2025 Report. GOLD; 2024.
- [13] Jacobs S S, Krishnan J A, Lederer D J, et al. Home oxygen therapy for adults with chronic lung disease. an official American thoracic society clinical practice guideline [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202(10): e121–e141.
- [14] Echevarria C, Brewin K, Horobin H, et al. Early supported discharge/hospital At home for acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease: a review and meta-analysis [J]. *COPD J Chronic Obstr Pulm Dis*, 2016, 13(4): 523–533.
- [15] Jeppesen E, Brurberg K G, Vist G E, et al. Hospital at home for acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2012, 2012(5).
- [16] Corcoran R, Moore Z, Avsar P, et al. Home-based management on hospital re-admission rates in COPD patients: a systematic review [J]. *J Adv Nurs*, 2024, 80(10): 3955–3964.
- [17] Hu C R, Liao X Q, Fang Y, et al. Clinical and cost-effectiveness of telehealth-supported home oxygen therapy on adherence, hospital readmission, and health-related quality of life in patients with chronic obstructive pulmonary disease: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *J Med Internet Res*, 2025, 27: e73010.
- [18] Spellberg B, Lynch C, Yee H F, et al. Health economic analysis of an all-virtual, at-home acute care model [J]. *JAMA Netw Open*, 2025, 8(6): e2517114.
- [19] Powell D, Burrows F, Lewis G, et al. How might Hospital at Home enable a greener and healthier future? [J]. *npj Digit Med*, 2024, 7: 252.
- [20] Gomez-Cabello C A, Borna S, Pressman S M, et al. Barriers to hospital-at-home acceptance: a systematic review of reasons for patient refusal [J]. *mHealth*, 2024, 10: 34.
- [21] Kouwenberg L H J A, Cohen E S, Hehenkamp W J K, et al. The carbon footprint of hospital services and care pathways: a state-of-the-science review [J]. *Environ Health Perspect*, 2024, 132(12): 126002.
- [22] National Health Commission of the People's Republic of China, National Administration of Traditional Chinese Medicine. Notice on issuing the Measures for the Administration of Internet Diagnosis and Treatment (Trial) and three related documents [EB/OL]. [2018-03-05].
- [23] General Office of the National Health Commission of the People's Republic of China. Notice on launching pilot programmes of Internet Plus Nursing Services [EB/OL]. [2019-06-29].
- [24] General Office of the National Health Commission of the People's Republic of China. Notice on further advancing pilot programmes of Internet Plus Nursing Services [EB/OL]. [2020-06-27].
- [25] General Office of the National Health Commission of the People's Republic of China, Office of the National Administration of Traditional Chinese Medicine. Detailed Rules for the Supervision of Internet-Based Diagnosis and Treatment (Trial) [EB/OL]. [2022-04-30].
- [26] Shanghai Municipal Health Commission. Shanghai Standards for Family Bed Services [EB/OL]. [2025-02-04].
- [27] Shanghai Municipal Health Commission. Key Points of Health Work in Shanghai in 2025 [EB/OL]. [2026-01-28]. <https://wsjkw.sh.gov.cn/zfxgknb/20260128/1536eb5d24484e6e8db6ccada1cbb919.html>
- [28] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine [J]. *Clin eHealth*, 2022, 5: 1–9.
- [29] Bai C X. Views on metaverse medicine. *China Medical Herald*. 2023;25(1):1–6.
- [30] Bai C X. My views on new quality productive forces in

- medicine. *Metaverse Medicine*. 2024;1(3):3–10.
- [31] Bai C X. My views on the development and application of medical GPT. *Metaverse Medicine*. 2025;2(1):6–14.
- [32] Bai C X. Lung Nodule Expert 3: BAIMGPT White Paper. *Metaverse Medicine*. 2025;2(2):55–64.
- [33] Pandit J A, Pawelek J B, Leff B, et al. The hospital at home in the USA: current status and future prospects [J]. *npj Digit Med*, 2024, 7: 48.
- [34] Tan S Y, Sumner J, Wang Y C, et al. A systematic review of the impacts of remote patient monitoring (RPM) interventions on safety, adherence, quality-of-life and cost-related outcomes [J]. *npj Digit Med*, 2024, 7: 192.
- [35] Gilbert S, Ricciardi F, Mehrali T, et al. Can we learn from an imagined ransomware attack on a hospital at home platform? [J]. *npj Digit Med*, 2024, 7: 65.
- [36] Brückner S, Brightwell C, Gilbert S. FDA launches health care at home initiative to drive equity in digital medical care [J]. *npj Digit Med*, 2024, 7: 204.
- [37] Pathak K, Marwaha J S, Tsai T C. The role of digital technology in surgical home hospital programs [J]. *NPJ Digit Med*, 2023, 6(1): 22.
- [38] Turner E, Johnson E, Levin K, et al. Multi-disciplinary community respiratory team management of patients with chronic respiratory illness during the COVID-19 pandemic [J]. *npj Prim Care Respir Med*, 2022, 32: 26.
- [39] Ceren Ates H, Kabakli O S, Madsen K E, et al. Self-sustained closed respiratory loop in chronic obstructive pulmonary disease in real life—a perspective [J]. *Cell Biomater*, 2025, 1(9): 100157.
- [40] Sigera C, Oliveira C B, Melman A, et al. Effectiveness of a virtual hospital model of care for patients with low back pain presenting to emergency departments (Back@Home) [J]. *npj Digit Med*, 2026, 9: 191.

引用本文

Bai C X, Song Y L, Yang D W. Hospital at home: from international evidence to a China-oriented pathway——building an integrated hospital-community-home model for respiratory home hospitalization coordinated with cloud outpatient care, with evaluation of clinical safety, environmental footprint, social benefit, and economic value [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(1): 1–10.

DOI:10.61189/799037wwkyrc

· 专家述评 ·

医学 GPT 研发的挑战与解决方案

白春学^{1,2,3,4}

1. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032
2. 上海市呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032
3. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032
4. 复旦大学附属中山医院 AI+肺癌防治中心, 上海 200032



[摘要]系统梳理医学 GPT 研发面临的关键挑战, 结合国际最新综述、评价框架、伦理治理与监管文件, 以及白春学教授《肺结节专家——BAIMGPT 白皮书》, 总结医学 GPT 从通用大模型走向临床可用系统的主要解决路径。基于近年发表于高影响力医学、数字医学与人工智能期刊的系统综述、方法学研究和真实工作流评价, 同时结合 WHO 伦理治理文件与 FDA 人工智能器械生命周期建议, 从事实可靠性、知识更新、数据治理、多模态整合、工作流适配、可解释性、偏倚公平性与责任边界等方面, 对医学 GPT 研发的核心问题进行综合分析。现有证据显示, 医学 GPT 的主要瓶颈并不只是一般意义上的“准确率不足”, 而更集中体现为幻觉与事实错误风险高、对新增医学知识吸收有限、医学数据异质性强且标签稳定性不足、单一文本模型难以支撑真实临床中的多模态决策、离线高分与真实部署效果不一致、解释链与责任链不完整, 以及偏倚、公平性和伦理治理问题突出。高质量研究进一步指出, 当前 LLM 对信息顺序和信息量敏感, 指令遵循性不足, 尚未准备好承担自主临床决策。医学 GPT 研发的核心任务, 不是单纯提升语言生成能力, 而是将大模型重构为具备知识可靠性、流程适配性、可追溯性和制度可接受性的医学智能系统。现阶段医学 GPT 更适合作为知识增强工具和流程支持工具, 而非替代临床主体的自动决策系统; 未来应坚持“辅助决策而非替代决策”的基本边界, 在强化数据治理、循证更新、真实世界验证和全生命周期治理的前提下稳步推进临床应用。

[关键词] 医学 GPT; 大语言模型; 临床决策支持; 检索增强生成; 数据治理; 人机协同; 专病智能体; BAIMGPT

[中图分类号] R-0 **[文献标志码]** A

Challenges and solutions for the development of medical GPTs

Bai Chunxue^{1,2,3,4}

1. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China
2. Shanghai Respiratory IoT Medical Engineering Technology Research Center, Shanghai 200032, China
3. Shanghai Institute of Respiratory Diseases, Shanghai 200032, China
4. AI+Lung Cancer Prevention and Treatment Center, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

[Abstract] To systematically summarize the major challenges in developing medical GPT systems and, with reference to recent international reviews, evaluation frameworks, ethical and regulatory guidance, as well as Prof Chunxue Bai's BAIMGPT White Paper, to outline practical solutions for translating large language models into clinically usable systems. Recent high-impact systematic reviews, methodological studies, real-world workflow evaluations, and governance guidance were synthesized to examine the main issues in medical GPT development, including factual reliability, knowledge updating, data governance, multimodal integration, workflow adaptation, explainability, bias, fairness, and accountability. Current evidence indicates that the bottlenecks of medical GPT go well beyond imperfect accuracy. Major challenges include hallucinations and factual inconsistency, limited ability to absorb newly updated medical knowledge, heterogeneous clinical data and unstable labels, insufficient support for multimodal decision-making, weak adaptation to real-world workflows, incomplete explainability and accountability, and concerns regarding bias, fairness, and ethics. Current LLMs remain sensitive to information order and quantity and are not ready for autonomous clinical decision-making. The mission of medical GPT development is not simply to improve language generation, but to transform large models into trustworthy medical intelligence systems with reliable knowledge, workflow compatibility, traceability, and governance readiness. At present, medical GPT should be positioned as a tool for cognitive augmentation and workflow support rather than a substitute for clinical

[收稿日期] 2026-01-05

[接受日期] 2026-03-01

[基金项目] 四大慢病重大专项(2024ZD0529300). Supported by Noncommunicable Chronic Diseases-National Science and Technology Major Project (2024ZD0529300).

[作者简介] 白春学, 博士, 主任医师、教授. E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

judgment.

[Key Words] medical GPT; large language model; clinical decision support; retrieval-augmented generation; data governance; human-AI collaboration; disease-specific agent; BAIMGPT

生成式人工智能,尤其大语言模型的快速发展,使医学信息处理正由“数字化记录”走向“智能化组织”^[1-2]。传统医疗信息系统的核心功能在于存储、检索与传输,而医学生成式预训练变换器(generative pre-trained transformer, GPT)进一步承担了解释、归纳、重写、解释与交互的任务,因而在临床文书生成、指南问答、患者教育、科研辅助和专病管理等方面展现出独特价值。近年综述^[1-2]普遍认为,大语言模型(large language model, LLM)已成为生物医学与医疗人工智能的重要前沿之一,但其真正进入临床仍面临一系列系统性障碍。

需要强调的是,医学GPT并不是通用对话模型在医疗场景中的简单复制^[1]。医学场景具有高风险、高责任、强时效与强监管等特点,任何看似轻微的事实偏差、知识过时、语义误导或流程脱节,都可能在真实诊疗中被放大为安全问题^[3-5]。当前LLM在复杂临床决策中对信息顺序和信息量敏感,且难以自然嵌入既有 workflow,因此尚不适合承担自主临床决策^[3]。现有医疗LLM研究虽增长迅速,但评估口径并不统一,且真实 workflow 证据明显不足^[5]。

在我国专病场景中,这一问题又具有更强的实践导向^[6]。白春学教授在《肺结节专家——BAIMGPT白皮书》中提出,医学GPT不应停留在一般化医学问答,而应服务于肺结节等高价专病场景中的筛查、风险分层、随访管理、患者教育和医患协同^[7]。由此可见,医学GPT的先进性最终不取决于语言是否更自然,而取决于其能否与专病知识、循证证据、数字平台和真实 workflow 形成闭环^[7]。这也正是本文讨论“挑战与解决方案”的现实出发点^[7]。

1 幻觉与事实错误:医学GPT最根本的安全挑战

医学GPT研发首先必须解决幻觉与事实错误问题。医学内容不同于一般文本生成,其输出很可能被直接用于检查安排、随访计划、风险沟通甚至治疗建议,因此“表述流畅但事实不实”的回答比“明显答错”更危险。现有高质量研究反复显示,LLM在医学任务中的错误往往披着专业表达的外衣,具有较强迷惑性。

这一风险在临床决策场景中尤其突出。临床判断建立在不完整、非线性、带时间顺序且高度情

境化的信息之上,远比医学考试题复杂^[3,5]。当前LLM在面对这类任务时,不仅结果受提示变化影响显著,而且在长上下文中容易出现重点漂移与指令偏离,因此尚不足以承担自主临床决策^[3]。这意味着,医学GPT的危险不只是“不会”,而是“会以足够像真的方式说错”。

从工程上说,这一问题决定了医学GPT不能被设计成无限制的自由生成系统,而必须被设计成受证据、规则和场景边界共同约束的输出系统。换言之,医学GPT的目标不是“像专家一样表达”,而是“在证据约束下稳定表达”。这一点构成后续检索增强生成(retrieval-augmented generation, RAG)、知识中台和规则护栏的理论基础^[8]。

2 知识更新与版本管理:医学GPT不能停留在静态记忆

医学知识更新快,直接决定了医学GPT不能主要依赖预训练参数中的静态记忆。指南每年可能修订,药品适应证可能变化,支付规则和院内路径也在持续调整^[8]。目前并没有证据表明“通用型临床LLM”能够稳定覆盖大范围临床任务,其部署仍然依赖具体任务与具体知识供给方式。

知识更新问题在医学中并不只是“新旧差异”,更是“版本与适用性问题”^[8]。同一临床问题往往同时受到国际指南、国内共识、专科推荐、本院制度和可及性条件的共同影响。如果模型不能区分“何时、何地、针对何人群、依据哪一版证据”来作答,就容易出现表面正确、实际不可执行的回答。

因此,医学GPT研发必须引入动态知识中台。指南、药典、专病路径和院内制度应进行版本化管理,并通过检索增强生成在输出前被动态调用。只有这样,模型输出才不仅“像正确答案”,而且“是当前场景中的正确答案”。这一步看似是技术优化,实则是临床可用性的基本门槛。

3 数据异质与标签不稳:模型上限取决于数据治理质量

医疗数据看似丰富,真正可用于模型训练与部署的数据却常常充满噪声^[9]。病历自由文本比例高,缩写体系杂糅,历史复制粘贴常见;影像、病理、检验和随访信息来自不同系统,字段不统一,时间

轴不完整^[10]。当前医疗 LLM 研究在评估数据类型、任务设置、评价维度和应用场景方面缺乏统一性,这从侧面反映出基础数据质量与任务定义仍然不稳^[5]。

更重要的是,医学任务的“标签”本身并不总是稳定^[5,9]。许多临床问题没有唯一答案,而取决于疾病阶段、风险等级、资源条件和专家判断^[9-10]。例如“是否进一步检查”“何时复查”“是否转诊”,都具有明显情境依赖。这使得医学 GPT 的研发不仅是模型学习问题,也是任务建模问题。若任务定义过粗、标签构建过度简化,模型即便取得较好离线表现,也可能在真实场景中迅速失效。

因此,数据治理不能被视为训练前的辅助步骤,而应被视为整个医学 GPT 工程的底层基础设施。术语标准化、模板统一、结构化抽取、时间轴重建、脱敏处理、专家标注和金标准验证集建设,都会直接决定模型输入边界与输出上限。没有高质量数据治理,所谓“高性能医学 GPT”往往只是演示效果,而不是临床能力。

4 多模态整合不足:文本优势尚未自动转化为临床智能

当前多数医学 GPT 的优势主要体现在文本任务上,如摘要、改写、问答和说明生成。但临床决策从来不是单一文本任务,而是多模态、多时序、多角色共同作用的结果^[10-11]。真实判断常常依赖影像、病理、检验、生命体征、既往治疗反应和患者报告结局的综合分析^[10-11]。近年综述^[1,10-11]普遍指出,医疗 LLM 的下一阶段关键并不只是更好的文本生成,而是与工具调用、检索系统及多模态模型的协同。

这一不足在专病场景中尤为突出。以肺结节管理为例,真正有临床价值的系统,不能只会解释“报告写了什么”,而应能结合结节影像学特征、既往 CT 变化、吸烟史、家族史与随访时间轴,生成符合风险分层逻辑的建议^[7]。BAIMGPT 之所以具有代表性,正是因为它强调肺结节筛查—评估—随访—教育的全流程整合,而不是单轮问答^[7]。

因此,医学 GPT 若想从文本能力跨越到临床能力,必须从“纯语言模型”升级为“多模态专病智能体”。文本模型仍然重要,但更重要的是它能否调度其他模块,并把分散信息整合为结构化、可复核的临床支持输出。

5 workflow 适配问题:离线成绩高,不代表真正能落地

医疗 LLM 研究中最常见的误区之一,是将题库

成绩、基准表现或回顾性模拟结果视为真实临床可用性的充分证据^[3-5]。事实上,医学 GPT 是否真正有价值,取决于它能否在门诊、病房、会诊、MDT 和随访等工作流中减少重复劳动、缩短信息整理时间并降低遗漏^[4-5,10]。当前 LLM 不仅容易受信息呈现顺序影响,而且难以自然适配既有工作流,这意味着离线“答得好”与真实“用得上”之间存在明显鸿沟^[3]。

目前并无证据支持“一个通用临床 LLM”可以跨场景稳定胜任广泛任务,因此更现实的策略是按具体任务、具体风险等级和具体场景部署模型^[10]。也就是说,医学 GPT 研发的对象,不应只是模型,而应是“模型+界面+输入方式+复核路径+日志机制”的完整 workflow 单元^[4,10]。

由此可见,医学 GPT 要想真正落地,关键不只是更高的能力分数,而是更低的部署摩擦^[3-5,10]。它必须接得进现有系统、嵌得进现有流程、经得起临床复核,并最终为医生节省时间而不是增加新的操作负担^[4,10]。

6 可解释性与责任边界:医学 GPT 必须被审计,而不只是被赞叹

临床信任并不来自模型“写得像医生”,而来自模型的输出“有据可查、可被复核、可被问责”^[5,12-14]。医生真正关心的问题包括:模型依据了哪些数据?调用了哪一版指南?是否存在不确定性?最终由谁负责^[12-14]?当前医疗 LLM 研究仍缺乏足够统一和稳健的评价框架,这意味着很多“高表现”结果还不足以直接转化为可审计的临床能力^[5]。

与此同时,WHO 关于人工智能健康治理的文件和 FDA 关于 AI 医疗器械软件功能生命周期管理的建议,都强调透明性、问责性、持续监测和风险管理的重要性^[13-14]。对医学 GPT 而言,这些原则同样适用:高风险输出必须可追踪,知识来源必须明确,异常输出必须可回溯,人工监督必须被记录^[13-14]。

因此,医学 GPT 真正需要的不是表面“会解释”,而是深层“能审计”^[12-14]。一个临床可接受的系统,应能清楚展示证据来源、关键变量、规则校验结果以及人工确认节点。只有当证据链和责任链同时存在,医学 GPT 才可能逐步获得真实世界的临床信任。

7 偏倚、公平性与本土化:不能只追求平均表现

医学 GPT 的另一个深层问题,是偏倚、公平性和本土适配^[5,13,15-16]。现有研究往往过度聚焦总体

性能,而对不同亚群、不同语言、不同医疗资源水平下的表现差异关注不足^[5]。这意味着,一个“平均准确率较高”的模型,仍可能在某些特定人群或特定场景中持续输出不利结果。

对中国医学场景而言,本土化校准尤其关键^[7]。国际高等级证据固然重要,但若模型忽视本土指南、基层医疗条件、患者沟通习惯和分级诊疗结构,就可能出现“证据上先进、执行上脱节”的情况^[16]。BAIMGPT所强调的专病路径与本土流程整合,正提示医学GPT必须在国际证据与本土实践之间建立桥梁,而不能简单移植国外模型逻辑^[7]。

因此,医学GPT的评价不应止于总体准确率,而应延伸到亚组稳定性、公平性、可及性、语言适配性和本土适应性^[5,15-16]。公平性不是锦上添花的指标,而应成为研发起点中的基本原则^[13,15-16]。

8 解决路径之一:知识中台+RAG+规则引擎

综合现有文献^[1,6,8,10],最可行的方向并不是继续依赖“更大的单体模型”,而是搭建知识驱动型系统架构。基础模型负责理解与生成,知识中台负责存放并更新指南、药典、共识和院内制度,RAG负责在回答前检索当前可用证据,规则引擎负责对剂量、禁忌证、危急值和高风险建议进行边界约束。临床部署应围绕任务需求选择LLM,而不是预设存在一个全能模型^[10]。

这种架构的价值在于,它把医学GPT从“参数驱动的回答系统”转化为“知识驱动的临床支持系统”^[1,6,10]。对医疗来说,真正重要的并不是模型记住了多少知识,而是它在给定场景中能否调用正确、最新、适用的知识,并把这些知识转换为可复核的输出^[8,10,13-14]。

9 解决路径之二:人机协同与风险分级部署

现阶段,医学GPT更合理的定位是认知增强工具和流程支持工具,而不是替代医生的自动决策主体^[3-5,10]。当前LLM尚未准备好自主临床决策,这一结论已得到高质量研究的明确支持^[3]。因此,部署策略必须围绕风险分级展开^[14]。

低风险任务如病历摘要、出院小结初稿、患者教育材料和文献综述初稿,可采用“模型生成—人工快速确认”^[4,10]。中风险任务如分诊建议、编码辅助、随访提醒,可采用“模型提示—规则校验—人工签发”^[10]。高风险任务如诊断、治疗选择和危急值处置,则必须坚持“模型辅助—专家裁决”^[3,13-14]。这一模式并非保守,而是当前证据条件下最稳妥也最

现实的实施路径。

10 解决路径之三:专病化、多模态与全生命周期治理

从未来趋势看,医学GPT最有前景的方向,不是做一个“什么都能聊一点”的通用医学机器人,而是围绕肺结节、慢阻肺、哮喘、睡眠呼吸障碍、肿瘤MDT等高价值场景,建设专病化、多模态、流程化的智能体^[7,10-11]。按任务和场景部署,而非追求无边界泛化,更符合当前证据与临床现实^[10]。

同时,医学GPT研发不应在“模型上线”那一刻结束^[5,10]。上线后的知识更新、性能漂移、异常监测、采纳率变化和安全事件回顾,都属于全生命周期治理的一部分^[13-14]。没有标准化的持续评估,任何早期高表现都不足以保证长期安全有效^[5]。也正因此,未来真正领先的医学GPT,不会只是“更会写”,而会是“更能被管理、更能被复核、更能持续进化”^[10,13-14]。

综上所述,医学GPT研发已经从“证明大模型能够进入医学”转向“证明大模型能够安全、稳定、可监管地服务医学”的阶段。现有高质量研究一致表明,其主要瓶颈并不只是一般性的准确率问题,而是幻觉、知识时效性不足、数据异质性高、多模态整合困难、工作流适配不足、可解释性不充分以及偏倚与治理风险等系统性难题。尤其需要强调的是,当前LLM仍不适合自主临床决策^[3]。

因此,医学GPT的未来不应继续沿着“更大的模型、更高的考题得分”这一单线逻辑推进,而应转向以知识中台、RAG、规则引擎、人机协同和全生命周期治理为核心的医学智能系统。白春学教授提出的BAIMGPT路径也进一步说明,在我国专病场景中,专病化、流程化和本土化,是医学GPT走向高质量落地方案的重要方向^[7]。总体而言,现阶段医学GPT更适合作为辅助决策与流程支持工具,而非替代临床主体的自动决策系统^[3-5,10]。未来只有在数据治理、循证更新、真实世界验证与制度治理同步强化的前提下,医学GPT才可能真正从原型走向平台、从概念走向临床现实^[13-14]。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 白春学:选题、撰写、定稿。

参考文献

- [1] Zhou J X, Li H Y, Chen S Y, et al. Large language models in

- biomedicine and healthcare[J]. npj Artif Intell, 2025, 1: 44.
- [2] Busch F, Hoffmann L, Rueger C, et al. Current applications and challenges in large language models for patient care: a systematic review[J]. Commun Med, 2025, 5(1): 26.
- [3] Hager P, Jungmann F, Holland R, et al. Evaluation and mitigation of the limitations of large language models in clinical decision-making[J]. Nat Med, 2024, 30(9): 2613–2622.
- [4] Artsi Y, Sorin V, Glicksberg B S, et al. Large language models in real-world clinical workflows: a systematic review of applications and implementation[J]. Front Digit Health, 2025, 7: 1659134.
- [5] Bedi S, Liu Y T, Orr-Ewing L, et al. Testing and evaluation of health care applications of large language models: a systematic review[J]. JAMA, 2025, 333(4): 319–328.
- [6] Omiye J A, Gui H W, Rezaei S J, et al. Large language models in medicine: the potentials and pitfalls: a narrative review[J]. Ann Intern Med, 2024, 177(2): 210–220.
- [7] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT 白皮书[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(2): 55–64.
- [8] Mahla N, Jadhav K S, Ramakrishnan G. Exploring gradient subspaces: addressing and overcoming LoRA’s limitations in federated fine-tuning of large language models [J]. arXiv, 2024: 2410.23111.
- [9] Tam T Y C, Sivarajkumar S, Kapoor S, et al. A framework for human evaluation of large language models in healthcare derived from literature review[J]. NPJ Digit Med, 2024, 7(1): 258.
- [10] Li H Y, Fu J F, Python A. Implementing large language models in health care: clinician-focused review with interactive guideline[J]. J Med Internet Res, 2025, 27: e71916.
- [11] Wang X F, Xiong Z X, Zou K, et al. Reasoning-driven large language models in medicine: opportunities, challenges, and the road ahead[J]. Lancet Digit Health, 2026, 8(1): 100931.
- [12] Bedi S, Jiang Y X, Chung P, et al. Fidelity of medical reasoning in large language models [J]. JAMA Netw Open, 2025, 8(8): e2526021.
- [13] World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO Guidance [M]. Geneva: WHO, 2021.
- [14] U. S. Food and Drug Administration. Artificial intelligence-enabled device software functions: lifecycle management and marketing submission recommendations [EB/OL]. [2025-01-07] (2026-01-30). <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/artificial-intelligence-enabled-device-software-functions-lifecycle-management-and-marketing>
- [15] Omiye J A, Lester J C, Spichak S, et al. Large language models propagate race-based medicine [J]. NPJ Digit Med, 2023, 6(1): 195.
- [16] Haltaufderheide J, Ranisch R. The ethics of ChatGPT in medicine and healthcare: a systematic review on Large Language Models (LLMs) [J]. NPJ Digit Med, 2024, 7(1): 183.

引用本文

白春学. 医学 GPT 研发的挑战与解决方案[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(1): 11–15.

Bai C X. Challenges and solutions for the development of medical GPTs[J]. Metaverse Med, 2026, 3(1): 11–15.

DOI:10.61189/627405ptxbio

· 专家述评 ·

液态生命与数字围栏:元宇宙健康数据的治理困境与范式重构

高承实^{1*}, 程元骏²

1. 安徽栈谷科技有限公司, 池州 247100

2. 池州市人民医院胸心外科, 池州 247000

[摘要] 元宇宙与数字医疗的深度融合正在改变健康数据的基本形态。传统电子健康记录作为离散化、事件驱动的“固态记录”, 正演变为持续生成、跨平台流动、由算法不断重构的“数字生命流”。这一本体论变革对既有数据治理框架构成根本性挑战: 一方面, 数据的高度流动性使得传统基于明确边界的隐私保护机制失效; 另一方面, 大型平台通过技术标准、协议与硬件垄断对流动数据进行“再疆域化”, 形成了从软件层到硬件层的新型权力结构。本文以“液化化”与“再疆域化”为核心分析框架, 系统考察元宇宙健康数据治理的结构性困境。研究提出3个核心问题: (1) 数字生命流如何改变数据治理的基本前提? (2) 液化化与再疆域化的辩证关系如何塑造数据权力结构? (3) 面对这一双重运动, 新的治理范式应如何构建? 通过从权力分配、经济公平、价值抉择、责任归属、数字主权5个维度批判性分析技术方案(联邦学习、零知识证明、可信执行环境)、法律监管模式(GDPR、HIPAA)与市场自我调节机制的局限性, 本文揭示单一治理模式难以应对高度动态的数据生态。在此基础上, 本文提出一种关系型数据治理范式, 并构建由微观技术架构(默认隐私保护、互操作标准、可解释算法)、中观制度创新(数据信托、数字公地、参与式审计)与宏观法律重塑(数字人格权、数字守门人监管、全球最低标准)构成的多层次治理框架。该框架以“数据关系权”取代“数据所有权”, 以“集体数字福祉”补充“个人隐私保护”, 在核心理念层面完成双重升维, 并在制度设计中嵌入数据信托的“四要素”机制(受托人构成、决策机制、收益分配、监督机制)和数字公地的 Ostrom 八项原则等具体操作化安排。研究引入 Apple Health 生态、VR 心理治疗平台、欧盟健康数据空间等案例作为经验参照, 为元宇宙健康数据治理提供理论整合与政策参考。

[关键词] 元宇宙; 健康数据治理; 数字生命流; 液化化; 再疆域化; 数据信托; 数字人格权

[中图分类号] R-03 **[文献标志码]** A

Liquid life and digital fence: governance dilemma and paradigm reconstruction of metaverse health data

Gao Chengshi^{1*}, Cheng Yuanjun²

1. Anhui Zhangu Technology Co., Ltd., Chizhou 247100, Anhui, China

2. Department of Thoracic and Cardiac Surgery, Chizhou People's Hospital, Chizhou 247000, Anhui, China

[Abstract] The deep integration of the metaverse and digital healthcare is fundamentally reshaping the nature of health data. Traditional electronic health records (EHRs), characterized as discrete, event-driven "solid records," are evolving into "digital life streams"—continuously generated, cross-platform flowing, and algorithmically reconfigured data processes. This ontological shift poses profound challenges to existing data governance frameworks. On one hand, the heightened fluidity of data renders traditional privacy mechanisms, which rely on clear data boundaries, increasingly ineffective. On the other hand, dominant platforms are "reterritorializing" this fluid data through technical standards, protocols, and hardware monopolies, thereby constructing novel power structures that extend from the software layer to the hardware layer. Employing "liquefaction" and "reterritorialization" as core analytical lenses, this paper systematically investigates the structural dilemmas of health data governance in the metaverse. It poses three central research questions: (1) How does the emergence of "digital life streams" alter the foundational premises of data governance; (2) How does the dialectic between liquefaction and reterritorialization shape the power dynamics of health data; (3) In the face of this dual movement, what form should a new governance paradigm take through a critical analysis of technological solutions (federated learning, zero-knowledge proofs, trusted execution environments), legal-regulatory models (GDPR, HIPAA), and market-based mechanisms—examined across five dimensions: power distribution, economic equity, value choices, accountability, and digital sovereignty—this paper reveals the inherent limitations of single-pronged governance approaches in addressing a highly dynamic data

[收稿日期] 2026-01-30

[接受日期] 2026-02-28

[作者简介] 高承实, 博士, 副教授、董事长。

* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 056-62028361, E-mail: 13838001036@163.com

ecosystem. Building on this critique, the paper proposes a relational data governance paradigm and constructs a multi-level framework integrating micro-level technological architecture (privacy by default, interoperability standards, explainable algorithms), meso-level institutional innovations (data trusts, digital commons, participatory auditing), and macro-level legal reforms (digital personality rights, digital gatekeeper regulation, global minimum standards). This framework moves from "data ownership" to "data relational rights" and supplements "individual privacy protection" with "collective digital well-being," achieving a dual conceptual elevation. It further embeds operational mechanisms such as the "four elements" of data trusts (trustee composition, decision-making, benefit distribution, supervision) and Ostrom's eight principles for governing digital commons. Drawing on case studies including the Apple Health ecosystem, VR psychotherapy platforms, and the European Health Data Space (EHDS), the paper offers both theoretical integration and policy references for the governance of health data in the metaverse.

[Key Words] metaverse; health data governance; digital life stream; liquefaction; reterritorialization; data trusts; digital personality rights

随着元宇宙与医疗健康的深度融合,一个根本性的问题正浮出水面:当患者的生命体征、行为轨迹乃至情绪反应被实时、持续地捕获并汇入虚拟空间,传统意义上边界清晰、用途明确的“医疗记录”,正在演变为一种性质全新的数据实体。这一演变所引发的,远不止于技术应用层面的创新,更是一场关于生命数据控制权的深层治理危机。

1 数字生命流

1.1 问题提出 医疗健康数据的形态,正经历着从静态档案到动态流变的根本性跃迁。传统电子健康记录(EHR)或病历,本质上是结构化、离散化的历史快照,其生成与记录依赖于明确的临床交互节点(如就诊、检验)。然而,元宇宙与医疗的深度融合,正在催生一种连续、多模态、高维的情景化数据实体。

在元宇宙医疗场景中,数据采集将突破传统医疗机构的物理与时间边界。通过VR/AR设备、可穿戴传感器及环境感知技术,患者的生理指标、行为数据、情绪反应、乃至与虚拟环境的交互日志,都将被实时、持续地捕获与融合。这些数据不仅体量巨大,更关键的是其高度情景化,数据的医疗意义与生成时的虚拟场景深度绑定,使得脱离情境的数据解读将丧失其临床价值。数据的价值,日益依赖于其在流动与聚合中涌现的新知识。

这种从“离散记录”到“连续生命流”的本质变革,对建立在工业时代与早期信息化基础上的传统健康数据治理范式构成了严峻挑战。旧有范式依赖于清晰的边界、明确的权属关系、基于特定目的有限收集,以及以“知情同意”为核心的事前授权模型。然而,元宇宙中持续生成的数据流,使得这些前提假设纷纷失效。数据如同“液态”般无孔不入地流动、聚合与重组,其最终用途可能远超收集时的预设,传统的隐私边界在此过程中被迅速

侵蚀。

与此同时,掌控数据聚合平台的科技巨头,正试图对这些流动的数据实施“再疆域化”。它们通过技术标准、服务协议和算力优势建立新的数字支配领地,不仅从软件层抽取“数字地租”,更将控制触角延伸至硬件层,通过垄断可信执行环境等核心芯片技术,形成更深层的依附关系。平台资本对健康数据的控制正在向多维度的权力集中演变,风险在健康这一最敏感的领域日益隐现。

因此,核心问题在于,面对性质已经发生根本性变革的元宇宙健康数据,基于旧有数据形态构建的治理框架是否已然滞后乃至失效?我们亟需何种跨学科的新范式,来应对这场由数据“液态化”流动与“再疆域化”垄断所共同引发的治理范式危机?要回答这一问题,首先必须深入理解这种新型数据实体,即“数字生命流”的本体论特征。

1.2 理解“数字生命流” 传统电子健康记录本质上是“临床事件的快照”,它记录的是患者在特定时间点、特定医疗场景下产生的离散化、结构化信息。这种数据形态具有明确的边界、预设的采集目的,以及相对静态的存储方式。与之相对,元宇宙医疗场景中涌现的“数字生命流”,是一种性质截然不同的数据实体,其核心特征可归纳为以下4个维度。

一是连续性。数据生成从“点状采集”转变为“无中断流淌”。通过可穿戴设备及VR/AR交互,患者的生理指标、行为轨迹、情绪反应被实时、持续地捕获,形成持续更新的数据序列,而非孤立的数据点。

二是情境依赖性。数据的医疗意义高度内嵌于生成时的虚拟场景之中。一段关于疼痛的行为数据,必须与其所处的虚拟任务(如康复训练中的特定动作)、社交互动(如与虚拟医护的对话)、乃至环境参数(如虚拟空间的沉浸强度)关联解读,才能生成完整的临床意义。脱离情境的数据,其价值将

大幅衰减甚至失真。

三是生成性。数据在流动中不断增值与创生新意。单一维度的数据流与其他数据流聚合后,能够通过算法挖掘出超越原始采集意图的新洞察。这意味着数据的价值不是预存的,而是在动态重组中涌现的。

四是多模态融合性。数据来源突破了单一文本或数值的局限,呈现出生物信号、行为日志、感官反馈、语音情感、环境上下文等多种模态的深度融合。这种融合使得元宇宙中的“患者”形象从抽象的医疗记录编号,还原为一个完整的、具身化的数字人。

以 Oxford VR 开发的 VR 心理治疗平台为例,该平台通过虚拟场景暴露疗法治疗社交焦虑症。患者在虚拟环境中与虚拟角色互动时,系统实时记录其眼球运动、头部转向、语音反应、心率变异性等多模态数据。这些数据并非静态记录,而是随着治疗进程持续生成,并在不同治疗阶段被重新分析。例如,早期暴露阶段的行为数据可能与后期康复阶段的数据对比,用于评估疗效。这一案例生动体现了“数字生命流”的4个特征,并将成为后文分析技术治理困境(3.2节)和制度创新(5.2节)的重要经验参照。

与既有概念相比,“数字生命流”具有独特的理论内涵。如果说“量化自我”强调个体主动记录自身行为^[1],而“数据化身体”聚焦于身体的数据表征^[2],那么“数字生命流”则更侧重于技术系统对个体生命过程的持续捕捉与算法重构,强调数据本身的流动性、生成性与情境嵌入性。

简言之,如果说传统 EHR 是医疗体系为患者绘制的“静态地图”,那么数字生命流则是患者在数字世界中真实经历、持续生成的“动态航行日志”。这一本体论层面的跃迁,构成了现有治理范式失效的根本原因,也为我们理解后续的“液化化”与“再疆域化”双重运动提供了关键的认知前提。

然而,现有研究是否充分把握了这一新型数据形态所带来的治理挑战?下文将系统梳理相关文献,揭示其局限与缺口。

1.3 文献综述与批评 当前,学术界与政策界对元宇宙健康数据治理的关注日益增加,现有研究主要围绕三个层面展开,但均存在显著的视角局限或整合缺口。

技术解决方案与框架设计层面的研究,聚焦于应用隐私增强计算(如联邦学习、安全多方计算、可信执行环境)、区块链、去中心化架构等技术,旨在

从工程层面解决数据安全、隐私保护与可信共享问题。部分研究已提出针对医疗元宇宙空间数据治理的初步框架,如 Das 等^[3]强调患者控制与安全协议;部分研究探讨区块链、NFT 用于健康信息交换的潜力。但这个层面的讨论常陷入技术决定论的乐观想象,默认技术方案能自动解决社会与伦理问题,而忽视了技术的复杂性。零知识证明的可信初始化由少数精英掌控,可信执行环境导致硬件层垄断,可能加剧而非缓解权力集中。

法律与伦理原则的探讨主要是识别并警示元宇宙医疗带来的新型伦理风险与法律挑战,如沉浸式环境中的知情同意、数字模拟体的道德地位、跨境医疗的法律管辖权等,强调在 AI 时代沿用与更新隐私保护原则(如目的限定、数据最小化、透明度)的重要性。如 Kostick-Quenet 和 Rahimzadeh 系统阐述了元宇宙健康数据治理的伦理风险^[4];何之行分析了 GDPR 原则在 AI 医疗与防疫中的应用与张力^[5]。但这类讨论多为原则性倡导或风险描述,缺乏将这些原则转化为可操作治理机制的深入分析,尤其未能回应“合规成本高企反而巩固大平台垄断”的悖论。

数据政治经济学批判则借鉴相关理论,批判性地分析全球数字经济中的不平等结构。Zuboff 提出的“监控资本主义”理论揭示了行为数据如何成为资本主义积累的新资源,强调企业通过持续收集行为数据建立新的市场控制机制^[6]。Srniczek 的“平台资本主义”理论指出,平台企业通过控制数据接口、算法系统与云计算资源,在数据生产与利用过程中占据核心位置^[7]。Cohen 进一步分析了法律制度如何被动员起来服务于信息资本主义的扩张,揭示了法律与技术平台的共构关系^[8]。另有研究借鉴“数据殖民主义”框架^[9],指出全球南方国家的健康数据被跨国科技公司大量收割并输往全球北方,用于创造价值,而数据来源国与个体却未能公平受益,如 Sekalala 等^[10]的研究。该视角提供了重要的批判性宏观视野,但较少与元宇宙医疗的具体技术情境(如空间计算、数字孪生、硬件层垄断)深度结合,也未能充分提出超越批判的、建设性的替代治理方案。

上述3条研究路径基本处于平行发展状态,存在显著的“分野”现象。技术研究者缺乏足够的社会理论与伦理考量;伦理与法律学者对技术实现逻辑的理解可能流于表面;而政治经济学批判则常与具体治理设计脱节。特别地,现有研究未能系统性地提出一个能够同时把握元宇宙健康数据“双重运

动”,即无界液化流动与平台主导的再疆域化的分析框架,也未能在在此基础上整合技术可能性、法律伦理原则与社会经济正义,构想出切实可行的下一代治理范式。本研究旨在弥补这一核心缺口。

1.4 研究思路与方法 为回应上述研究缺口,本文拟采用“科学、技术与社会”(STS)研究与政治经济学批判相交叉的分析框架。这一框架拒绝将技术视为中立工具,也反对将社会因素视为单纯的外部背景,而是将元宇宙健康数据治理视为一个技术系统、社会制度、经济权力与法律规范共同建构、相互博弈的动态场域。

本研究将以“液化化”与“再疆域化”作为核心分析透镜。“液化化”概念汲取自齐格蒙特·鲍曼的现代性理论^[11],用以描述数据脱离固定容器、持续流动、不可预测且易于重组的状态,它解构了传统的空间、隐私与控制边界。“再疆域化”则源于德勒兹与瓜塔里的政治地理学概念^[12],后被批判数据研究借用^[9],用以分析权力实体(如平台企业、国家)如何通过基础设施、算法、协议与法律手段,试图对流动的数据施加控制、划定归属并从中提取价值,从而形成新的数字领土。这两者并非先后关系,而是同一进程的一体两面。数据的液化化是资本与权力进行更高阶积累(再疆域化)的前提,而再疆域化的努力又不断塑造着数据流动的方向与规则。

在方法上,本文将进行批判性的理论整合与框架构建。首先,系统梳理并对话来自计算机科学、法学、伦理学、社会学与政治经济学的相关文献;其次,运用“双重运动”透镜,对现有的技术方案(如联邦学习、区块链、零知识证明、可信执行环境)与治理模式(如GDPR式监管、市场自我调节)进行深入的内在批判,从软件层的密码学协议到硬件层的芯片垄断,揭示其在应对元宇宙健康数据特质时的内在矛盾与局限;最后,在批判的基础上,尝试构建一个多层级的治理新范式。为增强论证的经验厚度,本文将在技术批判和治理建构部分穿插引入Apple Health生态、VR心理治疗平台、欧盟健康数据空间等案例。

基于上述分析,本文提出以下三个核心研究问题。(1)本体论问题:在元宇宙医疗环境中,健康数据如何从传统的结构化记录转变为持续生成的“数字生命流”?这一转变对数据的基本属性(边界、用途、控制方式)带来了哪些根本性改变?(2)政治经济学问题:数据的“液化化”与平台的“再疆域化”如何构成一对辩证运动?二者的张力如何塑造元宇宙健康数据的权力结构与治理困境?(3)规范性问

题:面对这一双重运动,现有的技术治理、法律监管与市场调节模式为何失效?一种能够在技术架构、制度设计、法律保障3个层面协同回应液化化与再疆域化张力的治理新范式应如何构建?

2 液化化与再疆域化的双重奏

元宇宙中健康数据的治理困境,其根源在于数据本身的性质与运动逻辑发生了根本性变革。传统基于静态、离散数据的治理范式,在面对一种持续生成、无界流动且被强力聚合的新型“数字生命流”时已然失效。本章旨在构建一个整合性的理论分析框架,以揭示这一困境的本质。引入“液化化”与“再疆域化”这一对辩证概念作为核心透镜,前者描绘了数据挣脱物理与制度束缚后呈现的流体状态,后者则揭示了资本与权力对这种流动性进行捕获、固化和剥削的新型统治形式。二者共同构成了元宇宙健康数据政治经济学的双重奏。

2.1 理论谱系:从数据化社会到平台权力批判 在展开“液化化”与“再疆域化”这一对核心分析透镜之前,有必要将本文的理论框架置于更广泛的学术脉络之中。近年来,社会科学领域围绕数字技术与数据治理的讨论,逐渐形成了3条相互关联的研究传统:数据化社会研究、平台治理研究以及数据政治经济学批判^[13-15]。本文的理论框架正是在这3条路径的交汇处发展而来。

(1)数据化社会研究为理解健康数据的持续生成提供了基础。“数据化”(datafication)概念强调,越来越多的人类活动正在被系统性地转化为可计算的数据形式。Van Dijck等学者指出,在数字平台环境中,社会行为被持续记录并转化为可分析的数据资源,从而形成新的社会组织方式^[16]。在健康领域,这一趋势表现为“量化自我”运动、可穿戴设备的普及以及远程医疗系统的发展^[1]。个体的身体状态、行为模式与生活环境逐渐被持续记录并整合为数字健康数据。这一过程不仅改变了医学研究与医疗服务的方式,也使健康数据从传统的临床记录转变为一种持续生成的数据资源。

(2)平台治理研究揭示了数字基础设施在组织数据流动中的关键作用。Srnicsek提出的“平台资本主义”理论指出,平台企业通过控制数据接口、算法系统与云计算资源,在数据生产与利用过程中占据核心位置^[7]。平台不仅提供技术服务,也通过规则制定和数据控制塑造数字经济的运行方式。在健康数据领域,这种平台化趋势同样日益明显。从数字健康应用到虚拟医疗系统,越来越多的医疗服务

依赖平台基础设施运行,这使得平台企业在健康数据流动中拥有重要影响力。

(3)数据政治经济学批判进一步揭示了数据流动背后的权力结构。Zuboff提出的“监控资本主义”理论揭示了行为数据如何成为资本主义积累的新资源,强调企业通过持续收集行为数据建立新的市场控制机制^[6]。而“数据殖民主义”理论则指出,当代数字经济正在形成一种新的资源提取模式,即通过技术系统大规模收集并分析用户数据,从而创造经济价值,而数据来源的个体与社群则难以参与价值分配^[9]。

这3条研究传统共同表明,数字数据不仅是技术资源,也是重要的社会资源,其生产、流动与利用都深刻嵌入到社会结构之中。然而,现有研究在解释数据流动性与数据控制的关系时仍存在一定局限,数据化研究强调数据生成的持续性,平台治理研究关注平台基础设施的控制能力,而数据政治经济学则聚焦权力与价值分配问题,三者的理论整合仍然有限。

正是在这一背景下,本文提出“数据液化化一再疆域化”分析框架。其中,“液化化”概念汲取自鲍曼的“液态现代性”理论^[11],用以描述数据在数字环境中呈现出的高度流动性与可重组性;“再疆域化”则借用德勒兹与瓜塔里的概念^[12],用以分析平台系统如何通过技术基础设施重新建立数据控制边界。通过整合这两个概念,本文试图在数据技术形态与数据权力结构之间建立更加系统的理论联系,为理解元宇宙健康数据治理问题提供新的分析工具。

2.2 从鲍曼“液态现代性”的视角看数据的液化化波兰社会学家齐格蒙特·鲍曼提出的“液态现代性”理论,为理解元宇宙健康数据的根本特性提供了深邃的哲学社会学基础。鲍曼指出,现代性正经历从“固态”向“液态”的过渡^[11]。固态现代性的特征是坚固、持久的结构与关系(如稳定的职业、地域社群、终身制度),而液态现代性则意味着一切社会形态、关系、制度都在以空前的速度流动、蒸发与重塑。流动性、短暂性和不确定性成为新的生存法则。数字技术的崛起,正是推动并加速这一液化化进程的核心引擎。

在元宇宙医学的语境下,健康数据的“液化化”表现为三个相互关联的维度。

首先,数据的无界复制与聚合重组。传统医疗数据(如病历、化验单)如同被锁在档案柜中的“固体”文件,其复制、流动受严格管控。而元宇宙中的

健康数据,包括实时生理信号、行为轨迹、情感交互、虚拟环境反馈,自生成起便是持续的数据流。它们可以近乎零成本地被无限复制,并在不同平台、算法与数据库间瞬间聚合、交叉比对,生成远超单一数据源的“数字孪生”或用户画像。这种流动性是数据价值倍增的源泉,但也意味着其一旦脱离采集瞬间的原始情境,便如同汇入海洋的水滴,流向与用途均难以追踪与控制。

其次,数据目的漂移与语境抽离。液态数据的价值在于其可塑性。一段为康复训练而采集的关节运动数据,可能被用于评估患者的保险风险;一组为心理健康监测而记录的情绪波动数据,可能被用于个性化广告推荐。鲍曼所警示的液态现代性下关系的短暂与工具的即弃性,在数据领域演变为使用目的的随意转换与承诺的脆弱性。数据的原始医疗语境被抽离,沦为一种可供任意解读和利用的原始素材,这使得传统的“基于特定目的”的知情同意原则在数据流的持续重组面前彻底崩塌。这一现象与Nissenbaum所论述的“语境完整性”被破坏^[17]形成呼应,当数据脱离其原始生成语境时,原本的规范与预期便被瓦解。

最终,对个体权利基石的侵蚀。液化化最深刻的冲击在于瓦解了个人自主与知情同意,这是现代数据治理的伦理与法律基石。当数据如液体般持续渗出、四处流淌时,那种在特定时间点、针对特定数据集、给予明确授权的“固态”同意模型变得毫无意义。个体陷入一种“同意的悖论”,要么拒绝一切数据化从而被排除在元宇宙医疗服务之外,要么在完全无法预见未来用途的情况下,交出自身生命信息的永久流动权。这导致个体从数据权利的主体,异化为数据流的源头,也就是被监控和提取价值的对象^[6]。正如研究所指,数字时代的监控通过数据收集与核对,在习惯于中介化生活的人群中构建了一种新的、稳固的权力形式。个体的生物特征与行为,在液态流动中悄无声息地巩固了外部的控制权力。

2.3 从“数据殖民主义”与平台权力的视角看数据的再疆域化 数据的液化化并非指向一个自由散漫的无政府状态,恰恰相反,流动是为了更好地被捕获与统治。在液态数据的汪洋之上,数字平台资本正凭借其技术优势与市场权力,开展一场轰轰烈烈的“数字圈地运动”,此即数据的“再疆域化”过程。这一过程可借助“数据殖民主义”与“技术封建主义”等批判理论进行透视,二者分别揭示了再疆域化的不同面向:“数据殖民主义”侧重于全球南北之间的

资源提取不平等^[9],而“技术封建主义”则聚焦于平台与用户之间形成的新型依附关系^[18]。

“数据殖民主义”指出,当代科技巨头正重复着历史上殖民帝国的逻辑,只不过掠夺的对象从土地和自然资源,变成了人类的生命数据与社交关系^[9]。在健康领域,来自全球用户(尤其是发展中地区)的珍贵生物数据被源源不断地“提取”,传输至位于科技核心企业的“宗主国”数据中心进行“精炼”,最终转化为预测模型、算法专利和商业利润,而数据来源的个体与社群往往难以分享其价值。这构成了一种数字时代的健康资源不平等交换。

平台实现再疆域化的核心机制,是构建“数字围栏”。它们通过控制应用程序接口、制定互操作性标准、垄断计算基础设施,将流动的数据捕获进自身的生态闭环。例如,一家提供虚拟现实心理治疗服务的平台,通过其专属的头显设备、传感器和软件,独占用户在治疗过程中产生的全部交互与生理数据。这些数据被封锁在平台的私有数据库内,形成一个个互不连通的“数据孤岛”或“数字领地”。算法则充当了这片领地上精准丈量与收割的“智能围栏”,它不仅能圈占数据,更能实时评估和抽取数据所蕴含的价值。

这种再疆域化直接导致了3种新型不平等。一是算法偏见与健康歧视。在封闭系统中训练的算法,若基于不具代表性或有偏的历史数据,其诊断建议或风险评估会将社会偏见“代码化”,对特定种族、性别或地域群体造成系统性健康歧视。二是服务差异化定价与排斥。基于对用户健康风险的精细化预测,保险或健康服务提供商可在元宇宙中实现极致的“价格歧视”,高风险个体可能被收取天价保费或被变相排斥,侵蚀医疗保障的普惠性。三是数字人身依附关系。用户为了获得持续的医疗服务,不得不依附于特定平台,接受其不断更新的条款,让渡更多数据权利。平台则如同“数字领主”,通过收取“数字地租”(如数据使用费、高额服务分成)坐享其成,而用户则处于依附地位,其健康与数据自主权受到严重束缚。这种关系,被学者批判为是一种数字时代的“从契约到身份”的退步^[18]。

这种新型依附关系的内核,在于平台凭借对基础设施和核心数据的垄断,得以持续抽取“数字地租”。在元宇宙健康领域,地租的表现形式多样且隐蔽:制药公司为获取特定患者群体的数字孪生数据以优化药物研发,需向平台支付高额“数据访问费”;保险公司为基于实时行为数据动态调整保费,须与平台签订利润分成协议;甚至广告商为触达具

有特定健康偏好的用户群体,也需通过平台的“数据交易市场”完成竞价。这些费用的本质,并非对数据生产者的劳动(患者的生命体验)的合理回报,而是平台凭借其对“数字领地”的排他性控制权,向数据使用者征收的“过路费”。用户作为数据的源头,不仅未能分享这些收益,反而因自身数据被商品化而面临隐私泄露、算法歧视等风险。

这一洞察为理解新范式的制度创新提供了批判性的参照。如果说平台的再疆域化是在数字世界重建封建领地,那么第五部分将要探讨的“数据信托”与“数字公地”,则可视作对抗这种私有化垄断的集体性制度实验。数据信托将分散的个体数据权聚合为集体的谈判力量,由专业的受托人代表社群与平台协商数据使用条款,确保收益回流和数据用途符合成员福祉。而“数字公地”则对于那些具有基础性公共价值(如匿名化的全民健康统计库、开源的数字器官模型)的数据资源,通过多元共治的规则设计,防止其被任何单一平台圈占,保障其向符合公共利益的研发活动平等开放。这两种制度创新,正是试图在被平台“再疆域化”的数字荒野上,重新开辟出属于数据生产者的“共有地”。

2.4 双重困境的辩证关系 在2.2节和2.3节分别阐述了数据的液化化与再疆域化之后,本节将进一步揭示二者的辩证关系。这一关系构成了理解元宇宙健康数据治理困境的核心。

数据的“液化化”与“再疆域化”并非两个独立或先后发生的阶段,而是构成同一进程不可分割的一体两面,它们存在着深刻的辩证关系,具体如表1所示。

液化化是再疆域化的前提与动力。没有数据从传统制度框架(如医院信息系统、隐私法规)中的“融化”与释放,没有其跨场景、连续性的流动,平台资本就无从获得进行大规模捕获、聚合与分析的对象。液化化创造了巨大的、待开采的“数据石油”矿藏。平台追求垄断利润的天然倾向,则驱使其必须对这种流动性加以控制。因此,数据的自由流动幻想,实质上是为更高阶、更隐蔽的资本集中与控制铺平道路。

再疆域化是为液化化赋予私有秩序的努力。无边无际的液态数据本身会造成混乱与不确定性,不利于资本的稳定增值。因此,平台巨头通过技术架构、法律协议和经济手段,致力于将流动的数据“再凝固”起来,将其导入私有的、可管理的“河道”与“水库”中,并贴上所有权的标签。它们试图建立一种基于私人权力的数据封建秩序,以替代传统基

于公共法律与伦理的治理秩序。从这个意义上说，元宇宙中所谓的“去中心化”愿景，在实践中极易被

扭曲为“从国家中心化转向平台中心化”的权力转移。

表 1 健康数据液化化与再疆域化的辩证关系

维度	数据的液化化	数据的再疆域化	二者的辩证关系
核心表现	连续生成、无界复制、跨场景聚合、目的漂移、语境抽离	平台通过 API、标准、算力建立“数字围栏”，形成私有化“数据孤岛”，攫取“数字地租”	液化化创造可被开采的资源；再疆域化实施对资源的私有化控制与剥削
权力机制	解构传统时空与制度边界，削弱个体知情同意与控制能力，权力弥散于流动过程	权力高度集中于平台巨头，通过技术架构与市场地位建立新型依附关系	液化化瓦解了旧权力（如医疗机构垄断），却为更集中、更隐蔽的新数字权力（平台垄断）铺路
个体处境	从权利主体沦为被动数据源，在“全有或全无”的同意困境中丧失自主性	依附于特定平台生态，面临算法偏见、服务歧视与数据依附	在液化化中失去控制权，在再疆域化中遭受系统性剥削，自主权经历双重剥夺

相较于“平台资本主义”聚焦于平台作为新的商业模式^[7]，“监控资本主义”关注行为数据的剩余价值剥削^[6]，本文提出的“液化化—再疆域化”框架试图解释一个更根本的结构性的转变：数据的存在方式本身正在从“固态”变为“液态”，而平台的权力运作也从“占有”转向“组织流动”。这一视角将数据本体论与政治经济学相结合，为理解数字时代的权力重组提供了新的分析工具。

最终，二者共同塑造了元宇宙健康数据治理的核心矛盾。一方面，数据的液化化特征要求治理模式必须具备前所未有的弹性、适应性与全球协调性；另一方面，数据的再疆域化现实却呈现出权力高度集中、规则私有化、生态封闭化的顽固“固态”格局。治理的挑战，正在于如何破解这种“流动的盛宴被固化的高墙所分割”的悖论。

3 技术解决方案的贡献与社科批判

面对元宇宙健康数据“液化化”与“再疆域化”带来的治理危机，技术社区率先给出了一系列充满雄心的解决方案。这些方案以密码学、分布式系统与人工智能的最新进展为基础，承诺在保障隐私与安全的前提下释放数据价值。本章旨在系统审视这些技术回应的核心逻辑与潜在贡献，并引入社会科学视角对其进行深度批判。我们将揭示，技术方案虽在工具层面提供了精巧的破题思路，但若脱离对权力、公平与价值等根本性社会问题的考量，其“去中心化”与“自主权”的承诺可能沦为一种幻象，甚至无意中巩固其试图挑战的不平等结构。

3.1 技术乐观主义的回应 技术乐观主义的叙事建立在这样一个信念之上：元宇宙健康数据治理的难题，本质上可以通过更高级的算法、更安全的协议和更巧妙的系统设计来解决。其核心路径聚焦于

两大方向，一是通过“隐私增强技术”确保数据“可用不可见”，二是在缺乏传统信任中介的虚拟环境中，通过“权属与追溯技术”重建可信的数据生产关系。

3.1.1 隐私增强技术(PETs)在流动中构筑“加密围栏” 为解决数据液化化带来的隐私失控问题，一系列 PETs 被寄予厚望，其目标是在不暴露原始数据的前提下完成计算与分析。

(1)联邦学习。联邦学习是应对数据再疆域化形成的“孤岛”的典型方案。在元宇宙医疗中，多家医院、研究机构或健康平台可在不交换本地原始数据（如患者 VR 康复轨迹、生理数据）的情况下，协同训练一个共享的 AI 模型（如疾病预测模型）。各参与方仅交换加密的模型参数更新。这在理论上实现了“数据不动模型动”，既打破了平台的数据垄断，又保护了数据隐私。例如，针对罕见病的诊断模型，可以通过联邦学习聚合全球多个医疗元宇宙的数据进行训练，而无需患者数据离开本地服务器。

(2)同态加密与安全多方计算。这类技术旨在实现“数据可用不可见”的终极形态。同态加密允许对加密状态下的数据进行直接计算，得到的结果解密后与对明文数据计算的结果一致^[19]。在元宇宙中，患者可将加密的健康数据上传至云端分析服务，服务商在不解密的情况下完成数据分析，并将加密结果返回，只有患者自己能解密查看。这为将敏感健康数据分析任务外包给第三方算力平台提供了可能，同时确保了数据的绝对机密。

与同态加密不同，安全多方计算(secure multi-party computation, SMPC)将数据分散成若干“秘密碎片”(secret shares)，分别交由多个互不信任的计算方持有。各方在本地对碎片进行计算，并通过特

定协议交换中间结果,最终协同完成分析任务,而任何单一计算方都无法获取完整的原始数据。在元宇宙医疗场景中,多家医疗机构可将其患者的敏感数据(如基因组信息、VR诊疗记录)碎片化后分发给多个计算节点,共同完成跨机构的流行病学统计或多中心临床研究,而无需任何一方的数据离开本地或被其他参与方还原。研究表明,采用三方计算框架的隐私保护记录链接方法,其运行速度可比传统两方方案提升14倍,且能有效规避布隆过滤器等传统方法面临的频率攻击风险。

同态加密与安全多方计算形成了互补的技术路径。前者以密文计算为核心,适合单方数据所有者将计算任务外包;后者以多方协同为核心,适合多个数据持有者共同完成联合分析而不泄露各自隐私。

(3)差分隐私。差分隐私通过向数据集中添加精心设计的随机噪声,使得任何单一数据记录的存在与否不会显著影响分析结果。在元宇宙健康研究中,当需要发布包含大量用户行为数据的聚合统计报告(如“某种虚拟疗法对特定人群的平均效果”)时,差分隐私能在保证统计效用可信的同时,从根本上防止对任何特定个体的推断与识别,从而抵御“目的漂移”带来的再识别风险。

(4)零知识证明(zero-knowledge proof, ZKP)。零知识证明允许证明者向验证者证实某一陈述为真,而无需披露陈述背后的具体信息^[20-21]。其核心价值在于打破“验证必先知情”的传统逻辑,验证者可以确信某结论成立,但对得出结论所依据的数据一无所知。自Goldwasser等^[20]提出零知识证明的原始概念以来,经过Blum等^[22]的非交互式改进,以及近年来的效率优化,zk-SNARK等高效实现已具备实际应用可能^[23]。

在元宇宙医疗场景中,ZKP适用于三类典型应用。其一,身份属性的选择性披露,比如患者可向远程医疗平台证明自己“年龄超过18岁”或“已完成疫苗接种”,而无需透露具体的出生日期或疫苗接种记录。其二,数据合规性的可验证证明,比如医疗机构可向监管机构证明其数据处理流程符合隐私合规要求(如数据仅用于约定目的),而无需公开数据处理的完整细节。其三,计算结果的正确性验证,比如当使用同态加密或安全多方计算完成数据分析后,ZKP可用于证明计算过程的正确性,确保输出结果未被篡改。ZKP的局限性在于计算开销较大,且许多高效实现(如zk-SNARK)依赖可信初始化设置^[24]。然而,随着zk-STARK等无需可信设置

的新方案发展,ZKP在医疗数据治理中的应用前景正在扩展。

(5)可信执行环境(trusted execution environment, TEE)。与前文所述密码学方法不同,TEE依托CPU硬件层面的安全能力,在计算平台内部创建一个隔离的“安全飞地”(secure enclave)。在该飞地中,数据及其处理过程对操作系统、云服务商乃至硬件管理员均不可见,仅能通过预定接口输入数据并获取结果。TEE的核心优势在于兼具安全性与高性能,它能够在保证数据机密性的同时,支持复杂计算任务(如AI模型推理)以接近明文的速度运行,但这种安全建立在信任硬件厂商的前提之上^[25-26]。

在元宇宙医疗场景中,TEE尤其适用于对实时性要求苛刻的数据处理任务。例如,VR/AR康复训练中需要毫秒级响应的生理数据分析(如跌倒检测、动作矫正),若采用同态加密可能因计算延迟导致体验中断,而TEE则可在确保数据不出安全飞地的前提下实现实时反馈。研究表明,采用Intel SGX或AMD SEV等TEE技术的联邦学习系统,其计算开销远低于基于HE的方案。然而,TEE的局限性在于其安全性依赖于硬件制造商的可信性(需信任芯片厂商),且面临侧信道攻击等新型威胁^[27]。

3.1.2 权属与追溯技术为液态数据锚定“数字产权” 为解决数据权属模糊、流向不可控的问题,区块链及相关技术被视为构建可信数字经济的基础设施。

(1)区块链与数据溯源。区块链的不可篡改、可追溯特性,使其成为记录数据生命周期的理想账本。每一次元宇宙健康数据的创建、访问、授权交易都可以作为一条哈希上链存证,形成不可抵赖的审计线索。这为监管机构提供了穿透式监管的工具,也为个体主张自身数据权利提供了技术证据。

数据溯源(data provenance)在此扮演着关键角色。它不仅记录“谁在何时何地访问了数据”这类表层操作日志,更重要的是追踪数据从生成到衍生的完整谱系,包括原始数据来源于哪次VR康复训练、经过何种算法处理生成了新的衍生数据、被哪些第三方模型调用用于训练、以及这些调用是否符合原始授权约定。在元宇宙医疗场景中,患者的数字孪生数据可能被多次聚合、转换和衍生,比如一段步态数据可能被用于训练康复算法,其衍生特征又被用于保险风险评估。若缺乏精细化的溯源机制,个体将无从知晓自身数据的“后代”流向何方、被谁利用。区块链的链式结构和时间戳机制,使得

这种复杂的谱系关系得以被忠实记录和验证,为后续的问责与收益分配提供了可信基础。

(2)智能合约与动态授权管理。基于区块链的智能合约可以编码复杂的、细粒度的数据使用规则,实现从静态同意向动态授权的范式跃迁。

传统知情同意是一次性的、模糊的授权,用户在数据采集时签署一份宽泛的同意书,此后便对数据的实际使用失去控制。动态授权管理则通过智能合约将这种静态权利转化为可编程的、持续更新的控制能力。其核心机制体现在3个层面。

其一,细粒度的条件控制。患者可以设定高度定制化的授权条款,比如其睡眠数据仅能以加密形式提供给A研究机构用于为期一个月的帕金森病研究,且每日调用次数不得超过限定阈值;若机构欲将数据用于商业开发,则需通过合约触发自动支付流程,向患者补偿约定数额的代币。

其二,时间维度的权限管理。授权不再是永久的,而是可设定精确的有效期。一旦研究期满,智能合约自动撤销访问权限,无需患者主动操作。这尤其适用于元宇宙中的持续性数据流场景,用户可授权平台实时访问其康复训练数据,但限定仅在该次训练会话期间有效,训练结束后权限即刻终止。

其三,事后的收益分配与撤销机制。当第三方基于用户数据开发出商业产品并获得收益时,智能合约可根据预设的分配规则,自动向数据源用户支付版税分成。同时,若用户发现数据被滥用,可触发合约中的“紧急撤销”条款,切断后续的数据访问,并将违规行为上链存证,为司法救济提供证据。

这种动态授权管理使得元宇宙中的“知情同意”从一个静态的法律文书,转变为一种实时的、可验证的技术流程,在保障用户控制权的同时,也为合规的数据利用提供了自动化基础设施。

(3)去中心化数字身份。以自主主权身份为代表,用户可拥有一个不依赖于任何中心化平台(如科技公司或政府)的、可移植的数字身份。该身份是用户控制其元宇宙健康数据的枢纽,所有数据授权、访问日志都与此身份关联,用户可以自主选择向不同服务方披露身份的不同维度属性,从而在虚拟世界中重建一种“便携式”的个人数据主权。

值得注意的是,零知识证明虽然主要用于隐私增强计算(3.1.1节),但其“可验证性”特性也可与本节所述的权属追溯技术结合使用。例如,在去中心化身份系统中,ZKP可用于实现属性的选择性披露;在智能合约授权中,ZKP可用于证明用户符合某项授权条件(如已完成知情同意)而不泄露具体身份

信息。

技术乐观主义者勾勒的图景极具吸引力:一个数据自由流动但隐私无忧、价值共创但权属清晰、全球协作但个人自主的元宇宙医疗未来。然而,这幅蓝图主要是在工程与逻辑的层面自洽,当其置于复杂的社会现实与权力关系中时,将面临深刻的质疑。

3.2 社科视角的深度批判 社会科学视角的批判并不否认上述技术的工具价值,而是尖锐地指出,将治理难题过度简化为技术问题,可能忽视乃至掩盖了更为根本的政治经济与社会伦理矛盾。本节从权力分配、经济公平、价值抉择、责任归属、数字主权五个维度,系统揭示技术治理方案在元宇宙健康数据领域的内在悖论。这五个维度正是对第二章所揭示的“液化化—再疆域化”双重运动的系统性回应,即技术方案如何在试图应对数据液化的过程中,反而强化了平台的再疆域化权力。

3.2.1 权力再分配的幻象:从软件去中心化到硬件再中心化 区块链、分布式账本等技术常被赋予“去中心化”和“民主化”的光环,但社科批判指出,这往往是一种“技术中心化”替代“组织中心化”的幻象^[14]。技术系统的权力结构并未消失,而是以新的形式重新集中。这种从软件到硬件的权力再集中,正是第二章所论述的“再疆域化”在技术层面的具体体现。

(1)软件层的去中心化神话。技术的开发、标准的制定、核心协议的维护,依然高度集中在少数科技巨头、精英开发团队或学术机构手中。普通用户与医疗机构在技术黑箱面前处于绝对的知识劣势。这导致权力并未消失,而是从传统的机构管理者转移到了更不透明、更难问责的技术专家与平台运营者手中。所谓的“去中心化”,可能只是治理责任的分散化与模糊化,而非权力的民主化^[28]。运行节点、理解智能合约、管理私钥等操作具有较高的技术与认知门槛,这使得在传统医疗体系中处于弱势的群体(如老年人、低收入群体、数字素养不足者)在新技术体系中进一步被边缘化,形成“数字治理鸿沟”。他们的数据可能因无法有效行使“自主权”而事实上被默认的协议所处置。

(2)密码学协议的精英掌控。零知识证明技术的引入进一步强化了这一权力转移。高效的ZKP实现(如zk-SNARK)普遍依赖“可信初始化”设置,在系统启动阶段,需由一组参与者共同生成公共参考字符串,若该过程被操纵或秘密参数泄露,整个系统的安全性将土崩瓦解^[24]。这一初始化过程往往由少数开发团队或机构掌控,普通用户既无力参

与也无从监督。理解ZKP的数学原理、验证证明的有效性,需要远高于普通数字素养的专业知识,这进一步拉大了技术精英与普通用户的认知鸿沟。所谓的“无需信任”,实际上是将信任从传统机构转移到了掌握初始化密钥或能够编写ZKP电路的技术专家手中。

(3)硬件层的再中心化。当隐私保护的根基从密码学转向硬件时,权力集中以更隐蔽的形式出现。当前主流的可信执行环境(TEE)技术(如Intel SGX、AMD SEV、ARM TrustZone)均由少数几家芯片巨头掌控^[25-26],这意味着元宇宙健康数据的最终安全性,高度依赖于这些商业公司的硬件设计、密钥管理体系和安全更新政策。一旦某厂商的TEE实现被曝出硬件级漏洞(如近年多次出现的SGX侧信道攻击),所有依赖该技术的医疗应用将同时暴露于风险之下,且修复完全依赖于厂商的响应速度与诚意。2023年曝光的“Downfall”漏洞影响多代Intel处理器,修复需等待厂商发布微码更新,这种“硬件层锁定”使得医疗数据安全受制于芯片巨头的商业决策,形成了比软件层更难制衡的权力集中。这种“硬件层的再中心化”,比软件层的权力集中更为隐蔽,也更难通过开源社区或市场竞争来制衡。

(4)技术演进的路径依赖。值得警惕的是,技术系统的权力集中并非静态,而是在演进中不断自我强化^[29]。早期选择某种ZKP方案(如zk-SNARK)意味着后续系统将深度依赖其可信初始化流程;早期适配某家TEE芯片意味着未来迁移成本呈指数级上升。这种“路径依赖”使得最初看似中性的技术选择,随着时间的推移固化为难以撼动的权力结构。当我们在元宇宙医疗的黎明期选择技术路线时,实际上也是在为未来几十年的治理格局投下关键一票,而这一投票权,恰恰掌握在少数技术精英和芯片巨头手中。

3.2.2 效率与公平的悖论:隐私技术的成本排斥 隐私与安全并非无代价的福音,其成本可能以意想不到的方式加剧不平等。当隐私保护本身成为一种稀缺资源时,技术非但未能促进普惠,反而可能加深既有的社会分化。

(1)算力成本的结构性的不平等。联邦学习需要频繁的加密通信和分布式优化,同态加密的计算开销比明文操作高出数个数量级^[19,30]。这些成本最终会转化为更高的云服务费用和更昂贵的医疗数据分析产品。资源丰富的顶尖研究机构或商业平台能够承担,而资金拮据的社区医院或公共卫生部门则可能被排除在外,导致健康数据研究与应用向资

本密集型方向倾斜,违背医疗普惠的初衷。

(2)密码学隐私的“合规奢侈品”化。零知识证明带来了显著的成本问题,进一步加剧了技术应用的的不平等。生成一个zk-SNARK证明虽已优化至毫秒级,但其可信初始化过程需要“信任设置仪式”,参与方若合谋可伪造证明^[24]。zk-STARK虽无需可信设置,但其证明规模可达数百KB(通常为200-300KB),远大于zk-SNARK的几百字节,验证成本较高^[31]。在元宇宙医疗场景中,若要求每一次数据交互、每一笔授权记录都附带ZKP验证,其累积计算成本将使小型医疗机构难以承受,这种“隐私税”可能进一步加剧医疗资源不平等。这可能导致ZKP沦为大型平台的“合规奢侈品”,它们有能力投资专用硬件和优化算法来满足隐私合规要求,而资源匮乏的机构则被迫在“成本高昂的完美隐私”与“成本低廉的隐私裸奔”之间二选一。

(3)硬件门槛与数字鸿沟。可信执行环境不仅带来权力集中问题,也制造了新的经济门槛。适配特定TEE方案(如为Intel SGX优化算法)需要专门的技术积累和开发投入,更换硬件平台面临高昂的重构成本^[26]。对于资源有限的公共卫生机构而言,这种硬件锁定效应可能使其长期被排除在隐私计算的主流生态之外。

(4)性能妥协的伦理权衡。差分隐私添加的噪声可能降低数据分析的精度;联邦学习中非独立同分布的数据可能导致模型性能下降^[32]。在诊断、预后等对精确性要求极高的医疗场景中,这种为隐私付出的性能代价是否可接受?这构成了一个严峻的伦理权衡:我们是否愿意为群体的隐私保护,承受对个体患者诊疗准确性的潜在微小风险?技术方案本身无法回答这个价值抉择问题。

3.2.3 治理与价值的不可通约:“代码即法律”的限度 最深刻的批判指向技术治理的哲学基础。“代码即法律”的信奉者认为,可自动执行的智能合约能超越低效、模糊的人类法律,实现绝对的规则公正^[33]。然而,这一理念将治理问题化约为技术问题,忽视了社会价值的复杂性与不可通约性。

(1)规则的刚性与社会情境的复杂性。智能合约的规则是预先编写、僵化执行的,但医疗实践充满伦理灰色地带和需要人道主义例外的情境。例如,一项严格限制数据共享的合约,在突发公共卫生事件(如元宇宙内追踪传染病接触者)时,可能阻碍必要的公共利益实现。代码无法理解“情有可原”,而人类社会的治理恰恰依赖于这种情境化的判断与协商。

(2)价值抉择的技术固化。数据治理的核心问题,隐私与公益的边界、个人权利与集体利益的权衡、商业价值与社会价值的分配,本质上是政治问题和伦理问题。技术可以提供实现某种既定价值的工具,但无法替代民主社会就价值排序进行公开辩论、协商并达成共识的过程。将价值抉择编码进看似中立的算法,实则是将特定的、通常是开发者的价值偏好进行“技术固化”,这是一种更具隐蔽性的专制^[34]。

(3)健康认知的技术化重构。更深层的问题是,当健康数据被持续量化、算法化为可计算的指标时,我们对“健康”本身的理解也在悄然改变。元宇宙中的数字孪生体、持续追踪的行为数据、AI生成的健康评分,正在塑造一种新的“数据化健康观”^[2],那些难以量化但同样重要的维度(如患者的心理体验、疼痛的主观感受、治疗的尊严价值)可能被边缘化^[1]。这种认识论层面的重塑,使得患者逐渐从“体验的主体”异化为“数据的集合”,而技术系统则成为定义“何为健康”“何为有效治疗”的隐蔽权威。

(4)算法黑箱与民主监督的缺失。当健康决策越来越多地由算法辅助甚至主导时,算法的内部逻辑却往往处于不透明状态。即便技术方案提供可解释性模块,其解释也往往面向技术专家而非普通患者。这种“解释鸿沟”使得受算法决策影响的个体难以理解、质疑或申诉,技术系统因此绕过了民主监督的基本程序。

3.2.4 责任与信任的消解:自动化系统中的问责黑洞 当错误发生时,谁应当负责?在高度去中心化、自动化的技术系统中,这一问题的答案变得极其模糊。责任主体的消解,使得传统的法律追责与救济机制难以运作,最终损害的是个体的权利保障。

(1)责任主体的模糊化。当因加密算法漏洞导致数据泄露,或因智能合约漏洞导致授权错误时,责任在开发者、矿工、节点运营商、用户之间飘移不定。这种“责任漂浮”状态,使得受害者难以找到明确的追责对象,法律救济途径因此被堵塞。

(2)密码学证明的责任困境。零知识证明的引入非但未能化解责任困境,反而可能使其更加复杂。当ZKP验证通过但事后发现证明内容虚假(如证明者利用数学漏洞构造了欺骗性证明),或当ZKP系统的可信初始化参数被泄露导致大规模伪造证明时,受害者应向谁追责?是设计ZKP电路的开发者、执行初始化的参与者、运行验证节点的矿工,还是部署该系统的平台?ZKP的数学保证是“无条件”

的,但其工程实现和初始化的安全性却是“有条件”的^[23],而这“条件”的责任归属,在去中心化、自动化系统中恰恰最难以界定。

(3)硬件后门的追责难题。可信执行环境将信任基础从密码学转移到硬件厂商,但硬件层的责任问题同样悬而未决。若TEE芯片被曝存在设计后门,或因微码更新导致数据泄露,受害者应向芯片厂商追责,还是向部署该硬件的平台追责?芯片厂商往往通过终端用户许可协议限制自身责任,而平台则可能将责任推给硬件供应商,形成责任链条的无限回溯。

(4)技术麻醉效应。当技术系统以“数学保证”“硬件级安全”等名义声称解决了隐私问题时,可能诱导社会降低对制度监管的重视。然而,技术方案的安全性是概率性的,而非绝对性的。例如,联邦学习虽声称“数据不动模型动”,但研究表明,通过模型参数反推原始数据的“梯度泄露攻击”已被证实可行^[35-36]。这种“技术麻醉”效应使得社会放松警惕,一旦技术防线被突破,将造成更大规模的损害。

3.2.5 主权与依附:硬件层的数字殖民主义 当数据治理的根基从软件层延伸至硬件层时,一个更根本的问题浮出水面:谁掌控着数据赖以运行的基础设施?这不仅是技术问题,更是主权问题。这一发现与第二章关于“数据殖民主义”的论述形成呼应,表明再疆域化不仅发生在软件层的数据流动中,更延伸至硬件层的基础设施控制^[9]。

(1)供应链信任的单向强加。TEE要求用户“信任”芯片厂商的硬件设计和密钥管理基础设施,但这种信任是单向强加的,用户既无法验证芯片内部是否留有后门,也无从监督厂商的密钥使用是否合规^[25]。在元宇宙医疗的跨国场景中,若某国的医疗平台采用他国厂商的TEE芯片,其患者的敏感健康数据的安全性,实际上建立在两国政治关系与厂商商业道德的双重“黑箱”之上。

(2)硬件锁定的数字依附。一旦医疗应用深度适配特定TEE方案,更换硬件平台将面临高昂的重构成本^[26]。这种“硬件锁定”效应,使医疗机构和患者被绑定在特定芯片厂商的生态内,形成一种新的依附关系:数据虽“自主”,运行数据的土地却属于他人。这与前文讨论的数字地租形成呼应,平台抽取的是软件层的地租,而芯片厂商抽取的是更深层的硬件层地租。

(3)从软件殖民到硬件殖民。如果说数据殖民主义是平台资本对全球南方健康数据的“软件层掠夺”^[25],那么TEE的硬件垄断则构成了“硬件层控

制”。全球南方的医疗系统不仅可能失去对数据的控制权,甚至连数据赖以运行的计算基础设施也掌握在他国芯片巨头手中。这种双重依附,使得数字时代的南北不平等从经济领域延伸到技术主权层面。当医疗数据安全依赖于他国芯片厂商的商业决策和所在国的政治环境时,数字主权便面临实质性挑战。

3.2.6 小结:技术治理的结构性局限 综观本节所

述,从软件层的密码学协议到硬件层的可信执行环境,技术方案在回应隐私挑战的同时,也以其独特的方式复制乃至深化了权力集中的悖论。表2汇总了技术乐观主义承诺与社会科学批判现实之间的多重张力,这些张力共同揭示了一个根本困境:当治理问题被化约为技术问题时,被排除出议程的恰恰是最关键的社会政治追问。

表2 技术承诺与社科现实之间的张力

维度	技术乐观主义的承诺	社会科学视角的批判现实	核心张力
权力分配	去中心化网络将权力归还用户	权力向技术精英和芯片巨头集中,形成软件—硬件双重垄断	去中心化理想 vs. 再中心化现实
经济公平	隐私技术普惠所有用户	高昂成本制造“隐私税”,弱势群体被排除	技术普惠愿景 vs. 成本排斥
价值抉择	代码规则确保治理确定性	刚性规则无法处理伦理复杂性与情境例外	代码理性 vs. 社会协商
责任归属	透明算法实现自动问责	责任主体模糊化,受害者难以追责	自动化信任 vs. 问责真空
数字主权	硬件级安全提供终极保护	硬件垄断导致供应链依附和主权侵蚀	技术安全 vs. 主权自主

这一批判性审视并非要否定技术的工具价值,而是旨在划清其能力的边界。技术可以构筑精密的锁具与管道,却无法决定数据之河应流向何方、灌溉何处、又由谁受益。治理元宇宙健康数据,不能止步于工程思维的“怎么办”,而必须首先回答社会政治的“为谁治理”和“为何治理”。尤其值得警惕的是,当隐私保护的根基从软件密码学延伸至硬件层时,我们非但未能摆脱权力集中,反而可能陷入更隐蔽、更难制衡的“硬件封建主义”。

正是带着这一认识,我们将目光转向更广阔的社会制度层面。下一章将深入剖析法律监管与市场自我调节模式在面对元宇宙健康数据双重运动时的结构性困境,考察现有的制度框架是否能为这些技术嵌入更坚实的规则底座。

4 现有治理模式的困境与转型需求

前文剖析了元宇宙健康数据“液化化”与“再疆域化”的双重运动,并检视了纯技术解决方案的局限。本章对法律监管与市场调节模式的批判,正是对第二章所揭示的双重运动的制度层面回应,既有制度如何因无法适应数据液化化而失效,又如何在不经意间强化了平台的再疆域化权力。我们将论证,面对这一根本性变革,奠基于工业时代与早期互联网数据的传统治理模式,无论是依赖成文法的“法律监管模式”,还是信奉市场理性的“自我调节模式”,均已陷入系统性失效。它们的困境并非源于执行不力,而是其内在逻辑与元宇宙数据的本质

属性发生了深刻错配。因此,治理范式必须进行根本性转型,从单一主体的管控,迈向“国家—市场—社会”协同的多元共治,即所谓“第三代治理”。

4.1 法律监管模式(以GDPR、HIPAA等为例)的滞后性 第3章的批判表明,技术方案虽能构筑隐私保护的“锁具与管道”,却无法替代制度层面的规则底座。当我们将目光转向既有的制度框架时,首先映入眼帘的便是以GDPR和HIPAA为代表的法律监管模式。

以欧盟《通用数据保护条例》(GDPR)和美国《健康保险携带和责任法案》(HIPAA)为代表的现代数据保护法,是应对数字时代隐私风险的里程碑。它们确立的“知情同意”、“目的限定”、“数据最小化”及“主体权利”等原则,构成了当下数据治理的基石。然而,这些原则在应对元宇宙中实时、连续、多模态的“数字生命流”时,显露出结构性的滞后与无力。

首先,“数据最小化”与“目的限定”原则在元宇宙海量情景化数据前近乎失效。GDPR要求数据收集应限于“与处理目的相关的、适当的、最小化的”范围,但元宇宙的沉浸式体验依赖于对用户生物特征(如眼球追踪、脑电波、手势)、空间位置、行为轨迹及情感反应的全景式、持续性收集。在此场景下,何为“最小必要”变得极其模糊。例如,为提供流畅的VR康复训练而收集的精细运动数据,是否“必要”包含了可以推断用户精神专注度的微表情数据?这些数据在收集瞬间可能仅为优化体验,但

其作为连续流的一部分,蕴含着未来不可预见的医疗或商业价值,这使得“目的限定”在数据生成之初便可能被突破。这种数据用途的不可预见性,正是第二章所论述的“数据液化”中“目的漂移”特征在制度层面的体现。

其次,“知情同意”模型在实践中的崩塌。法律设想用户是在特定时点、基于清晰信息做出理性授权的“数据主体”。但在元宇宙中,用户通常只能通过点击冗长、晦涩的“服务条款”来接入整个虚拟世界。这种“捆绑式”、“一揽子”同意,与GDPR所要求的具体、知情、自由给予的同意相去甚远。用户为了获得基本的医疗服务或社交功能,不得不让渡自身最敏感的生物识别信息,导致同意在实践中沦为一种被迫的形式,而非真正的自主控制。更重要的是,元宇宙的持续数据流使得知情同意面临“认知超载”困境,用户即便有机会阅读条款,也难以理解数据被持续采集、聚合、衍生的复杂后果。这种认知不对称使得同意从“理性授权”异化为“被迫点击”^[37]。

再者,数据主体权利的行使面临巨大障碍。即便法律赋予用户访问、更正、删除(被遗忘权)和可携带其数据的权利,在元宇宙复杂的数据生态中也难以落地。数据在用户、设备商、平台运营商、第三方应用开发者之间瞬时流动、聚合与衍生,其存储位置与控制权高度分散。当用户想行使其“被遗忘权”时,可能面临无从知晓数据副本存在于何处、由谁掌控的困境,更遑论彻底删除。这种“去中心化追责风险”使得法律赋予个体的权利武器,在技术上变得钝化。

最后,法律体系的内在矛盾与高昂合规成本削弱了其效能。不同领域、不同司法辖区的法律(如数据法、消费者法、竞争法)在适用于元宇宙时可能产生重叠甚至冲突,造成“法律不一致性”。同时,将“隐私嵌入设计”等原则付诸实践需要巨大的资源投入,这实际上将合规能力塑造为一种新的市场壁垒,只有大型科技公司才能承担,从而意外地巩固了其市场地位,与小企业的发展形成矛盾。法律本意为制衡权力,却在执行中可能加剧了权力的集中^[38]。

此外,元宇宙的全球穿透性使得法律的地域管辖陷入困境。一场跨国VR远程手术中,患者位于A国、医生位于B国、数据服务器位于C国、平台总部位于D国,应适用哪国法律?GDPR的长臂管辖虽试图应对此问题,但其执行高度依赖国际司法协作,而元宇宙的实时数据流使得传统的事后司法救

济模式难以跟上技术节奏。这种“法律的时空错配”,使得监管往往在数据已造成损害后才姗姗来迟^[39]。

4.2 市场自我调节模式的失效 如果说法律监管试图以国家权力为数据流动划定边界,那么市场自我调节模式则信奉另一种逻辑:将数据视为商品,相信供求关系能自发形成最优秩序。然而,这一逻辑在元宇宙健康数据面前同样遭遇滑铁卢。

数据的商品化逻辑必然导向垄断与“平台资本主义”的强化。健康数据,尤其是元宇宙中高维、连续的生物行为数据,具有显著的规模效应和网络效应:数据越多,算法越精准,吸引的用户越多,进而产生更多数据。这一正反馈循环天然排斥竞争,促使主导平台(“看门人”)建立封闭的“数字围栏”,将用户和数据锁定在自有生态内。大数据市场研究表明,数据一定程度的排他性、质量和价值的差异性、高昂的收集成本、锁定效应和转换成本以及网络效应等实然属性均会提高市场的进入壁垒,强化主导经营者的市场地位^[38]。其结果不是开放、竞争的数据市场,而是少数“技术利维坦”对数字健康疆域的私有化统治。市场调节在这里失灵了,因为它无法阻止赢家通吃后的市场支配地位滥用。

Apple Health生态是平台再疆域化的典型样本,也是第二章“再疆域化”概念的具象体现。通过HealthKit API和ResearchKit框架,Apple将iPhone、Apple Watch和第三方应用的健康数据整合至其封闭生态中。用户虽可通过“健康”App查看数据,但数据向其他平台(如Android设备或非苹果认证的医疗机构)的迁移受到严格限制。2024年发布的Apple Vision Pro进一步将眼球追踪、手势识别等空间计算数据纳入健康监测体系,形成更完整的数据闭环。这一生态展示了“数字围栏”的典型特征:技术标准(如HealthKit)成为数据流动的“关卡”,平台通过硬件(Apple Watch传感器)和软件(iOS系统)的双重锁定实现对健康数据的排他性控制。

更为深刻的是,健康数据商品化会引发严重的“外部性”问题,即交易双方未承担的全部成本或产生的收益,由社会承担。其负外部性至少有以下三点。

第一,公共利益受损。当健康数据被私有平台垄断,用于公共卫生研究、流行病预警或普惠性医疗创新的数据访问就可能受阻,损害社会整体福利。健康数据的公共物品属性意味着,其过度商品化将导致“公地悲剧”的反向,数据资源被私人占有时,社会整体的公共健康利益反而受损。这与

Elinor Ostrom 所警示的公共资源治理困境形成呼应^[40]。

第二,加剧健康不平等。基于精细化健康数据的“差异化定价”可能使高风险或低收入群体无法负担保险或优质服务,算法偏见则可能在数字世界系统性地复制和放大现实社会中的歧视。研究表明,广泛使用的医疗算法在预测黑人患者的健康风险中显示了严重的种族偏见,该算法将医疗费用作为医疗需求的代理,但由于缺乏准入条件及存在系统性种族主义,黑人所招致的医疗成本比白人低,因此算法低估了黑人患者的健康需求^[41]。

第三,侵蚀人的主体性。将生命体验数据化并明码标价,实质上是在推动一种“数字异化”,人的生物性、情感和社交互动被降格为可供提取和交易的生产要素,这与医疗“以人为本”的伦理根本相悖。市场机制无法为这些深刻的社会伦理问题定价,因此其调节是失灵的。

更深层的问题是,健康数据的商品化是否应有伦理边界?当个体的基因组数据、脑电波数据、情绪反应被明码标价,我们是否在默许一种“生命本身的商品化”?这种追问触及市场逻辑的根本限度,有些东西一旦被标价,其内在价值便已受损。医疗领域尤其如此,健康不是消费品,患者不是消费者,将医患关系重构为“数据卖家”与“数据买家”的交易关系,本身便是对医疗伦理的背离。

4.3 迈向多元协同共治:国家、市场与社会的角色重构 既有的“国家中心”的法律管控与“市场中心”的自我调节双双陷入困境,表明元宇宙健康数据的治理需要超越这种二元对立,建构一个更具适应性、包容性和回应性的新范式。这就是强调多元主体协同、多种工具并用的“第三代治理”(亦称“多元协同共治”)。这一转型的核心在于承认治理权力的分散化与治理责任的共享性。它不再将国家视为唯一的规则制定者和执行者,也不盲目崇拜市场的自发秩序,而是寻求一种动态平衡。

(1)国家的角色转型:从直接控制者到“元治理者”与底线守卫者。国家的作用并非减弱,而是变得更加关键和精巧。鲍勃·杰索普提出的“元治理”概念,正是强调国家对治理机制的统筹协调,以防止治理失败^[42]。具体而言,国家需要从事后惩罚转向事前介入与合法性引导,负责制定顶层设计、设定核心伦理与法律红线(如禁止某些类型的健康歧视)、并确保不同法规间的协调一致。同时,国家需扮演“仲裁者”和“赋能者”角色,一方面对科技巨头进行反垄断监管,防范“数字利维坦”;另一方面通

过监管沙盒、标准制定等柔性工具,为负责任的创新预留空间。

(2)市场的角色修正:从无序扩张到负责任的创新主体。企业,尤其是平台企业,需要在追求商业利益的同时,内化其行为的社会成本。这要求其超越合规,践行“通过设计保护隐私”和“通过设计保障伦理”。市场机制应被引导至建设开放、互操作的数据基础设施和可信计算环境,而非构筑封闭花园。例如,采用标准化API促进数据在保障安全下的有限、可控流通。

(3)社会的角色崛起:从被动客体到积极参与的治理主体。这是第三代治理最具革命性的维度。它意味着患者社群、专业协会、伦理委员会、公民社会组织等社会力量应被制度性地纳入治理架构。其参与形式包括:对算法进行独立的审计与影响评估;通过数据信托等新型法律机构,代表集体管理成员的健康数据,在保护隐私的前提下促成数据用于公共利益^[43];以及提升公众数字素养与健康数据主权意识,使个体能从“数据主体”转变为真正的“治理主体”。

欧盟《健康数据空间条例》(EHDS)是应对平台再疆域化的制度性回应。该条例要求所有电子健康记录系统采用欧洲电子健康记录交换格式(EHRx),确保数据在不同成员国之间的互操作性。同时,EHDS建立了“健康数据访问机构”(Health Data Access Bodies)作为各国数据治理的协调机制,研究人员可通过这些机构申请访问匿名化的健康数据。这一案例展示了“国家作为元治理者”的角色:不是直接控制数据,而是通过标准制定和机构设置,为数据流动建立规则框架,防止平台私有化垄断。

需要清醒认识的是,多元协同共治并非一剂立竿见影的万能药。多元主体协同意味着决策过程的复杂化与时间成本的增加,当需要就某一数据使用规则达成共识时,国家、市场、社会三方的话语体系、利益诉求与行动逻辑可能存在深刻分歧。历史经验表明,多元治理结构本身并不能自动防止权力集中,强势主体可能通过资源控制、议程设置、话语霸权等方式,将多元形式转化为实质上的单方主导。因此,第三代治理的制度设计必须包含对“元权力”的制衡机制,如为弱势群体提供参与补贴、设立独立监督机构、建立议程公平规则等,防止“协商”沦为“扯皮”,避免强势主体在“多元共治”的外衣下继续主导议程。此外,多元治理对参与主体的能力要求较高,可能形成新的“参与鸿沟”。第三代

治理与其说是一种既成模式,不如说是一个需要持续探索的“治理实验场”。

综上所述,我们整理了元宇宙健康数据治理模式的演变与对比,具体见表3。由表3我们可以看到,现有治理模式的困境揭示了单向度思维的局

限。元宇宙健康数据的治理,必须走向一个承认复杂性、拥抱多样性、并强调协同韧性的新范式。这不仅是技术和管理上的挑战,更是一场深刻的社会实验,关乎我们如何在数字时代重新定义健康、隐私、公平与人的尊严。

表3 元宇宙健康数据治理模式的演变与对比

治理模式	核心理念	主要工具	在元宇宙健康数据治理中的困境	转型方向
第一代: 国家中心主义,通过法律监管模式	国家中心主义,通过统一、刚性的成文法进行外部控制	立法、行政监管、司法诉讼、处罚	原则滞后于技术现实;合规成本高企;权利行使困难;跨国执法复杂	国家向“元治理”与底线规制转型,提升法律的一致性与前瞻性
第二代: 市场自我调节模式	市场中心主义,相信竞争与契约能自发产生最优秩序	产权界定、市场竞争、企业自律、服务条款	必然导致数据垄断与平台霸权;无法解决负外部性(公益损害、不平等);侵蚀人的主体性	市场需在伦理与合规框架内创新,承担社会责任,推动互操作与开放生态
第三代: 多元协同共治模式	网络化治理,强调国家、市场、社会等多主体基于共识的协同与合作	“回应型”法律框架、行业标准、技术伦理、社群公约、数据信托、参与式审计等	主体间协调成本高、权责划分难、共识形成慢;存在“协商被俘获”风险;对参与主体能力要求较高,可能形成“参与鸿沟”	构建包含法律、代码、市场、规范的混合治理体系,培育各主体的治理能力,形成动态平衡的治理共同体;在实验迭代中探索本土化路径

本章提出的多元协同共治转型方向,正是试图回应第二章所揭示的核心矛盾:如何在承认数据液态化现实的同时,有效制衡平台的再疆域化权力。下一章将在此基础上,进一步构建微观技术层(如默认隐私保护、互操作标准)、中观制度层(如数据信托、数字公地、参与式审计)、宏观法律层(如数字人格权、数字守门人监管)的三层治理框架,使本章提出的“国家—市场—社会”协同理念落地为可操作的制度设计,为从“批判”走向“建设”提供更具操作性的路线图。

5 构建跨学科的元宇宙健康数据治理新范式

前文揭示了现有治理模式与技术方案的应对元宇宙健康数据双重运动时的深层困境。第二章提出的“液化化一再疆域化”双重运动框架揭示,元宇宙健康数据治理的核心矛盾在于:数据的高度流动性要求治理模式具备弹性与适应性,而平台的再疆域化权力却呈现出权力集中、规则私有化的“固态”格局。回应这一矛盾,需要从理念层面完成根本性转向。历史经验表明,当技术变革引发根本性的社会关系重组时,修补旧范式往往徒劳无功,必须进行理念与架构的重塑。本章旨在提出一个积极的、跨学科的治理新范式,这一范式不以禁锢数据流动或回归中心化控制为目标,而是致力于在流

动性中建立秩序,在开放中保障权益,其核心在于从对抗性管控转向关系性治理,从孤立思维转向系统生态思维。

5.1 从原子化权利到关系性生态的核心理念转变
构建新范式,首要的是完成两项根本性的理念转向,它们构成了所有后续制度与技术创新之魂。

第一,从“数据所有权”到“数据关系权/数据管理权”。传统法律框架执着于界定数据“归谁所有”,这实质上是将数据类比为土地、房屋等排他性动产。然而,元宇宙中的健康数据作为持续生成、多方贡献(个人生成、平台处理、算法解读)、价值在关联中涌现的“生命流”,其“所有权”在法理与实践上皆难以清晰切割,强行界定反而会引发无尽纠纷或导致数据僵化。

新范式应超越所有权思维,转向“数据关系权”框架。这一理念由学者如萨尔坎·巴哈莫特所倡导,其核心是关注数据实践中的动态关系、相互义务与影响力,而非静态的归属。它意味着治理的重点不在于回答“数据是谁的财产”,而在于规范“谁在何种情境下能对数据做什么,并需承担何种责任”。与之配套的是强化“数据管理权”,即赋予数据主体(个人或集体)一系列针对其数据生命周期的实质性控制权力,包括知情权、访问权、反对权、可携带权,以及至关重要的“持续管理权”。即便数

据已被共享,主体仍有权知晓其流向、用途变更,并能在特定条件下撤回授权或要求收益分享。这实质是将权利从“产权”的控制逻辑,转向“治理”的参与与问责逻辑。关于隐私、信息与数据三者的区分,申卫星指出应在严格区分权利客体与权利本身的基础上,构建数字时代个人权利的差序格局——隐私、信息与数据分别处于事实层、描述/内容层和符号层,三者之上分别成立隐私权、个人信息权与数据所有权^[44]。

第二,从“个人隐私保护”到“集体数字福祉与生态系统健康”。个人隐私保护仍是基石,但仅此不足以应对系统性风险。当平台算法基于有偏数据导致对特定族群的健康歧视,当数据垄断阻碍公共卫生研究时,损害的是集体利益和整个数字生态的健康。

因此,新范式必须将“集体数字福祉”与“生态系统健康”提升为核心目标。这要求我们不仅保护个体不受侵害,更要主动塑造一个公平、可信、可持续的数据生态。这意味着承认健康数据具有公共物品属性,其治理需考虑正负外部性。例如,一个开放、高质量的数字人体模型库能加速全球医学研究(正外部性),而一个封闭、有偏的诊断算法则可能损害特定社群健康并加剧社会不公(负外部性)。治理的任务,就是通过制度设计,最大化正外部性,内化负外部性,确保元宇宙健康这一“数字公地”不被过度掠夺或污染,最终服务于人类整体的健康福祉。

需要强调的是,集体数字福祉的构建并非以牺牲个体自主为代价,而是要求个体在数字生态中扮演更积极的“公民”角色。集体福祉的实现,离不开每一个体对自身数据权利的理性行使和对公共数据治理的参与。这意味着,在保护个体隐私的同时,还需培育个体的“数字健康素养”,使其理解数据的价值与风险,知晓如何授权、撤回、审计自身数据的使用,并有能力参与数据信托等集体治理机构的决策。国际研究表明,提升数字健康素养对于改善健康结果、弥合数字鸿沟、减少健康不平等具有显著潜力^[45]。个体不再是孤立的“数据所有者”,而是数字共同体中负有责任与权利的成员。只有当个体的能动性、集体制度形成良性互动,新范式才能避免滑向精英治理或技术寡头统治。

上述两大核心理念为治理框架提供了价值指引,它们需要落地为微观、中观、宏观3个层面的具体制度安排。图1展示了新范式的核心逻辑:两大核心理念(数据关系权/数据管理权、集体数字福祉

与生态系统健康)作为价值指引,贯穿并指导微观(技术)、中观(制度)、宏观(法律)3个层次的治理框架设计。每个层次对应具体的治理工具,形成理念引领、多层联动、工具协同的治理生态系统。微观技术层通过默认隐私保护、互操作标准和可解释算法,将伦理嵌入系统架构,回应数据液态化的“无界复制”风险;中观制度层通过数据信托、数字公地和参与式审计,创建新型治理主体和制衡机制,直接制衡平台的再疆域化权力;宏观法律层通过数字人格权确权、数字守门人监管和全球标准协作,提供制度保障和底线约束,为数据流动划定制度边界。

5.2 构建韧性协同治理生态系统的多层次治理框架要素 基于上述理念,新范式的实践需要构建一个微观、中观、宏观3层联动,技术、制度、法律与文化多要素协同的治理生态系统。本节提出的三层治理框架,正是对第四章“国家—市场—社会”三元转型方向的具体化:宏观法律层对应国家作为“元治理者”的角色,微观技术层对应市场作为“负责任创新主体”的要求,中观制度层则为社会力量的积极参与提供了制度化渠道。

5.2.1 微观(技术层)嵌入伦理的架构与开放的标准 技术架构是治理的“地基”。必须在元宇宙健康系统的设计源头,贯彻“通过设计保障伦理”的原则。

(1)默认隐私保护与数据最小化架构。系统应默认以最高隐私规格运行,例如,在设备端或边缘计算节点完成初步数据处理,仅上传必要的、脱敏的聚合信息;采用联邦学习、同态加密等隐私增强计算作为默认选项,而非事后附加。

(2)强制性互操作性与开放标准。为打破“数字围栏”,必须通过法规或产业共识,强制核心健康数据接口和虚拟环境组件遵循开放标准。这类似于互联网的TCP/IP协议,允许用户在符合安全规范的前提下,将其健康数据与数字身份在不同平台间迁移,促进竞争与创新。

互操作性标准已在健康数据交换领域取得实质性进展。国际组织HL7开发的FHIR(Fast Healthcare Interoperability Resources)标准已成为全球健康数据互操作的事实基准,支持临床数据、公共卫生报告、保险理赔等多场景的数据交换。欧盟2025年启动的“i2X项目”致力于在12个成员国推广欧洲电子健康记录交换格式(EHRx),通过35个试点项目覆盖电子处方、实验室结果、患者摘要、医学影像等五大领域,首次实现欧洲范围内电子健康记录系统的互联互通。

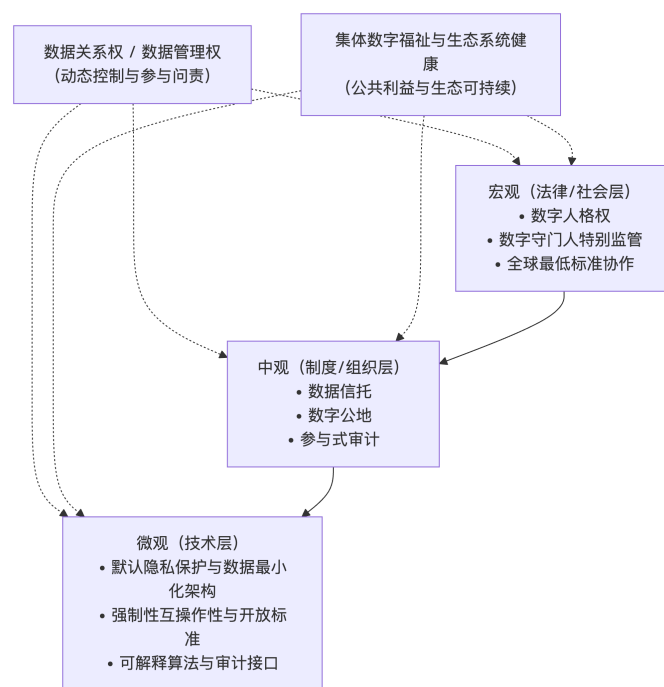


图1 元宇宙健康数据治理新范式:从核心理念到多层次治理框架

与此同时,德国“健康数据实验室”(Health Data Lab)已向研究人员提供覆盖该国90%参保人口(约7500万人)的假名化健康数据,依托联邦学习架构在保障隐私的前提下促进医学研究。这些标准化和数据空间的实践,为元宇宙场景下打破“数字围栏”提供了技术可行性和政策示范。

(3)可解释算法与审计接口。所有用于健康诊断、风险评估的算法,必须内置可解释性模块,并能提供标准化的审计接口,供独立的第三方机构进行黑箱或白箱测试。

5.2.2 中观(制度/组织层)创新治理主体与参与式制衡 这是新范式最具创新性的层面,旨在创建介于国家与个人之间的新型治理主体。辛苑、田新民的研究指出,第三方数据信托通过构建法定信义义务框架规范数据共享行为,依托信托财产独立性原则与权能分割机制重塑数据利益格局,在规范层面构建差异性授权与动态监管的弹性规制体系,在经济层面通过资产隔离与收益结构化设计降低数据交易成本^[46]。

(1)数据信托。这是管理集体健康数据的理想制度工具,由一个独立、专业的受托人机构(如由法律、医学、伦理专家及社群代表组成的董事会)代表特定社群(如某疾病患者群体)的利益,统一管理其成员自愿托管的健康数据。信托根据预设的章程(如仅用于非营利的医学研究)与数据使用者谈判、

签订合约、监督执行并分配收益。它解决了个人谈判力量薄弱、无力管理复杂数据授权的问题,将分散的数据主权聚合为有效的治理权力。

数据信托并非纯粹的学术构想,已出现值得关注的早期探索。英国开放数据研究所(Open Data Institute, ODI)与政府人工智能办公室于2019年联合发起数据信托试点项目,探索其在减少食物浪费、打击野生动物非法贸易、改善公共服务等领域的应用。研究结论表明,数据信托能够赋予个体和小型组织比传统数据关系中更大的“话语权”,尤其是在数据涉及自身或数据使用影响自身利益时。尽管这些早期试点尚未深入医疗领域,但其验证的治理原则,独立受托、章程约束、多方参与,为医疗健康数据信托的构建提供了宝贵经验。目前,欧盟《健康数据空间条例》(EHDS)的推进,正催生更多成员国探索患者数据集体管理的制度创新。

数据信托的成功运作离不开个体成员的积极参与。首先,信托的章程和重大决策(如接纳新类型的数据使用者、修改收益分配规则)应设置成员民主表决机制,确保个体意愿得以表达。其次,信托需建立透明的信息披露平台,使成员能实时查看自身数据的被访问记录、用途及产生的收益,强化“持续管理权”。最后,信托应承担“数字健康素养”培育功能,通过培训、指南等方式帮助成员理解数据信托的运作逻辑,提升其参与决策的能力,避免

因专业知识不足而使信托沦为少数精英的“代理机构”。

在制度设计细节上,数据信托的运作需明确以下关键问题。一是受托人构成,应由法律专家、医学伦理专家、技术专家和社群代表共同组成董事会,其中社群代表比例不低于 1/3,这一比例借鉴了公司治理中独立董事的制度经验,旨在确保数据主体在决策层拥有实质性话语权,避免信托被专家精英主导。二是决策机制,重大事项(如接纳新类型的数据使用者)需经董事会 2/3 多数通过,并需向全体成员公示。三是收益分配,数据使用产生的经济收益,扣除信托运营成本后,应按照“贡献度”原则分配,贡献度可由数据被调用的频次、数据质量等指标综合计算^[47]。李智、王苗苗的研究进一步指出,个人数据信托可在数据收集和流转阶段对数据资源与数据产品作出区分,厘清各阶段数据增值的劳动贡献,对个人数据的收益作出“事先协商+法定补充”的复合型分配设计,并以证券化的方式助力数据要素从资源到资产的实现^[48]。关于贡献度的具体计算,可借鉴合作博弈中的 Shapley 值方法,或基于数据稀缺性、准确性、完整性等维度的综合评价体系,这需要后续研究进一步细化^[49]。四是监督机制,信托运作应接受独立第三方审计,审计报告向成员公开。

(2)数字公地。对于具有重大公共价值的基础性健康数据资源,如经过匿名化处理的全民健康数据统计库、开源的数字孪生器官模型等,应确立其“数字公地”地位。由一个多元利益相关者委员会(包括政府、学界、产业界、公众代表)共同制定使用规则,确保其在严格保护隐私的前提下,向符合公共利益的研发活动平等、低成本开放,防止其被私有化垄断。

在制度设计细节上,数字公地的治理可借鉴 Ostrom 的八项原则:①清晰界定边界(哪些数据属于公地);②使用规则与当地条件相适应(如不同疾病的匿名数据可有不同访问权限);③集体选择安排(使用者参与规则制定);④监督机制(对数据滥用行为的监督);⑤分级制裁(根据违规程度设置不同处罚);⑥冲突解决机制(设立申诉渠道);⑦对组织权的认可(公地治理机构的合法性);⑧嵌套式企业(多层治理机构之间的协调)。

(3)参与式审计与算法影响评估。建立制度化的公众参与渠道。在算法部署前,强制进行有社群代表参与的“算法影响评估”,预测其对不同群体可能造成的公平性、隐私性影响。在运行中,定期由

公民陪审团、倡导组织或专业审计机构对关键算法进行“参与式审计”,审查其输入数据、逻辑与输出结果是否存在偏见。这使技术问责从封闭的专家评议走向开放的社会监督。

算法影响评估已在部分国家获得制度化实践。加拿大政府于 2019 年生效的《自动化决策指令》要求所有联邦机构在部署自动化决策系统前,必须完成“算法影响评估工具”(Algorithmic Impact Assessment, AIA)的问卷测评,以识别风险等级并采取相应缓解措施。该工具涵盖系统影响范围、数据来源、决策可逆性、公平性考量等多个维度,成为全球首个将算法影响评估纳入法定程序的先例。在欧盟层面,2024 年生效的《人工智能法案》将情感识别、生物特征分类等系统列为高风险,要求部署前进行符合性评估,并正在制定关于 AI 透明度义务的实施指南与实践准则。这些制度实践为元宇宙医疗中的算法审计提供了可借鉴的方法论框架。

5.2.3 宏观(社会/法律层)重塑法律根基与全球协作 微观与中观的创新需要宏观法律与社会共识的支撑与引领。

(1)确立“数字人格权”的法律地位。应在民法典或专门数字法典中,承认自然人在数字环境中享有与其生物人格不可分割的“数字人格权”。

这一权利与传统隐私权、个人信息权存在根本区别。隐私权侧重防范私生活被侵扰,个人信息权聚焦于信息处理过程中的控制与透明,而数字人格权则直接指向数字空间中“人”的完整性、自主性与尊严^[1]。其内涵至少包括三个维度:其一,对生物识别数据(如脑电波、步态、心率变异性)的自主控制,防止其被用于身份伪造或行为操纵;其二,对“数字化身”(Avatar)完整性与尊严的保护,禁止对他人的数字孪生体进行扭曲、侮辱或未经授权的商业化利用(例如将患者的虚拟形象用于广告);其三,对 AI 生成或篡改健康数据的防御权,当深度伪造技术可能生成虚假的医疗记录或诊疗影像时,数字人格权赋予个体要求验证数据来源、更正错误信息、删除伪造内容的权利。这为应对元宇宙中“身份混淆”“数据污染”“算法操纵”等新型风险提供了法律根基。

在权利具体化方面,数字人格权在立法层面需明确以下权能:①访问权,有权了解自身哪些数据被采集、存储于何处、用于何种目的;②更正权,有权要求更正错误的数字身份信息;③删除权,有权要求删除非必要的数字痕迹;④可携带权,有权将自身数字人格数据在不同平台间转移;⑤反对权,

有权反对将其数字人格用于商业目的(如广告投放);⑥继承权,数字人格在主体去世后的处理方式。关于继承问题,可借鉴《民法典》对死者人格利益保护的规定,探索“近亲属同意+死者生前意愿优先”的处理模式,在尊重死者生前意愿与保护近亲属情感利益之间寻求平衡。

(2)对垄断平台实施“数字守门人”特别监管与公共效用监管。借鉴欧盟《数字市场法》思路,将掌控元宇宙核心基础设施与数据的超大型平台认定为“数字守门人”,对其施加特别义务:包括强制数据互操作、禁止自我优待、开放核心服务接口等。同时,鉴于健康数据的极端敏感性,可考虑对其实施类似公用事业的“公共效用监管”,要求其以合理、无歧视的条件提供基础性健康数据服务,并接受在价格、数据访问权等方面的更严格监管。

(3)推动全球治理的最低标准协作。健康无国界,数据流动亦无国界。应通过世界卫生组织、经济合作与发展组织等平台,推动形成全球性的“元宇宙健康数据治理最低标准”,在个人同意、数据安全、算法公平、跨境传输等核心议题上达成基本共识。这并非追求统一法,而是建立一种基于“共同但有区别责任”的协作框架,防止“监管洼地”的出现导致全球健康风险。

5.3 新范式下从分野到共生的学科角色重构 这一跨学科范式的成功,最终依赖于计算机科学与社会科学的角色从分离走向深度共生。跨学科研究强调,应对数字技术的复杂社会挑战需要超越单一学科视角,通过整合不同科学视角的见解来培养新一代公共部门专业人员^[50]。

计算机科学家需要从纯工具构建者转向具备社会视野的系统架构师。他们不能仅满足于实现功能与提升效率,而必须将公平、问责、透明、隐私等社会价值作为核心设计约束。这意味着需要学习基本的伦理与法律框架,在系统设计之初就与社会科学家合作,思考技术选择可能引发的社会后果,并主动将治理逻辑(如可审计性、可解释性)编码到系统架构之中。

社会科学家需要从外部批判者转向共同设计者与效果评估者。他们需要超越事后的理论批判,更早、更深入地介入技术生命周期。作为“共同设计者”,他们应参与制定技术需求、设计用户研究、共同草拟治理章程;作为“效果评估者”,他们应主导算法影响评估和社会接受度研究,运用定性与定量方法,持续监测和评估技术部署后的真实社会影响,为迭代优化提供证据。

这种角色重构的目标,是培育一批真正的“跨学科桥梁人才”,他们能够理解技术的逻辑与社会的复杂,从而在元宇宙这片新疆域上,共同设计出既能释放巨大技术潜力,又能坚守人类尊严与公正的治理体系。这不仅是应对健康数据挑战的必需,更是为一个日益深度数字化的社会培育跨学科治理能力的重要基础。

6 结 论

元宇宙的兴起,标志着人类交互与认知正经历一场从物理原子世界向数字比特世界的深刻迁徙。在这一迁徙中,医疗健康,这一最关乎人类本体安全与尊严的领域,也无可避免地迈入虚拟与现实交织的新边疆。然而,本研究的核心论点是:这一技术跃迁所带来的,远不止于诊疗效率的提升或服务形式的创新,它更引发了一场关于生命数据控制权的根本性治理危机。本文通过层层剖析,旨在揭示这场危机的本质,批判应对方案的局限,并最终指向一个更具韧性、公平与智慧的治理未来。

6.1 研究总结 本研究始于一个核心观察:元宇宙中的健康数据,其性质已从传统的结构化、离散化记录,嬗变为连续、多模态、高维的情景化“数字生命流”。这一本体论层面的根本性变革,使得奠基于一工业时代与早期互联网思维的治理范式陷入系统性失效。

本文识别并论证了构成这场危机内核的“双重运动”:一方面是数据的液化化,即数据以前所未有的速度和规模挣脱传统的制度与物理边界,无界复制、聚合重组、目的漂移,导致个体知情同意与隐私边界趋于崩塌;另一方面则是资本的再疆域化,即大型平台凭借技术架构、协议标准与市场权力,对流动的数据流进行捕获、圈占与定价,构建起封闭的“数字围栏”,形成了健康数据生态的私有化与新型“技术封建”关系,平台与用户形成的依附性权力结构^[18]。这两股力量并非对立,而是辩证统一:液化化为再疆域化提供了掠夺的原料,而再疆域化则试图为无序的流动赋予私有化的秩序,其结果是个体自主权遭受双重侵蚀,集体福祉面临系统性风险。

面对这一困境,当前的应对方案呈现出显著的局限性。以联邦学习、区块链、零知识证明、可信执行环境为代表的技术乐观主义回应,虽在工具层面提供了隐私保护和权属追溯的精致方案,但其“去中心化”承诺在权力维度沦为技术专家垄断或硬件巨头掌控的幻象(ZKP的可信初始化由少数精英主

导,TEE的硬件层被芯片寡头垄断);在公平维度因高昂算力成本与认知门槛制造新的“隐私税”,将弱势群体排斥在外;在价值维度以“代码即法律”的逻辑替代必要的社会价值商谈,导致规则刚性无法应对伦理复杂性;在责任维度引发责任主体模糊化的“问责黑洞”,使受害者难以寻求救济;在主权维度则因硬件层垄断引发供应链依附风险,形成从软件到硬件的“双重殖民”^[9]。同时,以GDPR为代表的法律监管模式在应对海量情景化数据时显露出原则滞后、权利行使困难、合规成本高企反而巩固大平台垄断的“合规悖论”;而依赖市场自我调节的逻辑,则必然走向数据垄断与商品化,其负外部性(公共利益受损、健康不平等、人的主体性侵蚀)无法通过市场机制内部化。

6.2 主要贡献 本研究的主要贡献在于,超越了对元宇宙健康数据风险的现象描述或单一学科的技术性回应,提供了一个融合技术批判与政治经济分析的综合性理论框架。

(1)理论框架的建构。本文将齐格蒙特·鲍曼的“液态现代性”理论与“数据殖民主义”“平台资本主义”“技术封建主义”等批判政治经济学视角相结合,创造性地提出了“液化化”与“再疆域化”这一对核心分析透镜。相较于“平台资本主义”聚焦于平台作为新的商业模式、“监控资本主义”关注行为数据的剩余价值剥削,这一框架揭示了更根本的结构性质变:数据的存在方式本身正在从“固态”变为“液态”,而平台的权力运作也从“占有”转向“组织流动”。这一框架不仅深刻揭示了元宇宙健康数据动态的本质矛盾,流动与控制的辩证共生,也为理解更广泛的数字时代资源与权力重组提供了有力的分析工具。

(2)跨学科的深度批判。研究对主流技术方案进行了超越工程学视角的社会科学批判,揭示了技术治理在权力、公平、价值、责任、主权五个维度的内在限度,从软件层的密码学协议(ZKP的可信初始化)到硬件层的可信执行环境(芯片寡头垄断、供应链主权侵蚀),技术方案以其独特的方式复制乃至深化了权力集中的悖论。同时,对法律与市场治理模式的困境分析,指出了单纯依靠国家管控或市场自发秩序在应对新型数字社会形态时的结构性缺陷,尤其是法律合规成本意外巩固大平台垄断的“合规悖论”,以及数据商品化对医疗伦理的根本背离。这种多维批判为寻找新路径扫清了认识障碍。

(3)范式转型方向的系统性勾勒。本文最大的建设性贡献在于,明确提出了从旧有范式向“国家

—市场—社会”多元协同共治的第三代治理范式转型的必然性,并系统性地构建了一个覆盖理念、技术、制度、法律多层次的治理新蓝图。在理念层面,完成了从“数据所有权”到“数据关系权/数据管理权”、从“个人隐私保护”到“集体数字福祉与生态系统健康”的双重升维;在制度层面,创新性地设计了数据信托、数字公地、参与式审计等中观治理机制,使第四章提出的“国家—市场—社会”三元转型方向得以具体化,并引入英国ODI试点、加拿大算法影响评估工具、FHIR互操作标准等实践案例作为可行性参照;在宏观层面,提出了“数字人格权”的法律确权、数字守门人特别监管、全球最低标准协作等制度构想。这一蓝图为政策制定者、产业实践者与学术界提供了清晰且可行的行动路线图。

(4)学科角色的重构倡议。本文首次在元宇宙健康数据治理语境下,明确提出计算机科学家需从工具构建者转向具备社会视野的系统架构师,社会科学家需从外部批判者转向共同设计者与效果评估者,并倡导培育“跨学科桥梁人才”^[50]。这一倡议为治理范式的落地提供了主体性基础。

6.3 研究局限与未来展望 作为一项前瞻性的理论探索,本研究亦存在其局限,这些局限恰恰指明了未来研究富有潜力的方向。本节将从理论、方法与制度3个层面反思研究不足,并在此基础上提出对应的深化路径。

(1)理论层面框架开放性与动态性的局限。元宇宙技术本身仍在快速迭代,人工智能生成内容、脑机接口、空间计算等新技术的融合将不断提出新的伦理与治理挑战。本文提出的“液化化—再疆域化”框架虽力求涵盖从软件层到硬件层的权力结构,但其解释力仍需在技术演进中持续检验与更新。如何在保持框架稳定性的同时赋予其足够的开放性,以容纳未来可能出现的新型数据形态与治理问题,是本研究未能完全解决的难题。

(2)方法层面实证检验缺失的局限。本研究采用理论整合与框架构建的方法,未进行系统的实证检验。这一选择有助于在概念层面构建完整的治理图景,但也使部分论断缺乏经验支撑。例如,5.2.2节提出的数据信托制度设计,其“四要素”机制(受托人构成、决策机制、收益分配、监督机制)的可行性尚需通过试点项目验证;3.2节对技术成本的批判,其具体数值(如ZKP计算开销、TEE硬件适配成本)需结合真实部署环境测算;5.1节提出的“数字健康素养”培育路径,其实际效果有待通过干预研究评估。理论推演固然能够揭示结构性矛盾,但无法

替代经验证据对制度设计的校准作用。

(3)制度层面文化适应性与落地可行性悬置的局限。本文提出的治理范式具有普适性抱负,但具体制度的实践必然受到不同国家和地区文化传统、法律体系、医疗体制与社会结构的深刻影响。例如,“数据信托”的法律主体地位、受托人的权责界定、运作模式等,需要在英美法系与大陆法系的不同语境下进行细致的设计与比较研究;“数字人格权”的确立方式,在大陆法系国家可通过民法典修订,在普通法系国家则可能依赖判例积累;“参与式审计”机制的有效运作,高度依赖公民社会的成熟程度与制度信任基础。本文对这些“地方性知识”的讨论仍停留在原则层面,未能深入不同法域的制度细节。

综上所述,本文的理论建构只是一个起点。真正有效的治理范式,需要在与经验世界的持续对话中接受检验、修正与丰富。唯有理论、方法与制度实践的协同演进,才能在数据的“液态”河流与权力的“固态”围栏之间,开辟出真正可行的第三条道路。

6.4 结语 元宇宙中的健康数据治理,绝非一个单纯的技术管理或法律合规问题。它是一场发生在数字新大陆上的、关于权力、正义与人类尊严的前沿谈判。本文揭示了旧地图无法指引新航路的困境,批判了仅靠修补船帆而非重新设计航向的努力,并尝试绘制一幅需要多元舵手共同协作的新航海图。这幅图景以“数据关系权”与“集体数字福祉”为罗盘,以微观技术嵌入、中观制度创新、宏观法律重塑为三层甲板,以计算机科学家与社会科学家的深度共生为共同划桨者。这幅图景或许尚不完美,但其核心指向是明确的:我们必须在数据的“液态”河流与资本的“固态”围栏之间,开辟第三条道路,一条以数据关系权为基石、以集体数字福祉为指引、以三层治理框架为支撑、以跨学科作为动力的数字健康治理新路。这条道路的开拓,将是技术专家、社会科学家、政策制定者与每一位公民共同承担的、至关重要的时代使命。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 高承实,选题,撰写、修改论文;程元骏:选题,修改论文。

参考文献

[1] Lupton D. The quantified self: a sociology of self-tracking[M].

Cambridge: Polity Press, 2016.

- [2] Ruckenstein M, Schüll N D. The datafication of health[J]. *Annu Rev Anthropol*, 2017, 46: 261-278.
- [3] Das B C, Ahmad M, et al. Spatial data governance for healthcare metaverse[M]. *Advances in Healthcare Information Systems*. Hershey: IGI Global, 2025.
- [4] Kostick-Quenet K, Rahimzadeh V. Ethical considerations for health data governance in the metaverse[J]. *Journal of Medical Ethics*, 2023, 49(2): 87-92.
- [5] 何之行, 廖 貞. AI 個資爭議在英國與歐盟之經驗: 以 Google DeepMind 一案為例[J]. *月旦法學雜誌*, 2020, 302: 127-156.
- [6] Zuboff S. The age of surveillance capitalism: the fight for a human future at the new frontier of power[M]. New York: PublicAffairs, 2019.
- [7] Srnicek N. Platform capitalism[M]. Cambridge: Polity Press, 2017.
- [8] Cohen J E. Between truth and power: the legal constructions of informational capitalism[M]. Oxford: Oxford University Press, 2019.
- [9] Couldry N, Mejias U A. The costs of connection: how data is colonizing human life and appropriating it for capitalism[M]. Stanford: Stanford University Press, 2019.
- [10] Shaw J, Sekalala S. Health data justice: building new norms for health data governance[J]. *npj Digital Medicine*, 2023, 6(1): 1-4.
- [11] Hormazábal C, Bauman Z. (2000). liquid modernity. Cambridge: polity press[J]. *Athenea Digit Rev De Pensamiento E Investig Soc*, 2001, 1.
- [12] Deleuze G, Guattari F. A thousand plateaus: capitalism and schizophrenia [M]. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1987.
- [13] Van Dijck J, Poell T, De Waal M. The platform society: Public values in a connective world[M]. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [14] Gillespie T. The politics of ‘platforms’ [J]. *New Media & Society*, 2010, 12(3): 347-364.
Gillespie T. The politics of ‘platforms’ [J]. *New Medium Soc*, 2010, 12(3): 347-364.
- [15] Couldry N, Hepp A. The mediated construction of reality[M]. Cambridge: Polity Press, 2016.
- [16] Van Dijck J. Datafication, dataism and dataveillance: Big Data between scientific paradigm and ideology [J]. *Surveillance & Society*, 2014, 12(2): 197-208.
- [17] Nissenbaum H. Privacy in context: Technology, policy, and the integrity of social life[M]. Stanford: Stanford University Press, 2010.
- [18] Rikap C. Capitalism as Usual Implications of Digital Intellectual Monopolies [J]. *New Left Review*, 2023, 139: 145-160.
- [19] Gentry C. Fully homomorphic encryption using ideal lattices [C]. *Proceedings of the 41st Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. New York: ACM, 2009: 169-178.

- [20] Goldwasser S, Micali S, Rackoff C. The knowledge complexity of interactive proof systems [J]. *SIAM Journal on Computing*, 1989, 18(1): 186–208.
- [21] 李 耕, 刘建伟, 张宗洋. 大规模监视下安全性定义再分析 [J]. *密码学报*, 2020, 7(3): 326–341.
- [22] Blum M, Feldman P, Micali S. Non-interactive zero-knowledge and its applications [C]. *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. New York: ACM, 1988: 103–112.
- [23] Ben-Sasson E, Chiesa A, Tromer E, et al. Succinct non-interactive zero knowledge for a von Neumann architecture [C]. *Proceedings of the 23rd USENIX Security Symposium*. Berkeley: USENIX Association, 2014: 781–796.
- [24] Swanson T. Consensus-as-a-service: a brief report on the emergence of permissioned distributed ledger systems [R/OL]. (2015-04-06). <https://www.ofnumbers.com/wp-content/uploads/2015/04/Permissioned-distributed-ledgers.pdf>.
- [25] Costan V, Devadas S. Intel SGX explained [J]. *IACR Cryptology ePrint Archive*, 2016, 2016(86): 1–118.
- [26] Luevano L S, Frey D. Analyzing trusted execution environments: comparing commercial implementations and diverse applications [R/OL]. HAL Preprint, 2024. <https://inria.hal.science/hal-04393667>.
- [27] 冯登国, 刘敬彬, 秦 宇, 等. 创新发展中的可信计算理论与技术 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(8): 1127–1147.
- [28] 胡 凌. “分享经济”的法律规制 [J]. *文化纵横*, 2015(4): 42–49.
- [29] David P A. Clio and the economics of QWERTY [J]. *The American Economic Review*, 1985, 75(2): 332–337.
- [30] Gao Y, Quan G, Homs S, et al. Secure and efficient general matrix multiplication on cloud using homomorphic encryption [J]. *J Supercomput*, 2024, 80(18): 26394–26434.
- [31] Ben-Sasson E, Bentov I, Horesh Y, et al. Scalable, transparent, and post-quantum secure computational integrity [J]. *IACR Cryptology ePrint Archive*, 2018, 2018(46): 1–28.
- [32] 刘 睿, 陈晓峰. 联邦学习安全与隐私保护研究综述 [J]. *软件学报*, 2022, 33(3): 924–945.
- [33] Lessig L. Code and other laws of cyberspace [M]. New York: Basic Books, 1999.
- [34] 郑 戈. 算法的法律与法律的算法 [J]. *中国法律评论*, 2018(2): 66–85.
- [35] Zhu L, Liu Z, Han S. Deep leakage from gradients [C]. *Advances in Neural Information Processing Systems 32*. Red Hook: Curran Associates, 2019: 14774–14784.
- [36] Fan M, Wang F, Chen C, Zhou J. Boosting gradient leakage attacks: data reconstruction in realistic FL settings [C]. *Proceedings of the 34th USENIX Security Symposium*. Berkeley: USENIX Association, 2025. (Accepted) arXiv preprint arXiv:2506.08435, 2025.
- [37] Solove D J. Introduction: privacy self-management and the consent dilemma [J]. *Harvard Law Review*, 2013, 126(7): 1880–1903.
- [38] 殷继国. 大数据市场反垄断规制的理论逻辑与基本路径 [J]. *政治与法律*, 2019(10): 134–148.
- [39] 袁 康, 赵宛如. 跨境数据流动中的管辖权冲突及其协调 [J]. *重庆邮电大学学报(社会科学版)*, 2024(2).
- [40] Ostrom E. Governing the commons: the evolution of institutions for collective action [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [41] Obermeyer Z, Powers B, Vogeli C, et al. Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations [J]. *Science*, 2019, 366(6464): 447–453.
- [42] Jessop B. The rise of governance and the risks of failure: the case of economic development [J]. *Int Social Sci J*, 1998, 50(155): 29–45.
- [43] 陈 磊, 郑 森. 数据信托中“信任”的实现——以自决性个人信息权利的实现与表达为核心 [J]. *学术交流*, 2025(7): 82–95.
- [44] 申卫星. 数字权利体系再造: 迈向隐私、信息与数据的差序格局 [J]. *政法论坛*, 2022(3): 89–102.
- [45] Powell D, Asad L, Zavaglia E, et al. Promoting digital health data literacy: the datum project [J]. *JMIR Form Res*, 2025, 9: e60832.
- [46] 辛 苑, 田新民. 第三方数据信托模式在数据共享中的作用机理与实现路径 [J]. *江西社会科学*, 2025(2).
- [47] 邢亚楠, 李跃文. 数字经济视域下数据信托参与主体利益分配的合作博弈分析 [J]. *时代经贸*, 2025(11): 177–181.
- [48] 李 智, 王苗苗. 数据信托: 个人数据交易与收益分配实现机制 [J]. *学术交流*, 2025(7): 66–81.
- [49] 李 智, 张津瑶. 数据信托本土化的现实困境与路径构建 [J]. *学术交流*, 2023(7).
- [50] Jabbouri R, Issa H, Dakroub R, et al. Unlocking immersive education: the emergence of the meta-governance framework [J]. *Information Technology & People*, 2025, 38(4): 2069 – 2093.

引用本文

高承实, 程元骏. 液态生命与数字围栏: 元宇宙健康数据的治理困境与范式重构 [J]. *元宇宙医学*, 2026, 3(1): 16–37.

Gao C S, Cheng Y J. Liquid life and digital fence: governance dilemma and paradigm reconstruction of metaverse health data [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(1): 16–37.

AI+数字病理与分子检测



白春学^{1,2,3,4*}, 纪元^{4,5}

1. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032

2. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032

3. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

4. 复旦附属中山医院 AI+肺癌防治中心, 上海 200032

5. 复旦附属中山医院分子病理中心, 上海 200032

[摘要] 随着肺癌精准医学不断发展, 尤其是非小细胞肺癌(NSCLC)进入以病理亚型、驱动基因、免疫生物标志物及微小残留病灶(MRD)共同决定治疗路径的新时代, 传统仅依赖形态学阅片的病理诊断模式已难以满足临床需求。AI与数字病理的兴起, 使全视野数字切片(WSI)从静态玻片转变为可计算、可共享、可追溯的数据载体, 并推动肿瘤区域识别、组织学分型、肿瘤细胞比例评估、PD-L1定量判读、肿瘤微环境分析及潜在分子表型预测等任务进入智能化阶段。与此同时, 驱动基因检测由少数靶点扩展至多基因组, 液体活检和ctDNA为组织不足病例提供分子分型补充, MRD监测则推动肺癌管理由治疗前单次分层走向围治疗期动态风险评估。本文系统梳理AI辅助病理切片判读、驱动基因与PD-L1/TMB/ctDNA/MRD整合、数字病理与分子分型联动、精准医学场景下的数据标准化, 以及外部验证不足、平台差异、可解释性、法规治理和系统割裂等现实挑战。简言之, AI+数字病理与分子检测的核心价值, 不仅在于提升单一检测环节的效率与一致性, 更在于构建面向肺癌全流程管理的智能伴随诊断体系, 实现病理、分子、液体活检、MRD与临床决策的连续耦合。未来, 该领域将从单任务模型迈向多模态基础模型, 从静态伴随诊断迈向动态伴随诊断, 并在平台化、区域化和生态化建设中, 与医学GPT、数字医学专家及BAIMGPT等理念深度融合, 推动肺癌精准诊疗进入数据融合驱动的新阶段。

[关键词] 肺癌; 数字病理; 人工智能; 分子检测; 伴随诊断

[中图分类号] R 446.8 **[文献标志码]** A

AI-enabled digital pathology and molecular testing

Bai Chunxue^{1,2,3,4*}, Ji Yuan^{4,5}

1. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

2. Shanghai Respiratory IoT Medical Engineering Technology Research Center, Shanghai 200032, China

3. Shanghai Institute of Respiratory Diseases, Shanghai 200032, China

4. Fudan University Affiliated Zhongshan Hospital AI+Lung Cancer Prevention and Treatment Center, Shanghai 200032, China

5. Molecular Pathology Center, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

[Abstract] With the rapid evolution of precision oncology, particularly in non-small cell lung cancer (NSCLC), therapeutic decision-making is increasingly shaped by histologic subtype, driver alterations, immune biomarkers, and minimal residual disease (MRD). Under this paradigm, conventional pathology based solely on morphologic interpretation is no longer sufficient for modern clinical needs. The integration of artificial intelligence (AI) and digital pathology has transformed whole-slide imaging (WSI) from static glass slides into computable, sharable, and traceable data objects, enabling automated tumor region detection, histologic classification, tumor cell proportion estimation, PD-L1 quantification, tumor microenvironment analysis, and even prediction of potential molecular phenotypes. In parallel, molecular testing has expanded from a limited number of actionable genes to broad multigene panels, while liquid biopsy and circulating tumor DNA (ctDNA) provide complementary options for molecular profiling when tissue is limited. MRD monitoring further shifts lung cancer management from one-time pretreatment stratification toward dynamic peri-treatment risk assessment. This review systematically summarizes the roles of AI-assisted pathology interpretation, the integration

[收稿日期] 2026-02-25

[接受日期] 2026-03-05

[基金项目] 四大慢病重大专项(2024ZD0529300). Supported by Noncommunicable Chronic Diseases-National Science and Technology Major Project (2024ZD0529300).

[作者简介] 白春学, 博士, 主任医师、教授。

*通信作者(Corresponding author). E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

of driver mutations with PD-L1, TMB, ctDNA and MRD, the coupling of digital pathology with molecular subtyping, the importance of data standardization in precision medicine, and the major barriers to clinical translation, including insufficient external validation, platform heterogeneity, limited interpretability, regulatory concerns, and fragmented workflows. We argue that the true value of AI-enabled digital pathology and molecular testing lies not merely in improving the accuracy or efficiency of individual diagnostic steps, but in establishing an intelligent companion diagnostic system spanning the entire continuum of lung cancer care. Such a system can continuously integrate pathology, molecular profiling, liquid biopsy, MRD surveillance, and clinical decision-making. Looking forward, the field is expected to evolve from single-task algorithms to multimodal foundation models, from static companion diagnostics to dynamic companion diagnostics, and from isolated laboratory tools to regionalized, platform-based intelligent ecosystems, ultimately promoting data-driven precision lung cancer care.

[Key Words] lung cancer; digital pathology; artificial intelligence; molecular testing; companion diagnostics

肺癌, 尤其非小细胞肺癌(non-small cell lung cancer, NSCLC), 已经进入由病理亚型、驱动基因、免疫生物标志物以及微小残留病灶(minimal residual disease, MRD)共同塑造治疗路径的新时代^[1-6]。传统病理诊断的核心任务主要是确认肿瘤性质、细胞类型和分化程度;而在精准医学框架下, 病理科还要为治疗决策制定提供依据^[2-9]。这意味着传统显微镜下的形态学阅片, 已无法单独承担现代肺癌伴随诊断的全部任务。

数字病理和人工智能(artificial intelligence, AI)的引入, 正在改变这一局面^[1,7-12]。全视野数字切片(whole slide imaging, WSI)使病理玻片从静态图像转变为可存储、可共享、可量化、可计算、可追溯的数据对象;深度学习则进一步将肿瘤区域识别、组织学分型、肿瘤细胞比例估算、程序性死亡配体 1(programmed death-ligand 1, PD-L1)表达定量、免疫微环境解析及潜在分子表型预测纳入统一的计算框架^[7-15]。与此同时, 驱动基因检测已由 EGFR、ALK 等少数位点拓展至多基因组;液体活检与 ctDNA 分析使组织不足或难以重复活检的病例获得分子分型机会;MRD 检测则推动肺癌管理从“治疗前一次性分层”走向“围治疗期动态风险管理”^[3-6,16-21]。因此, 肺癌诊断体系正在从“病理+单项检测”的串联模式, 升级为“数字病理—分子检测—动态监测—治疗决策”相互耦合的多模态协同模式。

这一转型并非单纯的技术叠加, 而是诊疗逻辑的系统性重构:(1)诊断方面, 数字病理为高质量样本选择、肿瘤富集区域标注、免疫组化判读一致性提升和远程协作提供了坚实基础^[1,7,10-11]。(2)分型方面, 分子检测与形态学信息的联动, 正在推动“形态—分子”一体化分型模式的形成^[2-4,13-15]。(3)治疗方面, PD-L1、肿瘤突变负荷(tumor mutational burden, TMB)、驱动基因、融合、共突变格局及 ctDNA/MRD 信号共同塑造对靶向、免疫、围术期辅助治疗和复

发监测的综合判断^[5-6,16-19]。(4)体系方面, 标准化、互操作性、质控、监管与数据治理成为技术能否安全落地的关键环节^[1,10-12,20-23]。AI+数字病理与分子检测的价值, 不仅在于提高某一环节的准确率, 更在于推动肺癌伴随诊断从局部优化迈向全流程再设计。

数字化、智能化与医学新质生产力的融合, 也为我国肺癌精准诊疗提供了更大想象空间。白春学教授围绕元宇宙医学、医学 GPT、数字人医学专家以及 BAIMGPT 的系列论述, 强调医学知识、临床流程、智能算法、患者管理和医学教育之间应形成数据驱动的闭环生态^[24]。将这一思想映射到肺癌领域, AI 不应仅是单个模型或单点软件, 而应成为贯穿病理判读、分子检测、风险评估、随访管理与患者沟通的“数字医学专家底座”。这使数字病理与分子检测联动, 不仅具有方法学价值, 也具有未来平台化、体系化建设意义^[24]。基于此, 系统梳理该领域的最新进展、临床证据、现实挑战与未来方向, 具有突出的学术价值和实践意义。

本文拟围绕 5 个相互关联的核心问题展开:(1) AI 提升肺癌病理切片判读的一致性、效率与定量能力的原理及其临床价值边界;(2)多模态信息与病理形态学的有机整合方法;(3)数字病理在分子分型前筛查、样本优选和伴随诊断增强器中的应用潜力;(4)在精准医学场景下, 数据标准化、跨平台互操作、质量管理与法规治理的落地;(5)临床转化的主要瓶颈及其突破点。这些问题共同指向一个更本质的目标:建立面向肺癌精准诊疗的、动态演进的智能伴随诊断体系。

1 AI 辅助病理切片判读

1.1 从传统病理到数字病理是肺癌病理工作流的重构 数字病理首先改变的不是诊断结论本身, 而是诊断生成的工作流^[1,7,10-11]。传统模式下, 肺癌病理诊断依赖玻片制备、显微镜阅片、人工估算肿瘤细

胞比例以及基于经验的辅助免疫组化选择。该流程在小样本、异质性高的肺癌病例中尤其容易受到阅片者经验、观察习惯和工作负荷的影响。WSI技术使全部切片高分辨率数字化之后,病理医师可以在统一的数字平台上完成阅片、测量、标注、会诊、复核和归档,AI则进一步介入肿瘤区定位、关键区域提示、坏死与炎细胞区识别、肿瘤细胞含量估算等步骤,从而把病理 workflow 由“视觉经验驱动”推向“经验+计算协同驱动”^[1,7-12]。

这一转变在肺癌领域尤其具有现实意义。肺癌经常以穿刺、支气管镜、EBUS-TBNA、经皮活检等方式获得有限组织,小样本中既要完成组织学分型,又要兼顾IHC、DNA/RNA检测甚至未来的复检需求,因此任何不必要的切片浪费、肿瘤富集不足或送检判断失误,都可能直接影响后续治疗决策^[2-4,8-9]。AI辅助下的数字病理,可通过自动圈定肿瘤富集区、提示坏死及低细胞量区域、辅助估算肿瘤细胞比例,为分子检测样本选择提供更客观依据^[8,13-14]。从这个意义上说,数字病理并非病理科内部的“技术升级”,而是精准医疗时代肺癌诊断前端的关键基础设施。

当然,数字病理的临床应用必须建立在严格验证之上。美国病理学家学会指南^[1]明确指出,数字病理系统的引入不是简单的设备采购,而应包括扫描质量、显示设备、病例类型覆盖、阅片流程重建、用户培训和持续质量监测等完整体系。因此,肺癌数字病理工作的核心,不只是“能否扫描”,而是“能否在真实诊疗环境中稳定、等效甚至优于传统模式地支持诊断与分子检测决策”。这也是后续所有AI病理应用得以成立的前提。

1.2 AI在肺癌病理形态识别中的核心任务 AI在肺癌数字病理中的首要价值,在于把原本依赖主观经验的形态学识别任务转化为可重复、可训练、可评估的计算任务^[7-15]。目前较成熟的应用主要集中在4个层面。

(1)肿瘤区域识别与组织分割。肺癌切片往往同时包含肿瘤、坏死、出血、炎细胞浸润、纤维化间质和正常肺组织,不同区域对诊断和分子检测的贡献并不相同。深度学习分割模型可以快速标注肿瘤主体区、非肿瘤区及低质量区,从而为后续的肿瘤含量评估、组织学分析和感兴趣区域选择提供基础^[7-8,13]。这在穿刺活检、细支气管镜活检等有限样本中尤其有意义。

(2)组织学分型与亚型识别。肺腺癌内部存在贴壁、腺泡、乳头、微乳头、实体等不同生长模式,这

些亚型与侵袭性、预后、复发风险和潜在分子特征相关^[2,7,13]。AI能够在WSI层面对不同结构成分进行定量识别,避免传统病理报告中过于笼统或主观的描述。对于鳞癌、小细胞癌、大细胞神经内分泌癌等类型,AI还可提供一定程度的分类支持,尤其适用于复杂混合成分和边界模糊病例的初筛^[7-8,15]。

(3)肿瘤细胞计数与比例估算。肿瘤细胞比例是决定NGS、PCR或RNA检测成败的重要前提^[3-4,8-9]。临床实践中,不少分子检测失败并非技术平台本身问题,而是源于前端样本肿瘤富集不足。AI可在细胞或区域层级估算肿瘤细胞比例,识别坏死和炎细胞稀释效应,并辅助病理医师选择最适合送检的区域^[8,13-14]。这类功能若能标准化落地,将直接提升分子检测的有效率和时效性。

(4)肿瘤微环境定量分析。肺癌治疗已从单纯以肿瘤细胞为中心,转向关注肿瘤-免疫-基质相互作用的整体生态^[5-6,15,20-21]。AI可从病理图像中提取肿瘤浸润淋巴细胞、间质比例、坏死范围、血管密度、界面形态和空间异质性等指标,为免疫治疗反应预测和预后模型建立提供基础^[15,20-21]。这些指标并不能简单替代分子或免疫组化检测,但能为患者分层提供依据。

AI正在把肺癌病理切片从“描述性形态学材料”转化为“高维组织表型数据源”。这一转变既拓展了病理学的外延,也为数字病理与分子分型联动奠定了方法学基础。

1.3 AI辅助PD-L1等免疫组化判读 PD-L1免疫组化仍是晚期NSCLC免疫治疗决策的重要伴随诊断工具之一^[5-6]。然而,PD-L1判读存在3个结构性难题:(1)不同抗体克隆、平台和染色流程之间的方法学差异;(2)在肿瘤比例评分(tumor proportion score, TPS)为1%、50%等关键阈值时的观察者间差异;(3)标本内异质性、切片质量、肿瘤与免疫细胞混杂、坏死和压挤伪影对判断的干扰^[5-6,9-10]。因此,尽管PD-L1已广泛用于临床,但其稳定性和一致性始终是精准免疫治疗路径中的薄弱环节。

AI在这一领域的作用,主要为定量化、一致性增强和边界病例辅助判读^[9-12]。通过肿瘤细胞检测、膜染色识别和区域筛选,AI有望对TPS进行更标准化的估算,尤其是在阈值附近病例中减少纯人工判读的波动^[9-10],帮助医生在复杂切片中更快识别关键区域并完成半自动定量。对于日常工作负荷较大的中心而言,这种辅助模式更符合临床可行性,也更容易获得病理医师信任。

值得注意的是,AI判读的临床落地高度依赖染

色标准化和平台泛化能力^[5-6, 10-12]。不同实验室前处理、抗体克隆、显色强度和扫描设备存在差异,任何在单中心高性能运行的模型,一旦脱离原始数据分布,均可能出现显著性能衰减^[11-12]。因此,AI辅助PD-L1染色判读的关键不是“算法是否在某项研究中优于人工”,而是“是否经过多平台、多中心、真实世界外部验证,并能在不确定性增加时主动提示人工复核”。这也是今后免疫组化AI产品评价的核心标准之一。

除PD-L1之外,AI在ALK、ROS1、HER2、Ki-67等免疫组化或原位杂交辅助解读方面也有潜力,但在目前肺癌场景中,最具现实价值的仍是PD-L1^[5-6, 9-12]。其原因在于,PD-L1直接连接一线免疫治疗路径,且对判读一致性的要求极高。若数字病理平台能够实现对PD-L1的稳定辅助,实际上就为更广泛的伴随诊断数字化奠定了范式基础。因此,本领域的重点不是无限扩展AI判读对象,而是优先把真正影响临床决策的标志物做深、做稳、做成可验证的工作流。

1.4 AI辅助病理的临床价值与局限 从临床角度看,AI辅助病理的价值主要体现在4个方面:(1)提升效率,尤其在大样本量筛查、重复性计数和病理图像定量方面,可显著减少机械性劳动^[7-10];(2)提升一致性,在肿瘤区识别、肿瘤比例估算和PD-L1等半定量判读任务中,可减少不同阅片者之间的差异^[9-12];(3)前移分子检测准备环节,通过更精准地选择送检区域,提高组织利用效率和检测成功率^[8, 13-14];(4)促进区域协作与远程病理,使基层和专科中心之间共享同一数字平台成为可能^[1, 10-11]。

然而,其局限同样不容忽视:(1)外部验证不足^[11-12]。许多模型在开发集和内部验证集上表现优异,但在跨中心、跨扫描仪、跨染色体系乃至跨种族人群的场景中,性能常出现明显回落。(2)可解释性与责任归属不足。临床医师尤其是病理医师并不排斥AI,但对“黑箱式”结论天然谨慎,尤其是在关系到靶向与免疫治疗路径选择的高风险场景下^[11-12, 24-25]。(3) workflow整合难。若AI输出不能无缝进入实验室信息系统(Laboratory Information System, LIS)/医学影像存档与通信系统(Picture Archiving and Communication System, PACS)/报告系统,反而增加额外操作步骤,其实际价值将被明显削弱^[22-25]。(4)监管与持续维护成本高。AI模型上线后仍需面对数据漂移、版本升级、再验证和质量审计等长期任务^[24-25]。

因此,AI辅助病理不是一项“单点突破技术”,

而是肺癌精准诊断体系中的一类基础能力。只有当算法性能、标准化流程、质控体系、报告整合与临床信任共同到位时,它才能真正从论文走向病理科日常实践。AI辅助病理的评价标准也不应停留在AUC或准确率,而应进一步考察其是否改善检测成功率、缩短周转时间、减少重复取材、提高多学科决策质量,并最终惠及患者预后。这样的评价框架,才符合现代伴随诊断的真实需求。

2 驱动基因、PD-L1、MRD等数据整合

2.1 肺癌伴随诊断的多标志物时代 肺癌伴随诊断已经从单标志物时代全面迈入多标志物协同时代^[2-6]。驱动基因不再仅指EGFR和ALK,而是扩展至ROS1、BRAF、MET14外显子跳跃突变、RET、NTRK、HER2、KRAS G12C等多个可操作靶点。免疫相关标志物也从PD-L1逐步延伸至TMB、免疫微环境特征及共突变格局;此外,ctDNA与MRD又为疗效监测和复发风险评估打开了新空间^[3-6, 16-21]。

这些生物标志物并非相互独立。即使某些驱动基因阳性患者的PD-L1表达较高,其仍未必从一线单纯免疫治疗中获益;某些病理形态特征可能提示特定分子改变或高异质性;ctDNA的阴性并不总能排除组织中存在可操作变异,而MRD阳性则可能在影像学复发前数月提示生物学复发风险^[5-6, 16-19]。因此,真正的伴随诊断不应是各项目结果的机械堆叠,而应是围绕临床问题展开的整合式解释。这也是精准肺癌管理走向成熟的重要标志。

2.2 驱动基因检测推荐组织优先并与液体活检协同 目前,组织样本仍是肺癌分子分型病理检测的基础^[2-4]。其优势在于可同时确认病理类型、评估肿瘤细胞比例并开展DNA/RNA层面的多位点分析。尤其是初诊的晚期NSCLC患者,若条件允许,应优先争取获得足量、高质量的组织样本,以便一次性完成病理分型、免疫组化和NGS检测^[2-4, 8-9]。这不仅能提高检测完整度,也有助于避免因重复活检带来的风险和延误。

然而,现实临床中组织不足、样本耗竭、肿瘤位置不易活检、患者状态差或需尽快启动治疗等情况并不少见^[3-4, 16-17]。在这些场景下,液体活检,尤其ctDNA检测,显示出重要补充价值。其最大优势在于微创、可重复、周转较快,并可在一定程度上反映多灶病变或空间异质性^[16-17]。对于组织难以获取或初次检测失败的患者,ctDNA可为分子分型和耐药机制识别提供宝贵线索;但其结果受肿瘤负荷、释放水平、检测灵敏度等多因素影响,不能简单排除

组织中存在驱动变异。因此,在条件允许时,仍需组织检测加以补充或确认^[16-17]。

数字病理可成为组织检测与液体活检之间的重要桥梁。通过更准确地评估肿瘤细胞含量、圈定富集区域和减少无效切片消耗,AI辅助病理有望提高组织检测的一次成功率;而当病理提示样本极度有限、细胞量不足或异质性显著时,也可更早触发液体活检作为补充路径^[8,13-14,16-17]。因此,“组织优先、液体协同”并不是静态策略,而应成为由病理、分子和临床共同动态决策的工作流。

2.3 PD-L1、TMB与驱动基因检测的时序整合 在晚期NSCLC中,最容易出现临床偏差的情形之一,是过早根据PD-L1高表达直接进入免疫治疗路径,而忽略了驱动基因检测尚未完成^[5-6]。这类问题在临床实践中并不罕见,尤其当患者症状明显、影像进展较快时,医生容易受到“尽快开药”的现实压力影响。然而,对具有可操作驱动变异的患者而言,靶向治疗往往较免疫单药更具优先性和确定性^[2-6]。因此,PD-L1结果应放在完整生物标志物框架中解释,而非作为孤立、唯一的用药入口。

TMB亦存在类似问题。尽管TMB在部分研究中显示出与免疫治疗反应相关,但其检测方法、阈值、panel差异和跨平台一致性仍存在明显挑战^[5-6]。在肺癌临床实践中,TMB尚不足以脱离病理类型、驱动基因状态、PD-L1表达和临床背景独立决定治疗。PD-L1、TMB与驱动基因检测应在正确时序下形成互补:在确诊晚期NSCLC后,尽可能同步启动病理亚型确认、PD-L1检测和广泛分子检测;在结果未齐备前,除非临床迫切需要,否则应避免因单一标志物而过早锁定治疗方向^[2-6]。

从体系设计角度看,这一问题再次说明伴随诊断不是“项目越多越好”,而是“整合越合理越好”。只有将PD-L1、TMB和驱动基因纳入统一报告与统一解释框架,才能真正服务临床,而非制造新的信息碎片化。

2.4 ctDNA与MRD正从晚期分型走向围术期管理 ctDNA的临床角色正在发生根本性变化。它最早主要用于晚期肺癌的驱动基因检测和耐药机制识别,但随着检测灵敏度提高和围术期研究累积,ctDNA正逐步进入术后复发风险评估与MRD监测领域^[16-21]。所谓MRD,本质上是影像学或常规临床评估尚未发现复发时,分子层面已存在残留肿瘤信号的状态。对NSCLC而言,MRD检测的核心价值并不只是预测复发风险,而是帮助识别谁真正需要更积极的辅助治疗、谁需要更密集随访、谁可能适合进

入强化干预试验^[18-21]。

当前证据^[18-21]提示,围术期NSCLC患者ctDNA持续阳性或术后转阳,通常与更高复发风险和更差生存相关。这一结论为MRD进入临床提供了坚实基础。但与此同时,MRD检测尚面临时间点选择、检测深度、panel设计、背景噪音、克隆性造血干扰、阈值设定以及“阳性后如何干预”等关键问题^[18-21]。也就是说,MRD已从概念验证迈向临床应用前站,但距离广泛标准化落地仍需更多前瞻性证据。

值得注意的是,MRD的真正潜力,恰恰在于其可与数字病理和组织分子特征形成互补。病理高危模式、肿瘤浸润特征、淋巴血管侵犯、神经周围浸润、切缘情况、分子共突变格局与ctDNA动态变化若能统一分析,围术期肺癌风险分层将比单一指标更具临床解释力^[15,18-21]。这也意味着,未来肺癌伴随诊断不应局限于初诊时的一次性判断,而应延伸为“初诊—治疗—术后—随访”的全周期动态伴随诊断体系。

2.5 多模态AI整合模型的演变 从信息学角度看,当前多数肺癌诊疗流程仍停留在“多结果并列展示”阶段。病理报告、分子报告、PD-L1报告、ctDNA等报告各一份,最后由MDT在人工阅读后进行整合^[2-6,16-21]。这种方式虽可行,但效率有限,且容易受到报告格式差异、信息遗漏和主观解释差异影响。多模态AI模型的出现,为从“结果并列”走向“联合推断”提供了可能^[14-15,20-21]。

所谓联合推断,并不是简单把多个数据源拼接后输入模型,而是围绕具体临床决策问题进行结构化整合。例如,对晚期腺癌患者,模型可综合HE染色、肿瘤细胞比例、PD-L1水平、驱动基因、共突变背景、基线影像肿瘤负荷以及ctDNA丰度,输出更接近临床逻辑的治疗优先级排序;对围术期患者,则可整合病理高危特征、空间免疫表型、术后ctDNA及既往治疗信息,形成复发风险和辅助治疗建议^[15,18-21]。这种模型如果建立在高质量、可解释、可追溯的标准化数据之上,将显著增强伴随诊断的实际决策价值。

在中国探索中,BAIMGPT所代表的“数字人医学专家GPT”理念具有启发意义^[24]。其关键并非某一个算法指标,而在于把指南、专家知识、病例流程、患者数据和智能问答整合为面向临床场景的知识—决策联合体。若将这一思路落地于肺癌数字病理与分子检测,未来完全可能服务面向肺癌专病中心的智能伴随诊断平台。病理切片数字化后自动完成肿瘤区识别、建议IHC和NGS方案,分子结

果返回后自动更新治疗路径,术后再接入MRD动态监测与随访提醒。这样的系统化能力,才是“AI+数字病理与分子检测”真正值得期待的终局形态。

3 数字病理与分子分型联动

3.1 从形态学分型走向“形态—分子”耦合 现代肺癌病理学正在经历一个重要转折:病理形态不再只是分子检测之前的“前置标签”,而逐渐成为可与分子特征相互映照的高维表型载体^[2,13-15]。传统上,病理医师根据HE染色与有限IHC染色确定组织学分型,再把样本送入分子平台;分子结果随后作为独立模块返回。数字病理和AI的发展,使这一串联流程逐步被更深层的“形态—分子”耦合逻辑所替代。也就是说,病理形态本身可被计算和量化,并与某些基因改变、耐药倾向、微环境状态和预后模式建立统计关联^[13-15]。

这一思路的最大价值在于形成分子检测前的智能预筛查和资源分配机制。对于高负荷病理科和分子平台而言,若AI可根据切片特征识别出高概率驱动变异病例、低肿瘤细胞量风险病例或强异质性病例,即可提前优化检测优先级、样本选择和补充取材策略^[8,13-14]。这将显著提高真实世界精准诊断的效率,尤其在资源分布不均和病例量大的场景中更有意义。

3.2 AI预测驱动基因与耐药相关表型 近年来,多项研究^[13-15]尝试基于HE或IHC染色图像预测EGFR、KRAS、ALK等驱动改变及其相关表型。从理论上讲,这一方向具备合理性。驱动基因改变会通过肿瘤细胞形态、排列模式、核异型、间质反应及微环境改变在组织层面留下“可计算痕迹”。但必须保持学术审慎。迄今为止,大多数相关模型仍更适合作为优先送检和补充证据工具,而不适合作为独立诊断依据^[13-15]。其原因在于,许多分子表型在不同病例中的组织学表现并不特异,且模型跨中心泛化、标准化和临床获益证据尚不足。

AI在耐药相关表型预测方面同样具有潜力。例如,某些病理模式、异质性增强或微环境重塑可能与治疗后分子演化有关。若将基线切片、治疗后复检切片和ctDNA动态信号联合分析,未来有望建立更接近真实肿瘤生物学演进的耐药预警模型^[16-21]。但在当前阶段,这一方向更适合作为研究热点和前瞻平台建设方向,而非直接写入常规临床路径。真正稳妥的策略,是把AI图像预测用于提示“谁更值得优先做更广泛检测”“谁需要警惕阴性假象”以及“谁可能需要更精细地复检与随访”,而非

以图像推断替代标准实验室检测。

3.3 数字病理联动空间组学与肿瘤微环境分层 肺癌精准分型正在从“肿瘤细胞中心论”走向“空间生态系统视角”^[15,20-21]。空间转录组学、空间蛋白组学 and 多重免疫表型技术的发展,使研究者得以在组织原位同时观察肿瘤细胞、免疫细胞、间质成分和血管结构的空間关系。数字病理在此扮演承上启下的角色。一方面,WSI提供宏观组织框架和结构上下文;另一方面,AI可将形态区域与空间组学信号对应起来,从而识别哪些组织微区与免疫逃逸、侵袭、转移或治疗反应更相关^[15,20-21]。

这一方向对于肺癌免疫治疗尤其重要。单纯的PD-L1表达只能反映某一维度的免疫状态,而肿瘤浸润淋巴细胞空间分布、免疫细胞排斥模式、肿瘤—间质界面特征及坏死相关炎症生态,可能共同决定免疫治疗真实反应^[5-6,15,20-21]。因此,未来肺癌的“数字病理+分子检测”联动,不应仅理解为HE染色加NGS,还应包括更丰富的空间生物学信息整合。虽然这一领域距离常规临床还有一定距离,但其方法学意义已十分明确。精准分型的对象将不再只是某个基因或某个TPS数值,而是整个肿瘤空间生态。

3.4 面向伴随诊断的联动场景 若从临床路径出发,数字病理与分子分型联动至少存在3个最现实的应用场景。(1)初诊:患者经穿刺或支气管镜确诊肺癌后,AI辅助病理快速识别肿瘤富集区、估算肿瘤细胞比例并提示样本质量,帮助优化NGS和IHC的送检顺序与范围^[8,13-14]。(2)免疫治疗:数字病理辅助PD-L1判读和免疫微环境分析,再与驱动基因和临床状态联合解释,避免在不恰当的患者中仓促启动免疫路径^[5-6,9-10]。(3)围术期:病理高危特征与ctDNA-MRD联合,可用于术后复发风险评估、辅助治疗强化与随访频率调整^[18-21]。

数字病理与分子分型联动的核心,不是为了制造新的检测项目,而是为了让既有检测更合理地排列组合并更贴近临床问题。真正优秀的伴随诊断体系,永远不是“项目清单越来越长”,而是“信息整合越来越有方向”。这也是未来肺癌专病中心建设中最值得重视的能力之一。

4 精准医学场景下的数据标准化

4.1 标准化为何成为临床转化瓶颈 在AI+数字病理与分子检测中,真正制约临床转化的往往不是模型本身,而是标准化不足^[1,10-12,22-25]。数字病理涉及样本固定、切片厚度、染色质量、扫描参数、图像压

缩、显示终端、标注一致性和报告格式;分子检测则涉及取材时机、肿瘤细胞比例、核酸质量、检测平台、变异判读和报告解释。若这些前后环节标准不统一,即使算法设计精巧,也难以在多中心真实世界复制其性能。换言之,标准化不是技术转化的附属条件,而是其真正地基。

4.2 病理数字化标准 病理数字化的首要标准,是确保数字阅片与传统显微镜阅片在诊断目的上等效^[1]。这要求实验室在正式上线前完成病例覆盖充分的本地验证,并建立扫描失败重扫、图像缺陷识别、颜色校准、阅片显示环境、数据存储与追溯等规范。肺癌场景中特别需要关注小样本、压挤伪影、黏液性成分、坏死和边界区域的数字表现,因为这些往往是影响病理判断和后续送检的关键部位。

此外,AI应用还要求更严格的标注与质控。若训练集中肿瘤区、坏死区、炎症区定义不一致,或不同病理医师对同一组织模式理解差异较大,则算法输出再稳定,也可能建立在不稳定标签之上^[11-12]。因此,病理数字化标准不仅是设备层面的标准,更是认知和操作层面的标准。只有当实验室内部对病理任务边界和标注规范形成统一,AI辅助结果才具有真正可信的解释基础。

4.3 分子检测标准 分子检测标准同样决定伴随的诊断质量^[2-6,16-17]。组织固定时间、脱钙处理、核酸提取方式、肿瘤细胞比例评估、panel设计、测序深度和变异过滤策略,都会直接影响结果质量。对于肺癌这类常依赖有限样本完成多项检测的疾病而言,病理科与分子实验室之间若缺乏紧密协作,极易造成样本浪费、结果延迟或解释偏差。PD-L1、TMB和ctDNA的检测亦有各自标准化难点,尤其是平台间一致性和阈值解释问题^[5-6,16-17]。

因此,理想的肺癌分子检测标准不应只是某项技术SOP,而应是一套跨部门共享的样本管理和报告解释规范。该规范应明确什么样的样本优先做DNA/RNA panel,何时考虑液体活检补充,何时需复检,如何解释低频变异、如何处理阴性结果与高度临床怀疑不一致情形,以及如何把结果转化为临床可执行建议。只有这样,分子检测才能真正融入伴随诊断体系,而不是沦为“实验室孤岛”。

4.4 数据互操作与平台整合 标准化的进一步目标,是实现互操作与平台整合^[22-25]。肺癌精准诊疗涉及LIS、PACS、数字病理平台、分子检测平台、电子病历、MDT系统和随访数据库。若这些系统彼此割裂,即使每个模块都很先进,也难以形成闭环。反之,若能以统一元数据、结构化报告和标准接口打

通数据流,则数字病理的肿瘤区标注可直接进入分子检测申请,分子结果可自动回填病理整合报告,MRD结果亦可联动随访计划更新。

未来真正高水平的肺癌精准平台,未必是某一项检测最领先,而是能够把多源数据转化为连续、可追溯、可交互的知识流和决策流。平台化整合的意义,不在于界面更“智能”,而在于让每一次病理判读、每一次分子检测和每一次随访结果都能服务于下一步决策。这样的互操作能力,才是临床数字化成熟的标志。

4.5 真正的“标准化终点”应是临床可用 讨论标准化时,最容易陷入“数据格式合规即成功”的误区。事实上,标准化的终点不是报告更整齐,而是更能支持临床行动^[20-23]。一个真正有价值的肺癌伴随诊断系统,应让临床医生一目了然地知道该患者是否具备可操作靶点、PD-L1是否足以支持免疫路径、样本是否存在检测盲区、是否需要追加活检、术后是否建议纳入MRD监测以及何时复评。若一份报告仍需临床医生在多个系统间反复查找、再自行整合,其数字化水平本质上仍然有限。

因此,未来标准化工作的评价指标,应从“技术合格”进一步转向“临床可用”。只有当标准化真正缩短诊断周转时间、减少重复取材、提高治疗路径匹配度并改善患者管理质量时,它才完成了从实验室规范到临床价值的真正闭环。

5 展 望

5.1 从单任务AI到多模态基础模型 未来肺癌数字病理的演进方向,显然不会停留在单一分割、分类或计数任务上^[14-15,19]。更值得期待的是能够整合H&E、IHC、临床资料、分子结果、影像特征和随访信息的多模态基础模型。这类模型若建立在高质量真实世界数据基础上,有望同时输出诊断支持、分型建议、风险分层、疗效预测和随访建议,从而把当前分散的多个工具整合为更接近临床思维的辅助系统。

5.2 从静态伴随诊断到动态伴随诊断 伴随诊断的概念也在扩展。过去它主要指治疗前对某一药物适应证的检测;未来它更可能成为贯穿诊断、治疗、复发监测和长期管理的动态体系^[16-19]。病理、驱动基因、PD-L1、ctDNA、MRD以及治疗后新出现的生物学变化,将在不同时间点持续更新患者分层。这一变化意味着肺癌精准医学不再只是“选药学”,更是“动态决策学”。谁能率先把这一动态过程数字化、结构化并智能化,谁就更接近下一代肺癌管理

平台。

5.3 从实验室工具到区域化精准诊疗平台 AI+数字病理与分子检测的发展方向应是区域化、平台化和生态化^[20-24]。未来专病中心可以依托统一数字平台,实现远程会诊、AI辅助质控、结构化整合报告、分子检测触发、MRD随访和真实世界数据库沉淀。BAIMGPT等数字医学专家系统的价值,也将在这种平台中得到最大化体现:它不仅回答问题,更参与流程;不仅生成文本,更支持决策;不仅服务医生,也连接患者和管理场景^[24]。这将推动肺癌精准诊疗从“技术组合”迈向“智能生态”。

6 挑战与解决方案

6.1 外部验证不足 目前,绝大多数肺癌AI病理模型仍存在外部验证不充分的问题^[11-12]。解决之道不是继续在单中心数据上追求更高指标,而是建立多中心、前瞻性、真实世界的验证框架,明确病例构成、终点定义和失败情形,并把外部验证表现作为模型评价核心指标。

6.2 前分析与平台差异导致算法漂移 染色、扫描、压缩和样本质量差异会持续造成模型漂移^[1,10-12]。解决方案应包括实验室标准化、颜色归一化、持续性能监测、版本管理和再验证机制,而不是寄希望于一次性训练解决所有问题。

6.3 AI结果可解释性与临床信任不足 在PD-L1、驱动基因预测等高风险任务中,临床并不需要“神奇但不可解释”的模型,而需要“稳健且可复核”的工具^[11-12,22-23]。因此,输出热图、关键区域、误差边界、不确定性评分并保留人工复核接口,应成为高风险AI病理应用的基本要求。

6.4 法规、责任与隐私问题 AI医疗器械审批、算法更新责任、训练数据来源与隐私治理,仍是全球共同面对的问题^[22-23]。解决这一问题,需要把AI从“科研模型”与“临床模型”严格区分,建立审计追踪、访问权限、数据脱敏和版本备案制度,使其在制度层面可监管、可追责、可持续。

6.5 分子检测与数字病理“各自为政” 病理、分子、影像、随访和临床系统常常仍彼此割裂^[20-23]。真正的解决方案,不是再增加一份报告,而是建立结构化整合报告。在同一页面中呈现病理亚型、肿瘤细胞比例、关键IHC、PD-L1、驱动基因、ctDNA/MRD及治疗建议。这种“以问题为中心”的报告模式,才可能真正改变临床工作方式。

7 小结

总体而言,AI+数字病理与分子检测正在把肺癌精准诊疗从“结果堆叠”推进为“数据融合驱动的伴随诊断体系”^[1-6,16-19]。其近期目标,是提高切片判读效率和一致性、优化样本利用、增强PD-L1与分子检测协同;其中期目标,是实现病理—分子—液体活检—MRD的连续联动;其远期目标,则是构建动态、可学习、可追溯并可平台化部署的精准医学闭环。真正决定这一体系能否落地的,不只是算法精度,而是标准化、验证、互操作、治理和多学科协同能否同步成熟^[20-23]。在这一进程中,白春学教授提出的元宇宙医学、医学GPT与BAIMGPT理念,为我们提供了比单点算法更宏观的方向。未来肺癌精准诊疗所需要的,不是更多孤立工具,而是能够贯穿知识、数据、流程和决策的数字医学专家系统^[24]。这也正是“AI+数字病理与分子检测”最值得期待的时代意义所在。

伦理声明 无

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 纪元:撰写、修改、核对文献;白春学:选题、撰写、定稿。

参考文献

- [1] Pantanowitz L, Sinard JH, Henricks WH, et al. Validating whole slide imaging for diagnostic purposes in pathology: Guideline update from the College of American Pathologists in collaboration with the American Society for Clinical Pathology and the Association for Pathology Informatics. *Arch Pathol Lab Med*, 2021, 145(11): 1333-1342.
- [2] Lindeman N I, Cagle P T, Aisner D L, et al. Updated molecular testing guideline for the selection of lung cancer patients for treatment with targeted tyrosine kinase inhibitors: guideline from the college of American pathologists, the international association for the study of lung cancer, and the association for molecular pathology[J]. *J Mol Diagn*, 2018, 20(2): 129-159.
- [3] Kalemkerian G P, Narula N, Kennedy E B, et al. Molecular testing guideline for the selection of patients with lung cancer for treatment with targeted tyrosine kinase inhibitors: American society of clinical oncology endorsement of the college of American pathologists/international association for the study of lung cancer/association for molecular pathology clinical practice guideline update[J]. *J Clin Oncol*, 2018, 36(9): 911-919.
- [4] Nicholson A G, Tsao M S, Beasley M B, et al. The 2021 WHO classification of lung tumors: impact of advances since 2015 [J]. *J Thorac Oncol*, 2022, 17(3): 362-387.
- [5] Tsao M S, Kerr K M, Kockx M, et al. PD-L1

- immunohistochemistry comparability study in real-life clinical samples: results of blueprint phase 2 project [J]. *J Thorac Oncol*, 2018, 13(9): 1302–1311.
- [6] Kerr K M, Tsao M S, Nicholson A G, et al. Programmed death-ligand 1 immunohistochemistry in lung cancer: in what state is this art?[J]. *J Thorac Oncol*, 2015, 10(7): 985–989.
- [7] Bera K, Schalper K A, Rimm D L, et al. Artificial intelligence in digital pathology—new tools for diagnosis and precision oncology[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2019, 16: 703–715.
- [8] Coudray N, Ocampo P S, Sakellaropoulos T, et al. Classification and mutation prediction from non-small cell lung cancer histopathology images using deep learning[J]. *Nat Med*, 2018, 24: 1559–1567.
- [9] Lu M Y, Chen T Y, Williamson D F K, et al. AI-based pathology predicts origins for cancers of unknown primary[J]. *Nature*, 2021, 594(7861): 106–110.
- [10] Baxi V, Edwards R, Montalto M, et al. Digital pathology and artificial intelligence in translational medicine and clinical practice[J]. *Mod Pathol*, 2022, 35(1): 23–32.
- [11] Bilal M, Raza S E A, Azam A, et al. Development and validation of a weakly supervised deep learning framework to predict response to immune checkpoint blockade from routine histopathology in non-small cell lung cancer: a retrospective study. *Lancet Digit Health*, 2023, 5(2): e89–e100.
- [12] Echle A, Rindtöff N T, Brinker T J, et al. Deep learning in cancer pathology: a new generation of clinical biomarkers[J]. *Br J Cancer*, 2021, 124(4): 686–696.
- [13] Chen R J, Lu M Y, Wang J W, et al. Pathomic fusion: an integrated framework for fusing histopathology and genomic features for cancer diagnosis and prognosis[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2022, 41(4): 757–770.
- [14] Fu Y, Jung A W, Torne R V, et al. Pan-cancer computational histopathology reveals mutations, tumor composition and prognosis[J]. *Nat Cancer*, 2020, 1(8): 800–810.
- [15] Saltz J, Gupta R, Hou L, et al. Spatial organization and molecular correlation of tumor-infiltrating lymphocytes using deep learning on pathology images[J]. *Cell Rep*, 2018, 23(1): 181–193. e7.
- [16] Rolfo C, Mack P, Scagliotti G V, et al. Liquid biopsy for advanced NSCLC: a consensus statement from the international association for the study of lung cancer [J]. *J Thorac Oncol*, 2021, 16(10): 1647–1662.
- [17] Gale D, Heider K, Ruiz-Valdepenas A, et al. Residual ctDNA after treatment predicts early relapse in patients with early-stage non-small cell lung cancer [J]. *Ann Oncol*, 2022, 33(5): 500–510.
- [18] Abbosh C, Birkbak N J, Wilson G A, et al. Phylogenetic ctDNA analysis depicts early-stage lung cancer evolution [J]. *Nature*, 2017, 545(7655): 446–451.
- [19] Chaudhuri A A, Chabon J J, Lovejoy A F, et al. Early detection of molecular residual disease in localized lung cancer by circulating tumor DNA profiling[J]. *Cancer Discov*, 2017, 7(12): 1394–1403.
- [20] Pantanowitz L, Sharma A, Carter A B, et al. Twenty years of digital pathology: an overview of the road travelled, what is on the horizon, and the emergence of vendor-neutral archives [J]. *J Pathol Inform*, 2018, 9: 40.
- [21] Hanna M G, Reuter V E, Samboy J, et al. Implementation of digital pathology offers clinical and operational increase in efficiency and cost savings [J]. *Arch Pathol Lab Med*, 2019, 143(12): 1545–1555.
- [22] Topol E J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence[J]. *Nat Med*, 2019, 25(1): 44–56.
- [23] High-Level Expert Group on Artificial Intelligence, European Commission. Ethics Guidelines for Trustworthy AI. Brussels: European Commission; 2019.
- [24] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. *Clin eHealth*, 2022, 5: 1–9.

引用本文

白春学, 纪元. AI+数字病理与分子检测[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(1): 38–46.

Bai C X, Ji Y. AI-enabled digital pathology and molecular testing[J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(1): 38–46.

DOI: 10.61189/250967rgamgp

· 医学教育 ·

面向全周期医学教育培训与管理的“复旦中山惠生智育”元宇宙平台:设计思路与早期实践



张 雯¹, 张 敏¹, 马畅畅¹, 张梦瑶¹, 魏丽萍¹, 周逸飞¹, 王翔宇¹, 郑玉英¹, 杨达伟², 余 情^{1*}

1. 复旦大学附属中山医院教育处, 上海 200032

2. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032

[摘要] 本文面向贯通“院校医学教育—毕业后医学教育—继续医学教育”的全周期医学教育体系, 针对教学资源更新滞后、临床实践机会不均、标准化培养与个体化发展张力、以及跨阶段管理分段割裂等现实瓶颈, 提出“复旦中山惠生智育”元宇宙平台总体建设思路方案: 以扩展现实与人工智能为关键技术底座, 构建医学知识生态系统、虚拟教学场景、综合教学智能体、全周期教学管理中枢四大版块, 形成知识供给、情境训练、过程留痕、评测画像、精准导学、治理改进的闭环路径。平台早期实践示例以难定性肺结节多学科会诊元宇宙教学单元为代表, 面向住院医师开展影像判读、风险分层、共识形成与医患沟通的情境化训练, 并支持上海与厦门两院区同步进入同一虚拟空间完成同口径教学与复盘, 从而为后续开展客观效果评估与可复制推广提供工程化框架与证据链基础。

[关键词] 全周期医学教育; 培训与管理; 复旦中山惠生智育; 元宇宙平台

[中图分类号] R-0 **[文献标志码]** A

A metaverse platform (“Huisheng Intelligent Education”) for full-cycle medical education, training, and management: design rationale and early practice

Zhang Wen¹, Zhang Min¹, Ma Changchang¹, Zhang Mengyao¹, Wei Liping¹, Zhou Yifei¹, Wang Xiangyu¹, Zheng Yuying¹, Yang Dawei², Yu Qing^{1*}

1. Department of Education, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

2. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

[Abstract] This paper addresses the full-cycle medical education system that integrates “undergraduate medical education—postgraduate medical education—continuing medical education.” It proposes the design and development approach of the “Huisheng Intelligent Education” metaverse platform to address current challenges, including outdated educational resources, unequal clinical practice opportunities, the tension between standardized training and personalized development, and fragmented management across different stages. The platform leverages extended reality and artificial intelligence as core technologies to construct four key components: a medical knowledge ecosystem, virtual teaching scenarios, a comprehensive teaching intelligence system, and a full-cycle teaching management hub. These components form a closed-loop path for knowledge delivery, situational training, process tracing, assessment and feedback, personalized guidance, and governance improvement. The early practice example is the metaverse-based multi-disciplinary team (MDT) teaching unit for difficult-to-diagnose pulmonary nodules, aimed at training residents in image interpretation, risk stratification, consensus formation, and doctor-patient communication. It supports synchronized participation of residents from both Shanghai and Xiamen hospitals in the same virtual space, providing consistent teaching and review, thus laying the foundation for subsequent objective evaluations and scalable implementation.

[Key Words] full-cycle medical education; training and management; huisheng intelligent education; metaverse platform

[收稿日期] 2026-01-03

[接受日期] 2026-02-12

[基金项目] 上海申康医院发展中心管理研究项目(2025SKMR-21), 高等教育科学研究规划课题(24CX0201), 复旦大学附属中山医院管理科学基金(2024ZSGL14), 复旦大学附属中山医院医学人文和思政调研课题(SZ2024-4). Supported by Shanghai Shenkang Hospital Development Center Management Research Project (2025SKMR-21), Higher Education Science Research Planning Project (24CX0201), Management Science Fund of Zhongshan Hospital, Fudan University (2024ZSGL14), Medical Humanities and Ideological-Political Education Research Project of Zhongshan Hospital, Fudan University (SZ2024-4).

[作者简介] 张 雯, 硕士, 主治医师; E-mail: zhang.wen1@zs-hospital.sh.cn

* 通信作者 (Corresponding author). 余情, 博士, 主任医师. E-mail: yu.qing@zs-hospital.sh.cn

党的二十大报告强调,把保障人民健康放在优先发展的战略位置,并提出发展壮大医疗卫生队伍,为医学教育与医学人才培养指明了战略方向^[1]。党的二十届三中全会进一步提出实施健康优先发展战略,并就深化改革、推进中国式现代化作出系统部署,为卫生健康领域人才培养体系与管理能力现代化提供了顶层牵引^[2]。在此宏观背景下,我国全周期医学教育贯通“院校医学教育—毕业后医学教育—继续医学教育”^[3],以胜任力为主线,强调将理论学习、临床实践训练、评价与持续改进置于同一连续框架中,实现医学人才培养的纵向衔接与横向协同。然而,在教学医学院与医院的真实运行情境中,全周期培养的高质量发展仍面临“培训—管理”双端结构性约束:培训侧,关键能力形成所依赖的真实临床情境、低频高危任务与可重复演练场景供给不足且分布不均,制约了能力训练的覆盖度、同质化与可重复性;管理侧,培养过程数据分散、过程性连续留痕不足、证据链不完整,难以有效支撑跨阶段的闭环管理与持续改进。面向医学教育数字化、智能化与高质量发展的转型要求,亟需以新一代数字技术重构“情境化训练—过程留痕—评价导学—持续改进”等一体化能力,以提升全周期医学教育培训与管理的可执行性与可评价性。

以元宇宙为代表的虚实融合平台为破解上述瓶颈提供了更贴近能力培养规律的技术路径。元宇宙在方法论层面可遵循虚实互动、技术互联与人文互利等原则,以保障沉浸式场景、互联互通与价值导向的协同实现^[4]。“教育元宇宙”被认为可在创新人才培养模式、构建智慧教育环境、供给多样化教育资源、支持多元化学习生活与实现智能教学评价等方面形成可操作的系统能力^[5]。在医学元宇宙框架下,现实世界的医学知识与临床过程可被结构化并转化为可交互的数字化形式,使医学诊疗、医学教育及临床实践训练在虚拟环境中实现“可复现、可评估、可追溯”的情境化开展;其沉浸式体验、强交互性、个性化支持与虚实结合等特征已被认为具有重要应用前景^[6-9]。基于此,本文提出面向全周期医学教育培训与管理的“复旦中山惠生智育”元宇宙平台设计思路:在既有贯通式信息化管理平台实践基础上^[3],构建医学知识生态系统、虚拟教学场景、综合教学智能体与全周期教学管理中枢四大版块,并选择1个已具备成熟基础的应用进行早期实践呈现,为后续效果评估与可复制推广提供框架与证据链。

1 全周期医学教育培训与管理的主要瓶颈

1.1 教学资源更新滞后与医学知识快速迭代的矛盾 全周期医学教育以胜任力为导向,要求课程内容能够持续对齐最新循证证据与临床指南,并与真实临床决策路径保持一致。然而现实中,教学资源尤其是教材、课件与题库等的更新周期相对较长,难以及时纳入新指南、新技术与新证据,导致“教什么”与“临床正在怎么做”之间出现时间差与内容差。这种滞后不仅影响培训侧的知识与临床推理训练质量,也直接制约管理侧的评价口径一致性。

1.2 临床实践机会不均与能力培养达标要求的矛盾 临床胜任力的形成依赖充足的实践机会与高质量反馈,尤其是急危重症处置、手术等高复杂度任务更强调情境化训练与重复演练。但在教学医院的轮转体系中,不同科室病例谱与操作机会存在客观差异,导致学员获得关键病例、关键操作与关键决策训练的机会不均,甚至出现某些能力要素“训练不足”的结构性缺口。

1.3 标准化培养与个性化发展需求的矛盾 全周期培养对象跨越本科生、研究生、住院医师与继续教育学习者,其基础水平、岗位任务与学习节奏差异显著。若长期采用以统一授课、统一任务为主的培养方式,往往难以兼顾之间差异与专业方向需求;但若缺乏可解释、可治理的个体化智能机制,又可能削弱培养标准的一致性与质量控制的可比性。

1.4 教育连贯性需求与管理分段割裂的矛盾 全周期医学教育强调跨阶段的目标一致、内容衔接与评价互认,但现实中市域级管理部门、院校、医院、专业基地等之间的信息系统、数据标准与管理流程往往割裂,导致培养目标、教学内容与评价标准在不同阶段出现脱节或重复,既增加组织成本,也削弱培养的连续性与效率。

2 元宇宙赋能的优势与证据基础

2.1 沉浸式与高保真交互:提升情境化学习与技能/认知结局 沉浸式虚拟现实(immersive virtual reality, IVR)以及增强现实/混合现实(augmented/mixed reality, AR/MR)在医学与健康专业教育中总体能带来积极学习结局与较高学习体验,尤其在情境化理解、技能训练与学习投入方面具有优势^[10-11]。

2.2 可重复、可规模化与风险可控:支撑标准化训练与低频高危能力补齐 元宇宙相关模拟技术的发展,使训练从“依赖真实临床暴露”转向“可复现、可扩展的标准化情境”,在外科、急救、解剖、沟通等多

领域被用于提升学习兴趣、信心与训练效率,并已逐步纳入“评估维度”的讨论^[12-13]。

2.3 过程留痕与学习分析:为形成性评价、个性化导学与证据链提供基础 元宇宙沉浸式学习环境的关键增益之一在于“可记录、可分析”的过程数据能力。学习者在情境任务中的行为轨迹、交互序列与任务表现能够被结构化采集并进入学习分析流程,从而支持形成性评价、即时反馈与个性化学习支持^[14-15]。

2.4 协作学习与多主体联动:支持团队训练、跨专业协作与跨场景应用 元宇宙优势不仅在个体沉浸训练,也体现在支持多用户协作、远程互动与跨阶段学习应用。另外,元宇宙技术在急危重症照护教育中的研究正在增多,适用于团队协作、流程推演与复杂决策训练^[16-17]。

3 “复旦中山惠生智育”元宇宙平台的建设思路

面向四大瓶颈,借助元宇宙优势赋能,复旦大学附属中山医院教育处牵头,联合信息与智能发展部、医务处、人力资源部、科研处、护理部、设备材料处、总务处等职能部门以及临床业务科室,创新打造“复旦中山惠生智育”元宇宙平台,拟采用虚实融合的技术架构,通过虚拟现实(virtual reality, VR)、AR、MR 和人工智能(artificial intelligence, AI)等元宇宙技术,将全周期医学教育的内容、场景、评测、导学与管理完整结合成一个循环闭环。平台从知识资源的数字化管理到沉浸式情境训练,再到过程数据分析与能力评测,以及最后的个性化学习路径与持续改进,拟形成一个自我强化、不断演化的全周期教学系统(见图1)。



图1 “复旦中山惠生智育”元宇宙平台构建示意图

3.1 版块一:元宇宙医学知识生态系统 目标是建立一个高效的、可持续更新的医学教育知识底座,为虚拟场景、评测与智能体的应用提供统一的内容来源与证据引用。(1)数据底座与资源治理:整合真实病例、医学文献、影像/病理、多媒体技能资源、教材与指南、题库等多源资源,采用AI与机器学习(machine learning, ML)算法进行资源的智能标注与分类,确保知识内容可以高效、准确地被调用。(2)教育大模型/知识引擎能力:结合自然语言处理(natural language processing, NLP)、生成式人工智能(generative artificial intelligence, GenAI)与深度学习(deep learning, DL),提供强大的检索、生成、推送和试题/案例生成等能力,能够支持虚拟患者的情境化推送与智能答题生成。(3)产出与接口:通过跨模态技术(包括图像、文本、视频的多层次融合),输出

标准化知识单元,并提供接口(API)供虚拟场景、智能体与管理中枢调用,确保所有教学内容和评价数据的可追溯性和高效共享。

3.2 版块二:元宇宙虚拟教学场景 核心是通过VR、AR、MR技术构建一个逼真的、可交互的临床模拟环境,使学习者能够在无风险的虚拟环境中进行高强度、高复杂度的训练。(1)场景谱系:开发智能问诊、急救决策、微创手术、介入治疗、多学科会诊(multi-disciplinary team, MDT)、医患沟通等场景,所有场景都基于虚拟患者(virtual patient, VP)的模型构建,并引入AI增强虚拟患者技术,实现高度互动与个性化反馈。(2)场景共性设计规范:每个场景都采用统一的“任务脚本”—关键决策点与行为轨迹采集—即时反馈的设计规范。通过MR技术,场景中的虚拟患者与真实环境相结合,支持多方协作与

情境推演。(3)数据采集与评价:场景中的每项操作、每次决策都将实时记录,并通过数据日志与行为分析为智能体提供训练反馈和评估依据。

3.3 版块三:综合教学智能体 目标是通过智能化的评测与个性化导学,精准评估学习者在虚拟训练中展现的能力,并根据数据为其定制学习路径和成长规划。(1)自适应测评:借助DL与NLP技术,平台能够自动分析学员在虚拟任务中的表现,包括决策点选择、操作步骤、沟通效率等方面,生成精准的评估结果,并根据这些评估结果实时调整学习内容。(2)学员全息画像:通过对学员所有交互行为(如任务执行、时间管理、错误反馈等)的跟踪,平台能实时生成全面的能力画像,提供跨阶段、跨任务的能力评估。(3)精准导学与个性化成长路径:结合学习者的画像与能力缺口,平台基于强化学习(reinforcement learning, RL)算法,为学员定制个性化的学习路径。

3.4 版块四:全周期教学管理中枢 目标是实现全周期医学教育管理的闭环治理,包括招生—培训—考核—改进的全过程管控,并通过数据驱动优化资源配置、教研协同与质量监控。(1)闭环管理流程:全流程将通过区块链技术进行不可篡改的记录与审计,确保所有数据来源与过程可追溯,提供有力的治理证据链。(2)核心功能组件:建设教学质量仪表盘与关键指标体系,提供对教学质量的实时监测与预警;同时,通过虚拟教研室功能实现跨区域、跨基地的资源共享与协同共建。(3)资源优化配置:借助大数据分析 & ML 算法,对资源配置、学员反馈、教学效果等多维度数据进行分析,优化资源配置与教学策略,确保教学质量的持续提升。(4)数据治理与合规:建立数据标准、权限管理、审计跟踪与隐私保护机制,保证平台在数据使用与处理中的合规性和安全性。

4 “复旦中山惠生智育”元宇宙平台的早期实践

以目前开展运行中的难定性肺结节MDT元宇宙教学单元为例。

4.1 场景选择与教学定位 难定性肺结节处于影像不确定性与风险分层决策的交汇处,涉及影像判读、路径决策、MDT共识形成与医患沟通等多维胜任力,是毕业后医学教育阶段临床思维与协作决策能力训练的代表性主题。基于此,本平台已形成“难定性肺结节MDT”元宇宙教学单元,主要面向住院医师,用于在可复现的情境任务中训练其规范化诊疗思维、团队协作与沟通能力。该单元以扩展现

实技术(extended reality, XR)为交互载体(包括VR/AR/MR),结合“5A流程(即Ask/Assessment/Advice/Arrangement/Assistance)+专家数字人”的MDT会诊教学模式,在沉浸式空间中实现多模态影像与证据材料的共享讨论与流程推演。该单元支持复旦大学附属中山医院与复旦大学附属中山医院厦门医院两地住院医师同步进入同一MDT虚拟空间开展学习:场景脚本、知识口径、评价规则与复盘机制保持一致,使跨院区的毕业后医学教育在同一标准下实施,并为后续跨地域质量监测与改进提供统一证据基础。

4.2 四版块串联式落地 内容由知识生态系统统一供给,任务由MDT元宇宙场景承载,评价与导学由综合教学智能体生成,证据沉淀与改进由全周期管理中枢闭环完成。(1)知识生态系统:为住院医师提供统一口径的指南要点、典型影像征象、风险分层要素与管理策略,并通过知识引擎能力支持检索、推送与循证引用,保证场景训练与复盘反馈的可追溯与可解释。(2)虚拟教学场景:以MDT元宇宙空间承载任务执行,嵌入“5A流程+专家数字人”的会诊流程化教学结构,支持多学科协作推演与共识形成。(3)综合教学智能体:对住院医师在关键决策点与协作讨论中的过程行为进行结构化采集与分析,输出形成性评价与个体化补训建议,并将短板映射到后续训练任务。(4)全周期教学管理中枢:将场景训练记录、评价结果与改进建议纳入既有“教—学—考—评—管”数据框架,支撑毕业后医学教育阶段的过程监测、质量分析与改进闭环。

4.3 场景组织方式:任务链与关键决策点 该单元采用结构化任务链组织训练过程,并在各环节设置关键决策点与可观察行为指标,以保证“可训练、可评价、可复盘”。(1)影像特征识别与结构化描述:住院医师在XR终端(VR头戴显示设备/PC端协作界面)中完成多视角影像浏览与征象标注,输出结构化描述,强调可复核的要点表达。(2)风险分层与管理策略初拟:住院医师基于影像与病史信息完成风险分层,提出随访/进一步检查/干预策略,并说明关键依据与不确定性处理。(3)MDT共识形成(5A流程+专家数字人):住院医师进入MDT虚拟空间,按流程推进讨论,与专家数字人进行证据与方案交互,完成多学科权衡并形成共识建议。(4)医患沟通与共同决策:住院医师在虚拟患者交互模块中完成风险沟通与方案解释,输出可执行计划并进行理解确认,形成可落地的随访/管理安排。各任务段均配套即时反馈与结构化复盘,复盘可回看关键节点证

据、讨论路径与方案变更原因,强化从“完成任务”到“按证据完成并能解释”的能力迁移。

4.4 过程留痕与形成性评价:证据链的生成与回流
将住院医师在元宇宙空间中的行为轨迹转化为可解释证据,用于形成性评价与个体化导学。过程证据主要包括决策证据、协作证据、产出物证据等。评价输出强调“证据解释+改进行动”:除达标结论外,反馈包含典型错误类型及相应补训建议,并自动关联知识生态内容进行针对性推送与再练任务,从而形成“训练—反馈—补训—再评价”的闭环。

5 讨论

本文提出“复旦中山惠生智育”元宇宙平台的总体构建方案,并以典型场景展示其在全周期医学教育培训与管理中的可落地路径。目前工作主要聚焦于平台体系结构搭建与迭代开发中,效果证据层级以“可行性与工程实现”为主,尚缺乏基于严格研究设计的系统性结局评价。本文尚未报告系统的学习结局与长期随访结果;不同场景成熟度与师资介入差异亦可能影响效果稳定性。后续将围绕关键场景与指标体系固化、证据链审计机制完善、真实世界评估研究开展及跨院区协同验证,逐步形成可比较的客观证据,并推动平台从“可用”走向“可证、可复制、可持续”。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 张雯:论文具体构思与撰写;张敏:论文框架指导;马畅畅、张梦瑶、魏丽萍、周逸飞:文献收集整理;王翔宇、郑玉英:论文审核与优化;杨达伟:元宇宙相关学术指导;余情:论文整体设计与修改。

参考文献

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. (2022-10-25)[2026-02-20]. <https://www.12371.cn/2022/10/25/ARTI1666705047-474465.shtml>
- [2] 国务院办公厅. 中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定[EB/OL]. (2024-07-21)[2026-02-20].

- <https://www.news.cn/politics/20240721/cec09ea2bde840dfb99331c48ab5523a/c.html>
- [3] 张雯,张敏,陈旻敏,等. “5+3+X+继续教育”贯通式医学教育信息化管理平台创新实践[J]. 医学教育管理, 2025, 11(4): 373-378.
- [4] 赵星,乔利利,张家榕,等. 元宇宙研究的理论原则与实用场景探讨[J]. 中国图书馆学报, 2022, 48(6):6-15.
- [5] 赵星,乔利利,叶鹰. 元宇宙研究与应用综述[J]. 信息资源管理学报, 2022, 12(4):12-23+45.
- [6] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. Clinical eHealth, 2022, (5):1-9.
- [7] 杨达伟. 元宇宙医学对医学教育的颠覆[J]. 元宇宙医学, 2024, 1(2):33-38.
- [8] 王源,余情,张敏,等. 数字人GPT在医学教育领域的应用现状及研究进展[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(1):51-56.
- [9] Sendra-Portero F, Lorenzo-Álvarez R, Rudolphi-Solero T, et al. The second life metaverse and its usefulness in medical education after a quarter of a century[J]. J Med Internet Res, 2024, 26: e59005.
- [10] Liu J Y W, Yin Y H, Kor P P K, et al. The effects of immersive virtual reality applications on enhancing the learning outcomes of undergraduate health care students: systematic review with meta-synthesis[J]. J Med Internet Res, 2023, 25: e39989.
- [11] Zhang R X, Jin X Y, Liu M, et al. The effectiveness of augmented reality/mixed reality in medical education: a meta-analysis[J]. BMC Med Educ, 2025, 25(1): 1586.
- [12] Popov V, Mateju N, Jeske C, et al. Metaverse-based simulation: a scoping review of charting medical education over the last two decades in the lens of the ‘marvelous medical education machine’[J]. Ann Med, 2024, 56: 2424450.
- [13] Li Q, Duan H, Zhou X X, et al. The use of metaverse in medical education: a systematic review[J]. Clin Med (Lond), 2025, 25(3): 100315.
- [14] Bojic I, Mammadova M, Ang C S, et al. Empowering health care education through learning analytics: in-depth scoping review[J]. J Med Internet Res, 2023, 25: e41671.
- [15] Neher A N, Bühlmann F, Müller M, et al. Virtual reality for assessment in undergraduate nursing and medical education – a systematic review[J]. BMC Med Educ, 2025, 25(1): 292.
- [16] Mergen M, Graf N, Meyerheim M. Reviewing the current state of virtual reality integration in medical education – a scoping review[J]. BMC Med Educ, 2024, 24(1): 788.
- [17] Lau J, Dunn N, Qu M, et al. Metaverse technologies in acute care medical education: a scoping review [J]. AEM Educ Train, 2025, 9(1): e11058.

引用本文

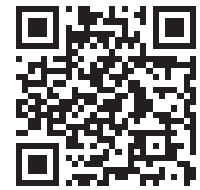
张雯,张敏,马畅畅,等. 面向全周期医学教育培训与管理的“复旦中山惠生智育”元宇宙平台:设计思路与早期实践[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(1):47-51.

Zhang W, Zhang M, Ma C C, et al. A metaverse platform (“Huisheng Intelligent Education”) for full-cycle medical education, training, and management: design rationale and early practice[J]. Metaverse Med, 2026, 3(1):47-51.

DOI:10.61189/262431bqczqz

· 医学教育 ·

神经科教学中的元宇宙革命：技术基础设施、临床应用与教育效能

林继先¹, 薛珉², 黄露艳², 汤罗嘉^{3,4*}

1. 上海市闵行区中心医院神经内科, 上海 201199

2. 上海市闵行区中心医院医务科, 上海 201199

3. 复旦大学附属中山医院急诊科, 上海 200032

4. 上海市闵行区中心医院院长办公室, 上海 201199

[摘要] 在21世纪医学教育转型背景下,神经病学与神经外科学教学面临解剖结构复杂、教学标本匮乏及安全性要求严苛等多重挑战。本研究通过系统性文献检索与理论建模,探讨了元宇宙技术在该领域的应用现状、技术框架及教育效能。研究构建了“基础设施层—认知层—临床决策层—伦理治理层”四层分析框架,系统分析了头戴式显示器、触觉反馈及数字孪生等关键技术特征。实证研究表明,元宇宙技术能有效重构空间认知,在提升神经解剖空间推理能力、虚拟标准化患者临床思维训练以及卒中团队协作演练方面展现出显著优势。然而,晕动症、触觉保真度不足以及数据隐私伦理等问题仍是制约其大规模普及的瓶颈。元宇宙更适合作为传统神经科教学的“渐进式增强工具”,而非完全替代路径。未来应基于多中心前瞻性研究,重点验证其对真实临床表现的长远影响。

[关键词] 元宇宙;神经科教学;虚拟现实;数字孪生;教育效能;理论框架

[中图分类号] R 742 **[文献标志码]** A

The metaverse revolution in neurological education: technical infrastructure, clinical applications, and educational efficacy

Lin Jixian¹, Xue Min², Huang Luyan², Tang Luojia^{3,4*}

1. Department of Neurology, Minhang District Central Hospital, Shanghai 201199, China

2. Department of Medical Administration, Minhang District Central Hospital, Shanghai 201199, China

3. Department of Emergency Medicine, Zhongshan Hospital affiliated to Fudan University, Shanghai 200032, China

4. President's Office, Minhang District Central Hospital, Shanghai 201199, China

[Abstract] In the context of medical education transformation in the 21st century, neurology and neurosurgery education face multiple structural challenges, including complex neuroanatomy, scarcity of cadaveric specimens, and stringent safety requirements. Through systematic literature review and theoretical modeling, this study explores the current application status, technical infrastructure, and educational efficacy of Metaverse technology in this field. A four-layer analytical framework comprising the "Infrastructure Layer, Cognitive Layer, Clinical Decision-making Layer, and Ethical Governance Layer" was constructed to systematically analyze key technologies such as Head-Mounted Displays (HMD), haptic feedback, and digital twins. Empirical evidence demonstrates that Metaverse technology effectively reconstructs spatial cognition, showing significant advantages in enhancing spatial reasoning in neuroanatomy, clinical thinking training via Virtual Standardized Patients (VSP), and stroke team collaboration simulations. However, challenges such as cybersickness, insufficient haptic fidelity, and data privacy ethics remain bottlenecks for large-scale adoption. The Metaverse is best characterized as a "progressive enhancement tool" for traditional neurological education rather than a complete replacement. Future research should focus on multi-center prospective studies to verify its long-term impact on real-world clinical performance.

[Key Words] Metaverse; neurological education; virtual reality; digital twin; educational efficacy; theoretical framework

在21世纪的医学教育版图中,神经病学与神经外科学的教学面临多重结构性挑战。传统的“霍尔

[收稿日期] 2026-02-19

[接受日期] 2026-03-10

[基金项目] 上海市闵行区医防协同医防融合项目,2026年“复旦—闵行”健康联合体科研项目。Supported by Minhang District Medical Prevention Coordination and Integration Project, 2026 “Fudan - Minhang” Health Consortium Research Project.

[作者简介] 林继先,博士,副主任医师。E-mail: linjixian@fudan.edu.cn

*通信作者(Corresponding author). 汤罗嘉,博士,副主任医师。E-mail: tang.luojia@zs-hospital.sh.cn

斯特德式”(Halstedian)学徒模式(即“看1次,做1次,教1次”)正逐渐难以满足现代医学对安全性、精准度以及伦理规范的严苛要求。神经解剖结构的复杂性、病理表现的微观性以及临床病例的随机性,使得医学生和住院医师在掌握核心技能时面临巨大的认知负荷。此外,尸体标本供给不足、临床教学时长受限及教学资源分布不均,进一步增加了高质量神经科教学的实施难度。

元宇宙(Metaverse)在此背景下应运而生。元宇宙(Metaverse),作为一个融合了虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)以及数字孪生(Digital Twin)技术的沉浸式数字生态系统,正推动神经科教学由“被动观察”向“交互实践”转变^[1-2]。在神经科教学中,元宇宙是一种“虚实融合的教学空间生态系统”,而非单一的虚拟现实(VR)工具集合。这一定义契合了 Matthew Ball 理论,强调元宇宙的核心特征在于持续性(Persistence)与互操作性(Interoperability):前者确保了教学环境与学习进度在数字世界中不间断地存在,不因个体退出而消失;后者则支持不同教学系统、临床数据库与硬件终端之间数据的无缝流动^[3]。同时,结合 IEEE 关于沉浸式系统(Immersive Systems)的技术框架,元宇宙被视为一个集成了感知接口、网络传输与算力支撑的层级化结构,能够提供从视觉渲染到触觉反馈的全方位支持^[4]。

在实现方式上,包括虚拟现实辅助教学(VR-assisted Teaching)和元宇宙式教学平台(Metaverse-based Platform)2种形式。虚拟现实辅助教学主要侧重于针对特定知识点的“单点工具”应用(如单纯观看一段3D解剖视频)。元宇宙式教学平台侧重于跨场景(从基础教室到虚拟手术室)、跨主体(师生化身与人工智能助教的协作)以及跨数据(临床影像、病理参数与数字孪生的实时同步)的持续交互。

本文作为理论模型构建型叙事综述,旨在深入剖析元宇宙技术在神经内科与神经外科教学中的应用现状、技术基础设施、临床效能及经济可行性,并在证据分级与四层理论框架下讨论其潜在价值、实施路径与现实挑战。

1 研究方法学:叙事性综述标准、证据分级与理论建模

1.1 文献检索策略与信息来源 本研究采用了结构化的文献检索策略,系统性地覆盖了 PubMed、Scopus、Embase 以及 Web of Science 等核心医学与跨学科数据库。考虑到扩展现实与数字孪生技术在

医疗领域的演进周期,文献检索的时间跨度设定为2010年1月至2025年1月。核心检索词通过布尔逻辑词进行矩阵组合,包括:(metaverse OR "virtual reality" OR "augmented reality" OR "mixed reality" OR "digital twin" OR "extended reality") AND (neurology OR neurosurgery OR neuroanatomy OR "medical education" OR "surgical training")。

1.2 证据层级评估框架 在文献筛选阶段,纳入标准聚焦于:探讨元宇宙技术及其核心组件(VR/AR/MR、数字孪生、虚拟标准化患者)在神经内外科教学、解剖学空间认知训练或团队资源管理中应用的系统评价、随机对照试验、观察性研究及前瞻性队列研究。排除标准则严格剔除了:与医学临床教学无直接关联的纯工程学算法研究、样本量极小且缺乏量化评价指标的个案报告,以及缺乏同行评议的个人观点性文章。

本研究创新性地结合了临床医学领域的 GRADE (Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation) 分级框架以及专门针对医学教育研究质量的 MERSQI (Medical Education Research Study Quality Instrument) 量表。

在 GRADE 框架的指导下,本研究将检索到的证据划分为不同的确定性层级。随机对照试验(RCT)通常作为高确定性证据的起点,而观察性研究或无对照的干预前后对比研究则作为低确定性证据的起点。随后,根据研究的偏倚风险、不一致性、间接性与不精确性进行降级评估。同时,利用 MERSQI 量表的维度(如抽样质量、评估工具的效度证据、数据分析的复杂性以及教育成果的客观性等)对纳入的医学教育实证文章进行二次校验。

本文根据证据确定性采用分级表述。对于高确定性证据(如大样本 RCT),使用“证实(demonstrates)”“显著提升(significantly improves)”；对于中低确定性证据(如早期队列研究或技术验证),采用“提示(suggests)”“可能(may)”等审慎措辞,以降低过度外推风险。

1.3 理论模型与变量的操作性定义 本文作为“理论模型构建型叙事综述”,方法学目标是通过结构化检索与证据分级,提炼可检验的教育机制假设,为后续实证研究提供变量定义与路径模型。

本文对引入理论作操作化解释:建构主义强调学习者通过主动操作重建知识结构,对应神经解剖的三维探索任务;情境学习强调知识在真实工作情境中的形成,对应卒中流程与团队协作训练;体验式学习强调“体验—反思—概念化—再实践”循环,

对应VSP与手术预演中的迭代练习;技术接受模型(TAM)用于解释教师与学生对接平台的采纳意愿(感知有用性与易用性);TPACK用于解释技术、教学法与神经科专业内容的协同设计能力。

变量定义方面,本文将“技术沉浸度”界定为临场感、交互实时性与感官一致性的综合;“认知负荷调节”界定为降低无关负荷并维持有益负荷;“临床情境理解”界定为对病例时间轴、风险节点与干预后果的结构化把握;“决策能力提升”界定为在标准化场景中的诊断准确性、流程完整性与团队沟通质量改进。

2 神经医学元宇宙教育的四层理论框架重构

本文构建“基础设施层—认知层—临床决策层—伦理治理层”的四层分析框架,并引入建构主义学习理论、情境学习理论、体验式学习理论、技术接受模型(TAM)与教育信息化整合模型(TPACK)作为教育学支撑。该框架强调从技术载体到学习机

制、再到临床应用与治理规范的递进关系:设备与平台对应基础设施层,解剖与临床教学对应认知层,手术规划与卒中协作对应临床决策层,经济与伦理问题对应治理层。

基础设施层主要解释“技术是否可被有效采纳”(TAM/TPACK);认知层主要解释“学习者如何形成稳定知识结构”(建构主义与体验式学习);临床决策层主要解释“知识如何在团队情境中迁移为行为表现”(情境学习与机制路径);伦理治理层用于约束“技术可做什么”与“教育应当做什么”之间的边界(图1)。该框架以“研究定位—方法学—四层结构—学习成效”为主线,系统呈现基础设施层、认知层、临床决策层与伦理治理层的递进关系。图中同时标示调节变量(学习动机、数字素养、先验经验、组织支持)的跨层作用,用于解释同类技术在不同教学情境中的差异化效果。该框架强调“结论强度与证据层级对应”,避免将早期技术验证外推为普适结论。

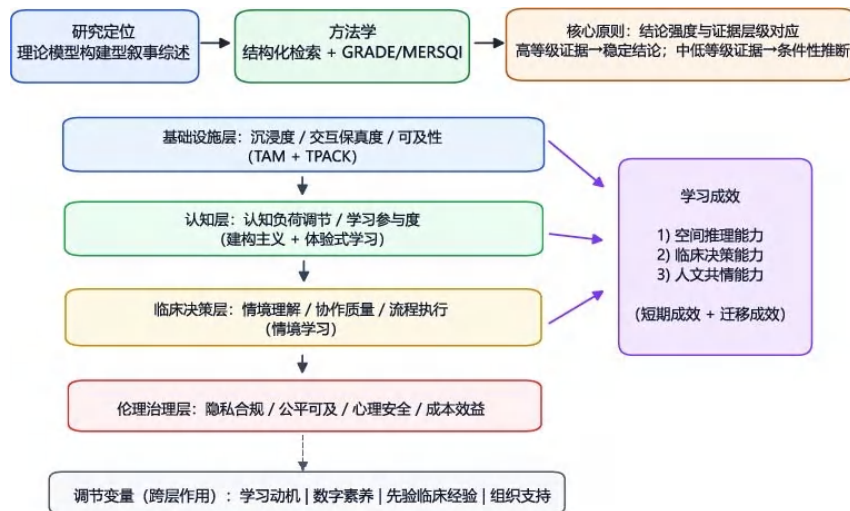


图1 神经医学元宇宙教学研究框架图

2.1 基础设施层:技术基础设施与硬件生态分析
元宇宙在神经科学教育中的转化效能,主要取决于硬件感知保真度与软件交互能力。为客观评估技术成熟度,本节采用技术成熟度等级(technology readiness levels, TRL)框架,对关键设备与系统进行分层讨论。不仅通过讨论“可实现性”,避免过度技术乐观,还通过TAM/TPACK来讨论“可教学化”与“可持续部署”。另外,通过比较“设备性能”和“可采纳性”,进一步用于区分“单点工具增强”与“平台基础设施建设”。前者回答某一训练任务是否改进,后者回答改进能否跨课程连续发生并被稳定复用。

2.1.1 头戴式显示器(head-mounted display, HMD):
光学透视与视频透视的博弈 目前,主导神经科教学的沉浸式设备主要分为两类:以 Microsoft HoloLens 2为代表的光学透视(optical see-through, OST)设备,和以 Apple Vision Pro为代表的视频透视(video see-through, VST)设备。这两类设备在分辨率、佩戴舒适度以及对精细运动操作的支持上表现出截然不同的特性^[5]。

一项针对20名医疗专业人员进行对照研究^[5]揭示了视觉保真度与任务绩效这2种技术路线在精密任务(如显微缝合)中的差异。

表 1 光学透视与视频透视在神经科教学应用中的技术指标对比

技术指标	Microsoft HoloLens 2 (MHL2)	Apple Vision Pro (AVP)	神经科教学应用影响分析
显示技术	MEMS 光学透视	Micro-OLED 视频透视	AVP 的 2300 万像素提供了阅读 CT/MRI 扫描所需的极高清晰度,适合影像诊断教学;MHL2 则允许用户直接通过光学镜片看到真实的手术器械和手部,无延迟 ^[6]
重量负荷	566 g	650 g	神经外科模拟通常持续数小时。AVP 较重的机身导致前庭与颈部肌肉疲劳更快,限制了长时间的虚拟手术演练 ^[6]
晕动症评分	41.1(较低)	66.9(较高)	视频透视技术中的微弱延迟(Photon-to-Motion Latency)会导致前庭系统与视觉系统的冲突,AVP 用户报告了更严重的恶心与定向障碍,这是教学推广的重大障碍 ^[5]
精细任务耗时	456.0 s (SD 120.0)	570.0 s (SD 192.0)	在执行缝合等精细动作时,VST 技术的深度感知失真导致操作时间显著延长($P<0.001$)。这表明目前的 VST 设备尚不完全适合显微神经外科的动作技能训练 ^[5]
临场感评分	115.0 (SD 11.4)	93.7 (SD 12.7)	OST 设备提供了更好的“混合现实”临场感,使学习者能更好地感知周围的物理环境(如手术室团队、器械台) ^[5]

现有研究^[7]显示,Apple Vision Pro 在三维解剖展示、术前讨论与影像阅读方面具有较高沉浸感;而在依赖手眼协调的精细操作训练中,HoloLens 2 等光学透视设备因保留真实视觉反馈,仍具有现实优势。总体而言,VST 与 OST 并非替代关系,而是适用于不同教学任务。

因此,头显设备在当前阶段更适合承担分层教学功能:VST 用于空间理解与方案讨论,OST 用于操作技能训练与术中认知支持。后续研究应进一步比较两类系统在学习迁移与长期技能保持方面的差异。

2.1.2 触觉反馈系统:从视觉模拟到真实触感 神经外科被誉为“毫米级的艺术”,其核心在于对人体组织质地的感知,如区分正常的脑实质与胶质瘤,感知动脉瘤夹闭时的血管壁张力等。然而,当前的元宇宙模拟器面临的瓶颈即触觉反馈(Haptic Feedback)的缺失或低保真度^[8]。

尽管已有多项研究^[8]评估触觉技术在颅脑手术模拟中的应用,但尚缺乏能够完整复现从切开到缝合全过程的高保真系统。现有的低成本模拟器通

常凭借图像的形变来提示阻力,仅提供了视觉上的“伪触觉(Pseudo-haptics)” ;Geomagic Touch 等设备虽然能提供一点式/多点式的力反馈,但缺乏表面纹理(Texture)和温度感知。虽然外科领域的经典操作在不久的将来,可能完全可以依托智能手术机器人精准定位后自主全程运作,但医生作为患者手术安全的最基本保障人员,不能仅学会如何使用并控制手术机器人,同时也仍需要具备经典的基本手术操作技能,如腰穿时的“落空感”的感知力等。目前现有的教学设备系统在模拟细微的力学改变方面仍有很大的提升空间^[9]。为了克服传统医疗机器人在环境适应性、操作灵活性等方面的局限性,生物医学工程领域正在积极转向软体机器人(Soft Robotics)技术,以期在微创手术、康复治疗 and 药物合成等应用中实现更高的精确度和安全性。

未来的模拟器将不再是刚性的机械臂,而是能够模拟生物组织粘弹性(Viscoelasticity)的智能材料。这种技术旨在实现“飞行员式”的全面训练,即在接触真正患者之前,外科医生已在物理—数字混合的模拟器上积累了足够的肌肉记忆^[8,10]。通过高

保真的力反馈,可以将资深医生在腰穿时的“落空感”或动脉瘤夹闭时的“张力感”转化为可量化的数字信号。这种数字化不仅是给学生练手,更是为了让AI学习人类医生的细微体感,最终实现手术模式从“人操作机器人”向“数字分身自主/辅助操作”的彻底改变。

2.1.3 数字孪生与脑科学计算平台 元宇宙的高级形态不仅仅是静态模型的展示,而是动态生理过程的仿真。数字孪生(Digital Twin)技术正在将“静态解剖”转化为“动态生理”。

依托EBRAINS等欧洲数字神经科学基础设施,研究人员正在构建能够模拟神经元活动、血流动力学甚至病理演变的数学模型。通过构建这样的“虚拟大脑孪生”(Virtual Brain Twin),医学生不再是查阅泛泛的教材,而是在一个动态的生理仿真平台上工作^[11]。斯坦福大学的研究团队利用AI构建了小鼠视觉皮层的数字孪生,能够预测神经元对新视觉刺激的反应。在教育中,这意味着未来的医学生可以在虚拟大脑上测试药物反应或电刺激效果,观察癫痫波的传播路径,从而深入理解神经电生理机制,而非仅仅记忆神经通路^[12]。

在教学应用层面,这意味着高年资医学生或住院医师的关注点,可以从死记硬背静态的神经通路,升华为对动态机制的探索。他们可以在数字孪生模型上模拟施加电刺激或虚拟投药,实时观察癫痫异常放电波在特定皮层网络中的传播路径,或是预测肿瘤切除对周围语言功能区的潜在影响。虽然目前的动态生理数字孪生技术尚处于概念验证与早期原型阶段(TRL 3-4),但它指明了未来神经科教学的重要演进方向:培养医学生理解并利用基于计算模型的预测系统,而非仅仅依赖经验性的解剖推测。

综合本层证据可见,当前硬件与软件更适合“任务匹配式”应用而非“单一路线替代”:VST与OST各有优势,触觉与动态孪生仍处持续迭代阶段。这意味着基础设施层可支持局部教学改进,但“平台级教学成效”仍需在后续认知层与决策层中通过学习过程与行为结果共同验证。

2.2 认知层:空间认知重构与基础技能习得 认知层建立在基础设施层之上,重点解释“技术如何转化为学习”。按照建构主义与体验式学习逻辑,学习者并非被动接收三维图像,而是通过“操作—反馈—反思—再操作”循环形成稳定的神经空间表征。通过区分“工具效应”与“平台效应”有不同的意义。工具可提升某一节课的理解效率,平台则要

求跨课程持续跟踪认知负荷、参与度与技能保持。本层将认知负荷调节视作连接技术输入与后续临床决策表现的关键中介。

2.2.1 神经解剖学教学——空间认知的重构 神经解剖学因结构复杂、毗邻关系抽象,向来是医学生眼中的“畏途”。大脑内部的脑室系统、基底节核团以及脑干内部的神经核团,在传统的二维图谱或切片中极难建立立体的空间概念。元宇宙技术通过提供可交互的3D环境,从根本上改变了这一学科的教学方法。

(1)空间推理能力的提升。多项Meta分析和对照研究证实,AR和VR工具在提升医学生的空间推理能力方面显著优于传统方法^[13]。从认知负荷理论(Cognitive Load Theory)视角看,学习神经解剖需极高的内在认知负荷(Intrinsic Load)。传统的2D教学要求医学生于脑海中开展“心理旋转”与“切片重组”,此过程消耗了大量工作记忆。VR技术通过外化这些内在认知负荷过程,允许医学生直接旋转、缩放、透明化3D大脑模型,释放了认知资源,使其能专注于理解结构之间的功能联系^[14]。以GreyMapp-AR为例,研究显示AR组虽承担了学习新工具带来的外在认知负荷,但在三维解剖关系理解方面优于传统图谱组^[14]。这提示沉浸式技术带来的空间直观性能够抵消技术操作带来的额外负担,并可能支持学习者形成更稳定的手术入路判断。

(2)虚拟解剖台与全息博物馆。在实际教学场景中,元宇宙技术已被用于创建“全息解剖博物馆”。医学生能够如同修理工拆解发动机一般,将大脑逐层剥离,全方位反复地研究解剖结构的拆解与重组。从大脑皮层到白质纤维束,再到深部的丘脑和脑室,这种“可逆的解剖”是尸体标本无法实现的^[15]。值得注意的是,虽然VR在空间结构教学上具有优势,但在单纯的知识记忆(如背诵核团名称)方面,并不总是优于传统的平板电脑或课本学习^[13],教学效能方面存在局限性。这提示,最理想的医学教学模式是混合式教学(blended learning),元宇宙应被看作传统解剖教学的“增强剂”,而非简单的“替代品”。通过元宇宙平台,医学生不仅能看到静态结构,更能加载虚拟大脑孪生(virtual brain twin)模型,观察神经元活动与血流动力学的实时映射。这种对“动态生理”的深层掌握,是制定个性化、全面医疗措施的前提,而非单纯的手部操作技能训练。另外,未来的医生通过元宇宙模型,不仅是为了自己看懂病灶,更是为了能向患者及家属直观地展示病灶与神经功能区的关系,将复杂的病理

生理转化为患者可理解的视觉语言。这种基于精准空间认知的医患共情能力,是未来医生不可被自动化系统替代的核心竞争力。

2.2.2 临床神经病学培训——虚拟标准化患者与具身共情 除了静态的解剖结构外,神经病学的核心在于培养临床思维,通过完整的病史采集、体格检查等来定位病灶。“虚拟标准化患者”(virtual standardized patients, VSPs)可以陪伴医学生反复训练,提升医学技能,是宝贵的学习资源。

(1)VSP系统的实证研究。中国衢州市人民医院在2022年至2024年间进行的一项随机对照试验(RCT),为VSP系统的教学有效性提供了强有力的证据^[16]。该研究将60名医学实习生随机分为VSP训练组(实验组)和传统教学组(对照组)。实验组使用了基于AI驱动的交互式诊疗系统,该系统涵盖了从新生儿到老年人的全生命周期疾病谱。实验组在理论成绩和临床思维上的显著提升,得益于VSP系统所采用的闭环反馈机制。通过多维度评估和实时反馈,促进了医学生临床思维等综合素质和能力水平。在传统教学中,医学生往往在诊疗结束后才能获得教师的反馈,而在VSP系统中,AI算法能提供“毫秒级”的操作节点反馈,即时指出逻辑漏洞或检查遗漏^[16]。这种高频次、低风险的试错契机,有助于促进临床直觉形成,但其长期迁移效果仍需前瞻性研究进一步验证。

(2)神经查体模拟(VRNET):再现不可复制的体征。神经查体中包含了许多难以由健康演员模拟的体征,如眼球震颤、瞳孔对光反射异常、面瘫或特定的病理反射。VRNET 2.0系统的突破之处在于:它是专为解决这一痛点而研发的。它允许学生佩戴VR头显,观察虚拟患者表现出的特定颅神经麻痹或前庭功能障碍。研究^[17]显示,使用VRNET辅助教学的医学生在神经体格检查(NPE)评分上显著高于仅接受传统标准化患者(SP)教学的医学生(3.81 ± 0.92 vs 3.40 ± 1.01 , $P=0.043$)。这证明了VR在展示稀有或难以模拟的病理体征方面具有独特的优势。两组在学生满意度和场景真实感主观评分上并无显著统计学差异,但在最为核心的神经体格检查(NPE)客观评分中,借助VRNET系统观察虚拟体征的学生表现出了显著的优势^[17]。这一实证数据支持虚拟VR在三维模型中重现稀有和不可控病理体征方面具有不可替代的教学价值。通过头戴式设备,学生能够近距离、高频次地观察虚拟患者眼外肌麻痹的动态变化,这种反复的视觉印刻有助于加速临床直觉的固化。

(3)具身实验室(Embodied Labs):从“治病”到“医人”。在神经退行性疾病,如阿尔茨海默病、路易体痴呆等疾病的教学过程中,理解患者的主观体验和掌握病理生理同等重要。元宇宙提供了“视角转换”(Perspective Taking)的可能性。Embodied Labs平台中,医学生可化身为患有阿尔茨海默病的老人。通过头显,体验到患者视野缺损、黄斑变性、听力模糊以及幻觉的干扰,切身体验成为患者(Becoming the Patient)的各项医疗需求^[18]。同时也无缝融入了换位思考与人文关怀的教育。一项俄亥俄州与明尼苏达大学的案例研究^[19-20]表明,这种体验极大地改变了学生对痴呆患者“激越行为”的认知。医学生们不再将患者的喊叫视为单纯的精神症状,而是理解为感官剥夺后的挫败感表达,让聚焦“治病”更好地转变为温情地“医人”。这种深层次的同理心与人文温度,是任何AI分身都无法替代的,也是未来个性化全面医疗措施中最具“人性”的部分。

空间推理与体征识别方面已有相对稳定证据,而共情、长期迁移与复杂行为改变仍以中低确定性证据为主。由此可见,“单点工具增强”已具可行性,但“元宇宙式平台”是否成立,取决于这些局部收益能否在决策层转化为可重复的临床行为改进。

2.3 临床决策层:特异性规划与协作网络 本文提出“技术沉浸度→认知负荷调节→临床情境理解→决策能力提升”的路径模型来强化机制论证。沉浸度并非“画面更逼真”本身,而是学习者能否稳定进入任务状态并持续获得可执行反馈。机制上,技术沉浸度可通过2条路径影响决策表现:一是直接路径,即更高交互一致性可降低操作迟疑并提升流程完成度;二是间接路径,即通过认知负荷调节提升对关键线索的捕捉,再经临床情境理解转化为更准确的决策。学习动机、先验临床经验与数字素养作为调节变量,决定上述路径效应强弱(图2)。模型描述“技术沉浸度→认知负荷调节→临床情境理解→决策能力提升”的中介路径,并保留技术沉浸度对决策能力的直接效应。学习动机、数字素养与先验临床经验作为调节变量影响路径强度。模型外部设置治理边界(隐私、公平、心理安全、成本可承受),用于界定技术应用的教育可行性与推广条件。

临床决策层代表医学教育从“知识掌握”向“行为执行”的跃迁。依照情境学习理论,决策能力不是单个知识点相加,而是在团队沟通、时间压力和风险权衡中生成。因此本层将术前预演、VSP推演与卒中协作置于同一分析框架。

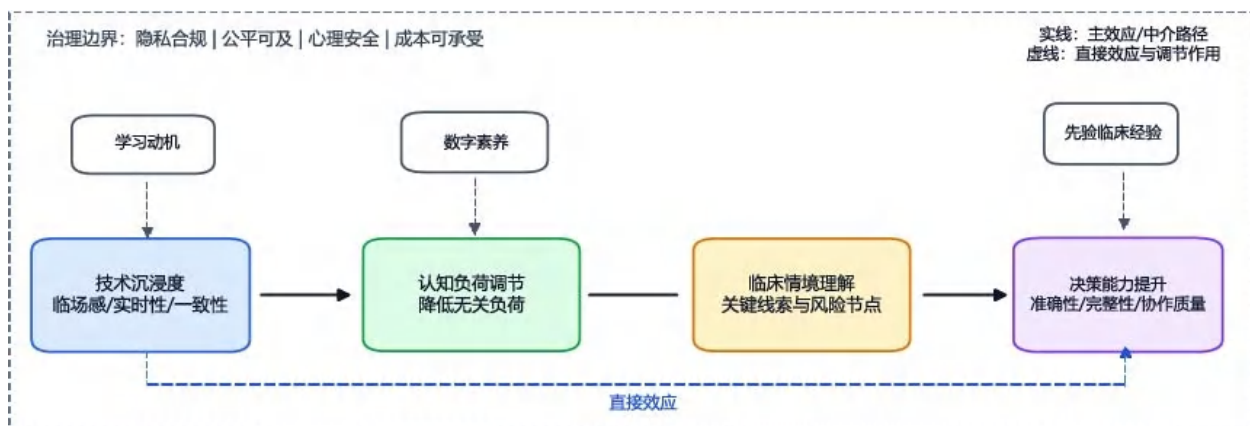


图2 元宇宙教学作用机制路径模型

2.3.1 神经外科模拟与手术规划 神经外科手术具有高风险性,这使得“从实践中学习”的成本居高不下。元宇宙技术推动手术训练从通用的解剖教学迈向患者特异性(Patient-Specific)的手术复现(Rehearsal)。

(1) 手术模拟平台的多元化生态。目前,市场上的神经外科模拟平台呈现出高度专业化的态势,具有代表性的主要分为以下三大类:Surgical Science(原Simbionix):旗下的NeuroVR和ANGIO Mentor专注于血管内介入手术。模拟器能提供导丝在血管内行进的力反馈,并记录手术时间、透视剂量和器械选择的准确性,是血管内治疗培训的金标准^[21]。ImmersiveTouch专注于利用患者真实的CT/MRI数据,结合触觉反馈技术,生成高保真的VR模型,以训练外科医生并为患者制定特定的手术计划。外科医生可以在术前佩戴VR头显,对特定患者的肿瘤进行模拟切除,从而确定最佳的手术入路和骨窗大小^[21-22]。UpSurgeOn采用“混合现实”路径,将物理实体模型(如3D打印的头骨盒子)与AR应用相结合。医学生在操作物理模型时,可借用手机或平板的AR镜头,看到叠加于其上的解剖标注与病理结构。这种低成本、高触感的方案极大地降低了显微神经外科训练的门槛^[23]。上述平台共同推动神经外科教学由“通用技能训练”向“数据驱动的患者特异性决策支持”过渡。其核心价值不仅在于重复练习操作动作,更在于沉淀可复盘的路径数据与决策依据。

(2) 增强现实手术导航:透视“隐形”的解剖。在实际的手术室环境中,AR技术正对术中导航进行革新。传统的神外导航需要医生不断抬头看屏幕,通过心理转换将二维图像投射到手术视野中。借助HoloLens 2或显微镜AR模块,医生可在术野对应位置叠加显示深部肿瘤轮廓、血管走行及功能区

边界,实现更直观的空间定位^[24]。在教学意义上,对于观摩手术的低年资医生而言,AR导航犹如一位实时导师,能在术野中“勾勒”出解剖结构,助力他们理解主刀医生的每一项操作意图,而非仅仅看到血肉模糊的术野。

(3) 手术模式的阶段性重构(审慎研判)。现有证据提示,元宇宙在神经外科中的核心价值更可能体现为患者特异性术前预演、风险识别与决策支持,而非完全替代主刀医师。医生角色正在由“单纯操作者”向“决策与监督者”扩展。在这一过渡过程中,数字孪生与AI可用于形成可解释、可复核的手术方案推演,帮助平衡病灶切除范围与功能区保护目标。其前提是模型有效性、数据质量与临床监管机制同步完善。手术规划正由“通用预演”走向“患者特异性决策支持”,其临床收益仍需通过多中心、前瞻性研究进一步验证。

2.3.2 脑卒中急救与团队协作训练 脑卒中的救治犹如一场与时间的激烈赛跑,高度依赖神经内科、急诊科、放射科以及介入科的高效协作。元宇宙所具备的多人联机功能,使其成为团队资源管理(CRM)训练的理想之选。

(1) 虚拟卒中流程演练(Stroke Code Simulation)。TACTICS VR和LumetoXR等平台可支持跨地域团队在虚拟急诊场景中进行卒中流程演练^[25-26]。全流程模拟环节中,团队成员以化身的形式现身,携手共同处理一名疑似卒中患者。他们需实时展开沟通,依次完成从分诊、查体、阅读CT到决策溶栓的整个流程。Meta分析提示,基于VR的流程训练能显著缩短现实世界中的DNT(进门到溶栓时间),并提高临床决策的准确^[26]。这种训练不仅强化了医疗流程,更锻炼了在压力环境下的沟通技巧和领导力。

(2) 卒中康复的数字化延伸。在康复教学中,

VR可用于展示运动轨迹、代偿模式及功能恢复过程,帮助学习者理解神经可塑性与干预响应之间的关系。通过VR康复系统,治疗师可以直观地看到神经可塑性可视化展示,如肢体运动轨迹和代偿模式如何改善脑卒中患者运动功能、平衡能力和日常生活活动能力^[27-28]。在远程教学场景下,虚拟交互数据可为个体化康复方案设计提供辅助证据。通过在虚拟环境中的患者交互数据,浓缩再现现实中的临床床旁长时间的观察,医学生制定个性化的康复处方,同时接受现场的疗效反馈。

这一长期随访导向的教学模式有助于学习者从急性期处置延伸至全病程管理,并强化对功能结局与生活质量的关注。

2.3.3 全球案例研究与实施 元宇宙在神经科学中的应用已呈全球化趋势,不同地区根据自身的医疗痛点发展出了各具特色的应用模式。

(1)亚洲:技术驱动与资源下沉。中国:以前述衢州市人民医院VSP项目为例,中国在AI与元宇宙结合教学方面已形成初步实践路径,可在一定程度上缓解区域间教学资源不均衡问题。利用AI和元宇宙技术改善临床教学的同质化,同时通过云端部署将高质量的虚拟病例辐射到更广泛的医学院校^[16]。复旦大学附属华山医院在脑机接口(BCI)与VR融合方向的探索,为神经外科教学提供了重要转化场景^[29]。同时也为未来“数字分身”直接干预神经系统提供最前沿的实验阵地。日本:面对老龄化社会的严峻挑战,日本高度重视痴呆症护理和远程教育。Nippon Medical School与Jolly Good公司合作,开发了基于云的VR临床教育平台,利用360度全景视频记录真实手术,使医学生在疫情期间仍能身临其境地观摩手术^[30],捕捉专家的实时动作与决策路径,为后续加载专家经验的“数字分身”积累底层数据。

(2)欧洲:课程整合与性别差异关注。德国:图宾根大学医学院将VR引入急诊医学课程。研究显示,91%的医学生认为VR可快速传达复杂概念。然而,数据也揭示了一个需要关注的现象:女性学生在“直观易用性”上的评分显著低于男性,这提示在课程设计时需要考虑技术接受度的性别差异,提供更友好的引导机制^[31]。英国:切斯特大学(University of Chester)采取了“脚手架”式的教学策略。护理学生先在VR中进行神经科场景演练(使用Oxford Medical Simulation平台),获得即时反馈后,再进入实体实验室操作模型人。这种混合模式显著提升了学生在实体操作中的自信心和表现^[32]。

(3)北美:高端模拟与精准医疗。美国:以斯坦福大学和西奈山医院为代表,重点在于高端手术模拟和患者特异性规划。斯坦福神经外科模拟中心利用VR技术让住院医师在术前“预演”复杂病例,这不仅是教学工具,更已成为保障患者安全的临床标准流程^[33-34]。该模式体现了患者特异性数据在训练与决策支持中的应用潜力。

这些全球案例表明,元宇宙在神经科教学中的价值不仅体现在技能训练,还体现在跨机构知识共享与标准化流程建设。现有证据提示其具有促进教学同质化与流程可复用性的潜力,但具体效果仍受课程设计、资源配置和评估方法差异影响。

从本层证据看,术前预演与流程协作训练具有明确应用潜力,但研究终点、评估窗口与场景条件差异较大,尚不足以直接外推为普适临床收益。要完成从“工具有效”到“平台有效”的论证,必须把行为改进与治理成本放在同一评价框架中。因此,不同变量在不同层有不同的作用。技术变量(沉浸度、交互保真度、可及性)在第3.1节用于解释平台差异;过程变量(认知负荷、参与度、协作质量)在第3.2—3.3节用于解释学习机制;结果变量(空间推理、临床决策、人文共情)在案例与结论段用于归纳教育成效。学习动机、数字素养与教学组织支持被设为调节变量,用于解释为何同一技术在不同学校或不同年资学生中产生不同效果。

本文将元宇宙教学实施划分为“课前准备—课中实施—课后转化”3个连续阶段。该流程的核心不在于单次沉浸体验,而在于将任务设计、过程反馈与迁移评估纳入同一闭环,从而实现“教—学—评—改”的一体化运行。通过知识、技能与行为的分层输出评价,教学效果可从短期课堂表现进一步延伸到临床情境中的可迁移能力。该流程也为后续多中心研究提供了可复制的实施模板与评价接口(图3)。该流程以“课前准备—课中实施—课后转化”三阶段为主线:课前完成需求评估、课程设计与平台配置;课中通过任务导入、沉浸训练和形成性反馈实现“教—学—评”同步;课后通过迁移训练、综合评估与复盘迭代形成质量改进闭环。流程输出按“知识—技能—行为”分层评价,强调评估结果反向驱动课程再设计,用于支撑元宇宙教学从单次工具应用走向可持续的平台化实施。

2.4 伦理治理层:安全、隐私与经济效能 伦理治理层不是附加讨论,而是对前三层的边界约束:当技术变量提升沉浸度时,必须同步评估隐私暴露、心理负担与公平可及性。

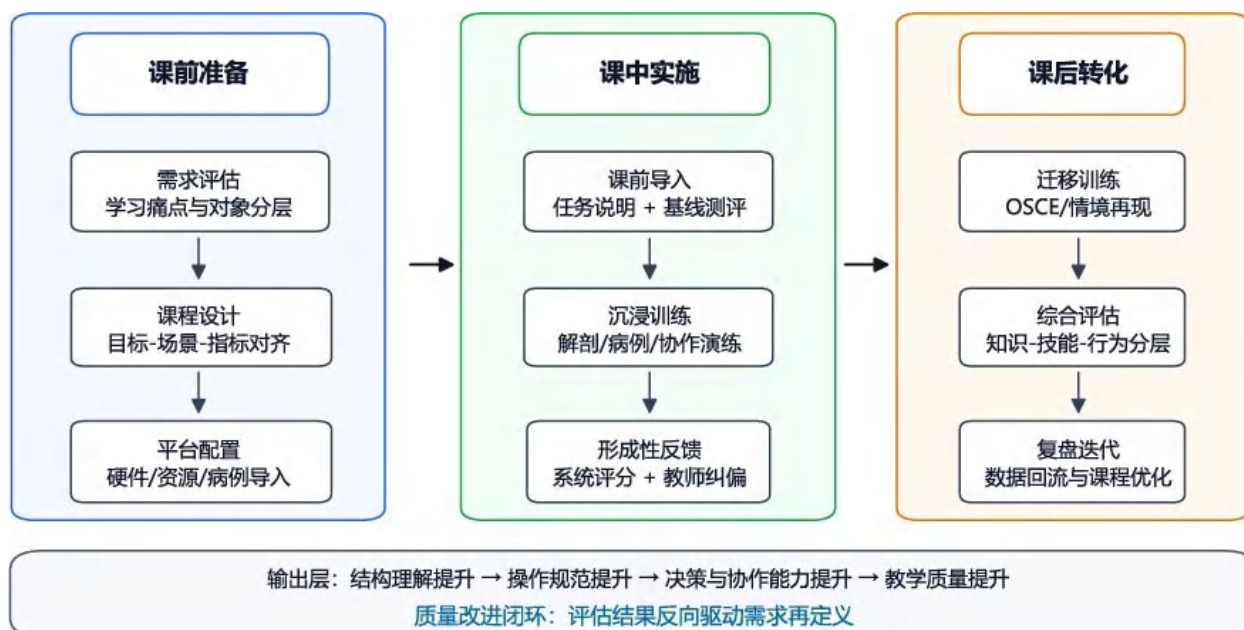


图3 元宇宙赋能神经科教学流程图(课前-课中-课后闭环)

当流程变量提升效率时,必须确认其未牺牲患者权益与职业伦理。换言之,只有在治理约束可满足时,前文观察到的工具效应才可能沉淀为可推广的平台方案。这一层直接回应了以下的问题:未来实证研究不仅要报告“是否有效”,还要报告“在何种治理代价下有效”。

伦理治理层作为覆盖上述三层的顶层规范,涵盖了虚拟环境中的患者数据隐私边界、算法生成内容的合规性、受训者的心理安全机制,以及技术投入的卫生经济学(成本-效益)评价。

2.4.1 经济学分析——成本效益与投资回报 尽管元宇宙技术初期投入高昂,但从长期运营与规模化应用视角审视,其具备显著的经济优势。

(1)成本对比分析:VR与传统尸体/动物实验。传统神经外科训练高度依赖尸体头颅标本,涉及采购、运输、防腐处理及废弃物处置等高昂成本。初始资本支出(CAPEX):建立一个VR实验室虽然需要初期投资购买头显(如HoloLens 2约\$3500/台)、高性能工作站及软件授权,但其优势在于能够提供多次重复使用的实验模拟,从而降低长期成本并提高资源利用效率。相比之下,单次尸体解剖工作坊虽然组织成本较低,但其一次性使用限制了资源的复用性。运营成本(OPEX)与长期效益:一项关于灾难医学培训的成本分析显示,VR方案虽具有较高初始开发成本(327.78/人),但在三年周期内可随培训规模扩大而将人均成本降至115.43;相比之下,实体演练人均成本约为229.79,且随人数增加呈线性上升^[35]。隐形节约:VR训练可减少对高仿真模

型人(high-fidelity manikins,单价可达数万美元)、场地与差旅的依赖^[36]。对资源受限地区而言,基于云端平台的课程分发可显著降低边际教学成本。通过云端元宇宙平台,原本仅限于顶尖中心的专家决策经验,可以实现“零边际成本”的跨国界、跨层级分发。

(2)市场趋势与虚拟融合经济。全球医疗元宇宙市场预计在2030年前将以37%~42%的年复合增长率(CAGR)爆发式增长^[37-38]。随着硬件成本下降与软件生态成熟,相关教学工具的可及性有望持续提升,原本仅限于顶尖医院的技术逐渐向医学院校和基层医院普及。该趋势可能减少部分教学环节的边际成本,但其真实经济收益仍需结合长期效果与机会成本进行系统评估。

2.4.2 挑战和伦理 尽管前景广阔,但元宇宙在神经科学的全面普及仍面临多重挑战,必须跨越生理极限与伦理红线。

(1)生理与技术挑战:晕动症。如前所述,视频透视设备(AVP)带来的晕动症(VR Sickness)是一个不容忽视的生理障碍。眼球运动疲劳、恶心和定向障碍限制了单次训练的时长(通常不超过20—30分钟)^[5]。未来的硬件迭代必须致力于降低光子到运动延迟(photon-to-motion latency)并优化视觉辐辏调节冲突。

(2)数据隐私与伦理风险。元宇宙教学涉及眼动、手势等生物特征数据及患者影像数据,数据治理与隐私保护是实施中的核心前提^[39-40]。另外,虽然VR可以培养共情,但过度依赖虚拟化身也可能

导致医疗行为的“游戏化”。教育者必须警惕,虚拟互动的最终目的是更好地服务于真实的、有血有肉的患者,而非仅仅追求高分的模拟成绩^[41]。课程设计需避免“过度游戏化”对职业价值观的潜在影响,确保技术应用服务于真实临床能力提升。

课程实施应在高沉浸训练后配置结构化复盘与伦理讨论,强化学习者对医疗风险、患者权益和专业责任的持续认知。引导学生将虚拟场景中的无痛操作与现实世界中不可逆的伦理责任重新锚定,是防止技术反噬教育内核的关键保障。据此,前三层形成“技术—学习—行为”链条,第四层提供实施边界。四者合并考虑后才有可能真正地理解神经科教学中的元宇宙革命。

3 文献综述的批判性综合

现有研究在研究设计、评价指标与随访周期方面存在较高异质性:部分研究重主观满意度,部分研究重短期技能评分,导致跨研究横向比较难度较大。国内研究更强调场景落地与资源均衡,国外研究更强调机制验证与可重复评估;两者在样本代表性、技术迭代速度和伦理治理边界方面仍存在结论分歧。

4 创新性与不足

本文创新点:(1)提出“定义—变量—层级”一体化框架,避免概念泛化;(2)提出“技术沉浸度—认知负荷—情境理解—决策能力”机制链,明确直接与间接效应;(3)提出与TRL对应的分阶段实施建议,使技术演进、教学评估与伦理治理可以同频推进。

本文局限性:(1)本文未纳入统一原始个体数据进行量化合并,且不同研究在结局定义、随访长度、学习者层级和对照条件上存在不一致;(2)本文提出的机制模型尚需通过前瞻性研究进行参数估计与路径检验。因此,本文更适合作为研究设计蓝图,而非终局性证据。

5 未来展望(基于TRL的阶段研判)

近端(1-3年,TRL 5-6):重点落在VR/AR解剖教学、虚拟标准化患者与卒中流程协作训练,目标是获得可量化、可复核的教学改进。中期(3-5年,TRL 6-7):患者特异性三维建模、术前预演与部分触觉反馈系统将逐步成熟,适用于高风险训练场景。远期(5-10年,TRL 7-8):可能出现更高水平的人机协同决策与跨地域虚拟协作平台,但仍应坚持

医生主导与伦理合规前提。总体上,元宇宙更适宜被界定为神经医学教育的渐进式增强路径,而非对传统临床带教的完全替代。

6 结论与未来演进研判

本叙事性综述通过创新性地构建“基础设施层—认知层—临床决策层—伦理治理层”四层理论框架,结合GRADE证据分级与MERSQI质量评估工具,系统而客观地梳理了元宇宙技术在神经病学与神经外科学教育中的应用轨迹与实证效能。XR技术与虚拟标准化系统可在空间认知训练、罕见体征识别及卒中团队协作教学中提供可观增益。然而,触觉反馈精度、设备耐受性与基础设施成本仍是限制其大规模落地的关键因素。

综上所述,元宇宙更适合作为传统神经科教学的增强工具,而非替代路径。后续研究应基于多中心、前瞻性、标准化评价体系,重点检验虚拟训练对真实临床表现与患者结局的长期影响。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 林继先:研究概念与设计,方法论构建,论文撰写;薛珉:论文初稿撰写与修订;黄露艳:图表制作;汤罗嘉:研究监督与项目管理,论文最终审阅与定稿。

参考文献

- [1] López-Ojeda W, Hurley R A. The medical metaverse, part 1: introduction, definitions, and new horizons for neuropsychiatry [J]. J Neuropsychiatry Clin Neurosci, 2023, 35(1): A4-A3.
- [2] Yu T, Yang Z C, Zhang M, et al. The application of the metaverse in surgical clinical teaching: transforming medical education through immersive approaches [J]. Front Oncol, 2025, 15: 1626680.
- [3] Matthew Ball. The Metaverse and how it will revolutionize everything [M]. New York: Liveright Publishing Corporation, 2022.
- [4] IEEE. Standard for metaverse: terminology, definitions, and taxonomy [EB/OL]. [2023-02-15] (2026-01-23). <https://standards.ieee.org/ieee/2048/11169/>.
- [5] Javaheri H, Fortes Rey V, Lukowicz P, et al. Assessing the feasibility of using apple vision pro while performing medical precision tasks: controlled user study [J]. JMIR XR Spat Comput, 2025, 2: e73574.
- [6] Ortiz García C, Aguilera Jiménez E, Antonio Calvo Haro J, et al. Comparative analysis of HoloLens 2 and apple vision pro in orthopedic surgery [J]. J Surg Res, 2025: 87-91.
- [7] Olexa J, Trang A, Cohen J, et al. The apple vision pro as a neurosurgical planning tool: a case report [J]. Cureus, 2024, 16(2): e54205.

- [8] Luglietto D, de Benedictis A, Marasi A, et al. Simulators with haptic feedback in neurosurgery: are we reaching the “aviator” type of training? narrative review and future perspectives [J]. *Life (Basel)*, 2025, 15(5): 777.
- [9] Lin W, Zhu Z J, He B W, et al. A novel virtual reality simulation training system with haptic feedback for improving lateral ventricle puncture skill [J]. *Virtual Real*, 2022, 26(1): 399–411.
- [10] Silber D. Virtual reality: expanding haptic applications in medical simulation beyond specialized surgical training [J]. *VR for Health*, 2025.
- [11] Wu G Q, Wang H, Ma X J, et al. SWI and CTP fusion model based on sparse representation method to predict cerebral infarction trend [J]. *Front Neurosci*, 2024, 18: 1360459.
- [12] Popov V, Mateju N, Jeske C, et al. Metaverse-based simulation: a scoping review of charting medical education over the last two decades in the lens of the ‘marvelous medical education machine’ [J]. *Ann Med*, 2024, 56(1): 2424450.
- [13] Alim E, Coşkun Ö, Peker T V. Comparison and evaluation of the effectiveness of traditional neuroanatomy teaching in medical education with virtual-reality application based on 3D virtual [J]. *Gazi Med J*, 2024, 35(4): 407–415.
- [14] Henssen D J H A, van den Heuvel L, de Jong G, et al. Neuroanatomy learning: augmented reality vs. cross-sections [J]. *Anat Sci Educ*, 2020, 13(3): 353–365.
- [15] Gonzalez-Romo N I, Mignucci-Jiménez G, Hanalioglu S, et al. Virtual neurosurgery anatomy laboratory: a collaborative and remote education experience in the metaverse [J]. *Surg Neurol Int*, 2023, 14: 90.
- [16] Xu L Y, Xu Q R, Liu C Y, et al. Virtual standardized patients for improving clinical thinking ability training in residents: randomized controlled trial [J]. *JMIR Med Educ*, 2025, 11: e73196.
- [17] Han S G, Kim Y D, Kong T Y, et al. Virtual reality-based neurological examination teaching tool (VRNET) versus standardized patient in teaching neurological examinations for the medical students: a randomized, single-blind study [J]. *BMC Med Educ*, 2021, 21(1): 493.
- [18] Hamilton A, Molzahn A, McLemore K. The evolution from standardized to virtual patients in medical education [J]. *Cureus*, 2024, 16(10): e71224.
- [19] Morone G, Ciancarelli I, Calabrò R S, et al. MetaRehabVerse: the great opportunity to put the person’s functioning and participation at the center of healthcare [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2025, 39(3): 241–255.
- [20] Veras M, Labbé D R, Furlano J, et al. A framework for equitable virtual rehabilitation in the metaverse era: challenges and opportunities [J]. *Front Rehabil Sci*, 2023, 4: 1241020.
- [21] Halman J, Tencer S, Siemiński M. Artificial intelligence and extended reality in the training of vascular surgeons: a narrative review [J]. *Med Sci (Basel)*, 2025, 13(3): 126.
- [22] Lemole G M Jr, Banerjee P P, Luciano C, et al. Virtual reality in neurosurgical education: part-task ventriculostomy simulation with dynamic visual and haptic feedback [J]. *Neurosurgery*, 2007, 61(1): 142–148.
- [23] Petrone S, Cofano F, Nicolosi F, et al. Virtual-augmented reality and life-like neurosurgical simulator for training: first evaluation of a hands-on experience for residents [J]. *Front Surg*, 2022, 9: 862948.
- [24] Sharma N, Mallela A N, Khan T, et al. Evolution of the meta-neurosurgeon: a systematic review of the current technical capabilities, limitations, and applications of augmented reality in neurosurgery [J]. *Surg Neurol Int*, 2024, 15: 146.
- [25] Hood R J, Maltby S, Keynes A, et al. Development and pilot implementation of TACTICS VR: a virtual reality-based stroke management workflow training application and training framework [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 665808.
- [26] Maltby S, Garcia-Esperon C, Jackson K, et al. TACTICS VR stroke telehealth virtual reality training for health care professionals involved in stroke management at telestroke spoke hospitals: module design and implementation study [J]. *JMIR Serious Games*, 2023, 11: e43416.
- [27] Wu J L, Zeng A H, Chen Z Y, et al. Effects of virtual reality training on upper limb function and balance in stroke patients: systematic review and meta-meta-analysis [J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23(10): e31051.
- [28] Landim S F, López R, Caris A, et al. Effectiveness of virtual reality in occupational therapy for post-stroke adults: a systematic review [J]. *J Clin Med*, 2024, 13(16): 4615.
- [29] Wang Y, Zhu M Y, Chen X, et al. The application of metaverse in healthcare [J]. *Front Public Health*, 2024, 12: 1420367.
- [30] Lewis K O, Popov V, Fatima S S. From static web to metaverse: reinventing medical education in the post-pandemic era [J]. *Ann Med*, 2024, 56(1): 2305694.
- [31] Mahling M, Wunderlich R, Steiner D, et al. Virtual reality for emergency medicine training in medical school: prospective, large-cohort implementation study [J]. *J Med Internet Res*, 2023, 25: e43649.
- [32] Li Q, Duan H, Zhou X X, et al. The use of metaverse in medical education: a systematic review [J]. *Clin Med*, 2025, 25(3): 100315.
- [33] Saher L, Asif A, Mehmood Z, et al. Virtual reality in neurosurgery: advancing training, education, and surgical planning [J]. *Asian J Neurosurg*, 2026, 21(1): 26–37.
- [34] Lim H L, Chen M W. The challenges and future of neurosurgical training—is extended reality the way moving forward? [J]. *AME Surg J*, 2025, 5: 41.
- [35] Farra S L, Gneuchs M, Hodgson E, et al. Comparative cost of virtual reality training and live exercises for training hospital workers for evacuation [J]. *Comput Inform Nurs*, 2019, 37(9): 446–454.
- [36] Deng Z H, Xiang N, Pan J J. State of the art in immersive interactive technologies for surgery simulation: a review and prospective [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(12): 1346.
- [37] Boztas C, Ghadafi E, Ibrahim R. Metaverse architectures: a

- comprehensive systematic review of definitions and frameworks [J]. *Future Internet*, 2025, 17(7): 283.
- [38] Li T, Yan J X, Gao X, et al. Using virtual reality to enhance surgical skills and engagement in orthopedic education: systematic review and meta-analysis [J]. *J Med Internet Res*, 2025, 27: e70266.
- [39] Kostick-Quenet K, Rahimzadeh V. Ethical hazards of health data governance in the metaverse [J]. *Nat Mach Intell*, 2023, 5 (5): 480-482.
- [40] Lake K, Mc Kittrick A, Desselle M, et al. Cybersecurity and privacy issues in extended reality health care applications: scoping review [J]. *JMIR XR Spatial Comput*, 2024, 1: e59409.
- [41] Letafati M, Otoum S. Digital healthcare in the metaverse: insights into privacy and security [J]. *IEEE Consum Electron Mag*, 2024, 13(3): 80-89.

引用本文

林继先, 薛珉, 黄露艳, 等. 神经科教学中的元宇宙革命: 技术基础设施、临床应用与教育效能 [J]. *元宇宙医学*, 2026, 3 (1): 52-63.

Lin J X, Xue M, Huang L Y, et al. The metaverse revolution in neurological education: technical infrastructure, clinical applications, and educational efficacy [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(1): 52-63.

AI+多模态融合在肺结节良恶性鉴别中的应用

童琳^{1,2,3,4}, 白春学^{1,2,3,4*}

1. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032

2. 上海市呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032

3. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

4. 复旦大学附属中山医院 AI+肺癌防治中心, 上海 200032

[摘要] 目的 系统综述人工智能(artificial intelligence, AI)与多模态融合技术在肺结节良恶性鉴别中的研究进展, 重点阐述影像、临床资料及血液生物标志物整合决策的理论基础、关键技术、临床价值与应用边界, 为肺结节精准分层管理及临床转化提供参考。方法 基于肺结节管理相关国际指南、经典风险预测模型、近年 AI 影像学研究、多组学与液体活检研究以及方法学规范文献, 从多模态技术评估肺结节的意义、影像数据与临床资料融合、血液标志物/循环肿瘤 DNA(circulating tumor DNA, ctDNA)/循环染色体异常细胞(circulating genetically abnormal cells, CAC)/蛋白组学协同价值、多模态模型的临床预测潜力、“辅助决策”而非“替代决策”的边界, 以及当前挑战与解决路径等方面进行归纳、分析与综合。结果 当前肺结节管理仍以结节大小、体积、密度、边缘特征、增长动力学及患者年龄、吸烟史、既往肿瘤史等临床危险因素为基础, 并依托 Fleischner 学会、英国胸科学会(British thoracic society, BTS)、肺结节分级及数据系统(lung imaging reporting and data system, Lung-RADS)、美国胸外科协会(American association for thoracic surgery, AATS)等指南及 Mayo、Herder、Brock 等经典模型完成风险分层。然而, 在亚厘米结节、亚实性结节、多发结节、炎症背景结节及中间风险结节中, 单一影像征象或传统模型的校准能力和临床净获益仍有限。AI, 尤其是影像组学(radiomics)、深度学习和多模态机器学习, 可从 CT 中提取人眼难以稳定识别的高维特征; 与年龄、吸烟状态、肺气肿、既往恶性肿瘤史等临床变量融合后, 可提升风险评估的稳定性和重分类能力。同时, 游离细胞 DNA (cell-free DNA, cfDNA)/ctDNA 甲基化、片段组学、CAC 及蛋白分类器等液体活检手段, 为中间风险结节提供了额外的分子与细胞学证据, 有助于减少不必要的侵入性操作, 并促进真正高危病灶更早进入精准诊断流程。当前多模态模型的主要价值体现在中间风险结节的二次分层、专病门诊流程优化和多学科团队(multidisciplinary team, MDT)决策支持, 但其临床落地仍受数据异质性、外部泛化能力不足、前分析标准化不充分、高维低样本、监管与支付机制等因素制约。结论 肺结节良恶性鉴别正由单模态影像判断向“影像—临床—生物标志物”多模态整合决策转变。AI 在当前阶段最合理的定位仍是辅助决策而非替代决策。未来真正可能改变临床实践的, 将是经前瞻性验证、具备可解释性与可审计性、符合指南逻辑并可嵌入肺结节专病中心和 MDT 工作流的多模态辅助决策系统。

[关键词] 肺结节; 人工智能; 多模态融合; 影像组学; 深度学习; cfDNA 甲基化; CAC; 蛋白组学; 辅助决策

[中图分类号] R 734.2 **[文献标志码]** A

Application of AI and multimodal fusion in the differential diagnosis of benign and malignant pulmonary nodules

Tong Lin^{1,2,3,4}, Bai Chunxue^{1,2,3,4*}

1. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

2. Shanghai Engineer & Technology Research Center of Internet of Things for Respiratory Medicine, Shanghai 200032, China

3. Shanghai Respiratory Research Institution, Shanghai 200032, China

4. AI+ Lung Cancer Prevention and Treatment Center, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

[Abstract] **Objective** To systematically review recent advances in artificial intelligence (AI) and multimodal fusion for differentiating benign from malignant pulmonary nodules, with a focus on the theoretical basis, key technologies, clinical utility, and practical boundaries of integrated decision-making based on imaging, clinical data, and blood-based biomarkers. **Methods** International guidelines for pulmonary nodule management, classic risk prediction models, recent AI-based imaging studies, multi-

[收稿日期] 2026-03-12

[接受日期] 2026-03-28

[基金项目] 四大慢病重大专项(2024ZD0529300). Supported by Noncommunicable Chronic Diseases-National Science and Technology Major Project (2024ZD0529300).

[作者简介] 童琳, 博士, 副主任医师. E-mail: tong.lin@zs-hospital.sh.cn

*通信作者(Corresponding author). 白春学, 博士, 教授, 主任医师. E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

omics and liquid biopsy studies, and methodological consensus documents were reviewed. Evidence was synthesized from six perspectives: the significance of multimodal assessment, integration of imaging and clinical variables, synergistic value of blood biomarkers including ctDNA and circulating genetically abnormal cells (CAC), clinical potential of multimodal models, the boundary between decision support and decision replacement, and current challenges with possible solutions. **Results** Current pulmonary nodule management still relies primarily on nodule size, volume, density, margin characteristics, growth dynamics, and conventional clinical risk factors such as age, smoking history, and prior malignancy, under the framework of established guidelines and prediction models. However, in subcentimeter nodules, subsolid nodules, multiple nodules, inflammation-related nodules, and intermediate-risk nodules, single-modality imaging features and conventional models remain inadequate in calibration and net clinical benefit. AI-based radiomics, deep learning, and multimodal machine learning can extract high-dimensional CT features beyond human visual recognition and improve risk stratification when combined with clinical variables. Meanwhile, liquid biopsy approaches, including cfDNA/ctDNA methylation, fragmentomics, CAC, and proteomic classifiers, provide additional molecular and cellular evidence for intermediate-risk nodules, thereby helping reduce unnecessary invasive procedures and accelerating precision diagnosis in truly high-risk cases. Nevertheless, real-world implementation remains limited by data heterogeneity, insufficient external validation, lack of assay standardization, high-dimensional low-sample-size issues, and regulatory and reimbursement barriers. **Conclusion** The differential diagnosis of pulmonary nodules is evolving from single-modality imaging judgment toward multimodal integrated decision-making based on imaging, clinical data, and biomarkers. At the current stage, AI should be positioned as a decision-support tool rather than a decision-replacement tool. Future practice-changing systems will likely be prospectively validated, interpretable, auditable, guideline-concordant multimodal platforms that can be seamlessly embedded into pulmonary nodule clinics and multidisciplinary workflows.

[Key Words] pulmonary nodule; artificial intelligence; multimodal fusion; radiomics; deep learning; cfDNA methylation; circulating genetically abnormal cells; proteomics; decision support

肺结节是肺癌早诊早治时代最常见的临床入口之一。随着低剂量螺旋 CT (low-dose computed tomography, LDCT) 筛查持续推进、体检胸部 CT 普及以及胸部影像检查量快速增加,肺结节已成为现代呼吸与胸部肿瘤临床实践中最常见、最复杂的影像学问题之一。美国国家肺癌筛查试验 (National Lung Screening Trial, NLST) 与荷兰-比利时肺癌筛查试验 (Nederlands-Leuvens Longkanker Screenings Onderzoek, NELSON) 等里程碑研究证实,LDCT 可降低肺癌死亡率,使“早发现”成为高危人群管理的重要策略;但与之并行的是筛查结节和偶发结节数量持续增加,临床关注重点也由“是否发现结节”进一步转向“如何对发现的结节进行准确、分层、低创且可持续的良恶性鉴别”^[1-6]。

当前肺结节评估主要建立在“影像征象+临床危险因素+指南化随访/干预阈值”的框架上。Fleischner 学会 2017 指南将实性与亚实性结节纳入统一管理体系,并对多发结节、风险因素和随访问隔作出细化;Lung-RADS v2022 更新了筛查场景下的分级与管理建议;AATS 亚实性结节专家共识进一步强调了亚实性结节的独特自然史和个体化处置逻辑。同时,Mayo、Herder、Brock 等经典模型长期用于前测恶性风险估计^[3-10]。这些框架构成了当前肺结节管理的基本底盘,但更多反映群体层面的经验规则,在高度异质的个体病例中仍存在解释力不

足的问题^[10-12]。

肺结节管理的困难并不止于“良恶性二分类”,更在于这一判断直接影响随访频率、检查路径、取材方式、手术时机及患者心理负担。对患者而言,“肺结节”常迅速引发对肺癌的高度焦虑;对医生而言,则意味着必须在有限信息下作出既不能延误、又不能过度的平衡判断。传统路径中,这种平衡主要依赖影像科医师经验、呼吸/胸外科临床判断及既有指南框架,但随着结节数量显著增加,单纯依赖经验的模式已越来越难以满足高通量、标准化与个体化并存的现实需求^[3-10]。

此外,肺结节管理受明显的地区差异和疾病谱差异影响。在真菌感染、结核或慢性炎症性肺病较常见地区,炎性结节和瘢痕样结节比例更高,影像学假阳性问题更突出;而在高筛查覆盖地区,更多被发现的是体积更小、密度更淡、自然史更长的早期病灶,传统“见结节即高度警惕”的思维也需相应调整^[3-6]。因而,肺结节良恶性鉴别从来不是一个脱离背景的单纯影像问题,而是一个嵌入人群谱系、临床场景和资源配置条件中的综合问题。

正是在这一背景下,人工智能与多模态整合迅速进入肺结节研究与转化视野。影像组学将 CT 从“可视图像”转化为“高维可计算数据”,深度学习实现了从原始体素到高阶潜在表征的端到端学习,而 cfDNA 甲基化、CAC 和蛋白分类器等液体活检工具,

则为影像难以定性的结节提供了额外的分子与细胞学证据^[13-40]。越来越多研究提示,肺结节管理未来最关键的升级,并不是再增加一个孤立的影像评分,而是构建能够整合影像、临床与生物标志物的辅助决策体系,使不同证据在同一患者体内完成相互校正、相互补充与共同赋能^[16,25-33]。

本文围绕多模态技术评估肺结节的意义、影像数据与临床资料融合、血液标志物与多组学协同价值、多模态模型在临床预测中的潜力、“辅助决策”而非“替代决策”的边界,以及挑战与解决路径等方面,系统综述AI+多模态融合在肺结节良恶性鉴别中的研究进展与转化方向,为后续建立更加精准、可解释、可落地的肺结节智能管理体系提供参考。

1 多模态技术评估肺结节的意义

LDCT筛查的临床价值已在大型随机研究中得到明确验证,但筛查获益并不是由“检出率”单独决定,而是由“检出后的管理质量”共同决定^[1-2]。如果一个筛查体系只能发现更多结节,却无法准确区分哪些值得继续随访、哪些需要进一步检查、哪些应尽快取材或手术,那么其总体收益将被大量假阳性、过度检查和患者焦虑所削弱^[1-4]。因此,肺结节管理的核心已由“能否看到病灶”转向“能否理解病灶”,即在影像发现之后尽快回答病灶的恶性概率、生长潜力及最合适的下一步路径。

单一CT形态学征象虽仍是肺结节评估的起点,但其本质上主要反映病灶宏观表型,难以完全对应底层肿瘤生物学。炎症性结节、肉芽肿、机化灶、局灶性纤维化、非典型腺瘤样增生、原位腺癌与早期浸润性腺癌,在影像上可能共享相似的大小、密度和边界特征^[3,5-6,13-18]。对亚实性结节而言,这种局限更为突出,因为其自然史较长、异质性更高,单次CT往往难以完整呈现其演化趋势^[5]。

多模态融合之所以受到重视,首先在于不同数据源之间具有信息互补性。影像提供空间结构信息,包括病灶形态、纹理、边界、内部异质性及其时间演化;临床资料提供先验概率信息,包括年龄、吸烟暴露、肺气肿、家族史和既往恶性肿瘤史等;血液与分子标志物则更接近病灶的生物学活动层面^[9,16,25-33]。其次,多模态还具有误差互补性。影像学判断易受炎症背景、机器参数和观察者经验影响,而液体活检则可能受肿瘤负荷、样本处理、检测平台和阈值选择影响。联合后有望降低单一模态的系统偏差。更重要的是,多模态整合的目的并非简单提高模型分数,而是帮助临床把模糊的中间风

险病例更可靠地向低风险或高风险两端移动,从而改变后续管理动作^[16,25,31-33]。

从临床可用性看,多模态评估最适合用于证据链不完整的结节,而非不分场景地应用于全部肺结节。典型场景包括:亚厘米结节,尤其是直径5~10 mm的实性或部分实性结节;亚实性结节和混合磨玻璃结节;传统模型评估为中间风险的病例;以及不适宜贸然侵入性操作的人群^[5,8-9,28-33]。对于这些患者,多模态整合不仅有望提高恶性风险判别,更重要的是可提供更符合个体条件的路径选择。

从更宏观的角度看,多模态评估的价值不能仅以准确率定义,还应从医疗资源配置角度理解。若一个模型能够更可靠地识别真正低风险人群,就可能减少不必要的高成本影像和有创操作;若能更早识别真正高风险人群,则可能缩短诊断延迟,提高早期可切除肺癌的发现率^[3-10]。因而,多模态评估的重要性并不只在于“更先进”,而在于其可能改变管理强度分布,使有限资源更集中于真正需要强化干预的人群。

需要强调的是,多模态并不等于把尽可能多的数据一股脑塞进模型。真正有临床意义的多模态,应体现为不同信息层级之间的有序整合:基础影像和临床危险因素可作为第一层,影像组学或深度学习特征作为第二层,血液标志物和omics信号作为第三层^[13-40]。这种分层设计更符合真实工作流,也更有助于控制成本和提高可实施性。

2 影像数据与临床资料融合

无论AI如何发展,结节大小、体积、部位、数目、密度、边缘特征及增长动力学,仍然是肺结节风险评估中最基础、最有解释力的一类输入变量^[3-10]。同样,年龄、吸烟暴露、肺气肿、既往恶性肿瘤史和家族史等临床变量,也不会因为AI的出现而失去价值。Mayo、Herder和Brock模型的长期沿用,正体现了影像与临床联合判断的基本逻辑^[7-10]。

影像组学的本质,是把原本由肉眼观察和语言描述的影像学表型转化为可大规模提取、量化和建模的数值特征^[13-18,22-23]。这些特征包括灰度分布、纹理粗细、形状不规则性、边界复杂度、内部异质性、周围肺实质特征以及病灶与宿主界面模式等。其价值首先体现在对“人眼难以稳定识别差异”的捕捉能力上,但同时也面临对扫描协议、图像重建和分割方法敏感等局限^[22-24]。

深度学习进一步推动影像特征提取由“手工特征工程”走向“端到端表征学习”^[16,41-44]。它能够从

原始CT体素或多切面图像中自动学习高阶潜在模式,在复杂背景、边缘模糊病灶、微小结节和时序影像建模中显示出明显潜力。尤其在结节形态不典型、人工定义特征难以充分表达差异的场景中,深度学习可能更具优势。但与此同时,其黑箱性、外部泛化问题和解释困难,也决定了它难以脱离临床场景独立使用^[19-24]。

肺结节是高度依赖先验概率的临床问题。相同大小和外观的结节,在老龄重度吸烟者与年轻非吸烟者中的恶性含义并不相同^[7-10]。因此,影像AI模型若脱离患者背景单独输出“高风险”或“低风险”,其结果往往不具备足够稳定的临床解释力。已有研究提示,将影像AI风险分数与年龄、吸烟状态、肺气肿、既往恶性肿瘤史等变量联合后,模型的判别力、校准度和净获益通常更加稳定^[16,25,45-48]。

未来更重要的方向,是将影像-临床融合进一步扩展为时序化、动态化风险评估。肺结节不是静态对象,而是随时间演化的过程。体积倍增时间、实性成分增加、边界变化和长期稳定性,往往比单次直径更能反映其真实生物学行为^[4-6,10,44,48]。因此,高水平模型应尽量纳入纵向随访影像,使风险评估由单个时间点的静态分类升级为动态更新的风险曲线。

同时,临床变量不只是协变量,更是模型输出的解释框架。医生在接收模型结果时,天然会追问:这一输出是否已考虑高龄、吸烟史、肺气肿或既往肿瘤史?若缺乏这些语境,模型即使性能较高,也难以真正获得信任。影像分割质量同样决定后续建模上限,尤其在亚实性结节中,边界模糊和低对比度使分割偏差更易被放大^[22-24]。此外,影像-临床融合模型在评价时应更加重视校准,而不只是区分能力,因为临床真正使用的不是“排序”,而是“概率是否可信”^[20-21]。

3 血液标志物、ctDNA、CAC、蛋白组学等协同价值

液体活检被纳入肺结节研究视野,并不是因为其已达到可以替代病理的程度,而是因为它提供了与影像和临床先验不同维度的证据^[25-27]。影像主要反映形态表型,临床变量主要反映背景风险,而液体活检则试图捕捉肿瘤相关分子、细胞或宿主反应信号。这种层次差异,决定了液体活检最适合做补证,而非单独定论。

CAC是近年来肺结节液体活检研究中的亮点之一。Ye等^[28]研究聚焦于 ≤ 10 mm肺结节,发现CAC对识别小结节肺癌具有附加诊断价值。这类

研究的重要性在于,其瞄准了影像最难分层、病理又不易获得、同时临床最担心延误早癌的一类病灶。后续研究进一步提示,CAC与CT特征及临床变量联合时,其判别能力优于单独应用^[29-30]。因而,CAC更适合作为影像和临床评估后的二次校正工具。

在分子层面,cfDNA/ctDNA甲基化和片段组学成为近年肺结节研究热点^[31-34]。早期肺癌和亚厘米结节由于肿瘤负荷较低,单纯突变型ctDNA检测常面临灵敏度不足问题;相比之下,甲基化和片段组学更可能在早期阶段保留可用信号。其优势在于更接近肿瘤发生早期的表观遗传异常,并不完全依赖高丰度肿瘤DNA释放。相关研究提示,将cfDNA甲基化与LDCT影像及临床变量联合,可形成更贴近实际应用场景的风险分层模型^[31-34]。

蛋白组学和蛋白分类器则代表另一条更易与门诊流程衔接的路线。传统血清肿瘤标志物在肺结节良恶性鉴别中的独立表现有限,因此研究重点已由单一指标转向多蛋白面板与整合分类器^[35-40]。PANOPTIC及其后续分析显示,整合若干血浆蛋白和临床因素的分类器,在某些低至中等风险结节人群中,具有辅助“风险下调”和减少不必要侵入性操作的潜力^[35-37]。

从现有证据看,未来肺结节生物标志物发展的最优方向,并不是寻找一个适用于所有场景的“万能检测”,而是根据不同临床问题整合不同层面的信号。对亚厘米结节和筛查场景,cfDNA甲基化与CAC可能更有潜力;对低至中等风险偶发结节,蛋白分类器与临床模型结合可能更现实;对复杂病例,则可能需要临床+CT+omics的深度整合模型^[25-34]。

同时必须指出,肺结节生物标志物的理想定位应是“二次分层”工具,而不是开局即替代影像作出决定。对肺结节而言,最现实的应用场景,是在影像和临床判断之后,为“尚未足以决定下一步动作”的患者提供额外证据^[25-27]。甲基化与片段组学的潜力在于“早期信号放大”,而蛋白组学的优势则在于更容易嵌入门诊流程。未来开发组合biomarker时,也应警惕单纯堆砌变量带来的冗余和不可解释性。对临床而言,一个可重复、可解释、可支付的简洁模型,往往比一个极其复杂但难以落地的模型更有价值。

4 多模态模型在临床预测中的潜力

肺结节模型研究中,AUC、敏感度和特异度仍是

常见指标,但从临床视角看,更重要的问题是:模型是否真正改变了患者管理^[16,20-21,25]。如果一个模型仅在统计学指标上略有提高,却未减少不必要穿刺、未降低良性手术比例、也未使高危结节更快进入治疗流程,那么其临床意义仍然有限。

在肺结节管理中,低风险结节通常可按指南随访,高风险结节往往已具备相对明确的侵入性诊断或手术倾向^[3-10]。真正最需要多模态辅助的,是处于中间风险区间的患者。对这部分人群而言,传统影像和临床信息往往难以给出确定结论,而任何额外的有价值证据都可能影响下一步动作。多模态模型若能将这部分患者更稳健地向低风险或高风险两端推移,其临床价值就远大于在总体样本中单纯追求更高分。

从 workflow 角度看,肺结节管理可分为3层:入口层完成结节检出与初步风险提示;专病门诊层完成影像、临床及必要生物标志物的进一步重分类;MDT层作出最终的随访、PET-CT、支气管镜、经皮穿刺或手术决策^[4-5,16]。多模态模型最适合嵌入第二层与第三层之间,作为结构化证据整合器。这样既能提高路径标准化程度,又能保留对复杂病例的人工裁量。

近年的代表性研究已逐步由“CT+年龄+吸烟史”的简化模式,发展到 clinic-radiomics-omics 的联合建模^[16,31-33]。这意味着肺结节 AI 的竞争重点正在由“谁的单模态模型更高分”转向“谁能构建更符合临床真实决策流程的整合系统”。这类系统的价值,不仅在于理论上更全面,更在于其更接近真实世界中的问题解决方式:医生从来不是只看一张 CT 作决定,而是在不同层面证据间进行综合判断。

从转化角度看,多模态模型更值得关注的终点,还包括“动作改变率”,即模型在多大比例患者中真正改变了医生原本的管理计划。例如,原本拟行经皮穿刺的患者,在综合风险下调后转为影像随访;原本计划半年后复查的患者,在综合风险上调后提前进入 MDT 或取材流程。只有当模型能在这些具体动作层面带来合理改变,才说明它真正参与了临床决策。

此外,多模态模型落地还必须回答一个现实问题:多高的风险需要进一步检查,多低的风险可以安心随访。不同场景下,这些阈值并不相同。筛查项目中,为控制漏诊,阈值可能更保守;在高龄合并症患者中,为避免过度干预,阈值可能更强调净获益;在亚实性结节中,短期风险与长期风险又不一定一致。因此,一个真正实用的肺结节模型,不应

只告诉医生“恶性概率 18%”,而应尽量提示该风险在当前场景下更倾向于哪一种管理路径。

随着模型能力提升,多模态系统还有望推动肺结节随访策略由“固定频率复查”转向“个体化风险驱动复查”。不同结节即使大小相似,其综合风险和增长潜力也可能差异明显。若低风险结节可适当延长复查间隔,而风险升高者提前进入更密集评估,则既可减少不必要辐射暴露和医疗负担,也更符合精准医学思路。

5 “辅助决策”而非“替代决策”的边界

无论模型表现多好,肺结节良恶性鉴别在相当长时期内仍将是一种概率判断^[3-10]。“高风险”意味着更应加快进一步验证,并不等于病理已确诊;“低风险”意味着更倾向于观察,也不等于绝对安全。因此,AI 与多模态模型的最佳定位,是帮助医生更精准地量化风险和优化路径,而不是脱离病理、随访和 MDT 独立作出不可逆决策。

同时,不同人群和场景下,同一模型分数的含义并不相同。筛查人群、偶发结节人群、既往恶性肿瘤患者、炎症高发地区居民及非吸烟女性,具有明显不同的疾病谱和先验概率^[4-6,9,16]。因此,同一个模型分数在不同人群中的含义不应被机械等同。任何模型在落地前都必须明确目标人群、阈值设定和不适用边界。

近年来,CLAIM、TRIPOD+AI、PROBAST+AI 等框架不断完善,强调医疗 AI 模型必须具备透明报告、偏倚评估、外部验证、可解释性和持续性能监测^[19-21]。对肺结节模型而言,这些要求尤为重要,因为此类模型高度依赖阈值、场景和人群适配。

在肺结节场景中,更符合实际的路径,是将人机协同设计为分工优化:AI 负责高通量、标准化、对微弱模式敏感的任务,如结节检出、定量测量、风险初筛和证据整理;临床医生负责病史整合、异常情境识别、价值判断和与患者共同决策。二者不是彼此竞争,而是在不同层面发挥优势。尤其对中间风险患者而言,其之所以困难,正是由于信息不完整、证据存在冲突、不同路径各有代价。若将这类情况简单外包给单一模型,最容易造成过度相信单一分数的误区。正确做法应是把模型结果作为强化讨论的工具,而不是压缩讨论的借口。

6 挑战与解决方案

肺结节影像数据在设备品牌、层厚、重建核、剂量、分割方式和标注标准上差异显著,这些差异会

直接影响影像组学和深度学习模型的稳定性^[15-24]。解决之道包括多中心标准化采集、稳健特征筛选、域适配、联邦学习和充分外部验证。只有当模型在不同医院、不同设备和不同人群中均能维持稳定性,才具备真实世界应用价值。

液体活检虽然非侵入,但其结果高度依赖采血时间、样本处理、保存方式、检测平台和阈值设定^[25-40]。不同实验室之间若缺乏统一 SOP,结果的可比性和可重复性都将受到影响。因此,未来必须强化样本库建设、跨平台验证和流程标准化,明确不同标志物在不同结节场景下的最优使用方式。

多模态模型常同时纳入大量影像特征、临床变量和分子指标,但真实样本数和恶性事件数并不总是足够,易形成典型的高维低样本问题^[19-21]。这会带来训练集高性能、外部验证失效的风险。因此,未来研究应更加重视降维、嵌套验证、校准度和临床净获益,而不是片面追求高 AUC。

即使模型研究结果理想,若不能满足监管审批要求、缺乏成本效果证据、无法与 PACS/HIS/结节随访平台对接,其临床价值仍难以充分实现^[16,19-21,25]。真正决定多模态模型转化深度的,不只是技术表现,还包括其是否可解释、可审计、可部署、可支付,并能否自然嵌入现有肺结节专病中心工作流。

此外,许多肺结节 AI 或 biomarker 研究采用的是经过筛选的理想化队列,但真实临床中,患者流往往更加复杂。一个模型若只能在理想化数据集中工作,而不能适应真实世界复杂性,就很难真正进入日常诊疗。因此,未来研究需要更多地由“精选样本验证”转向“连续患者流验证”。

肺结节管理不仅是技术问题,也是沟通问题。即使模型准确,若医生无法向患者解释“为什么建议继续观察而不是立刻手术”“为什么虽然是结节但目前总体风险仍低”,患者仍可能因焦虑而倾向过度检查。因此,多模态系统未来若想真正提升临床质量,还应考虑如何把复杂模型结果转化为便于医生与患者沟通的风险表达方式。

一个真正可推广的肺结节多模态系统,至少应形成以下闭环:(1)在多中心队列中完成开发与外部验证;(2)明确目标人群、阈值和不适用场景;(3)在真实世界前瞻性研究中证明其能改变管理路径并改善资源使用;(4)形成与医院信息系统和结节随访平台兼容的可部署形态。缺少其中任一步,模型都可能停留在“科研可发表”而非“临床可使用”的阶段。

7 结 论

肺结节良恶性鉴别正处于由单模态影像判断向多模态证据整合决策过渡的关键阶段^[16,25-33]。现行指南和传统临床风险模型仍是管理底座,但单纯依赖影像形态学和静态临床变量,已难以满足筛查时代对精细分层和低创诊疗的要求^[3-10]。AI 尤其是影像组学、深度学习、多模态机器学习,以及 cfDNA 甲基化、CAC、蛋白分类器等液体活检工具的加入,使“影像—临床—生物标志物”联合决策成为现实可行的发展方向^[16,25-37]。

其中,中间风险结节将是多模态模型最重要、也最能体现临床价值的应用人群。对于这部分患者,单一模态证据常常不足,而多模态整合有望通过风险重分类减少不必要侵入性检查、降低良性结节手术比例,并促使真正高危病灶更快进入精准诊断和治疗路径。与此同时,也必须清醒认识到,AI 在当前阶段最合理的角色仍是辅助决策而非替代决策。真正能够改变实践的,不是某一个孤立算法,也不是某一个单一生物标志物,而是经前瞻性验证、符合指南逻辑、具有可解释性和可审计性、并能嵌入肺结节专病中心和 MDT 工作流的多模态辅助决策系统^[16,19-21,25-33]。

还应进一步强调,肺结节多模态融合的终极目标,并不是把所有患者都送入更复杂、更昂贵的检测流程,而是建立一种“按风险逐层升级”的管理体系:低风险患者得到更安心、更简化的随访;中间风险患者获得更有针对性的补充证据;高风险患者更快进入精准诊断与治疗路径。只有当多模态系统能够同时服务于“减少过度”与“避免延误”这两个目标时,它才真正体现出临床价值。

从更长远的角度看,肺结节可能成为整个呼吸肿瘤智能管理体系的一个入口场景。随着影像组学、液体活检、纵向随访建模和专病中心平台化建设的持续推进,未来肺结节评估有望由一次性判断演变为持续更新的数字化风险管理过程。在这一过程中,AI 不应被视为孤立工具,而应被视为连接影像、临床、生物标志物与 MDT 的桥梁。只有这样,肺结节管理才可能真正由“发现病灶”升级为“整合证据、精准分流、长期优化”。

未来研究应进一步强化多中心真实世界验证、时序数据融合、跨平台标准化和临床净获益评估,推动肺结节评估从“看见结节”真正迈向“看懂结节、分准风险、选对路径”。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 童琳:撰写、修改、核对文献;白春学:选题、撰写、定稿。

参考文献

- [1] National Lung Screening Trial Research Team. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening [J]. *N Engl J Med*, 2011, 365(5): 395–409.
- [2] de Koning H J, van der Aalst C M, de Jong P A, et al. Reduced lung-cancer mortality with volume CT screening in a randomized trial[J]. *N Engl J Med*, 2020, 382(6): 503–513.
- [3] MacMahon H, Naidich D P, Goo J M, et al. Guidelines for management of incidental pulmonary nodules detected on CT images: from the fleischner society 2017[J]. *Radiology*, 2017, 284(1): 228–243.
- [4] Christensen J, Prosper A E, Wu C C, et al. ACR lung-RADS v2022: assessment categories and management recommendations [J]. *CHEST*, 2024, 165(3): 738–753.
- [5] Chen H, et al. The 2023 AATS expert consensus document: management of subsolid lung nodules. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2024.
- [6] Callister M E J, Baldwin D R, Akram A R, et al. British Thoracic Society guidelines for the investigation and management of pulmonary nodules: accredited by NICE [J]. *Thorax*, 2015, 70(Suppl 2): ii1–ii54.
- [7] Swensen S J, Silverstein M D, Ilstrup D M, et al. The probability of malignancy in solitary pulmonary nodules. Application to small radiologically indeterminate nodules [J]. *Arch Intern Med*, 1997, 157(8): 849–855.
- [8] Herder G J, van Tinteren H, Golding R P, et al. Clinical prediction model to characterize pulmonary nodules: validation and added value of 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography[J]. *Chest*, 2005, 128(4): 2490–2496.
- [9] McWilliams A, Tammemagi M C, Mayo J R, et al. Probability of cancer in pulmonary nodules detected on first screening CT [J]. *N Engl J Med*, 2013, 369(10): 910–919.
- [10] Choi H K, Ghobrial M, Mazzone P J. Models to estimate the probability of malignancy in patients with pulmonary nodules [J]. *Ann Am Thorac Soc*, 2018, 15(10): 1117–1126.
- [11] Maldonado S G, Tanner N T, Silvestri G A, et al. Evaluation of prediction models for identifying malignancy in pulmonary nodules detected via low-dose CT screening. *JAMA Netw Open*. 2020;3(10):e2023121.
- [12] Chen S, Lin W L, Liu W T, et al. Pulmonary nodule malignancy probability: a meta-analysis of the Brock model[J]. *Clin Radiol*, 2025, 82: 106788.
- [13] Ather S, Kadir T, Gleeson F. Artificial intelligence and radiomics in pulmonary nodule management: current status and future applications[J]. *Clin Radiol*, 2020, 75(1): 13–19.
- [14] Kim R Y. Radiomics and artificial intelligence for risk stratification of pulmonary nodules: Ready for primetime? [J]. *Cancer Biomark*, 2025, 42(1): CBM230360.
- [15] Warkentin M T, Al-Sawaihey H, Lam S, et al. Radiomics analysis to predict pulmonary nodule malignancy using machine learning approaches[J]. *Thorax*, 2024, 79(4): 307–315.
- [16] Wang C D, Shao J, He Y C, et al. Data-driven risk stratification and precision management of pulmonary nodules detected on chest computed tomography[J]. *Nat Med*, 2024, 30(11): 3184–3195.
- [17] Du S, Wu T W, Wang H, et al. Advances in modelling the risk of benign and malignant lung nodules [J]. *Front Oncol*, 2025, 15: 1648548.
- [18] Li X, et al. Narrative review of the application of artificial intelligence in the diagnosis and management of pulmonary nodules. *J Thorac Dis*. 2025.
- [19] Mongan J, Moy L, Kahn C E Jr. Checklist for artificial intelligence in medical imaging (CLAIM): a guide for authors and reviewers[J]. *Radiol Artif Intell*, 2020, 2(2): e200029.
- [20] Collins G S, Moons K G M, Dhiman P, et al. TRIPOD+AI statement: updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods [J]. *Bmj*, 2024: e078378.
- [21] Moons K G M, Damen J A A, Kaul T, et al. PROBAST+AI: an updated quality, risk of bias, and applicability assessment tool for prediction models using regression or artificial intelligence methods[J]. *BMJ*, 2025, 388: e082505.
- [22] Gillies R J, Kinahan P E, Hricak H. Radiomics: images are more than pictures, they are data [J]. *Radiology*, 2016, 278(2): 563–577.
- [23] Zwanenburg A, Vallières M, Abdalah M A, et al. The image biomarker standardization initiative: standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping [J]. *Radiology*, 2020, 295(2): 328–338.
- [24] Avanzo M. Robust radiomics: a review of guidelines for reproducible and clinically translatable radiomic studies [J]. *Front Radiol*, 2025.
- [25] Paez R, Kammer M N, Tanner N T, et al. Update on biomarkers for the stratification of indeterminate pulmonary nodules[J]. *CHEST*, 2023, 164(4): 1028–1041.
- [26] McGann K C, Khalil T A, Kammer M N, et al. Biomarkers for the diagnosis of indeterminate pulmonary nodules: are we there yet?[J]. *J Thorac Dis*, 2025, 17(8): 6265–6282.
- [27] Afridi W A, Picos S H, Bark J M, et al. Minimally invasive biomarkers for triaging lung nodules—challenges and future perspectives[J]. *Cancer Metastasis Rev*, 2025, 44(1): 29.
- [28] Ye M S, Zheng X X, Ye X, et al. Circulating genetically abnormal cells add non-invasive diagnosis value to discriminate lung cancer in patients with pulmonary nodules ≤ 10 mm [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 638223.
- [29] Yang H, Chen H J, Zhang G R, et al. Diagnostic value of circulating genetically abnormal cells to support computed tomography for benign and malignant pulmonary nodules [J]. *BMC Cancer*, 2022, 22(1): 382.
- [30] Tahvilian S, Kuban J D, Yankelevitz D F, et al. The presence

- of circulating genetically abnormal cells in blood predicts risk of lung cancer in individuals with indeterminate pulmonary nodules [J]. *BMC Pulm Med*, 2023, 23(1): 193.
- [31] Liang W H, Tao J S, Cheng C, et al. A clinically effective model based on cell-free DNA methylation and low-dose CT for risk stratification of pulmonary nodules [J]. *Cell Rep Med*, 2024, 5(10): 101750.
- [32] Zhao M M, Xue G, He B X, et al. Integrated multiomics signatures to optimize the accurate diagnosis of lung cancer[J]. *Nat Commun*, 2025, 16: 84.
- [33] Yang M, Yu H S, Feng H X, et al. Enhancing the differential diagnosis of small pulmonary nodules: a comprehensive model integrating plasma methylation, protein biomarkers, and LDCT imaging features[J]. *J Transl Med*, 2024, 22(1): 984.
- [34] Li Y, Xie F F, Zheng Q, et al. Non-invasive diagnosis of pulmonary nodules by circulating tumor DNA methylation: a prospective multicenter study [J]. *Lung Cancer*, 2024, 195: 107930.
- [35] Silvestri G A, Tanner N T, Kearney P, et al. Assessment of plasma proteomics biomarker's ability to distinguish benign from malignant lung nodules: results of the PANOPTIC (pulmonary nodule plasma proteomic classifier) trial [J]. *Chest*, 2018, 154(3): 491-500.
- [36] Tanner N T, Porter A, Gould M K, et al. Assessment of integrated classifier's ability to improve the evaluation of indeterminate pulmonary nodules. *Chest*. 2021;159(6):2360-2369.
- [37] Long K J, Pitcher T, Kurman J S, et al. Using a blood biomarker to distinguish benign from malignant pulmonary nodules a subgroup analysis comparing screen detection, sex, smoking history, and nodule size[J]. *CHEST*, 2023, 164(6): 1572-1575.
- [38] Jia B, Wang T T, Pan L X, et al. An integrated proteomic classifier to distinguish benign from malignant pulmonary nodules[J]. *Clin Proteom*, 2025, 22(1): 11.
- [39] Li X J, Hayward C, Fong P Y, et al. A blood-based proteomic classifier for the molecular characterization of pulmonary nodules [J]. *Sci Transl Med*, 2013, 5(207): e3007013.
- [40] Kuang M Y, Tao X T, Peng Y Z, et al. Proteomic analysis of plasma exosomes to differentiate malignant from benign pulmonary nodules[J]. *Clin Proteom*, 2019, 16(1): 5.
- [41] Sun Y, Ge X Y, Niu R, et al. PET/CT radiomics and deep learning in the diagnosis of benign and malignant pulmonary nodules: progress and challenges[J]. *Front Oncol*, 2024, 14: 1491762.
- [42] Wang H. Risk-stratified classification of pulmonary nodule malignancy and invasiveness using multimodal machine learning [J]. *Lancet Reg Health West Pac*, 2025.
- [43] Sohn J H, Fields B K K. Radiomics and deep learning to predict pulmonary nodule metastasis at CT [J]. *Radiology*, 2024, 311(1): e233356.
- [44] Ohno Y, Aoyagi K, Yaguchi A, et al. Differentiation of benign from malignant pulmonary nodules by using a convolutional neural network to determine volume change at chest CT [J]. *Radiology*, 2020, 296(2): 432-443.
- [45] van Riel S J, Ciompi F, Winkler Wille M M, et al. Malignancy risk estimation of pulmonary nodules in screening CTs: Comparison between a computer model and human observers [J]. *PLoS One*, 2017, 12(11): e0185032.
- [46] Hammer M M, Palazzo L L, Kong C Y, et al. Limited utility of pulmonary nodule risk calculators for low-dose CT lung cancer screening[J]. *J Am Coll Radiol*, 2018, 15.
- [47] Nair V S, Sundaram V, Desai M, et al. Accuracy of models to identify lung nodule cancer risk in the national lung screening trial [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, 197(9): 1220-1223.
- [48] Tammemagi M, Ritchie A J, Atkar-Khattra S, et al. Predicting malignancy risk of screen-detected lung nodules-mean diameter or volume[J]. *J Thorac Oncol*, 2019, 14(2): 203-211.

引用本文

童琳,白春学. AI+多模态融合在肺结节良恶性鉴别中的应用[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(1): 64-71.

Tong L, Bai C X. Application of AI and multimodal fusion in the differential diagnosis of benign and malignant pulmonary nodules [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(1): 64-71.

深度学习辅助精细评估肺结节影像



白春学^{1*}, 朱煜²

1. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重医学科, 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

2. 华东理工大学信息科学与工程学院, 上海 200237

[摘要] 随着低剂量螺旋CT(low-dose computed tomography, LDCT)筛查的推广及胸部CT在体检、慢病管理和多学科诊疗中的广泛应用,肺结节检出率持续升高。肺结节管理的重点亦由“发现病灶”逐步转向“精细评估、风险分层和动态随访”。传统影像判读主要依赖结节直径、密度、边缘及增长趋势等指标,虽在临床实践中具有重要价值,但在小结节、血管旁结节、贴胸膜结节、亚实性结节及多发结节等复杂场景中,仍存在评估者差异大、重复性不足和纵向比较困难等问题。深度学习能够直接从二维、三维乃至多时点CT影像中自动提取多尺度表征特征,已被广泛应用于肺结节自动检出、精准分割、表型刻画、良恶性风险评估、动态随访及进展预测等多个环节。本文围绕肺结节影像精细评估的临床基础与管理框架,系统综述深度学习在肺结节检出与分割、影像表型精细刻画、良恶性分层决策、时间序列随访分析及临床转化方面的研究进展,并结合 Fleischner 学会指南、ACR Lung-RADS、BTS 指南及近年亚实性结节相关共识,讨论深度学习在真实世界应用中的主要瓶颈,包括外部验证不足、标注真值异质性、可解释性有限、概率校准不足及流程整合困难等。

[关键词] 肺结节;深度学习;低剂量螺旋CT;磨玻璃结节;影像精细评估;风险分层

[中图分类号] R 563 **[文献标志码]** A

Deep learning-assisted fine assessment of pulmonary nodule images

Bai Chunxue^{1*}, Zhu Yu²

1. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University; Shanghai Center for Respiratory Internet of Things Medical Engineering Technology; Shanghai Respiratory Research Institute; Shanghai 200032, China

2. School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

[Abstract] With the increasing adoption of low-dose computed tomography (LDCT) screening and the widespread use of chest CT in health examinations, chronic disease management, and multidisciplinary care, the detection rate of pulmonary nodules has risen substantially. Accordingly, the focus of pulmonary nodule management has shifted from simple lesion detection to refined evaluation, risk stratification, and longitudinal follow-up. Traditional radiologic assessment mainly relies on nodule diameter, density, margin characteristics, and interval growth. Although these approaches remain clinically valuable, they are limited by interobserver variability, suboptimal reproducibility, and difficulty in longitudinal comparison, especially in small nodules, juxta-vascular nodules, pleural-based nodules, subsolid nodules, and multiple nodules. Deep learning can automatically extract multi-scale imaging representations from two-dimensional, three-dimensional, and longitudinal CT data. In recent years, it has been widely applied to pulmonary nodule detection, precise segmentation, phenotypic characterization, malignancy risk prediction, dynamic follow-up, and progression forecasting. This review summarizes the clinical basis of refined pulmonary nodule imaging assessment and the current management framework, and systematically discusses recent advances in deep learning for nodule detection and segmentation, radiologic phenotype characterization, malignancy risk stratification, longitudinal follow-up, and clinical translation. In addition, based on the Fleischner Society guidelines, ACR Lung-RADS, BTS guideline, and recent consensus statements on subsolid nodules, this review analyzes the major barriers to real-world implementation, including insufficient external validation, heterogeneity of reference standards, limited interpretability, poor probability calibration, and incomplete workflow integration.

[Key Words] pulmonary nodule; deep learning; low-dose computed tomography; ground-glass nodule; refined imaging

[收稿日期] 2026-02-26

[接受日期] 2026-03-07

[基金项目] 四大慢病重大专项(2024ZD0529300). Supported by Noncommunicable Chronic Diseases-National Science and Technology Major Project (2024ZD0529300).

[作者简介] 白春学,博士,主任医师、教授。

*通信作者(Corresponding author). E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

assessment; risk stratification

肺癌长期位居全球肿瘤死亡原因前列,而肺结节则是肺癌早期发现、风险评估和干预决策中最常见、最关键的影像学切入点。随着低剂量螺旋CT(low-dose computed tomography, LDCT)筛查推广和胸部CT在体检、慢病管理及多学科诊疗中的广泛应用,临床面对的不再只是“能否发现肺结节”,而是“如何对肺结节进行精细评估、准确分层和长期管理”。美国国家肺癌筛查试验(National Lung Screening Trial, NLST)证实,LDCT筛查可使肺癌死亡率下降20%;荷兰-比利时NELSON研究进一步表明,基于体积CT的筛查可显著降低高危人群肺癌死亡率^[1-2]。美国预防服务工作组2021建议将筛查起始年龄降至50岁、吸烟暴露阈值降至20包年;美国癌症学会随后也更新了相关建议^[3-4]。肺结节诊治中国专家共识^[5]鉴于早期肺癌患者平均年龄在50岁左右,建议将肺癌筛查年龄降至40岁,且具有下述任一危险因素者(1)吸烟指数 ≥ 400 支/年(或20包/年);(2)环境或高危职业暴露史(如石棉、铍、铀、氡等接触者);(3)合并慢性阻塞性肺病、弥漫性肺纤维化或曾患肺结核者;(4)曾患恶性肿瘤或有肺癌家族史者,尤其一级亲属家族史。推荐每年采用胸部LDCT对肺癌高危人群进行筛查。这些循证证据提示,未来进入临床管理路径的肺结节数量将持续增加,肺结节影像评估的标准化、自动化和精细化需求也将随之增强。

从临床实践看,肺结节的来源多种多样。一部分来自高危人群LDCT筛查,一部分来自体检或住院期间的偶然发现,另有相当数量出现于慢性阻塞性肺病、肺纤维化、感染后改变或肿瘤随访患者的常规影像检查中。不同来源结节的人群风险背景、结节类型构成、随访依从性和处置目标上存在明显差异。例如,筛查场景更强调结构化分层与总体流程效率,而偶发结节管理更重视个体化判断和既往病史整合。因此,肺结节影像学评估不仅是影像学技术问题,也是场景化管理问题。

肺结节管理的重点,已由“发现病灶”逐步转向“影像学性质判断、恶性风险估计、复查节奏制定以及进一步介入决策”。Fleischner学会2017指南为偶发肺结节管理建立了系统框架,ACR Lung-RADS v2022则在肺癌筛查场景中强化了结构化分类、增长定义和处置建议^[6-7]。英国胸科协会(British Thoracic Society, BTS)指南及近年亚实性结节相关共识进一步强调,肺结节评估正在由“直径驱动”走

向“体积、实性成分、增长模式和时间维度共同驱动”的综合模式^[8-10]。然而,传统影像判读在小结节、血管旁结节、贴胸膜结节、亚实性结节及多发结节等复杂场景中,仍面临评估者差异大、重复性不足及纵向比较困难等瓶颈。

传统阅片模式的局限并非仅体现在“看得见”与“看不见”,更体现在“看得准不准、量得稳不稳、前后比得清不清”。对于部分实性结节而言,微小实性成分的识别可能直接影响其管理等级;对于多发结节而言,如何识别主导病灶、如何评价不同病灶之间的风险差异,也是日常工作中的常见难题。再如,对于生长缓慢的磨玻璃结节,即使经验丰富的医师也可能在前后扫描层厚、重建核、窗位设定略有不同的情况下,难以准确判断其是否真实进展。这些问题使得肺结节管理越来越需要依赖定量化、客观化和可重复的技术支持。

深度学习作为人工智能的重要分支,能够直接从二维、三维及多时点CT数据中自动提取多尺度表征特征,近年来已逐步从肺结节自动检出扩展至精准分割、影像表型刻画、良恶性概率估计、进展预测和管理流程支持等多个环节^[11-16]。与传统CAD不同,深度学习不再主要依赖人工构建的特征,而是能够通过大规模数据训练自主学习结节的空间模式、纹理异质性和时间变化规律,从而在复杂场景中展现出更高的适应能力。尤其是三维卷积网络、注意力机制、变换器结构以及时间序列建模方法的发展,使肺结节影像分析从单张图像识别走向跨层、跨期、跨模态综合理解成为可能。

因此,系统梳理深度学习辅助精细评估肺结节影像的研究进展及临床转化方向,具有重要理论意义和现实价值。本文将围绕肺结节影像精细评估的临床基础与管理框架、深度学习在检出与精准分割中的应用、影像表型刻画、良恶性风险评估、动态随访与进展预测,以及临床转化的关键挑战进行综述,以期对相关研究与实践提供参考。

1 肺结节影像精细评估基础及现有管理框架

1.1 肺结节影像精细评估的临床内涵 肺结节影像精细评估并不等同于单纯测量结节直径,而是包括结节数量、位置、大小、体积、体积倍增时间、密度类型、实性成分比例、边缘特征、内部结构、与周围血管及支气管关系,以及前后影像变化趋势等多个维度^[6-10]。尤其对于亚实性结节和磨玻璃结节,影像

学评估不仅影响恶性风险判断,还关系到随访周期、活检策略及手术方式选择。

从放射学角度看,肺结节精细评估至少包含3个层面。(1)病灶本体特征,即结节大小、体积、密度、边缘、分叶、毛刺、空泡、钙化和脂肪等;(2)病灶与周围结构的关系,例如胸膜牵拉、血管束、支气管截断或扩张等;(3)病灶在时间维度上的行为,包括增长速度、实性成分变化和影像稳定性。临床上,真正决定管理路径的往往不是单一指标,而是这些信息的综合结果。例如,一个直径不大的部分实性结节,如果在短期内实性成分逐渐增加,其风险可能明显高于一个体积更大但多年稳定的纯磨玻璃结节。

此外,肺结节精细评估还具有明显的学科交叉特征。影像科关注的是识别与量化,呼吸科关注的是风险与随访,胸外科关注的是可切除性与手术时机,肿瘤科则更看重其与系统治疗策略的衔接。因此,现代意义上的“精细评估”不应只停留在影像描述,而应能直接服务于后续决策。换言之,精细评估的终点不是报告写得更长,而是让下一步处理更合理、更可解释、更一致。

1.2 现有指南与风险分层体系 Fleischner学会2017指南^[6]主要适用于偶发肺结节管理,强调依据结节性质、大小、单发或多发及患者风险因素制定随访方案。Lung-RADS v2022^[7]则服务于筛查场景,突出结构化分类、增长阈值及风险升级路径。BTS指南^[8]更重视体积和体积倍增时间在风险管理中的作用。此外,针对亚实性结节的共识^[9-10]进一步提出应重视其长期随访及侵袭性演变风险。这些指南为肺结节管理提供了基础框架,但对于复杂影像表型、连续影像变化和跨中心一致性仍存在局限。

Fleischner学会指南的价值在于构建了偶发结节管理的普适性框架,其核心思想是将结节分类与患者基础风险结合起来。然而,该指南主要基于静态影像指标和经验性阈值,对于影像异质性强、形态复杂或时间行为不典型的结节,其指导仍需依赖医师个体判断。Lung-RADS则更强调筛查体系中的结构化输出,有助于提升不同中心间的沟通一致性和质量控制水平,但其标准化分类也可能对个别复杂病例存在一定简化倾向。

BTS指南更早地强调了体积测量与体积倍增时间的重要性,这一点与深度学习和自动分割的发展方向高度契合。实际上,体积及倍增时间比单纯直径更能反映结节真实生长情况,尤其对于不规则结

节和部分实性结节更具优势。近年围绕亚实性结节的共识进一步表明,对这类病灶不能仅靠一次测量做决策,而应重视其长期行为与侵袭性演变。因此,可以说现有指南已经提出了临床问题,但如何以更高效、更客观、更一致的方式实现这些管理要求,正是AI,尤其是深度学习,需要回应的核心命题。

1.3 传统风险预测模型的贡献与不足 Mayo、Brock、Herder等经典模型^[17-22]通过整合年龄、吸烟史、结节大小、部位、边缘形态和PET信息,实现了肺结节恶性概率的初步量化。这些模型在临床实践中具有重要价值,但其输入变量相对有限,对结节内部纹理异质性、局部微环境及纵向变化利用不足,也较难适应多发结节和亚实性结节等复杂场景。因此,基于原始CT数据直接建模的深度学习方法,逐渐成为新的研究热点。

经典模型最大的贡献,是把“经验性印象”转化为“概率化思维”。这种思维转变极其重要,因为它使肺结节管理开始具有风险分层意识,而不仅是二元化判断。然而,这些模型的变量多来自人工提取或临床登记表,难以反映影像中更细致、更连续的信息。例如,结节边缘不规则程度、内部纹理渐变、局部血管受牵拉的模式,并不能被简单地压缩为一个“有/无毛刺”或“上叶/非上叶”的变量。

此外,传统模型大多是在特定人群或特定场景中建立的,其可推广性也有限。筛查人群、偶发结节人群和既往肿瘤史患者的人群构成差异明显,单一模型往往无法在所有场景中都保持稳定表现。特别是在亚实性结节和多发结节中,经典模型的适配性往往更弱。因此,深度学习并不只是为了追求更高的AUC,而是为了弥补传统模型在复杂表征、时间维度和场景迁移上的不足。

2 深度学习在肺结节检出与精准分割中的应用进展

2.1 从传统CAD到深度学习检测框架 肺结节自动检出是精细评估的起点。传统CAD多依赖阈值分割、形状规则和手工特征提取,在血管旁结节、贴胸膜结节及复杂解剖背景中误报较多。深度学习尤其是卷积神经网络的发展,使肺结节检测从“规则驱动”转向“数据驱动”,显著提升了候选结节识别和假阳性排除能力^[11-12,23-27]。

传统CAD的问题之一在于,肺内正常解剖结构本身就高度复杂。血管分叉、支气管断面、局灶性瘢痕及胸膜邻近密度改变,都可能在CT上呈现类似结节的外观。基于规则的方法需要预先设定许多

判别条件,但这些条件很难穷尽真实世界中的所有变异。深度学习则不同,它通过学习大量正负样本,逐渐形成对“结节模式”的统计性理解,能够更好地区分真正病灶与复杂背景。

值得注意的是,肺结节检测并不只是一个单纯的技术起点,而是整个后续流程的“入口质量控制点”。如果初始检出漏掉关键病灶,则再精细的后续分类和随访模型也无从发挥作用;如果误报过多,则会增加医师负担并降低系统可用性。因此,近年来很多研究不再单纯追求最高灵敏度,而是更强调在合理误报水平下的综合性能,这种理念也更贴近真实临床场景。

2.2 公共数据库与技术演进 LIDC-IDRI 和 LUNA16 是肺结节 AI 研究最重要的公共基础。LIDC-IDRI 提供多专家标注的 1018 例胸部 CT 数据,为检测、分割和分类研究奠定了标准化资源基础;LUNA16 则建立了统一的算法评价框架^[23-25]。在此基础上,肺结节检测模型经历了从 2D CNN、2.5D 多视图融合到 3D CNN 以及检测-分割联合模型的演进,多尺度特征融合、注意力机制和变换器思路也被逐步引入^[11-12, 23, 26-27]。

2D CNN 的优势在于实现简单、训练成本相对较低,但它对层间三维信息利用不足,容易忽视结节在连续层面上的空间一致性。2.5D 方法通过同时输入轴位、冠状位和矢状位视图,在一定程度上弥补了二维信息不足。随着算力提升,3D CNN 逐步成为肺结节检测和分类的重要方向,因为肺结节本质上是三维结构,其形态、边缘及与周围组织关系都需要在体数据层面进行理解。

近年来,多尺度特征提取成为重要趋势。因为肺结节大小跨度很大,既有几毫米的小结节,也有边界复杂的较大病灶,单一尺度的卷积核往往难以兼顾。注意力机制和特征金字塔网络等方法,使模型能够同时关注局部细节和全局背景。更进一步,变换器类方法开始尝试增强长距离依赖建模能力,这对识别结节与周围血管、支气管关系具有潜在价值。

2.3 精准分割在精细评估中的基础地位 分割的准确性直接影响体积测量、倍增时间计算、实性成分量化、纹理提取和纵向配准结果。近年来,U-Net、3D U-Net、nnU-Net 及注意力分割网络已成为肺结节分割主流技术路线^[11-12, 28-30]。对于实性结节,这些模型在边界勾画和体积测量方面已取得较好表现;对于亚实性结节和磨玻璃结节,由于其边界模糊、密度渐变,精细分割仍是当前难点,也是后续侵

袭性预测和个体化管理的关键基础。

在临床中,许多重要指标都建立在准确分割之上。体积是评估生长速度的重要参数,体积倍增时间则与恶性风险密切相关;实性成分比例是部分实性结节分层的关键指标;纹理分析和影像组学特征提取同样依赖稳定、可重复的病灶勾画结果。因此,分割质量的提高不仅是图像处理精度问题,更直接关系到临床风险估计的可信度。

对于亚实性结节,精细分割尤其重要。原因在于这类病灶的边界与正常肺实质往往呈渐变过渡,且内部可能同时包含磨玻璃成分和实性成分。如果分割过粗,可能低估实性成分比例;如果分割不稳定,则前后随访比较的结果也会失真。深度学习分割模型在这一方向上的持续进步,意味着未来肺结节管理可以从“经验性估计”逐步过渡到“像素级定量”。

2.4 困难场景下的检出与分割挑战 深度学习模型在小结节、血管旁结节、贴胸膜结节、裂旁结节及多发结节场景中,仍面临鲁棒性考验^[11-12, 23-27]。尤其在 GGO 和部分实性结节中,边界模糊与病理异质性增加了检出和分型难度^[28, 30-32]。因此,未来研究应更加重视困难亚群的亚组分析和真实世界泛化验证,而非仅报告整体性能指标。

小结节的核心问题是信号弱、体素少,轻微噪声即可影响模型判断。血管旁结节则容易与血管截面或分叉混淆,这要求模型同时具备病灶识别与解剖理解能力。贴胸膜结节和裂旁结节则涉及边界缺失或与胸膜平行的复杂几何关系,也对分割算法提出更高要求。多发结节场景下,则不仅是“检出多个病灶”的问题,还涉及如何排序风险、如何识别主导病灶、如何避免多病灶之间的特征混淆。

这些困难场景之所以重要,是因为真实临床最常见的问题恰恰往往出现在这些边缘地带。一个模型若只在标准化数据集中的“典型病例”上表现良好,但面对复杂病例性能急剧下降,其临床价值有限。因此,今后研究应更加注重多中心、多协议、多场景验证,以及困难亚型的单独性能呈现,这 will 比单纯提高平均指标更有意义。

3 深度学习驱动的肺结节影像表型精细刻画

3.1 从尺寸测量到多维影像表型 传统肺结节评估多聚焦于长径、平均径或体积,而深度学习能够进一步学习结节形状复杂度、边缘不规则性、分叶、毛刺、胸膜牵拉、血管集束及周围肺实质特征等多维影像表型^[13, 33-36]。这种能力推动肺结节影像学从

“描述征象”向“刻画表型”转变,更接近结节真实的生物学行为。

表型刻画的意义在于,它能把以往由医师主观描述的征象转化为更连续、更定量的特征空间。传统报告中“边缘欠光整”“可见轻度分叶”“伴轻度胸膜牵拉”等表述,虽然临床上有价值,但不同医师之间理解并不完全一致。深度学习能够从原始数据中提取连续特征,有助于降低这种表述差异带来的信息损失。

更重要的是,某些影像风险信号本身可能并不容易用传统术语准确概括。模型所学习到的高维特征,未必能一一对应到现有影像征象,但它们可能真实地反映结节与恶性生物学行为之间的复杂关联。因此,深度学习带来的不仅是自动化,更是影像理解维度的扩展。

3.2 深度学习与影像组学的互补关系 影像组学通过人工定义的形状、灰度和纹理参数量化结节影像特征,而深度学习可自动学习更复杂、非线性的高维表征。两者并非相互替代,而是具有明显互补性^[31,33-36]。近年来,影像组学与深度学习融合模型在肺结节侵袭性预测、高危病理分层和良恶性鉴别中取得了较为稳定的表现。

影像组学的优势在于可解释性较强、特征定义清晰,便于统计分析和模型外推;其不足则在于高度依赖分割质量和预处理标准,并且难以穷尽图像中的全部复杂信息。深度学习的优势在于自动学习能力强,能够发现人工未显式定义的模式;不足则是可解释性相对有限,且对数据量和域一致性要求较高。两者结合,实际上是在性能与可解释性之间寻求平衡。

从临床接受度角度看,这种融合路径也更有现实意义。纯黑箱模型虽然可能性能更高,但若缺乏解释和可视化支撑,往往难以获得临床充分信任。若能够将深度特征与影像组学特征、传统影像征象共同纳入模型,则有望形成更易被放射科、呼吸科和胸外科共同理解的决策框架。

3.3 亚实性结节与磨玻璃结节的精细定量 亚实性结节尤其是纯磨玻璃结节和部分实性结节,是肺腺癌谱系影像学研究的重要对象。深度学习可通过三维表征与细粒度分割,更准确识别微小实性成分、密度梯度和内部异质性,从而提高对AAH/AIS、MIA及IA的区分能力^[9-10,28,30-32]。这对于决定继续观察、有限切除或手术升级具有重要意义。

磨玻璃结节管理之所以困难,是因为其影像与病理之间存在连续谱,而非简单二分。很多纯磨玻

璃结节长期稳定,适合观察;但一旦出现实性成分增加,其侵袭性风险明显上升。部分实性结节更是如此,微小实性核心的识别可能直接改变治疗策略。因此,深度学习在这一场景中的最大价值,不只是“分类”,而是帮助进行更细粒度的侵袭性评估。

此外,磨玻璃结节通常进展缓慢,传统人工判断容易受主观因素影响。借助深度学习与精细分割技术,可以更加稳定地量化其密度分布和结构演变,为长期监测提供客观依据。这对于避免过度治疗和避免延误治疗同样重要。

3.4 结节微环境与局部解剖语境的信息价值 越来越多研究提示,结节周围血管、支气管、胸膜及局部肺实质纹理异常同样承载重要风险信息。深度学习特别适合联合学习“结节+周围微环境”的多尺度特征^[13,33-36]。未来肺结节精细评估将不再仅限于病灶本体分析,而有望逐步向包含局部解剖语境的综合建模转变。

临床上,放射科医师在判断结节时,本来就不会只盯着病灶本身,而会同时观察周围血管是否聚拢、胸膜是否受牵拉、邻近支气管是否变形。深度学习若仅输入孤立裁剪的小块图像,可能反而丢失了这些重要上下文信息。多尺度建模和更大视野输入,能够让模型更接近真实阅片逻辑。

这种“语境化评估”还有助于解释一些传统上难以量化的征象。例如,局部肺实质细微结构紊乱、血管走行异常等,在人眼看来只能模糊感知,而模型可能把它们转化为稳定的判别特征。这意味着未来肺结节影像评估将逐步从“病灶中心主义”走向“病灶—环境整体主义”。

4 深度学习辅助肺结节良恶性风险评估与分层

4.1 从经验判断到概率化输出 临床真正需要的不是单纯的“良/恶性”标签,而是能够支持随访、PET-CT、活检和手术决策的恶性概率估计。深度学习在肺结节风险评估中的优势,在于可基于原始CT影像直接输出概率分层结果,并与既往影像、临床变量进一步整合^[13-16]。

概率化输出的意义在于,它更符合临床真实决策过程。绝大多数肺结节并不会在首次评估时被简单地定义为“肯定良性”或“肯定恶性”,而是落在不同程度的不确定区间中。对临床而言,最重要的是确定风险区间并匹配相应管理策略。深度学习若能提供可靠的概率估计,而非单纯标签,将更有助于与既有指南阈值和实际工作流衔接。

同时,概率输出还有助于沟通。对于患者而言,明确说明“当前风险较低,建议定期复查”往往比笼统地说“问题不大”更容易理解;对于MDT团队而言,风险量化结果也更利于形成共识。因此,深度学习在风险分层中的价值,不仅体现在算法层面,也体现在医患沟通和团队协作层面。

4.2 代表性研究及其启示 Ardila等^[15]基于当前及既往LDCT体数据建立三维深度学习模型,实现了较高水平的肺癌风险预测。Venkadesh等则分别展示了单时点和引入既往CT的深度学习恶性风险估计框架,提示时间维度可显著提高三年恶性风险预测能力^[13-14]。这些工作共同表明,肺结节风险不是静态概念,而是与时间轴密切相关的动态风险对象。

这些代表性研究的启示在于:(1)三维体数据本身包含比二维切片更多的信息,尤其在结节立体形态和与周围结构关系方面更具优势。(2)既往CT不应被视为附加资料,而应成为模型的重要输入,因为结节变化本身往往比单次静态外观更具有临床意义。(3)深度学习模型并非只能用于“发现病灶”,同样可以用于更高层级的风险推断和临床决策支持。

但是,应客观看待这些研究。许多高影响力成果仍主要集中于筛查人群或较为理想的数据条件下,而真实世界中的偶发结节、多发结节和复杂背景病例更加多样。因此,代表性研究更多是证明“可行性与潜力”,而非意味着问题已经完全解决。

4.3 多模态融合的趋势 近年来,研究者开始将深度学习影像特征与临床信息、影像组学、PET/CT及cfDNA等分子标志物整合,构建多模态风险模型^[34,37,39-40]。这类模型更接近真实临床决策逻辑,有望提高阳性预测值并减少不必要的侵入性检查。

单纯依赖CT影像,虽然可以在很大程度上反映结节特征,但临床决策显然不会忽略患者年龄、吸烟史、恶性肿瘤既往史、家族史以及代谢和分子层面的信息。多模态融合的价值就在于将这些信息纳入同一风险框架,使模型更贴近真实世界。尤其对于边界性结节,多模态模型可能比单一影像模型更具区分力。

此外,多模态融合也有助于提升模型的临床可接受性。医生更容易接受一个“综合信息后的风险评估系统”,而不是完全忽略临床背景的纯图像黑箱模型。因此,未来的高价值模型很可能不是“影像替代一切”,而是“影像驱动下的多源信息整合”。

4.4 与指南分层路径的衔接 深度学习风险模型若

要真正进入临床,理想输出形式不应只是抽象概率值,而应转化为与Fleischner、Lung-RADS和BTS管理路径相匹配的“概率+建议”双层结果^[6-8,13-16]。例如,对低危结节建议延长复查间隔,对中危结节建议短期复查或PET-CT,对高危结节建议MDT评估和组织学取材。

这实际上提出了一个重要转化原则:AI输出必须“可落地”。很多研究止步于模型性能比较,却没有回答临床最关心的问题——这个结果如何改变下一步处理。真正理想的系统应能够将风险评估自动映射到建议路径中,例如生成“建议6个月复查”“建议进一步PET-CT评估”“建议肺结节专门诊会诊”等结构化意见。只有当AI输出能够嵌入真实决策流程时,其价值才能被充分释放。

5 深度学习在肺结节动态随访中的价值

5.1 肺结节管理的时间轴特征 肺结节管理并非一次性判断,而是一个长期动态过程。对于许多边界性结节,真正决定临床策略变化的往往是后续随访中体积增长、密度变化和实性成分增加^[6-10]。因此,任何高价值的肺结节AI系统都应具备一定的纵向分析能力。

从临床管理角度说,初次检查只是风险评估的起点,而不是终点。许多结节首次影像表现并不典型,尤其是亚实性结节,真正能提示侵袭性升级的往往是后续变化。因此,肺结节AI若仍停留在对单次CT的静态分类上,便只能解决部分问题。只有把时间维度纳入分析,模型才更接近临床真实需求。

此外,纵向管理还涉及随访依从性和流程连续性。若系统能自动调取既往影像并进行比较,不仅有助于提高分析精度,也能减少人为遗漏,提高专病管理效率。

5.2 双时点及多时点模型的优势 通过自动配准当前与既往CT,并联合输入多时点影像,深度学习模型能够更加敏感地识别细微增长和结构变化。Venkadesh等^[14]的研究显示,既往CT信息可显著提高恶性风险估计;近年关于AI预测肺结节增长的综述也表明,时间序列学习正成为该领域的重要发展方向^[41]。

双时点和多时点模型的本质,是让模型从“看图”转向“看变化”。这种变化可以是体积上的,也可以是密度、形态或实性成分上的。对部分生长缓慢但持续进展的病灶而言,这种能力非常关键。未来,如果模型能够进一步预测“未来一段时间内是否可能增长”“实性成分是否可能增加”,将更有助

于制定个体化随访方案。

5.3 亚实性结节长期监测中的特殊价值 亚实性结节常呈慢性进展过程,既存在过度治疗风险,也存在延误治疗风险。深度学习结合精细分割与时间序列分析后,有望辅助识别真正需要升级处理的病灶,并帮助制定更个体化的复查间隔^[9-10,28,30-32,41]。

这是肺结节AI最具潜在临床价值的场景之一。因为亚实性结节的管理本身充满灰区:过早干预可能造成不必要手术和肺功能损失,过晚处理则可能错过最佳治疗窗口。深度学习若能帮助更早、更准确地识别风险升级征象,便可能显著改善这类患者的管理质量。

5.4 从单点算法到管理平台 未来,肺结节AI更可能以平台化形式存在,即完成自动检出、自动分割、自动调取既往影像、自动比较变化、自动生成风险提示和随访建议^[7,14,16,38,41]。这一模式更适用于筛查中心、肺结节专病门诊、体检中心及MDT管理流程。

平台化的意义在于把分散的算法模块整合为完整流程。对临床而言,最需要的不是十个彼此孤立的高性能模型,而是一个能够稳定服务日常流程的系统。未来若能把结构化报告、随访提醒、异常升级提示和多学科转诊接口整合进去,肺结节管理将真正迈向闭环化。

6 临床转化挑战、争议与未来发展方向

6.1 外部验证不足与数据偏倚 虽然肺结节深度学习研究快速增长,但系统综述反复指出,当前模型的主要局限仍是外部验证不足、样本选择偏倚和方法学异质性^[11-12,16,38]。许多模型在公开数据库或单中心回顾性数据中性能较好,但缺乏跨设备、跨地区和跨人群的真实世界验证。

数据偏倚不仅影响模型泛化,还可能导致某些人群或某些结节类型的性能被系统性高估或低估。例如,训练集若主要来自筛查人群,则模型应用于偶发结节时可能表现下降;若训练集以实性结节为主,则对亚实性结节的识别能力可能不足。因此,外部验证不只是“再测一次性能”,而是检验模型是否具备临床推广基础的关键步骤。

6.2 真值标注与标签异质性问题 肺结节良恶性标签并不总是基于统一病理金标准。很多研究依赖随访、专家共识或有限病理验证,尤其在磨玻璃结节和炎症性病变中,标签不确定性更高^[11-12,28,30,38]。这直接影响模型训练质量和结果可迁移性。

在肺结节领域,所谓“真值”本身常常是一个概

率性概念。不是所有结节都能获得病理证实,而长期稳定也并不等于绝对良性。标签的不确定性会给模型学习带来噪声,使其可能学习到不一致甚至相互矛盾的模式。因此,未来需要更高质量的标注体系,包括多专家共识、病理对照、长期随访确认及标签置信度设计等。

6.3 可解释性、校准性与责任归属 即使模型具有较高AUC,若缺乏可解释性和良好校准,临床使用仍会受到限制。近年来研究强调应加强决策曲线分析、概率校准、人机协同评估和真实 workflow 中的净获益验证^[16,38]。现阶段,深度学习更适合作为辅助决策工具,而非完全替代医生。

可解释性并不一定意味着必须完全揭示模型内部机制,但至少应能以热图、区域贡献或特征可视化方式说明模型主要依据什么作出判断。校准性同样重要,因为一个概率输出若系统性偏高或偏低,将直接影响随访和干预决策。责任归属问题则关系到医疗安全与监管合规,尤其在AI建议与医师判断不一致时更需明确边界。

6.4 基础模型、多模态融合与流程重构 未来肺结节深度学习的发展可能主要集中于:(1)肺部CT基础模型与预训练框架,提高跨任务迁移能力;(2)图像、临床、分子和文本等多模态融合^[34,37,39-40];(3)时间序列学习与平台化部署^[14,41]。其最终目标不是单纯提高某一性能指标,而是与指南、结构化报告、专病门诊和MDT流程深度耦合,成为肺结节管理流程的一部分。

基础模型的发展有望缓解小样本和标注昂贵的问题,使模型能够在多个任务之间共享更通用的表征能力。多模态融合将使风险评估更贴近真实临床。流程重构则是AI真正落地的关键,即不再把AI作为附加工具,而是作为管理流程的一部分嵌入日常工作。可以预见,未来高水平肺结节AI不只是“一个模型”,而更可能是“一个持续学习、持续迭代、持续服务临床流程的系统”。

7 小结

深度学习正在推动肺结节影像评估从“发现病灶”走向“精细表型刻画、恶性概率分层、动态随访预测和全流程管理”。深度学习已在结节检出、精准分割、GGO评估、风险预测及时间序列分析等方面显示出较高潜力。但现阶段其最佳定位仍是增强型临床决策支持工具,而非脱离指南和医师判断的独立替代方案。未来,随着多中心真实世界验证、可解释性提升、多模态整合、时间序列学习及平

台化部署的发展,深度学习有望成为肺结节精准管理体系中的关键技术支柱之一。

更进一步看,深度学习对肺结节领域的意义,不仅在于提高某一任务的技术指标,更在于推动整个管理理念的变化。它正在使肺结节影像学由经验性、离散化、静态化分析,逐步走向量化、连续化和全流程化管理。未来若能实现与临床指南、结构化报告、专病门诊和MDT决策的深度耦合,其价值将不再局限于“辅助读片”,而可能成为肺结节精准防治体系的重要基础设施。

伦理声明 无

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 白春学:选题、撰写、修改;朱煜:撰写、修改。

参考文献

- [1] National Lung Screening Trial Research Team, Aberle D R, Adams A M, et al. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening [J]. *N Engl J Med*, 2011, 365(5): 395-409.
- [2] de Koning H J, van der Aalst C M, de Jong P A, et al. Reduced lung-cancer mortality with volume CT screening in a randomized trial[J]. *N Engl J Med*, 2020, 382(6): 503-513.
- [3] US Preventive Services Task Force, Krist A H, Davidson K W, et al. Screening for lung cancer: US Preventive Services Task Force recommendation statement[J]. *JAMA*, 2021, 325(10): 962-970.
- [4] Wolf A M D, Oeffinger K C, Shih T Y, et al. Screening for lung cancer: 2023 guideline update from the American Cancer Society[J]. *CA Cancer J Clin*, 2024, 74(1): 50-81.
- [5] 中华医学会呼吸病学分会, 中国肺癌防治联盟专家组. 肺结节诊治中国专家共识(2024年版)[J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2024, 47(8): 716-729.
- [6] MacMahon H, Naidich D P, Goo J M, et al. Guidelines for management of incidental pulmonary nodules detected on CT images: from the Fleischner Society 2017 [J]. *Radiology*, 2017, 284(1): 228-243.
- [7] American College of Radiology. Lung-RADS® v2022[EB/OL]. [2025-01-02]. <https://www.professionalradiology.com/media/user/resources/Lung-RADS%202022.pdf>.
- [8] Callister M E, Baldwin D R, Akram A R, et al. British Thoracic Society guidelines for the investigation and management of pulmonary nodules [J]. *Thorax*, 2015, 70 (Suppl 2): ii1-ii54.
- [9] Chen H, Garrana S, Moreira AL, et al. Imaging and management of subsolid lung nodules [J]. *Radiol Clin North Am*, 2025, 63(4): 517-535.
- [10] Raad R A, Garrana S, Moreira A L, et al. Imaging and management of subsolid lung nodules [J]. *Radiol Clin North Am*, 2025, 63(4): 517-535.
- [11] Gao C, Wu L Y, Wu W, et al. Deep learning in pulmonary nodule detection and segmentation: a systematic review[J]. *Eur Radiol*, 2025, 35(1): 255-266.
- [12] Cheo H M, Ong CYG, Ting Y. A systematic review of AI performance in lung cancer detection on ct thorax [J]. *Healthcare (Basel)*, 2025, 13(13): 1510.
- [13] Venkadesh K V, Setio A A A, Schreuder A, et al. Deep learning for malignancy risk estimation of pulmonary nodules detected at low-dose screening CT[J]. *Radiology*, 2021, 300 (2): 438-447.
- [14] Venkadesh K V, Aleef T A, Scholten E T, et al. Prior CT improves deep learning for malignancy risk estimation of screening-detected pulmonary nodules [J]. *Radiology*, 2023, 308(2): e223308.
- [15] Ardila D, Kiraly A P, Bharadwaj S, et al. End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest computed tomography[J]. *Nat Med*, 2019, 25(6): 954-961.
- [16] Herber S K, Müller L, Pinto Dos Santos D, et al. Diagnostic performance of artificial intelligence models for pulmonary nodule classification: a multi-model evaluation [J]. *Eur Radiol*, 2026, 36(1): 537-547.
- [17] Swensen S J, Silverstein M D, Ilstrup D M, et al. The probability of malignancy in solitary pulmonary nodules. Application to small radiologically indeterminate nodules [J]. *Arch Intern Med*, 1997, 157(8): 849-855.
- [18] Al-Ameri A, Malhotra P, Thygesen H, et al. Risk of malignancy in pulmonary nodules: a validation study of four prediction models[J]. *Lung Cancer*, 2015, 89(1): 27-30.
- [19] Choi H K, Ghobrial M, Mazzone P J. Models to estimate the probability of malignancy in patients with pulmonary nodules [J]. *Ann Am Thorac Soc*, 2018, 15(10): 1117-1126.
- [20] Susam S, Çinkoğlu A, Ceylan K C, et al. Comparison of Brock University, Mayo Clinic and Herder models for pretest probability of cancer in solid pulmonary nodules [J]. *Clinical Respiratory J*, 2022, 16(11): 740-749.
- [21] Senent-Valero M, Librero J, Pastor-Valero M. Solitary pulmonary nodule malignancy predictive models applicable to routine clinical practice: a systematic review [J]. *Syst Rev*, 2021, 10: 308.
- [22] Balekian A A, Silvestri G A, Simkovich S M, et al. Accuracy of clinicians and models for estimating the probability that a pulmonary nodule is malignant[J]. *Ann Am Thorac Soc*, 2013, 10(6): 629-635.
- [23] Setio A A A, Traverso A, de Bel T, et al. Validation, comparison, and combination of algorithms for automatic detection of pulmonary nodules in computed tomography images: the LUNA16 challenge [J]. *Med Image Anal*, 2017, 42: 1-13.
- [24] Armato S G 3rd, McLennan G, Bidaut L, et al. The Lung Image Database Consortium (LIDC) and Image Database Resource Initiative (IDRI): a completed reference database of lung nodules on CT scans [J]. *Med Phys*, 2011, 38(2):

- 915–931.
- [25] Fedorov A, Hancock M, Clunie D, et al. DICOM re-encoding of volumetrically annotated Lung Imaging Database Consortium (LIDC) nodules[J]. *Med Phys*, 2020, 47(11): 5953–5965.
- [26] Zhang H, Peng Y J, Guo Y F. Pulmonary nodules detection based on multi-scale attention networks[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 1466.
- [27] Wang Q, Shen F Y, Shen L Y, et al. Lung nodule detection in CT images using a raw patch-based convolutional neural network [J]. *J Digit Imaging*, 2019, 32(6): 971–979.
- [28] Shah H P, Naqvi A S, Rajput P, et al. Artificial intelligence-based deep learning algorithms for ground-glass opacity nodule detection: a review[J]. *Narra J*, 2025, 5(1): e1361.
- [29] Mehrnia S S, Safahi Z, Mousavi A, et al. Landscape of 2D deep learning segmentation networks applied to ct scan from lung cancer patients: a systematic review[J]. *J Imaging Inform Med*. 2025. 38(6): 3711–3740.
- [30] Wu W, Gao C, Wu L Y, et al. Diagnostic accuracy of deep learning for the invasiveness assessment of ground-glass nodules with fine segmentation: a systematic review and meta-analysis [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2025, 15(4): 2722–2738.
- [31] Sun Q, Yu L, Song Z Q, et al. Deep learning and radiomics fusion for predicting the invasiveness of lung adenocarcinoma within ground glass nodules[J]. *Sci Rep*, 2025, 15: 29285.
- [32] Shao M H, Wang J, Zhu L, et al. Deep learning for Three-Class Classification of ground-glass nodules on non-enhanced chest CT: a multicenter comparative study of CNN architectures [J]. *Eur J Radiol Open*, 2025, 15: 100690.
- [33] Sun Y, Ge X Y, Niu R, et al. PET/CT radiomics and deep learning in the diagnosis of benign and malignant pulmonary nodules: progress and challenges[J]. *Front Oncol*, 2024, 14: 1491762.
- [34] Du H, Shen J, Chen F, et al. Integrating CT-based radiomics and deep learning for invasive prediction of ground-glass nodules in lung adenocarcinoma: a multicohort study [J]. *Insights Imaging*, 2025, 16(1): 271.
- [35] Warkentin M T, Al-Sawaihey H, Lam S, et al. Radiomics analysis to predict pulmonary nodule malignancy using machine learning approaches[J]. *Thorax*, 2024, 79(4): 307–315.
- [36] Ye G, Wu G, Li K, et al. Development and validation of a deep learning radiomics model to predict high-risk pathologic pulmonary nodules using preoperative computed tomography [J]. *Acad Radiol*, 2024, 31(4): 1686–1697.
- [37] Wang H, Huang H, Li F, et al. Risk-stratified classification of pulmonary nodule malignancy via a machine learning model integrating imaging and cell-free DNA: a model development and validation study (DECIPHER-NODL) [J]. *Lancet Reg Health West Pac*, 2025, 64: 101730.
- [38] Geppert J, Asgharzadeh A, Brown A, et al. Software using artificial intelligence for nodule and cancer detection in CT lung cancer screening: systematic review of test accuracy studies[J]. *Thorax*, 2024, 79(11): 1040–1049.
- [39] Xiao D, Forero Y, Kammer M N, et al. Radiomic ‘Stress Test’: exploration of a deep learning radiomic model in a high-risk prospective lung nodule cohort[J]. *BMJ Open Respir Res*, 2025, 12(1): e002687.
- [40] Huang P, Lin C, Li Y, et al. Prediction of lung cancer risk at follow-up screening with low-dose CT: a training and validation study of a deep learning method [J]. *Lancet Digital Health*, 2019, 1: e353–e362.
- [41] Huang W, Ye M, Wang B, et al. Narrative review: the research advances of artificial intelligence in the prediction of pulmonary nodule growth[J]. *J Thorac Dis*, 2026, 18(2): 165.

引用本文

白春学,朱煜.深度学习辅助精细评估肺结节影像[J].元宇宙医学,2026,3(1):72–80.

Bai C X,Zhu Y. Deep learning-assisted fine assessment of pulmonary nodule images[J]. *Metaverse Med*,2026,3(1):72–80.

《元宇宙医学》简介

《元宇宙医学》(ISSN 3006-4236)是由复旦大学附属中山医院联合国际元宇宙医学协会(International Association for Metaverse in Medicine, IAMM)于2024年正式创办的一本严格同行评议的聚焦医学与元宇宙学术交叉的开放获取中文学术季刊。杂志特邀IAMM主席、复旦大学附属中山医院终身荣誉教授白春学与复旦大学附属中山医院智慧医院建设专家、医院党委书记顾建英担任共同主编。

本刊旨在服务广大的元宇宙医学相关科技人员,打造“医学+X”的多学科交叉交流平台,促进创新、跨学科研究;应用物联网、人工智能、元宇宙等数字技术促进医学学术和科技发展,推动医工合作与交叉融合,更好地服务医疗和大健康,提高广大元宇宙医学从业人员的医学科学理论和业务技术水平,推动元宇宙医学科技进步和知识创新,繁荣中国健康事业,赋能“健康中国2030”,造福人群健康。



栏目设置

论著、专家述评、综述、平台建设与管理、伦理与法规、医学教育、产学研融合、指南与共识、方法学研究等。

征稿选题

包括但不限于如下方向:

- 元宇宙技术在诊断与治疗中的应用:探讨虚拟现实、增强现实、人工智能等技术在医学领域中的创新应用,以提高临床诊疗治疗效果。
- 虚拟医学环境与医学教育:研究元宇宙创造的虚拟医学环境,包括医学培训、手术模拟、康复治疗等领域。
- 医学数据的元宇宙化:探索将大数据、生物信息学等医学数据与元宇宙技术相结合,实现更深入、全面的医学研究。
- 患者体验与参与:研究如何通过元宇宙技术改善患者与医疗系统的互动,提高患者治疗参与度。
- 伦理与法规:关注元宇宙医学领域中的伦理问题,确保技术的安全和隐私保护。
- 跨学科合作:促进医学、计算机科学、工程学、心理学等多学科领域之间的协同合作,推动医学创新。

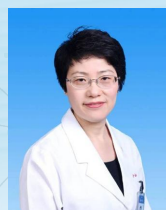
主编介绍



白春学

教授、主任医师,博士生导师,复旦大学附属中山医院终身荣誉教授,现任上海市呼吸病研究所所长、上海呼吸物联网医学工程技术研究中心主任、国际元宇宙医学协会和联盟(IAMM)主席、中国肺癌防治联盟主席、上海市控烟协会会长。

担任《元宇宙医学》(Metaverse in Medicine)、Clinical e-Health 主编,Frontiers in Medicine 呼吸研究领域主编,AJP-Lung Cellular and Molecular Physiology 副主编。



顾建英

教授、主任医师,博士生导师,现任复旦大学附属中山医院党委书记,整形与美容外科主任医师。中华医学会整形外科学会会员,中华医学会医学美容和美容学学会会员,中华医学会激光美容学会会员。中国女医师学会整形与美容专委会副主任委员、中国整形美容协会精准与数字医学分会第一届理事

会副会长、上海市医学会整形外科分会副主任委员等。《中华整形外科杂志》副主编。

投稿地址: <https://www.zentimepublishing.com/wap/journal/index/sid/69/code/MM.html>

编辑出版:复旦大学附属中山医院期刊中心《元宇宙医学》编辑部;

联系地址:上海市徐汇区枫林路179号复旦大学附属中山医院18号楼516室;

邮编:200032;联系电话:021-51217570,联系人:孙编辑

邮箱:metamedsh@vip.163.com



《元宇宙医学》第一届编委会

荣誉主编

樊 嘉

杨雄里

钟南山

主 编

白春学

顾建英

副主编

陈荣昌

高承实

贾泽军

刘 雷

连 勇

潘 毅

宋振举

王伟林

杨达伟

Niels H. Chavannes

Charles A. Powell

Christoph Thüemmler

编 委（按拼音排序）

白 莉

白春学

曹 鑫

陈 颖

陈大明

陈荣昌

陈智鸿

方金武

甘舜轩

高承实

葛海燕

顾建英

何 萍

胡 洁

胡伟国

胡 征

黄翔宇

贾泽军

姜 杰

金 晶

冷 非

李立亮

连 勇

刘 雷

陆俊羽

马礼兵

潘 毅

漆 远

沈 涛

盛 斌

施国明

宋海涛

宋元林

宋振举

苏士成

孙 湛

王 健

王 凯

王 洵

王伟林

王悦虹

韦 球

魏益平

辛弘毅

薛新颖

杨 冬

杨 丽

杨达伟

杨志刚

于广军

张纪阳

张宇鸣

张玉侠

张子强

赵列宾

赵明明

赵郑拓

周建军

朱智勤

邹 最

Niels H. Chavannes

Charles A. Powell

Christoph
Thüemmler

Lian Wu

Emeli Zhang

Shangming Zhou

