

Metaverse in Medicine

元宇宙医学

ISSN 3006-4236



元宇宙医学

二〇二六年六月 第三卷第二期



2026年6月 第3卷第2期

“原生重塑诊疗 数智领航医界” 复旦大学附属中山医院白春学教授团队携 BAIMGPT 肺结节专家智能体 亮相 MWC26 上海

2026 年 6 月 24 日至 26 日，世界移动通信大会（MWC26）上海站在上海新国际博览中心盛大启幕。作为全球最具影响力的移动通信与数字科技盛会之一，MWC 不仅是前沿技术的展示舞台，更是各行各业数字化转型成果的交汇平台。在本届展会上，复旦大学附属中山医院以“原生重塑诊疗，数智领航医界”为核心主题重磅亮相 N4 馆，集中展示医院在智慧医疗领域的全链路创新成果，标志着中国顶尖公立医院在医疗数字化、智能化赛道上的又一次重要突破。

在本届展会上，复旦大学附属中山医院终身荣誉教授白春学教授团队带来的 BAIMGPT 肺结节专家智能体，成为中山医院展区的一大亮点，吸引了众多业内外同道驻足体验。作为呼吸系统疾病领域的顶尖专家，白春学教授长期深耕元宇宙医学、肺结节早诊早治与肺癌防控领域。此次推出的 BAIMGPT 肺结节专家智能体，既是团队多年临床积累与人工智能技术深度融合的结晶，更是迈向“名医治未病，元医惠众生”愿景的关键一步！该智能体以遵循 5A 临床诊疗路径、依托人工智能精准评估肺结节良恶性为基础，结合 BAIMGPT 专病数字人，在继承原有 GPT 技术优势的基础上，进一步集成了 AI 辅助诊断、专病数字人互动、个性化诊疗建议等多项核心功能，实现了诊疗全流程智能化覆盖与人文关怀的深度融合。这一诊疗服务模式让展会体验者沉浸式感受到了“有温度的 AI 医疗”，未来有望惠及更多民众。

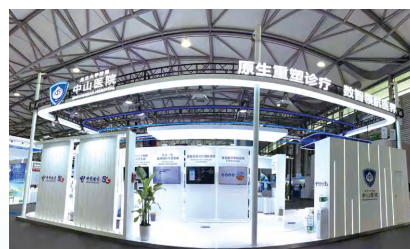


图 1 复旦大学附属中山医院展位全景图



图 2 BAIMGPT 肺结节专家智能体



图 3 参观者沉浸式体验 BAIMGPT 肺结节专家智能体

BAIMGPT 肺结节专家智能体的亮相，在呼吸专科领域具有重要的实践价值。对于临床医生而言，智能体能够高效辅助医生精准识别肺结节并进行风险分层，显著提升诊断效率与准确性，尤其在基层医疗场景中，能够有效弥补专业人才不足的短板，推动优质医疗资源下沉。对于患者而言，通过专病数字人互动功能，患者可以直观了解自身肺结节情况、随访方案与健康管理建议，大大提升就医体验与随访管理依从性。这一成果不仅是“元医惠众”理念的具体落地，更是智慧医疗从技术概念走向临床实效的有力印证，为专病智能化诊疗提供了可借鉴的创新范式。

展望未来，随着生成式 AI、多模态大模型等技术的持续演进，智慧医疗将迎来更加广阔的发展空间。复旦大学附属中山医院将继续秉持“以患者为中心、以临床为导向”的创新理念，在呼吸、心血管、肝肿瘤等重点专科领域持续深耕，推动更多像 BAIMGPT 这样的智能体从实验室走向临床一线，从医院走向社区与家庭。未来的智慧医疗，不仅是技术的革新，更是医疗服务模式的重塑——从“病后治疗”向“病前预防”延伸，从“中心化诊疗”向“全周期健康管理”拓展，让每一位患者都能享受到更加精准、高效、可及的医疗服务。

元宇宙医学

YUAN YU ZHOU YIXUE



季刊

2024 年创刊

第 3 卷第 2 期 (总第 10 期)

2026 年 6 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

编 者 按

肺结节智能体: 从辅助诊断工具到智能体医学新范式——兼论智能体医学学科体系的形成 陈智鸿, 贾泽军 (81)

专家述评

AI 智能体赋能肺结节诊治研发进展及展望 白春学 (83)

论 著

呼吸物联网驱动的哮喘精准监测与闭环管理
..... 陈智鸿, 遆柳青, 王悦虹, 等 (91)

AI 赋能基层医生病例分析报导的潜力与展望
..... 梁 琼, 白春学 (96)

肺结节智能体赋能纠正病理忽略的早期肺癌病例报告
..... 纪 元, 江峥增, 赵雪莲, 等 (103)

数字人、虚拟专家赋能呼吸慢病患者健康教育和管理新模式
..... 杨 丽, 蔡沁怡, 白春学 (106)

医学教育

元宇宙医学赋能呼吸专科教学创新: 从课堂教学到沉浸式临床培训
..... 余 情, 张 雯, 白春学 (113)

元宇宙创新模式在耳鼻咽喉科临床及教学中的应用现状与建设思路 周 雷,张 雯,于浩然,等(120)

基于“复旦中山惠生智育”平台的神经内科元宇宙教学体系构建设想 毛玲艳,余 情,张 雯,等(127)

基于“复旦中山惠生智育”元宇宙平台的中西医协同“旗舰”医院中医药传承创新教学版块构建设想.....
..... 张 雯,侯凤刚,杨云柯,等(132)

精准教育背景下医学教育治理数字孪生的构想与路径..... 张 雯,张 敏,马畅畅,等(138)

冠心病术后元宇宙沉浸式训练体系构建及教学模式研究 赵伟林,张 雯,余 情(142)

本期执行主编 高承实
本期责任编辑 翟铖铖
本期责任校对 臧天茹,孙梦瑶,殷 悦,姬静芳,王 迪

METaverse IN MEDICINE

Established in 2024; Volume 3, Number 2, June 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

Editorial Note

Pulmonary nodule intelligent agent: from auxiliary diagnostic tools to a new paradigm of intelligent agent medicine – also discussing the formation of the discipline system of intelligent agent medicine Chen Zhihong, Jia Zejun(81)

Commentary

Progress and prospects of AI intelligent agents empowering the diagnosis and treatment of pulmonary nodules Bai Chunxue(83)

Original article

Respiratory internet of things-driven precision monitoring and closed-loop management: asthma care from ward to home Chen Zhihong, Ti Liuqing, Wang Yuehong, et al(91)

The potential and prospects of AI empowering grassroots doctors in case analysis and reporting Liang Qiong, Bai Chunxue(96)

Intelligent agent empowers correction of pathologically overlooked early lung cancer cases in nodule reporting Ji Yuan, Jiang Zhengzeng, Zhao Xuelian, et al(103)

Digital humans, virtual experts, and patient education and management: a new model for respiratory health communication Yang Li, Cai Qinyi, Bai Chunxue(106)

Medical education

Metaverse medicine and innovation in respiratory education: from the classroom to immersive clinical training Yu Qing, Zhang Wen, Bai Chunxue(113)

Current applications and development strategies of metaverse innovation models in otolaryngology clinical practice and education·····	Zhou Lei, Zhang Wen, Yu Haoran, et al(120)
Design concept for a neurology metaverse teaching system based on the Fudan Zhongshan “huisheng intelligent education” platform·····	Mao Lingyan, Yu Qing, Zhang Wen, et al(127)
A conceptual framework for constructing an innovative teaching module for traditional chinese medicine inheritance in a collaborative “flagship” hospital integrating chinese and western medicine based on the “huisheng intelligent education” metaverse platform ···	Zhang Wen, Hou Fenggang, Yang Yunke, et al(132)
Conceptualization and pathways of the medical education governance digital twin in the context of precision education ······	Zhang Wen, Zhang Min, Ma Changchang, et al(138)
Research on the construction of metaverse-based immersive training system and teaching modes for postoperative coronary artery disease patients ······	Zhao Weilin, Zhang Wen, Yu Qing(142)

Acquisitions editor Gao Chengshi

Executive editors Zhai Chengcheng

Executive proofreaders Zang Tianru, Sun Mengyao, Yin Yue, Ji Jingfang, Wang Di

DOI:10.61189/279699gxbcd

·编者按·

肺结节智能体：从辅助诊断工具到智能体医学新范式——兼论智能体医学学科体系的形成

Pulmonary nodule intelligent agent: from auxiliary diagnostic tools to a new paradigm of intelligent agent medicine - also discussing the formation of the discipline system of intelligent agent medicine



陈智鸿¹, 贾泽军²

1. 上海交通大学医学院附属新华医院呼吸与危重症医学科, 上海交通大学医学院呼吸病研究所, 上海 200092

2. 《元宇宙医学》编辑部, 上海 200032

21 世纪以来, 肺癌始终是全球癌症死亡的首位原因, 也是我国疾病负担最重的恶性肿瘤之一^[1-2]。低剂量 CT(LDCT)筛查显著提高了早期肺癌检出率, 但同时也带来了假阳性增加、过度干预、长期随访困难以及医疗资源分布不均等新挑战^[1-5]。这些问题表明, 未来肺癌防治体系需要解决的关键问题已不再是单纯“发现结节”, 而是如何围绕患者未来发生肺癌的风险开展连续、精准和可持续管理。

与此同时, 人工智能(artificial intelligence, AI)、大语言模型(large language model, LLM)、医学物联网(medical internet of things, MIoT)、数字孪生及元宇宙医学快速发展, 正在推动医学从信息化时代迈向智能化时代, 从循证医学时代迈向人机协同医学时代。在这一历史背景下, 以医学智能体为代表的新型数字医疗主体开始出现, 并逐渐成为未来智慧医疗体系的重要基础设施。

本期刊载的《AI 智能体赋能肺结节诊治研发进展及展望》一文, 系统提出了肺结节智能体(Pulmonary Nodule AI Agent)的理论框架、技术体系和应用路径。文章指出, 肺结节智能体并非传统意义上的 AI 辅助阅片软件, 而是一种融合人工智能、医学 GPT、多模态数据、知识图谱、医学物联网、数字孪生及连续数字医疗体系的新型智能医疗系统。其核心目标不是单纯识别影像中的肺结节, 而是持续管理患者未来发生肺癌的动态风险。这一理念标志着肺结节管理模式正在由“发现结节时代”迈向“管理风险时代”, 也意味着肺癌早诊体系正在发生深刻变革。

值得关注的是, 白春学教授团队关于肺结节智能体的研究, 并非源于近年来生成式人工智能兴起

后的短期探索, 而是建立在十余年持续积累的理论创新和临床实践基础之上。从 2011 年前后开展肺结节规范化诊治研究, 到 2016 年牵头发表亚洲肺结节临床实践共识; 从 2017 年提出医学物联网肺结节管理模式, 到 2022 年发布全球首个 *Expert Consensus on the Metaverse in Medicine*; 从医学 GPT 理论体系构建, 到 BAIMGPT、PNapp 5A 以及肺结节智能评估管理一体机等创新实践, 团队逐步形成了“肺结节医学—物联网医学—数字医疗—医学 GPT—元宇宙医学—医学智能体”的连续创新链条^[4, 6-10]。

从学术演进角度分析, 肺结节智能体不仅是人工智能在肺癌领域的技术升级, 更可能代表一个新兴交叉学科的诞生。传统肺结节科学主要研究结节发现、诊断与治疗; 数字医疗强调数据驱动的医疗模式; 元宇宙医学关注虚实融合环境下的人机协同医疗; 而智能体医学则进一步将感知、认知、推理、决策、执行、反馈和持续学习整合于统一框架之中, 使智能系统由“工具”演变为“数字医疗主体”。

从这一意义上讲, 智能体医学并非简单的人工智能应用, 而是医学范式的重要演进。其研究对象不仅包括疾病本身, 更包括疾病风险、医疗流程、患者行为和健康生态系统; 其研究方法不仅包括传统医学研究, 还涵盖人工智能、认知科学、知识工程、复杂系统科学及数字治理理论; 其核心目标则是实现从“疾病治疗”向“风险治理”、从“间断医疗”向“连续医疗”、从“经验决策”向“人机协同决策”的转变。

肺结节智能体正是这一新范式最具代表性的实践场景之一。由于肺结节管理需要长期随访、多学科协作、多模态融合和动态风险评估等, 因此更

适合成为智能体医学的重要试验场。本文提出的感知层、认知层、决策层、执行层和进化层五层架构,不仅适用于肺结节管理,也为未来肿瘤智能体、慢病智能体、睡眠智能体乃至数字医院智能体建设提供了参考框架。

然而,任何新学科的发展都不会一帆风顺。当前智能体医学仍面临数据异质性、模型漂移、AI幻觉、可解释性不足、责任边界模糊及伦理治理体系滞后等挑战^[11-14]。尤其在医疗领域,智能体不仅需要具备高水平认知能力,更必须具备可信性、安全性和可治理性。因此,未来学科建设的重点将逐步由“提升模型性能”转向“提升系统可信度”,由“追求更聪明的AI”转向“建设更安全的AI”。

展望未来,随着基础模型、多智能体协同系统、自主智能体、联邦学习、数字孪生和元宇宙医学生态持续发展,智能体有望成为继电子病历、互联网医疗之后医疗体系的第三代核心基础设施^[7-10]。医生将更多承担复杂决策、价值判断和人文关怀职责,而智能体则承担持续监测、风险发现、路径推理和流程执行任务,最终形成“智能体连续运行—医生高层决策—患者深度参与”的新型医疗模式。

如果说循证医学改变了医学决策方式,精准医学改变了疾病分类方式,那么智能体医学则有望改变未来医疗运行方式。肺结节智能体的发展,或许正是这一历史进程的重要起点。我们期待更多临床医学专家、人工智能科学家、工程技术人员、管理学者和政策制定者共同参与智能体医学学科建设,推动医学由数字化迈向智能化,由疾病医学迈向风险医学,由医院医学迈向全生命周期健康医学。

未来已来。智能体医学时代正在开启。欢迎相关科学家和广大医务人员积极探索医学智能体,实现“名医治未病,元医惠众生”愿景!

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] Bai C X, Choi C M, Chu C M, et al. Evaluation of pulmonary nodules: clinical practice consensus guidelines for Asia [J]. *Chest*, 2016, 150(4): 877-893.
- [5] 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.
- [6] Topol E J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence [J]. *Nat Med*, 2019, 25: 44-56.
- [7] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine [J]. *Clin eHealth*, 2022, 5: 1-9.
- [8] 白春学. 元宇宙医学之我见 [J]. *中国医药导刊*, 2023, 25(1): 1-5.
- [9] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT白皮书 [J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(2): 55-64. DOI:10.61189/530445nlxrhb.
- [10] 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. DOI:10.61189/799037wwkyrc.
- [11] Haibe-Kains B, Adam G A, Hosny A, et al. Transparency and reproducibility in artificial intelligence [J]. *Nature*, 2020, 586: E14-E16.
- [12] Liu X X, Rivera S C, Moher D, et al. Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI Extension [J]. *BMJ*, 2020, 370: m3164.
- [13] Lekadir K, Frangi A F, Porras A R, et al. FUTURE-AI: international consensus guideline for trustworthy and deployable artificial intelligence in healthcare [J]. *BMJ*, 2025, 388: e081554.
- [14] Cruz Rivera S, Liu X X, Chan A W, et al. Guidelines for clinical trial protocols for interventions involving artificial intelligence: the SPIRIT-AI extension [J]. *Lancet Digit Health*, 2020, 2(10): e549-e560.

引用本文

陈智鸿,贾泽军. 肺结节智能体:从辅助诊断工具到智能体医学新范式——兼论智能体医学学科体系的形成 [J]. *元宇宙医学*, 2026, 3(2): 81-82.

Chen Z H, Jia Z J. Pulmonary nodule intelligent agent: from auxiliary diagnostic tools to a new paradigm of intelligent agent medicine-also discussing the formation of the discipline system of intelligent agent medicine [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(2): 81-82.

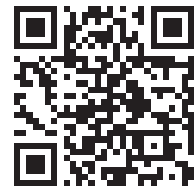
DOI:10.61189/345538vxseea

· 专家述评 ·

AI 智能体赋能肺结节诊治研发进展及展望

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] 肺癌长期位居全球恶性肿瘤死亡首位,在我国尤为突出。低剂量CT筛查显著提高了早期肺癌检出率,但同时也带来了假阳性增加、过度干预、随访困难及区域医疗差异等现实问题。近年来,人工智能(artificial intelligence, AI)、大语言模型、医疗物联网及元宇宙医学快速发展,使医学智能体逐渐由单纯影像辅助工具演变为具备感知、推理、决策、执行、反馈与持续学习能力的新型数字医疗主体。肺结节智能体是基于多模态数据融合、医学GPT、知识图谱及连续数字医疗体系构建的新型数字医学系统,可围绕肺结节完成风险识别、动态分层、路径推荐、长期随访及闭环管理,从而实现肺癌风险的全流程精准控制。当前,AI已从传统计算机辅助检测逐渐发展至多智能体协同体系,并开始进入数字化MDT、居家医院、数字孪生及元宇宙医学等更深层场景。本文结合国内外研究、共识指南及白春学教授团队提出的BAIMGPT与PNapp 5A体系,系统综述肺结节智能体的概念、技术基础、核心架构、临床应用、现实挑战及未来发展方向,重点讨论AI在肺结节检出、风险分层、多模态融合、连续随访、赋能基层及真实世界治理中的作用。研究提示,肺结节智能体真正管理的对象,并非“影像中的结节”,而是患者未来发生肺癌的动态风险。将来,智能体有望推动肺结节管理从“发现结节”进入“精准管理风险”时代,实现“名医治未病,元医惠众生”愿景。

[关键词] 人工智能;智能体;肺结节;肺癌早筛;医学GPT;多模态融合

[中图分类号] R 563 **[文献标志码]** A

Progress and prospects of AI intelligent agents empowering the diagnosis and treatment of pulmonary nodules

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

[Abstract] Lung cancer remains the leading cause of cancer-related mortality worldwide and poses an especially severe burden in China. Low-dose computed tomography (LDCT) screening has significantly improved the detection rate of early-stage lung cancer; however, it has also introduced major challenges, including increased false-positive findings, overtreatment, difficulties in long-term follow-up, and regional disparities in healthcare resources. In recent years, the rapid development of artificial intelligence (AI), large language models (LLMs), the medical Internet of Things (MIoT), and Metaverse Medicine has driven the evolution of Medical AI Agents from simple imaging-assistance tools into novel digital medical entities capable of perception, reasoning, decision-making, execution, feedback, and continuous learning. Pulmonary Nodule Agents represent a new generation of digital medical systems built upon multimodal data integration, medical GPT technologies, knowledge graphs, and continuous digital healthcare frameworks. These systems can perform risk identification, dynamic stratification, pathway recommendation, long-term follow-up, and closed-loop management for pulmonary nodules, thereby enabling precision control of lung cancer risk throughout the entire clinical pathway. Currently, AI has evolved from traditional computer-aided detection (CAD) systems toward multi-agent collaborative architectures and is increasingly being integrated into advanced clinical scenarios, including digital multidisciplinary team (MDT) management, Hospital at Home, digital twins, and Metaverse Medicine. Drawing upon international research, consensus guidelines, and the BAIMGPT and PNapp 5A framework proposed by Professor Chunxue Bai's team, this article systematically reviews the concepts, technological

[收稿日期] 2026-04-05

[接受日期] 2026-05-30

[基金项目] 四大慢病重大专项(2024ZD0529300). Supported by Major Special Projects for Four Major Chronic Diseases (2024ZD0529300).

[作者简介] 白春学,博士,主任医师、教授; E-mail: cxbai@fudan.edu.cn

foundations, core architectures, clinical applications, real-world challenges, and future development trends of pulmonary nodule agents. Particular emphasis is placed on the role of AI in pulmonary nodule detection, risk stratification, multimodal integration, continuous follow-up, grassroots healthcare empowerment, and real-world governance. Evidence suggests that pulmonary nodule agents are not merely managing “nodules on imaging,” but rather the dynamic future risk of lung cancer in individual patients. In the future, such intelligent agents are expected to transform pulmonary nodule management from a paradigm of “detecting nodules” to one of “precision risk management,” ultimately advancing the vision of “preventive medicine by renowned physicians and universal healthcare enabled by metaverse medicine.”

[Key Words] artificial intelligence; intelligent agent; pulmonary nodule; early lung cancer screening; medical GPT; multimodal integration

肺癌是全球癌症死亡的首位原因,也是我国疾病负担最重的恶性肿瘤之一。尽管靶向治疗与免疫治疗不断进步,但晚期肺癌总体预后仍不理想,因为降低死亡率最有效的路径依然是早期发现与早期干预^[1-2]。NLST与NELSON等大型随机对照研究^[1-2]已经证实,低剂量CT(LDCT)筛查可显著降低肺癌死亡率。然而,这也带来了新的挑战,包括假阳性率高、过度随访、不必要穿刺及过度手术等问题。在真实世界中,肺结节管理的真正困难并非“发现结节”,而是如何在海量结节中识别真正高危病变,并同时避免低危病灶被过度干预。因此,现代肺结节管理正在由“单次影像评估”逐渐转向“基于风险分层的连续动态管理”^[3-5]。这一转变意味着医疗体系不仅需要更高水平的影像评估能力,还应具备长期随访、动态比较、多模态融合及闭环协同能力。在此背景下,肺结节智能体有望成为未来肺癌早诊体系的重要利器。

当前AI的发展也正在经历重要阶段性演进。早期CAD系统主要解决“看见结节”的问题,而新一代智能体则开始进入“理解结节、预测风险并持续管理”的阶段^[6-10]。生成式预训练变换器(GPT)类模型的出现,使AI由传统图像识别进一步进入医学认知与临床协同层面^[11-13]。从本质上看,肺结节智能体真正管理的对象,不是影像中的结节,而是患者未来发生肺癌的动态风险。这也是现代肺结节管理理念最核心的变化。

1 肺结节智能体的概念与技术演进

1.1 肺结节管理模式正在发生根本转变 当前肺结节管理正由“是否存在结节”的静态识别模式,逐步转向“结节未来风险”的动态精准管理模式^[3-5]。现代肺结节诊疗更加关注恶性概率评估、长期演变趋势及个体化干预策略。Lung-RADS、Fleischner学会及亚太肺结节相关指南均强调风险分层与标准化随访的重要性^[3-5]。对高危人群而言,LDCT筛查不

仅关注早期发现,更强调阳性阈值控制、连续随访及项目质控;而对偶然发现的结节,则需结合患者年龄、吸烟史、既往影像变化及临床背景综合评估。现代管理理念旨在减少肺癌漏诊,避免良性结节过度干预,提高患者依从性与长期管理能力,并进一步优化卫生经济学效益。然而,真实世界中仍存在阅片差异、基层经验不足、区域资源不均衡及患者失访等问题^[14-15]。传统单中心、单学科模式已难以满足连续化、精准化管理需求。因此,AI与智能体技术正逐渐成为重构肺结节诊疗流程的重要利器。

1.2 肺结节智能体的定义 肺结节智能体是基于AI、LLM、多模态数据融合及医疗物联网构建的新型数字医疗主体,可围绕肺结节实现信息感知、风险推理、临床决策、连续随访、动态反馈及持续学习^[16-20]。与传统AI仅执行单一算法任务不同,智能体已逐渐具备感知、认知、决策、执行及反馈能力,可在影像、病理、临床资料及随访信息之间形成闭环协同。因此,肺结节智能体的核心价值已从“发现结节”发展为“理解结节、预测风险并落地全流程管理”。其本质是以数字化方式实现肺癌风险的连续精准管理,并促进医院—社区—家庭之间的协同医疗。

1.3 AI向智能体的技术演进路径 肺结节AI的发展大致经历5个阶段^[6,10,20]。早期CAD系统主要基于规则算法完成结节检出,但假阳性率较高,泛化能力有限。随后,深度学习特别是卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的发展,显著提高了小结节及磨玻璃结节评估能力^[21-22]。影像组学阶段通过高维特征提取实现风险分层,而GPT类模型的出现,则推动医学AI由“图像识别系统”逐渐升级为“医学认知系统”^[11-13]。AI不仅能够分析影像,还可理解指南、整合病例信息、生成诊疗建议,并参与长期随访管理(表1)。未来,随着多智能体体系、医学GPT及物联网技术进一步融合,肺结节管理有望进入连续数字医疗时代,实现从筛查、评估到随

访和康复的全流程智能化管理。

表 1 肺结节智能体技术演进路径

阶段	核心技术	主要特征
CAD时代	规则算法	辅助检出
深度学习时代	卷积神经网络	风险预测
影像组学时代	高维特征提取	精准分层
GPT时代	大语言模型	医学认知
智能体时代	多智能体协同	连续闭环管理

2 肺结节智能体的五层体系结构

2.1 感知层 感知层是肺结节智能体的“数字感觉器官”，决定其对复杂临床场景的基础识别能力^[6,8,10]。其核心数据来源包括LDCT、PET/CT、病理图像、液体活检、医疗物联网(MIoT)连续监测及患者报告结局(ePRO)等。近年来,深度学习显著提升了肺结节自动检出与定量分析能力,尤其在小结节、磨玻璃结节及复杂病灶识别方面优势明显^[21-22]。AI不仅可完成肺野分割、结节识别、三维重建及动态增长分析,还能实现跨时间点时序比较,提高测量一致性并降低人工阅片负担。值得注意的是,不同地区疾病谱差异明显,欧美模型在中国真实世界数据中的泛化性能曾受到限制,经本土化再训练后假阳性率明显下降^[16,23]。这提示高水平肺结节智能体必须具备区域适配与真实世界“习服能力”,从而为后续认知、决策及长期管理奠定基础。

2.2 认知层 如果说感知层解决的是“看见结节”,认知层解决的则是“理解结节”。随着LLM与医学GPT的发展,肺结节AI已由传统图像识别逐步进入医学认知阶段^[11-13]。GPT不仅能够处理结构化数据,还具备医学语义理解、指南推理、风险解释、临床路径推荐及医患交互能力,使AI初步具备“临床思维雏形”。当前认知层主要包括医学知识图谱、Lung-RADS与Fleischner指南规则、影像组学、多模态融合及时序动态推理等模块^[3-5]。AI可进一步从CT中提取纹理、灰度及空间异质性等高维特征,用于预测良恶性风险、EGFR突变及肿瘤侵袭性^[12-13,24]。BAIMGPT则进一步融合指南、MDT经验与真实世界随访数据,推动肺结节AI由“工具型AI”迈向“认知型AI”,成为精准化与连续化管理的重要中枢^[16-19]。

2.3 决策层 决策层是肺结节智能体最核心的“智能体化”环节,其本质是围绕肺癌动态风险进行路径推理与临床决策。传统AI多仅输出“高风险”或

“低风险”,而智能体还需进一步回答是否需要PET/CT、穿刺、微创切除或继续随访,以及最佳复查间隔等关键问题。因此,肺结节AI正由“风险评估系统”向“路径协同系统”演进。肺结节管理高度依赖MDT协作,但基层医院常缺乏成熟MDT体系,导致诊疗同质化不足^[14-15]。AI智能体的重要价值之一,在于推动“数字化MDT”建设。对于中间风险结节,AI可先完成风险评估,GPT结合指南进行路径推理;若风险进一步升高,则可触发PET/CT建议、规划穿刺路径,并辅助MDT评估是否需要微创手术,从而提高肺结节管理的精准性与连续性(表2)。这种流程化协同决策模式,正是智能体区别于传统AI的重要标志。

表 2 AI智能体在肺结节MDT中的作用

MDT环节	AI支持内容	临床价值
影像评估	自动分割与风险评估	提高一致性
呼吸评估	功能与基础疾病整合	提高手术适配性
介入决策	穿刺路径推荐	降低操作风险
病理整合	病理与影像关联	提高诊断准确性
随访管理	自动提醒与动态监测	降低失访率
MDT协同	自动生成摘要报告	提升协同效率

2.4 执行层 执行层是肺结节AI向智能体跃迁的关键环节。传统医学AI多停留于检出与预测阶段,而现代肺结节智能体已进入“行动层”,不仅能够分析数据,还可主动推动医疗流程运行。其核心功能包括自动随访提醒、检查调度、MDT触发、路径升级、患者通知、远程协同及术后管理等。真实世界中,医疗风险往往并非“未发现疾病”,而是流程断裂、患者失访及风险升级未形成闭环。因此,智能体的价值不仅在于提高诊断准确率,更在于提升医疗连续性。BAIMGPT一体机正体现这一趋势,其整合AI影像分析、GPT交互、MIoT连接、云平台及实时质控体系,推动肺结节管理由单一AI软件迈向全流程数字医疗基础设施^[16-19]。

2.5 进化层 进化层是未来智能体区别于传统AI的核心能力。传统AI多为“一次训练、长期固定”,而真实世界医疗环境却持续变化,包括数据漂移、设备升级、指南更新及疾病谱改变。因此,肺结节智能体必须由“静态算法”升级为“持续进化系统”。其核心机制包括持续学习、自动再训练、联邦学习、数据漂移校正、区域适配及模型更新。尤其在中国,不同地区疾病谱差异明显,如亚洲磨玻璃结节及炎症性结节更常见^[16,23]。智能体必须具备真实世

界持续“习服能力”,才能不断优化风险模型与决策路径。未来,肺结节智能体将逐渐接近可持续学习的“数字生命体”,而不再只是固定的软件工具。

3 肺结节智能体的临床应用现状

3.1 AI辅助LDCT筛查进入规模化阶段 LDCT筛查是当前肺癌早诊最重要的技术基础^[1-2]。然而,随着筛查规模持续扩大,影像数据量呈指数级增长,传统人工阅片模式已难以满足高效率、高一致性及连续化管理需求。AI的引入,正在推动肺癌筛查由“人工经验主导”向“智能辅助决策”转变。当前AI在LDCT筛查中的主要任务包括肺野自动分割、结节检出、三维体积测量、密度分类、时序比较及风险分层。其中,深度学习模型在小结节及磨玻璃结节识别方面优势尤为明显^[21-22]。AI不仅能够提高检出效率,还可显著降低漏诊率与观察者间差异。更重要的是,AI正在推动筛查体系实现标准化。尽管Lung-RADS等风险分级体系已广泛应用,但不同医生之间仍存在判读差异。AI可通过统一参数测量与标准化风险评分,提高阳性阈值一致性,降低不必要召回率,并改善筛查流程质量控制^[3-5]。因此,未来肺癌筛查将不再是“一次CT检查”,而是长期、多时间点、动态化的风险管理过程。

3.2 AI赋能肺结节精准评估 现代肺结节管理强调“风险分层”而非单纯“发现结节”^[3-5]。因此,AI的重要价值不仅在于“看见结节”,更在于“理解结节”。当前AI在肺结节精准评估中的核心应用主要包括(1)密度分类:AI能够自动识别实性结节、部分实性结节及磨玻璃结节(GGO)。不同密度类型对应不同管理路径,其中部分实性结节通常具有更高恶性风险^[3-5]。(2)体积与增长分析:传统二维测量误差较大,而AI三维体积分析能够更准确识别结节增长趋势^[21-22]。许多早期肺癌病灶增长缓慢,仅依赖单次影像难以判断性质,而AI时序动态比较可显著提高长期评估稳定性。(3)影像组学与侵袭性预测:近年来,影像组学快速发展。AI可从CT图像中提取纹理、灰度分布、边缘复杂度及空间异质性等高维特征,并进一步用于预测良恶性、微浸润风险、EGFR突变概率及肿瘤侵袭性^[12-13,24]。因此,AI正在推动肺结节管理由传统“形态学医学”向“数据驱动精准医学”演变,并逐渐形成基于风险概率的动态决策模式。

3.3 多模态融合推动肺结节管理进入精准时代 现代肺结节管理已不再依赖单一CT影像。当前越来越多研究开始融合临床信息、影像组学、病理特征、

液体活检、ctDNA、DNA甲基化、microRNA及PET/CT代谢信息等多源数据^[25-29]。多模态融合的核心价值,在于提高中间风险结节的再分层能力。例如,部分磨玻璃结节仅依赖影像难以明确性质,但若结合动态增长速度、分子标志物及患者危险因素,则能够显著提高预测准确性(表3)。因此,未来高水平肺结节智能体并非“单一超级算法”,而是能够整合多源数据、形成可解释路径建议并持续优化决策的综合智能体系。

表3 肺结节智能体中的多模态数据来源

数据类型	主要内容	临床价值
影像数据	LDCT、PET/CT	检出与风险评估
临床数据	吸烟史、COPD、家族史	风险修正
病理数据	组织学与分子病理	精准诊断
液体活检	ctDNA、甲基化	早期风险提示
IoT数据	连续监测与ePRO	长期管理
GPT知识层	指南与知识图谱	路径推理

3.4 BAIMGPT与PNapp 5A体系实践 白春学教授团队提出的PNapp 5A体系,是我国肺结节数字化管理的重要探索之一^[3,16-19]。其核心包括(1)询问(Ask);(2)测定(Assessment);(3)建议(Advice);(4)安排(Arrangement);(5)辅助(Assistance)。该体系的重要意义,在于不仅完成“发现结节”,更实现从筛查到长期管理的全流程闭环。

BAIMGPT则进一步推动“AI+名医”协同模式形成^[17-20]。与传统AI相比,其主要特点包括(1)医学知识融合能力:不仅整合文本知识,还能够结合影像特征、临床背景、生物标志物及病理结果进行综合分析。(2)结构化输出能力:可自动生成风险摘要、随访建议、MDT意见及患者教育内容,从而降低基层诊疗差异。(3)连续交互能力:不同于传统AI“单次输入、单次输出”模式,GPT类智能体可持续与医生及患者互动,使肺结节管理由“阶段性医疗行为”逐渐转向“连续数字陪伴”。因此,BAIMGPT的实践表明,智能体正在从辅助工具逐步演变为数字化肺结节管理平台。

3.5 AI辅助随访与患者教育 肺结节管理最大的难点之一,并非初诊,而是长期随访。现实中,大量患者因不理解影像报告、不清楚复查时间或焦虑过度而长期失访,最终延误诊断^[14-15]。因此,现代肺结节管理越来越强调患者教育与连续化管理。

AI智能体在这一过程中具有重要价值:(1)结构化解释:医学GPT可将复杂医学术语转化为患者

易理解语言。例如,“右上肺5 mm纯磨玻璃结节”可被解释为“目前恶性风险较低,建议定期复查,无需立即手术”,从而降低患者焦虑。(2)随访提醒:AI可自动生成复查时间、动态趋势图及检查清单,减少流程断裂。(3)智能问答:GPT类系统能够完成风险教育、检查意义解释及术后康复指导,尤其适用于基层及居家场景。因此,未来智能体不仅服务于医生,也将逐渐成为患者长期数字健康伙伴。

3.6 基层智能体推动“名医能力下沉” 当前我国肺结节管理的重要矛盾之一,是患者数量巨大而高水平专科资源有限。大量基层医生面临阅片经验不足、风险评估不规范、随访体系不完善及MDT支持不足等问题。因此,未来智能体的重要使命之一,是推动“名医能力数字化”。BAIMGPT的重要方向之一,即通过指南知识、风险模型、专家经验及真实世界病例,形成可复制的“数字名医能力”^[16-19]。在AI支持下,基层医生可逐步获得风险分层、标准化随访、MDT协同及患者教育能力。这一模式可能比传统“培养少数顶级专家”更具公共卫生价值。因为真正决定肺癌总体死亡率下降的,往往不是少数顶级中心,而是基层整体能力的系统性提升。

4 肺结节智能体研发面临的现实挑战

4.1 数据异质性仍是核心障碍 尽管AI在肺结节领域展现出巨大潜力,但目前多数模型仍存在“实验室性能优异、真实世界落地困难”的问题。肺结节数据异质性主要来源于人群特征、扫描协议、疾病谱及医疗流程差异。例如,欧美肺癌患者中吸烟相关实性结节比例较高,而亚洲地区则更常见非吸烟肺癌、磨玻璃结节及炎症性结节^[16,23]。因此,若直接套用欧美训练模型,容易导致假阳性率升高及风险误判。这一现象提示,真正高水平的肺结节智能体必须具备区域适配能力与持续学习能力。未来模型训练不仅需要多中心、多设备、多场景数据支持,还需结合真实世界长期反馈进行动态优化。

4.2 AI可解释性与“黑箱风险” 医学AI面临的核心挑战之一,并非单纯准确率,而是可信性。当前深度学习模型大多属于典型“黑箱模型”,虽然能够输出风险评分,但医生往往难以理解其决策依据:为什么判定高风险?哪些特征发挥关键作用?模型是否受到伪相关因素影响?因此,国际上越来越强调可解释AI及规范化治理框架,包括FUTURE-AI、TRIPOD-AI、STARD-AI及CONSORT-AI等^[30-35]。现代智能体开始尝试提供热力图、风险来源解释、动态增长依据及关键特征分析,从而增强

模型透明度。未来真正高水平的肺结节智能体,应不仅能够“给出建议”,更能够解释“为什么这样建议”。只有当AI具备可解释性与可追溯性时,医生才可能真正建立信任,并将其纳入临床决策流程。

4.3 AI幻觉与医学安全问题需高度警惕 随着GPT类模型进入医疗领域,“AI幻觉”问题逐渐受到广泛关注。所谓AI幻觉,是指模型生成不真实内容、错误医学结论、虚构参考文献或不合理诊疗建议。在普通互联网场景中,这类错误可能仅表现为信息偏差;但在医疗领域,则可能直接影响患者安全。例如,若肺结节GPT系统错误推荐手术时机、随访周期或穿刺路径,可能导致不必要干预、漏诊甚至严重并发症。因此,医学智能体与普通聊天机器人存在本质区别,其核心前提必须是“安全优先”。目前,高水平医学GPT系统通常采用医学知识库限制、指南约束、专病数据库、专家审核及人工质控等方式降低幻觉风险。BAIMGPT提出的重要方向之一,也是“AI+专家质控”协同模式^[16-19]。未来医学智能体的发展过程中,“安全性”很可能比“聪明程度”更加重要。

4.4 医疗责任边界与伦理治理问题 肺结节智能体若真正进入临床实践,还必须回答一个关键问题:如果AI出错,责任由谁承担?这是当前全球医疗AI监管领域最核心的议题之一^[34-35]。

目前主要争议包括(1)AI属于辅助工具还是“数字医生”;(2)医生是否必须完全复核AI结果;(3)AI建议能否直接进入临床路径;(4)患者是否需要知情同意。尤其在肺结节管理中,许多决策本身具有高度不确定性。因此,未来肺结节智能体更适合作为“增强型辅助系统”,而非“完全自主系统”。与此同时,数据隐私问题也日益重要。肺结节智能体通常需要整合CT影像、电子病历、基因信息及长期随访数据,因此必须建立数据脱敏机制、联邦学习体系及多中心安全共享机制。未来医疗AI的竞争,不仅是算法竞争,更是治理体系与伦理规范的竞争。

4.5 真实世界部署与持续运行挑战 许多医学AI研究的问题,并不在于模型本身,而在于缺乏长期稳定运行能力。真实世界医疗环境持续变化,包括设备升级、医院流程调整、指南更新、疾病谱变化及数据漂移等。因此,肺结节智能体不能是“一次训练、永久使用”的固定系统。未来真正高水平的智能体,应具备持续学习、自动再训练、真实世界反馈及长期质量监测能力^[16-17]。从本质上看,肺结节智能体将越来越接近“持续进化的数字生命体”,而不

再只是静态算法软件(表4)。总体而言,肺结节智能体的发展已从单纯算法竞争,逐渐进入“真实世界落地能力”竞争阶段。未来谁能够在安全性、可解释性、治理体系及长期运行能力方面建立优势,谁才可能真正推动医疗AI进入临床常态化应用。

表4 肺结节智能体当前主要挑战及对策

挑战	主要问题	可能对策
数据异质性	人群与设备差异大	多中心训练
外部验证不足	泛化能力有限	前瞻性研究
黑箱风险	缺乏可解释性	Explainable AI
AI幻觉	错误路径建议	专家质控
隐私问题	数据泄露风险	联邦学习
模型漂移	长期性能下降	持续再训练

5 肺结节智能体未来发展趋势与展望

5.1 多智能体协同与连续数字医疗将成为主流 未来肺结节智能体不应被理解为“单一超级AI”,而应发展为多专科智能体协同运行的数字化MDT体系^[16-20]。肺结节管理涉及影像识别、呼吸评估、病理推理、外科决策、肿瘤治疗、随访管理及患者教育,天然适合由影像智能体、GPT认知智能体、病理智能体、随访智能体和MDT智能体共同完成。在此基础上,肺结节管理将由分散、间断、被动的传统流程,转向主动、连续、实时的数字医疗模式。未来系统可自动完成CT识别、风险更新、复查提醒、趋势分析、MDT触发及远程咨询,患者不再依赖个人记忆完成复查,而是由智能体持续陪伴与管理^[36-39]。这一转变意味着肺结节诊疗将由“医院中心化”逐步走向“患者全生命周期中心化”。

5.2 居家医院与元宇宙医学将拓展落地场景 居家医院模式将成为肺结节智能体的重要应用场景。大量肺结节患者并不需要长期住院,却需要持续随访、动态风险评估和健康教育^[40-45]。未来智能体可结合MIoT设备、云平台、GPT交互及移动终端,构建医院—社区—家庭一体化体系,使患者在家中完成复查提醒、风险咨询、康复管理、ePRO上报及医患远程互动。医院则通过智能体实现风险监测、远程干预和动态质控。元宇宙医学与数字孪生也可能重构未来诊疗^[17-20,46]。通过连续CT、液体活检和AI模型,可构建个体化“数字肺”,用于观察结节演变、模拟手术路径、预测生长趋势及评估治疗效果。虚拟MDT可实现跨地域专家共享三维影像并协同决策,VR患者教育则有助于理解病灶位置、手术方案

和康复路径。其核心价值并非炫技展示,而是推动“名医治未病,元医惠众生”愿景落地。

5.3 基层智能体与自主临床智能体将推动能力重构 BAIMGPT通过整合指南知识、风险模型、专家经验及真实世界病例,可形成可复制的“数字名医能力”^[16-19]。未来基层医生在AI支持下,可逐步获得风险分层、标准化随访、MDT协同及患者教育能力。该模式并非降低医疗标准,而是通过AI标准化路径、云端协同与实时质控,使基层获得接近高水平中心的管理能力。从公共卫生角度看,真正决定肺癌死亡率下降的,往往不是少数顶级中心,而是基层整体能力的系统性提升。与此同时,肺结节智能体可能由“辅助型AI”走向“自主临床智能体”。随着基础模型、智能体工作流、具身智能和联邦学习发展,系统可主动完成风险发现、路径推理、动态监测、流程触发及质量控制。医生则更多承担边界判断、复杂灰区决策、医患沟通和最终医疗责任。未来医学模式可能由“医生主导+AI辅助”,逐渐演变为“智能体连续运行+医生高层决策”。

5.4 肺结节智能体研发六步路径 高水平肺结节智能体建设需要完整研发体系,而非单一算法开发。(1)数据治理,建立多中心数据库、高质量标注、真实世界随访队列和数据脱敏机制;(2)基础模型训练,涵盖CT模型、GPT模型、多模态融合模型和时序分析模型,重点提升泛化能力;(3)医学知识融合,将指南、共识、专家经验和知识图谱纳入智能体;(4)临床路径设计,围绕风险分层、MDT协同、随访闭环、患者教育和居家医院整合;(5)真实世界验证,开展外部验证、前瞻性研究、Silent Trial及长期结局评估;(6)持续学习与治理,推进联邦学习、模型再训练、数据漂移校正、安全监管和伦理治理(表5)。

表5 肺结节智能体研发六步路径

阶段	核心内容	关键目标
数据治理	多中心数据库	提高数据质量
基础模型训练	CT/GPT/多模态模型	提高泛化能力
知识融合	指南+知识图谱	提升认知能力
临床路径设计	MDT+随访闭环	实现智能体化
真实世界验证	Silent Trial	提升可信性
持续治理	联邦学习+再训练	长期进化

5.5 典型肺结节智能体临床案例 肺结节智能体正在推动肺癌管理由“单次影像判断”迈向“连续动态风险管理”新阶段。1例67岁女性无吸烟史、伴肝癌

家族史患者,于2025年7月因左肺7.0×5.4 mm混合磨玻璃结节至白教授AI门诊就诊。BAIMGPT肺结节智能体结合薄层CT影像纹理、密度异质性、动态风险模型及循环异常细胞(CAC)分析,提示恶性概率高达88%,并建议动态随访或手术活检^[47-48]。患者后赴日本接受左肺舌段切除,术后病理报告“无恶性肿瘤证据”。然而,白教授结合智能体持续风险推理指出可能存在病理漏诊,并联合中山医院病理科在AI辅助数字病理系统支持下重新阅片,同时结合EGFR检测综合分析,最终证实为微浸润性肺腺癌(MIA),浸润约4 mm,EGFR突变丰度10.2%。该病例不仅证实了AI对亚厘米级混合磨玻璃结节高风险识别能力,更体现了新一代肺结节智能体已由传统“发现结节”逐渐进入“认知—推理—纠错—闭环随访”阶段,对于减少早期肺癌漏诊具有重要临床价值。

6 小 结

肺结节管理正由“单次影像评估”向“连续风险管理”深刻转变。LDCT筛查虽显著提高早期肺癌发现率,但也带来假阳性增加、过度诊疗及长期随访困难等挑战^[1-5]。AI、医学GPT、医疗物联网及多模态融合技术的发展,为肺结节精准管理提供了新基础^[6-11]。当前智能体已由早期CAD系统,逐渐演变为具备感知、推理、决策、执行、闭环反馈及持续学习能力的新型数字医疗主体,不仅能完成结节检出与风险预测,还正进入随访管理、MDT协同、患者教育、基层赋能及居家医院等更深层场景^[16-19,46]。以BAIMGPT与PNapp 5A体系为代表的探索,体现了中国在“AI+肺结节智能体”方向的重要实践价值。但其广泛落地仍面临数据异质性、AI幻觉、责任边界及治理体系不足等挑战。未来发展重点将从提升模型性能,转向增强系统可信性、连续性与可治理性。未来,多智能体协同、数字孪生及元宇宙医学等方向,或将推动肺结节管理进入连续数字医疗时代,实现“早发现、少侵袭、优预后”的公共卫生目标。

伦理声明 无。

利益冲突 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] 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] Gould M K, Donington J, Lynch W R, et al. Evaluation of individuals with pulmonary nodules: when is it lung cancer? Diagnosis and management of lung cancer, 3rd Ed: American College of Chest Physicians evidence-based clinical practice guidelines[J]. *Chest*, 2013, 143(5 Suppl): e93S-e120S.

[5] 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.

[6] Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B, et al. A guide to deep learning in healthcare[J]. *Nat Med*, 2019, 25: 24-29.

[7] Topol E J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence[J]. *Nat Med*, 2019, 25: 44-56.

[8] Bi W L, Hosny A, Schabath M B, et al. Artificial intelligence in cancer imaging: Clinical challenges and applications[J]. *CA Cancer J Clin*, 2019, 69(2): 127-157.

[9] Hosny A, Parmar C, Quackenbush J, et al. Artificial intelligence in radiology[J]. *Nat Rev Cancer*, 2018, 18(8): 500-510.

[10] Gomase V S, Ghatule A P. Artificial intelligence and machine learning approaches in radiology for medical imaging diagnostics [Z]//Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering. 2025.

[11] Lambin P, Leijenaar R T H, Deist T M, et al. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine[J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2017, 14(12): 749-762.

[12] 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.

[13] Baldwin D R, Gustafson J, Pickup L, et al. External validation of a convolutional neural network artificial intelligence tool to predict malignancy in pulmonary nodules[J]. *Thorax*, 2020, 75(4): 306-312.

[14] Heuvelmans M A, Oudkerk M. Appropriate screening intervals in low-dose CT lung cancer screening[J]. *Transl Lung Cancer Res*, 2018, 7(3): 281-287.

[15] 中国物联网辅助评估管理肺结节专家组. 物联网辅助评估管理肺结节中国专家共识[J]. *国际呼吸杂志*, 2022, 42(1): 5-12.

[16] 中国物联网辅助肺结节诊治专家组. 物联网辅助肺结节诊治中国专家共识[J]. *国际呼吸杂志*, 2017, 37(8): 561-568.

[17] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT白皮书[J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(2): 55-64.

[18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Kelly C J, Karthikesalingam A, Suleyman M, et al. Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence[J]. BMC Med, 2019, 17(1): 195.
- [22] Rajpurkar P, Chen E, Banerjee O, et al. AI in health and medicine[J]. Nat Med, 2022, 28(1): 31-38.
- [23] Kann B H, Hosny A, Aerts H J W L. Artificial intelligence for clinical oncology[J]. Cancer Cell, 2021, 39(7): 916-927.
- [24] Haibe-Kains B, Adam G A, Hosny A, et al. Transparency and reproducibility in artificial intelligence[J]. Nature, 2020, 586: E14-E16.
- [25] Liu X X, Rivera S C, Moher D, et al. Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI Extension [J]. BMJ, 2020, 370: m3164.
- [26] Collins G S, Dhiman P, Andaur Navarro C L, et al. Protocol for development of a reporting guideline (TRIPOD-AI) and risk of bias tool (PROBAST-AI) for diagnostic and prognostic prediction model studies based on artificial intelligence [J]. BMJ Open, 2021, 11(7): e048008.
- [27] Sounderajah V, Ashrafian H, Aggarwal R, et al. Developing specific reporting guidelines for diagnostic accuracy studies assessing AI interventions: The STARD-AI Steering Group[J]. Nat Med, 2020, 26(6): 807-808.
- [28] European Society of Radiology ESR. What the radiologist should know about artificial intelligence – an ESR white paper [J]. Insights Imaging, 2019, 10(1): 44.
- [29] Pakdemirli E. Artificial intelligence in radiology: friend or foe? Where are we now and where are we heading? [J]. Acta Radiol Open, 2019, 8(2): 2058460119830222.
- [30] Ching T, Himmelstein D S, Beaulieu-Jones B K, et al. Opportunities and obstacles for deep learning in biology and medicine[J]. J R Soc Interface, 2018, 15(141): 20170387.
- [31] McKinney S M, Sieniek M, Godbole V, et al. International evaluation of an AI system for breast cancer screening [J]. Nature, 2020, 577(7788): 89-94.
- [32] Jha S, Topol E J. Adapting to artificial intelligence: radiologists and pathologists as information specialists [J]. JAMA, 2016, 316(22): 2353-2354.
- [33] Schabath M B, Cote M L. Cancer progress and priorities: lung cancer[J]. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev, 2019, 28(10): 1563-1579.
- [34] Lipkova J, Chen R J, Chen B W, et al. Artificial intelligence for multimodal data integration in oncology [J]. Cancer Cell, 2022, 40(10): 1095-1110.
- [35] Jiang Y H, University T M, Yang M, et al. Emerging role of deep learning-based artificial intelligence in tumor pathology [J]. Cancer Commun, 2020, 40(4): 154-166.
- [36] Ye M S, Tong L, Zheng X X, et al. A classifier for improving early lung cancer diagnosis incorporating artificial intelligence and liquid biopsy[J]. Front Oncol, 2022, 12: 853801.
- [37] Hendrix W, Hendrix N, Scholten E T, et al. Deep learning for the detection of benign and malignant pulmonary nodules in non-screening chest CT scans[J]. Commun Med, 2023, 3(1): 156.
- [38] Megat Ramli P N, Aizuddin A N, Ahmad N, et al. A systematic review: the role of artificial intelligence in lung cancer screening in detecting lung nodules on chest X-rays[J]. Diagnostics (Basel), 2025, 15(3): 246.
- [39] Xia Y, Zhu Y, Zhang S, et al. Precise diagnosis of small invasive pulmonary nodules driven by single-cell immune signatures in peripheral blood[J]. Nat Commun, 2025, 16(1): 10939.
- [40] Peng M C, Gong J, An T X, et al. Application of liquid biopsy in differentiating lung cancer from benign pulmonary nodules (Review)[J]. Int J Mol Med, 2025, 56(1): 1-20.
- [41] Melzer A C, Iaccarino J M. Standardized reporting and management of pulmonary nodules: integrating care to improve outcomes[J]. Chest, 2020, 158(5): 1824-1826.
- [42] Iaccarino J M, Steiling K, Slatore C G, et al. Patient characteristics associated with adherence to pulmonary nodule guidelines[J]. Respir Med, 2020, 171: 106075.
- [43] Li J, Zhang L, Yu Z L, et al. The impact of AI on modern oncology from early detection to personalized cancer treatment [J]. npj Precis Oncol, 2026, 10: 69.
- [44] Satapathy P, Padhi B K, Al Khathlan N. Artificial intelligence in respiratory therapy: Opportunities and ethical challenges[J]. Respir Med, 2023, 217: 107342.
- [45] Lekadir K, Frangi A F, Porras A R, et al. FUTURE-AI: international consensus guideline for trustworthy and deployable artificial intelligence in healthcare [J]. BMJ, 2025, 388: e081554.
- [46] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. Clin eHealth, 2022, 5: 1-9.
- [47] 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.
- [48] Henschke C I, Yankelevitz D F, Mirtcheva R, et al. CT screening for lung cancer: frequency and significance of part-solid and nonsolid nodules[J]. AJR Am J Roentgenol, 2002, 178(5): 1053-1057.

引用本文

白春学. AI智能体赋能肺结节诊治研发进展及展望[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(2): 83-90.

Bai C X. Progress and prospects of AI intelligent agents empowering the diagnosis and treatment of pulmonary nodules [J]. Metaverse Med, 2026, 3(2): 83-90.

DOI: 10.61189/411494rrzwam

· 论 著 ·



呼吸物联网驱动的哮喘精准监测与闭环管理

陈智鸿¹, 逯柳青¹, 王悦虹², 白春学^{3,4*}

1. 上海交通大学医学院附属新华医院呼吸与危重症医学科, 上海交通大学医学院呼吸病研究所, 上海 200092

2. 浙江大学医学院附属第一医院呼吸与危重症医学科, 杭州 310003

3. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

4. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032

[摘要] 哮喘管理正从门诊间断评估为主的传统模式, 转向以连续监测、动态预警、分层干预和结局追踪为核心的精准管理模式。呼吸物联网以智能吸入器、家庭肺功能检测、脉搏血氧仪、可穿戴设备、环境传感器、移动终端和云平台为主要载体, 可将“病房、门诊、社区与家庭”形成完整的服务网络。白春学团队关于元宇宙医学、医学新质生产力、BAIMGPT(白氏医学GPT)的研究, 为“多源感知-智能分析-数字人交互-质量控制-闭环执行”路径提供了具有中国语境特色的理论与技术框架。本文围绕呼吸物联网在哮喘病房监测、慢病管理及医院-社区-家庭协同中的应用, 系统综述其在哮喘精准监测与闭环管理中的研究进展、现实困境与未来路径, 以期呼吸专科连续照护体系建设提供参考。

[关键词] 哮喘; 呼吸物联网; 精准监测; 闭环管理; 智能吸入器; 数字医学

[中图分类号] R 256.12 **[文献标志码]** A

Respiratory internet of things-driven precision monitoring and closed-loop management: asthma care from ward to home

Chen Zhihong¹, Ti Liuqing¹, Wang Yuehong², Bai Chunxue^{3,4*}

1. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Xinhua Hospital, Institute of Respiratory Diseases, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200092, China

2. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, The First Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310003, Zhejiang, China

3. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai Institute of Respiratory Diseases, Shanghai 200032, China

4. Shanghai Respiratory Internet of Things Medical Engineering Technology Research Center, Shanghai 200032, China

[Abstract] Asthma management is shifting from the traditional model based predominantly on intermittent outpatient assessments toward a precision management model centered on continuous monitoring, dynamic early warning, stratified intervention, and outcome tracking. The Respiratory Internet of Things (Respiratory IoT), leveraging intelligent inhalers, home pulmonary function testing, pulse oximeter, wearable devices, environmental sensors, mobile terminals, and cloud platforms as its primary components, creates an integrated service network connecting hospital wards, outpatient clinics, community settings, and home environments. Research conducted by Professor Bai Chunxue's team on metaverse medicine, new-quality productivity in medicine, and BAIMGPT (Bai's Medical GPT) provides a theoretical and technical framework with distinct Chinese contextual characteristics, supporting the workflow of "multi-source sensing, intelligent analysis, digital human interaction, quality control, and closed-loop execution." This paper systematically reviews the application of the Respiratory IoT in inpatient asthma monitoring, chronic disease management, and hospital-community-home collaboration, summarizing research progress, practical challenges, and future directions for precision monitoring and closed-loop management in asthma, with the aim of informing the development of a continuous and integrated care system for respiratory diseases.

[Key Words] asthma; respiratory internet of things; precision monitoring; closed-loop management; smart inhalers; digital medicine

[收稿日期] 2026-04-10

[接受日期] 2026-05-27

[基金项目] 国家自然科学基金(82270026). Supported by National Natural Science Foundation of China (82270026).

[作者简介] 陈智鸿, 博士, 主任医师; E-mail: chen-zhihong@xinhua.com.cn

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

哮喘是常见的慢性气道疾病,其临床症状、治疗反应和预后具有显著异质性^[1-2]。传统管理模式主要依赖于门诊间断评估与患者回忆,虽已建立较成熟的分级治疗框架,但在真实世界中仍普遍存在吸入技术错误、长期依从性不足、过敏原持续暴露、院外病情波动识别滞后,以及病房-门诊-家庭管理断裂等问题^[1-3]。GINA 2025 提出,哮喘管理应在每次就诊时同时评估当前控制和未来风险,并核查吸入技术、依从性、合并症^[1];GINA 在“难治性与重度哮喘”文件中进一步强调,在判断“难治”或“重度”前,必须先系统排查诊断不当,治疗依从性差^[4]。上述要求提示,现代哮喘管理已不能仅依赖低频、间断和门诊中心化的信息采集,而需要更连续、更接近真实世界场景的监测体系^[3-4]。

呼吸物联网的发展为这一转变提供了技术基础^[5-6]。近年来,智能吸入器、家庭肺功能检测、脉搏血氧仪、可穿戴设备、环境监测、移动端症状记录、远程教育和数字行动计划等工具不断进入慢性呼吸病管理中^[5-10]。ATS 2025 官方研究^[6]声明指出,家庭监测不应仅被理解为设备部署,而应从检测性能、疾病管理价值、成本、患者体验、临床体验、研究用途和公平可及性等多个维度进行综合评价,并提出居家监测综合评估体系如“PANACEA 框架”等。这意味着,真正有价值的物联网管理不在于“装上设备”,而在于能否将多源数据转化为风险识别、行动计划触发和医疗协同响应等行动^[3,6]。

当前哮喘物联网管理的主体证据主要集中于智能吸入器和远程慢病管理^[7-18]。基于此,本文围绕呼吸物联网在病房监测、慢病管理及“医院-社区-家庭协同”中的应用展开综述,并结合白春学团队提出的元宇宙医学、医学新质生产力、BAIMGPT (白氏医学 GPT) 理念,探讨更符合中国场景的连续闭环管理路径^[19-23]。

1 呼吸物联网驱动哮喘精准监测的理论基础

哮喘之所以适合纳入呼吸物联网框架,首先在于其病情波动往往发生在医院之外或家庭。日间或夜间症状变化、诱因暴露、漏用药物和 SABA 使用过多等,均可能先于急性加重而出现,但这些信息在传统随访中往往依赖患者回忆,难以及时、准确地被捕捉。GINA 2025 强调,哮喘评估除症状外,还应同步关注未来急性加重风险、肺功能和治疗依从性,这与呼吸物联网“连续感知-动态识别-及时反馈”的能力高度一致^[3,6]。

其次,哮喘监测目标正由单纯“症状控制”转向

“症状控制与未来风险控制并重”。当前管理重点已不再局限于患者是否“这周咳不咳、喘不喘”,而更应强调未来急性加重风险、肺功能下降趋势、吸入技术错误、依从性不足和气道炎症是否持续存在等问题^[1,4]。对重度或难治性哮喘而言,这种风险导向的连续评估尤为关键^[4],因为许多看似“治疗失败”的病例,本质上可能源于持续的过敏原暴露、依从性差或可治疗特质未被识别等。

再者,现有研究^[10]提示,数字监测不应停留于“单一指标在线化”,而应逐步走向“数字表型”构建。关于哮喘加重相关数字标志物的系统综述显示,SABA 使用、心率、咳嗽等信号具有预警潜力^[5],而单一肺功能参数并不足以稳定预测所有患者的急性恶化^[5];2025 年有关“数字化绘制哮喘病程”的研究进一步提出,应从诊断、控制到缓解全过程构建纵向数字画像^[10]。由此可见,未来更合理的路径是将症状、行为、生理、环境和医疗信息有机整合起来,识别个体偏离基线的动态模式^[10]。基于此,哮喘呼吸物联网可概括为四层监测结构(表 1)。

表 1 哮喘呼吸物联网监测平台构建策略和技术路线

策略	技术路线
症状层	关注 ACT、夜间醒来、活动受限和救援药使用 ^[1,10] ;
行为层	关注漏服、延迟用药、吸入频率和吸入技术 ^[1,8-9] ;
生理层	关注 PEF、家庭肺功能、SpO ₂ 、心率和睡眠 ^[5-6] ;
环境层	关注花粉、空气污染、温湿度及室内过敏原暴露 ^[10] 。

多层信息融合后,可进一步划分为不同的数字表型,如依从性差主导型、环境触发主导型、夜间恶化型、高炎症负荷型和高风险重症型等,为分层干预提供数据支撑^[4-6,10]。

2 病房场景中的呼吸物联网

呼吸物联网并非只服务于家庭场景,在病房中同样具有重要价值^[3,6]。对因哮喘急性加重住院或需要强化治疗的患者而言,住院期间既是病情波动最明显的阶段,也是进行风险重新评估、强化教育和制定院后管理方案的关键窗口^[1,4]。病房物联网应用的核心不在“远程”,而在于高频、标准化和可追溯^[3,6]。连续生命体征监测有助于识别氧合下降、呼吸频率升高和夜间症状波动^[3,6];电子化用药记录与智能吸入监测则可揭示治疗的依从性,为出院后依从性风险评估奠定基础^[8-9]。

从流程上看,病房场景中的物联网至少承担 3 项任务:(1)早期识别病情恢复不佳或再次恶化风

险,辅助判断是否需升级治疗、延长观察或优化出院时机^[3,6]; (2)系统纠正吸入技术与用药执行问题,避免患者带着“症状暂时缓解但管理基础仍不牢靠”的情况出院^[1,4]; (3)将住院期间形成的数据转化为出院后的个体化行动计划,包括复诊时间、家庭监测项目、异常阈值和就医触发条件^[1,6]。GINA反复强调行动计划、吸入技术培训和规律复诊的重要性^[1],病房正是将这些要求转化为结构化交付内容的最佳场景^[1,3]。

因此,病房监测的价值不应仅以住院期间数据采集的数量来衡量,而应观察其是否真正形成了“出院即接续”的管理链条^[3,6]。未来更理想的做法,是将SpO₂、呼吸频率、症状趋势、雾化或吸入执行、PEF/肺功能变化和炎症指标接入同一平台,在电子病历中自动生成风险摘要,并与护理教育、门诊预约和社区随访任务联动^[6]。这样,住院管理才不再是一次孤立事件,而成为后续门诊和家庭闭环的起点^[3,6]。

3 物联网在哮喘管理中的核心应用

3.1 智能吸入器 在当前哮喘物联网管理模块中,智能吸入器是证据最成熟、最接近临床落地的入口^[24]。2025年系统综述与荟萃分析^[8]显示,反馈型数字吸入器可能改善哮喘控制,并可能在未来急性加重高风险患者中降低严重急性加重的发生。该研究采用GRADE方法评估证据质量,提示“改善控制”这一结论的证据确定性高于“减少严重急性加重”。这意味着,数字吸入器现阶段最明确的价值仍在于促进日常管理质量,而非改变哮喘治疗结局的“硬终点”^[12]。

2025年ACCEPTANCE集群随机试验进一步显示,在基层医疗环境中,数字吸入器可改善用药依从性,并在12个月内维持更好的哮喘控制^[9]。这一结果提示,数字吸入器并非只能在高度选择的研究场景下发挥作用,而有望嵌入真实世界的慢病管理流程^[9]。更早期随机研究同样证明,带提醒和反馈功能的电子监测装置可改善吸入性糖皮质激素依从性,并优化部分临床结局。综合现有证据^[12-18]可见,智能吸入器在“提醒-记录-反馈-再教育”的闭环中具有较高可操作性,也是连接患者端与医疗端最现实的数字入口。

3.2 远程监测 它已构成哮喘数字化慢病管理的另一核心方向。近年系统综述^[7,11]表明,远程治疗监测(remote treatment monitoring, RTM)与远程患者监测(remote patients monitoring, RPM)总体可改善

依从性、减少缓解剂使用并改善部分控制指标,但对急诊、住院和严重急性加重等硬终点的影响证据仍不充分。这并不意味着远程监测“无效”,而是提示其临床获益与人群选择、干预强度、随访时间和组织模式密切相关。换言之,当前更值得回答的问题不是“远程监测是否有效”,而是“哪类患者最需要、哪类指标最有效、哪种流程最能转化为最终获益”^[10-11]。

3.3 数字化行动计划 该计划应被视为家庭闭环管理的枢纽,而非附属模块。GINA 2025明确指出,行动计划可以采用手写、打印、数字化或图像化形式,其本质是将症状变化、药物调整、何时就医和何时急诊预先结构化^[1]。对于物联网平台而言,监测数据只有进入“行动计划引擎”,才能真正转化为干预^[6]。因此,未来成熟的哮喘数字化产品,不应只是若干设备和App的简单堆叠,而应是“智能吸入器+症状/PEF监测+环境提醒+数字行动计划”的一体化管理单元^[7-10]。

4 医院-社区-家庭协同的闭环管理组织模式

呼吸物联网的真正优势,并不在于把家庭数据上传到云端,而在于帮助建立医院-社区-家庭协同的管理共同体^[25]。传统哮喘管理的突出短板在于,专科负责定方案,基层缺少持续数据支持,家庭则缺乏明确的升级路径与实时反馈^[1-3]。物联网技术使症状、用药、肺功能、氧合及环境暴露等信息可以在不同照护场景间连续流动^[6],从而为闭环管理提供了现实基础。

从实施路径看,可将哮喘闭环管理概括为“1个数据底座、3类参与主体、4级响应机制”。1个数据底座,是指院内电子病历、呼吸专病平台、社区端和家庭端的互联互通;3类参与主体,包括专科医生、基层/社区团队及患者与照护者;4级响应机制,则包括自动提醒、专病护士或管理师干预、门诊加急复评和急诊/住院转运。如此,平台不再只是信息展示界面,而成为异常识别、任务分发和转诊触发的执行系统^[3,6]。

家庭病房为这一协同模式提供了进一步拓展方向。对哮喘而言,可分为2个层次。(1)狭义概念:门诊-社区-家庭慢病闭环,重点在依从性、复诊、教育与急性加重预警^[1,7-9]; (2)广义概念:病房-社区-家庭连续照护,适用于急性加重恢复期或合并复杂共病的患者。当前前者更成熟,后者则代表未来方向^[25]。

在中国,社区与基层的价值不应被理解为单纯

“执行末端”，而应被视为闭环管理中的关键节点^[3,6,25]。通过统一风险分层、统一随访模板、统一异常阈值和统一转诊触发条件，专科标准可被下沉为基层可执行流程^[1,3,6]。未来评价医院-社区-家庭协同成效时，也应引入控制率、规范复诊率、失访率、急诊率、再入院率和行动计划执行率等连续质量指标^[1,6,25]，而不应仅停留在项目建设层面的“有无平台”^[3,6]。

5 物联网与元宇宙和 GPT 是哮喘闭环管理的智能中枢

如果说呼吸物联网主要解决“数据从哪里来”的问题，那么医学 GPT 与数字人技术更可能解决“数据如何被理解、转化和执行”的问题。白春学团队在元宇宙医学专家共识中提出，医学元宇宙的重要底座之一即为医疗物联网，随后又在关于医学新质生产力和医学 GPT 的系列文章中，强调互联网、大数据、人工智能和物联网融合对于现代医疗能力升级的意义，并提出医学 GPT 应实现从数据处理到知识精选、从简单咨询到专家分身、从盲目信任到质控把关的能力跃迁。这为呼吸物联网与智能交

互系统的融合提供了具有中国场景特色的理论基础^[19-23]。

将上述理念嵌入哮喘管理，BAIMGPT 不宜仅被定位为患者端问答工具，而更应被理解为临床工作流程中枢^[22-23]。其在患者端可承担病情解释、吸入指导、用药提醒、行动计划教育和异常症状初筛；在医生端可自动汇总智能吸入器、家庭肺功能、SpO₂、环境暴露和既往急性加重史，为特定病人形成结构化风险摘要；在管理端则可跟踪随访完成率、异常响应时效、失访风险和闭环完成度，从而提升项目的可评价性与可复制性。

数字人和元宇宙技术在哮喘场景中的价值，也应避免停留在概念层面，而应落到可执行任务上。例如，可将其用于标准化吸入器教学、急性加重预警演练以及医院-社区-家庭多方沟通的可视化健康教育。其共同优势在于，可将抽象医学知识转化为更易理解、可反复训练和可实时反馈的交互过程，从而增强患者理解、治疗执行和照护协同^[22-23]。从平台架构看，未来“哮喘物联网管理平台”可按六层构建(表 2)。

表 2 哮喘物联网管理平台的构建策略和技术路线

策略	物联网赋能
采集层	负责吸入器、家庭肺功能、SpO ₂ 、可穿戴设备与环境数据接入
治理层	负责标准化、时间对齐、去噪和隐私保护
算法层	负责数字表型识别、风险分层和预警生成
编排层	负责消息推送、随访任务分发和升级转诊
应用层	面向患者、医生、社区与管理者
安全层	负责权限控制、模型审核、算法质控和责任追踪

该架构既承接了白春学团队关于元宇宙医学和医学 GPT 的思路^[19-23]，也与 ATS 关于家庭监测需要从性能、管理、体验和公平性多维评价的观点相呼应^[6]。

6 小 结

呼吸物联网正在推动哮喘管理由门诊中心化、回顾性和低频评估模式，转向以连续感知、动态识别、行动计划触发和多方协同响应为特征的精准管理新范式^[6]。现阶段，智能吸入器、远程慢病监测和数字化行动计划构成了哮喘物联网应用最成熟、最具落地基础的核心模块^[7-10,12-18]。

从未来趋势看，呼吸物联网的关键竞争力不在单一设备或单一算法，而在于能否将“多源监测—

数字表型—分层预警—人机协同—结局评价”整合为可复制、可评价、可持续的医疗服务模式^[6,10]。白春学团队提出的元宇宙医学、医学新质生产力、BAIMGPT(白氏医学 GPT)理念，为我国构建更具可解释性、交互性和质量控制能力的哮喘闭环管理平台提供了重要启示^[19-23]。未来研究应进一步聚焦高风险患者分层、硬终点验证、组织流程重构、支付与监管机制以及基层公平可及性，以推动呼吸物联网从“可连接”真正走向“可实施、可评价、可推广”。

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 陈智鸿:研究设计、论文初稿撰写;遑柳青:文献调研、图表制作;王悦虹:论文修改;白春学:提出研究思

路、最终审阅定稿。

参考文献

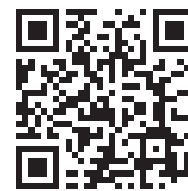
- [1] Heis M, Assabbagh O, Alda'As A, et al. Adherence to the latest GINA guidelines among family physicians and internists in Jordan: a cross-sectional study [J]. *Medicine*, 2025, 104 (43): e45379.
- [2] Bocian I Y, Chin A R, Rodriguez A, et al. Asthma management in the digital age [J]. *Front Allergy*, 2024, 5: 1451768.
- [3] Dunn J, Coravos A, Fanarjian M, et al. Remote digital health technologies for improving the care of people with respiratory disorders[J]. *Lancet Digit Health*, 2024, 6(4): e291-e298.
- [4] Rawat S S. Global Initiative for Asthma (GINA) 2025: a revolutionary document for management of asthma in children [J]. *Journal of Pediatric Pulmonology*, 2025, 4(2):29-30.
- [5] Cokorudy B, Harrison J, Chan A H Y. Digital markers of asthma exacerbations: a systematic review[J]. *ERJ Open Res*, 2024, 10(6): 00014-02024.
- [6] 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.
- [7] Mosnaim G, Carrasquel M, Ewing T, et al. Remote monitoring in asthma: a systematic review[J]. *Eur Respir Rev*, 2025, 34 (175): 240143.
- [8] Ologundudu L, Rayner D G, Oppenheimer J, et al. Patient-facing digital inhalers for asthma: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 2025, 13 (7) : 1824-1835.
- [9] van de Hei S J, van den Berg L N, Poot C C, et al. Long-term effectiveness of a digital inhaler on medication adherence and clinical outcomes in adult asthma patients in primary care: the cluster randomized controlled ACCEPTANCE trial[J]. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 2025, 13(7): 1693-1704.
- [10] Chan A H Y, Drummond D, Ramakrishnan S, et al. Digitally mapping the asthma journey—from diagnosis to remission [J]. *EClinicalMedicine*, 2025, 83: 103204.
- [11] Fadaizadeh L, Velayati F, Sanaat M. Telemonitoring in patients with asthma: a systematic review[J]. *J Asthma*, 2024, 61(2): 92-104.
- [12] van de Hei S J, Kim C H, Honkoop P J, et al. Long-term cost-effectiveness of digital inhaler adherence technologies in difficult-to-treat asthma [J]. *J Allergy Clin Immunol Pract*, 2023, 11(10): 3064-3073. e15.
- [13] Rumi G, Canonica G W, Foster J M, et al. Digital coaching using smart inhaler technology to improve asthma management in patients with asthma in Italy: community-based study [J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2022, 10(11): e25879.
- [14] Sulaiman I, Greene G, MacHale E, et al. A randomised clinical trial of feedback on inhaler adherence and technique in patients with severe uncontrolled asthma [J]. *Eur Respir J*, 2018, 51(1): 1701126.
- [15] Hale E M, Greene G, Mulvey C, et al. Use of digital measurement of medication adherence and lung function to guide the management of uncontrolled asthma (INCA Sun) : a multicentre, single-blinded, randomised clinical trial [J]. *Lancet Respir Med*, 2023, 11(7): 591-601.
- [16] Chan A H, Stewart A W, Harrison J, et al. The effect of an electronic monitoring device with audiovisual reminder function on adherence to inhaled corticosteroids and school attendance in children with asthma: a randomised controlled trial[J]. *Lancet Respir Med*, 2015, 3(3): 210-219.
- [17] Morton R W, Elphick H E, Rigby A S, et al. STAAR: a randomised controlled trial of electronic adherence monitoring with reminder alarms and feedback to improve clinical outcomes for children with asthma[J]. *Thorax*, 2017, 72(4): 347-354.
- [18] Moore A, Preece A, Sharma R, et al. A randomised controlled trial of the effect of a connected inhaler system on medication adherence in uncontrolled asthmatic patients[J]. *Eur Respir J*, 2021, 57(6): 2003103.
- [19] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. *Clin eHealth*, 2022, 5: 1-9.
- [20] 白春学. 元宇宙医学之我见[J]. *中国医药导刊*, 2023, 25 (1): 1-6.
- [21] 白春学. 医学新质生产力之我见[J/OL]. *元宇宙医学*, 2024 [2026-05-19]. <https://www.zentimepublishing.com/home/journal/info/aid/625/sid/69/code/MM.html>.
- [22] 白春学. 医学GPT研发应用之吾见[J]. *元宇宙医学*, 2025, 2 (1): 6-14.
- [23] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT白皮书[J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(2): 55-64.
- [24] Fowler S J, Sinha I, Doyle M, et al. Asthma: diagnosis, monitoring, and chronic asthma management: summary of guidance from BTS/NICE/SIGN[J]. *BMJ*, 2025, 390:r1162.
- [25] Ko S Q, Kee A. Hospital-at-home for respiratory diseases—opportunities and challenges[J]. *Respirology*, 2025, 30(12): 1124-1126.

引用本文

陈智鸿, 遑柳青, 王悦虹, 等. 呼吸物联网驱动的哮喘精准监测与闭环管理[J]. *元宇宙医学*, 2026, 3(2): 91-95.

Chen Z H, Ti L Q, Wang Y H, et al. Respiratory internet of things-driven precision monitoring and closed-loop management: asthma care from ward to home[J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(2): 91-95.

AI赋能基层医生病例分析报导的潜力与展望

梁 琼¹, 白春学^{2,3,4*}

1. 南宁市第一人民医院呼吸与危重症医学科, 南宁 530022

2. 复旦大学附属中山医院呼吸危重症医学科, 上海 200032

3. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032

4. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

[摘要] 病例分析报导是基层医生将临床实践、诊疗思维、随访结果与经验反思转化为可传播知识的关键载体, 具有鲜明的医疗、教学与科研三重属性。高质量病例分析报导不仅能够提高基层首诊识别、转诊决策和慢病连续管理水平, 而且有助于沉淀可复盘、可教学、可研究的一线经验。当前, 基层医生在病例分析报导实践中普遍面临时间不足、资料碎片化、临床推理链条显化不充分、规范化写作能力不足、文献检索效率不高以及科研转化门槛较高等现实障碍。近年来, 生成式人工智能、大语言模型、自然语言处理、多模态模型、环境语音记录、知识图谱, 以及物联网和元宇宙医学等技术快速演进, 为基层病例分析报导提供了从资料采集到知识转化的全流程赋能路径。AI可在病史采集与结构化整理、病例时间线重建、问题表征、鉴别诊断提示、循证证据辅助、病例教学设计、病例库建设与科研转化等方面发挥作用, 从而提升病例分析报导的完整性、规范性、可解释性与复用价值。现有研究表明, AI在复杂诊断推理、病例文本生成、医学教育和临床文书辅助等方面已展现出可观潜力, 但其在基层真实世界场景中的应用仍受到幻觉、偏倚、隐私保护、责任归属、外部可迁移性不足以及能力受限等问题制约。未来, 应坚持“人机协作、医生主导、事实可核、流程可审计、场景渐进部署”的原则, 构建面向基层的智能病例生态, 将病例分析报导升级为集诊疗、教学、科研、质控与区域知识共享于一体的数字化能力体系。

[关键词] 人工智能; 基层医生; 病例分析报导; 大语言模型; 医学教育; 真实世界研究**[中图分类号]** R 192.3 **[文献标志码]** A

The potential and prospects of AI empowering grassroots doctors in case analysis and reporting

Liang Qiong¹, Bai Chunxue^{2,3,4*}

1. Department of Respiratory Critical Care Medicine, Nanning First People's Hospital, Nanning 530022, Guangxi, China

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

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

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

[Abstract] Case analysis reporting is an important approach for general practitioners to transform clinical practice, diagnostic reasoning, follow-up observations, and reflective learning into sharable medical knowledge, with substantial clinical, educational, and research value. High-quality case analysis reporting can improve first-contact recognition, referral decisions, chronic disease management, and regional quality improvement, while also serving as an effective vehicle for case-based teaching, young physician training, and real-world evidence generation. However, in routine practice, general practitioners often face multiple barriers, including limited consultation time, incomplete data collection, weak diagnostic reasoning frameworks, insufficient standardized writing skills, difficulty in evidence retrieval, and low research conversion efficiency. Recent advances in generative artificial intelligence, large language models, natural language processing, multimodal AI, ambient clinical documentation tools, knowledge graphs, Internet of Things, and metaverse medicine have created new opportunities for empowering case analysis reporting in primary care. AI can support history taking, structured data extraction, reconstruction of disease timelines, problem representation, differential diagnosis prompting, evidence retrieval, case-based educational design, case repository development, and research transformation, thereby improving the completeness, standardization, interpretability, and reusability of case reports. Current studies suggest that AI has shown promising performance in complex diagnostic reasoning, clinical text generation, medical education, and documentation assistance. Nevertheless,

[收稿日期] 2026-04-05**[接受日期]** 2026-06-02**[基金项目]** 四大慢病重大专项(2024ZD0529300). Supported by Major Special Projects for Four Major Chronic Diseases (2024ZD0529300).**[作者简介]** 梁 琼, 博士, 主任医师; E-mail: lqiangqiong@163.com

*通信作者 (Corresponding author). 白春学, 博士, 主任医师、教授; E-mail: cxbai@fudan.edu.cn

real-world implementation in primary care remains constrained by hallucinations, bias, privacy risks, unclear accountability, limited external generalizability, and the potential erosion of clinicians' independent reasoning ability. Looking forward, AI empowerment in primary care case analysis reporting should follow the principles of human-AI collaboration, physician leadership, factual verifiability, auditability, and gradual scenario-based deployment. The ultimate goal is not merely to help physicians write faster, but to build an intelligent case ecosystem that integrates clinical care, education, research, quality assurance, and regional knowledge sharing.

[Key Words] artificial intelligence; general practitioners; case analysis reporting; large language models; medical education; real-world research

病例分析报导是基层医疗最基础、最具现场感的表达形态之一。与大型随机对照试验相比,病例分析报导更能真实呈现基层首诊场景中的症状模糊性、信息不完整性、多病共存性与资源受限性,因此在首诊识别、风险分层、转诊决策、慢病管理和公共卫生早期预警中具有独特价值^[1]。对基层医生而言,病例分析报导并不是对接诊经过的简单记录,而是将病史采集、检查解释、鉴别诊断、治疗处置、随访观察与经验反思重构为临床决策链的过程。正因为如此,病例写作本身也是临床能力显示与提升的重要环节,并为多维价值奠定了基础。

随着现代医学教育和循证医学的不断发展,病例分析报导已不再局限于展示罕见病或特殊现象,而是逐步扩展为临床推理训练、继续教育、科研启蒙、质量改进与真实世界研究的重要工具。病例报告规范(case report guidelines, CARE)及其解释与延伸文件明确强调,病例报告应突出真实性、完整性、透明性与临床启发性。尤其应清晰呈现患者背景、临床经过、关键决策节点、结局评价和经验教训^[2]。这种规范化表达不仅有助于沉淀一线经验,也有助于把个体实践转化为团队学习和机构改进的公共资源,因此病例分析报导值得被置于更加重要的位置来审视。

人工智能的发展正在为病例分析报导带来新的机会。近年来,大语言模型与多模态医学AI快速演进,相关技术不仅能够辅助病史转录、结构化信息提取和文本生成,还可参与问题表征、鉴别诊断提示、证据检索、教学反馈与病例库建设。与此同时,元宇宙医学、医学GPT、BAIMGPT和数字化医学提出的一系列理念与实践,为构建面向未来的智能病例生态提供了具有中国特色的理论框架和应用场景^[1,3-6]。因此,系统梳理AI如何赋能基层医生病例分析报导,不仅具有现实紧迫性,也具有方法学和学科建设层面的前瞻意义。

1 基层医生病例分析报导的医疗、教学与科研意义

1.1 医疗意义 病例分析报导首先是一种服务基

层医疗的实践。基层医生作为医疗体系中的“首诊医生”,承担着常见病、多发病、早期重症识别及慢病长期管理的重要职责。高质量病例分析能使基层诊疗中原本隐性的关键节点显性化,例如首发症状中的危险信号识别、经验性治疗无效后再评估、检验与影像结果如何赋能诊断排序,以及基层如何管理^[2]。通过这一过程,医生不仅记录“做了什么”,更解释了“为什么这样做”,从而把零散经验转化为团队可共享、可复盘、可迁移的临床知识。

病例分析报导还具有提升医疗质量的意义。临床工作中出现的误诊、漏诊、转诊延误和不合理治疗,往往与信息采集不完整、临床思路不清晰、病情演变识别滞后以及流程衔接不顺畅有关。通过对典型病例进行回顾性梳理,基层机构可以更具体地发现病史、复诊、双向转诊流程和随访机制中的薄弱环节,并据此推进流程再设计和质量改进^[2]。换言之,好的病例分析报导不仅是在总结一个病例,更是在修正一套流程,可使其自然连接到后续的教学与科研应用。

1.2 教学意义 病例分析报导同时是最贴近现场的基层医学教育实践。基层医生的学习需要基于真实病例开展问题导向和实践训练。病例分析能够把临床推理过程显性化,帮助年轻医生理解为什么要这样考虑、为什么要优先排除某些危险因素、为什么某些检查和处置顺序更合理,从而促进临床思维训练与反思性学习。与抽象知识相比,经过分析和重构的病例更容易形成可迁移的认知框架,因此也更符合基层培训对“能看、能想、能做”的综合要求。

病例分析报导的教学价值还在于其高度复用性和分层性。一个优质病例既可用于院内病例讨论、住培教学和全科培训,也可以根据教学目标改写为不同层级的教学案例。引入AI后,病例还可进一步拆解为基层首诊识别版、鉴别诊断拓展版、随访管理版和科研写作版等多种形式,从而实现更加灵活、高效的分层教学^[7-11]。因此,病例分析不应仅被看作临床记录的延伸,而被视为基层教学资源建

设的重要基础,这也为其科研转化提供了逻辑性前提。

1.3 科研意义 从科研角度看,病例分析报导是基层医生最现实、最可操作的学术起点。若病例分析报导能够遵循统一结构并保持高质量表达,个案便可以进一步扩展为病例系列、质量改进项目、区域病例数据库乃至真实世界研究的重要来源^[12-13]。因此,规范的病例写作并不是科研的附属环节,而往

往就是基层科研的起点和数据入口。

借助 AI,基层医生有望更高效地把临床实践转化为学术成果,并逐步形成“临床发现—病例整理—问题提出—研究深化”的连续路径。病例分析报导在基层并非可有可无的写作任务,而是推动“看病—教学—科研”三位一体发展的关键抓手,体现其价值(表 1)。

表 1 基层病例分析报导的主要价值

价值	核心内容	对基层医疗的意义
医疗价值	梳理诊疗经过,识别关键决策节点,总结经验教训	提升首诊识别、转诊判断与慢病管理能力
教学价值	显化临床思维过程,形成可讨论教学材料	促进年轻医生培训和继续教育
科研价值	将临床经验转化为可传播知识与真实世界数据	支持病例系列研究和基层科研起步
管理价值	暴露流程缺陷和质控薄弱环节	推动机构质量改进和区域协同
公共卫生价值	捕捉异常临床信号和早期流行趋势	有助于风险预警和资源配置优化

2 基层医生开展病例分析报导的痛点与难点

基层医生开展病例分析报导面临的困难具有明显的系统性。(1)时间与工作负荷是最直接的制约因素。基层门诊量大、节奏快、事务繁杂,医生常难以在高强度诊疗后继续投入足够精力整理病例资料、追踪随访并完成规范化写作,致使不少具有教学或科研价值的病例未能及时、完整地沉淀下来。因此,任何赋能方案若不能明显减轻时间负担,均难以真正落地^[14-21]。(2)资料采集与整理不足也是核心障碍。基层患者病史叙述常较口语化、碎片化,既往用药不清、外院资料分散、检查结果整合困难,易造成时间线混乱和关键证据缺失,使病例

难以形成逻辑清晰、证据充分的分析文本^[15-20]。(3)临床推理过程显化不足、规范化写作训练欠缺,也是基层病例报导质量受限的重要原因。许多病例虽有经过和结论,却缺少问题表征、鉴别诊断展开及证据支持,易形成流水账,削弱教学与科研价值^[22-28]。同时,摘要撰写、文献检索、参考文献规范、隐私保护与投稿逻辑等能力不足,也使临床素材难以顺利转化为正式学术文本^[27-28]。(4)科研转化与平台支撑不足进一步限制了病例持续沉淀,提示基层病例分析报导的改进不仅是个人写作问题,更涉及模板、病例库和讨论平台等系统建设(表 2)^[12-14, 20-21]。

表 2 基层医生病例分析报导的主要痛点与难点

痛点环节	主要表现	对病例分析报导的影响
时间不足	门诊繁忙,事务性工作多	难以完成系统整理与高质量写作
信息碎片化	病史叙述不完整,资料分散,时间线混乱	影响病例真实性与逻辑完整性
临床思维表达不足	缺少问题表征与鉴别诊断展开	病例形成流水账,深度不足
写作能力不足	不熟悉规范格式、摘要、参考文献等要求	难以形成正式投稿文本
文献支持薄弱	检索能力有限,难辨文献等级和适用性	影响病例分析的循证质量
科研平台不足	缺少模板、数据库和病例复用机制	难以实现教学和科研转化

3 AI赋能基层病例分析报导的可能性

3.1 AI在信息采集与结构化整理中的作用 AI最直接的价值,在于帮助基层医生把原本碎片化的临床信息转化为可分析、可书写的结构化材料。借助语

音识别、自然语言处理和环境语音记录技术,医生与患者的沟通内容可以被实时转录,并自动整理为主诉、现病史、既往史、用药史、过敏史、体格检查、初步印象和处置计划等结构化信息^[15-19]。这种能力一方面能够减轻文书负担,另一方面也有助于尽可

能保留原始信息,从源头提高病例分析报导的完整性与可追溯性。对基层而言,这种“先把材料收全、收准”的能力,正是后续高质量分析的起点。

在结构化采集基础上, AI还可以进一步完成病例时间线的重建。它能够把“何时起病、何时加重、何时检查、何时调整治疗、何时出现转折”等关键节点重新组织为清晰的时序链条,从而帮助医生快速看见病程演变中的逻辑关系。对于慢病管理病例、反复就诊病例和转诊协作病例而言,时间线是否清楚,往往直接决定病例分析报导的质量高低。换句话说, AI不仅是在帮助医生“记下来”,更是在帮助医生“理出来”,这也自然过渡到其在临床推理中的作用。

3.2 AI在临床推理与病例分析中的作用 AI在病例分析中的更高层次价值,体现在对临床推理框架的辅助上。尤其是大语言模型,可以基于已有资料生成高度概括的“病例摘要句”,提炼患者年龄、关键危险因素、核心症状、病程特征和主要异常检查结果,并在此基础上提出需要重点排查的诊断方向^[22-26]。对基层医生而言,这类功能相当于提供了一个“思考脚手架”,帮助其从杂乱信息中抓住问题本质、形成更清晰的问题表征。也正因为如此, AI最有价值的角色不是替代思考,而是促进思考。

AI还可以作为信息缺口与认知盲点的提示器。它能够提醒医生是否遗漏职业暴露史、旅行史、家族史、用药依从性、既往影像对比或关键实验室指标复测等要素,从而促使病例链条更加完整、分析更具深度。需要明确的是, AI在这一环节中的角色应始终被限定为辅助推理,而非替代临床判断。最终诊断、治疗决定和病例结论必须由医生依据真实资料与临床责任作出。只有把 AI嵌入“医生主导”的工作流,才会建立在可靠的医学基础之上,提升

病例分析报导的质量。

3.3 AI在文献检索与证据整合中的作用 病例分析报导的学术价值,不仅在于叙述单个个案,更在于把个案放回证据体系中进行解释。AI可以帮助医生快速定位相关指南、系统综述、经典原始研究和规范性文件,并初步汇总不同文献对某一临床问题的主要观点,从而显著提高病例讨论的循证质量^[30-36]。例如,在分析发热待查、咳嗽迁延不愈、胸闷胸痛、慢阻肺急性加重或肺结节发现等常见问题时, AI能够优先提示更高等级、更具适用性的证据来源。这样一来,病例分析报导就不再只是“写出经验”,而能够进一步走向“用证据解释经验”。

3.4 AI在教学与科研转化中的作用 AI还可使病例分析报导有机会从一次性写作任务,升级为可持续使用的知识资源。通过自动生成教学讨论题、难度分层版本、病例反思要点和考核提示,单个病例可以更方便地应用于全科培训、住培教学和继续教育^[7-11]。在科研层面, AI还可辅助完成去标识化、结构化标注、标签分类、参考文献格式化和图表草拟,使病例更容易进入病例库和真实世界数据平台^[33-36]。因此, AI赋能的意义并不局限于“写得更快”,而在于“用得更广、沉淀得更深”。

更进一步看,当 AI与物联网、元宇宙医学等技术结合后,病例分析报导的形态本身也将发生变化。家庭监测数据、可穿戴设备信息、远程随访记录以及数字人交互模块,都可能被整合进病例链条,使病例报导从“描述 1 次诊疗”逐步拓展为“呈现 1 个连续健康事件轨迹”^[3-6]。届时,病例不再只是静态文稿,而可能成为兼具临床、教学、管理和科研功能的数字对象。这一前景也提示,基层病例分析报导的未来应放在更大的数字医学场景中来理解(表 3)。

表 3 AI赋能基层病例分析报导的主要路径

应用环节	AI主要功能	对病例分析报导的促进作用
信息采集	语音转录、结构化抽取、自动摘要	提高原始资料完整性
病例整理	时间线重建、问题清单生成	强化病例逻辑结构
临床分析	问题表征、鉴别诊断提示、信息缺口提醒	提升病例分析深度
文献支持	检索指南、综述和关键研究并生成证据摘要	增强循证解释能力
教学应用	自动生成讨论题、分层教学版本、反馈意见	提高病例复用价值
科研转化	去标识化、标签分类、格式化参考文献和图表	促进病例库建设和学术发表

4 相关研究进展

当前, AI在医学病例分析相关场景中的研究进

展,主要可归纳为诊断推理支持、临床文书辅助、医学教育应用和基层医疗场景探索 4 个方面。这些方向虽然各有侧重,但共同指向一个核心问题,究竟

AI能否把复杂、低结构化、强情境化的临床信息转化为对基层医生真正有用的支持。基于这一判断,下面分别概述相关证据及其对基层病例分析报导的启示。

在诊断推理支持方面,现有研究已经显示出大语言模型在复杂病例开放式任务中的潜力。部分研究^[23-24]提示,GPT-4等模型能够以较高概率将正确诊断纳入鉴别诊断列表,在某些标准化病例推理任务中的表现接近甚至超过部分医生群体。然而,系统综述与荟萃分析^[25-26]也明确指出,生成式AI总体诊断准确率仍不稳定,研究异质性较大、偏倚风险较高,其整体表现仍低于专家医生。这意味着,在基层病例分析报导场景中,AI更适合作为“提示者”和“组织者”,而不应被神化为可靠的独立诊断者,这一点需要在应用设计时被充分强调。

在临床文书辅助方面,环境语音记录与自动文书生成技术已进入较快发展阶段。近期多项研究^[15-19]表明,这些技术可以减轻医生记录负担、改善文书效率,并在部分场景中与职业倦怠下降相关。对基层病例分析报导而言,这一进展的意义尤为重要,因为它提高了病例原始资料被完整保存和及时结构化整理的可能性。也就是说,文书辅助虽然看似为“后台能力”,但实际上恰恰是高质量病例分析写作得以成立的前提条件。

在医学教育领域,AI已被广泛探索用于病例式学习、个性化反馈、模拟患者、试题生成和课程辅助。多篇综述^[7-11]指出,AI有助于提高案例教学效率和学习者参与度,但同时也伴随内容失真、过度依赖、反馈质量不均和教师监督不足等风险。因此,在基层病例教学中,AI更适合扮演“脚手架”和“放大器”的角色,即帮助组织材料、提出问题和生成反馈,而教师仍应负责对知识边界、思维质量和临床真实性进行最终把关。这样的分工更符合基

层教学的实际需要。

在基层与家庭医学领域,AI应用研究的重点仍主要集中于工作流支持、文书自动化、风险筛查和慢病管理等方向^[12-14]。真正直接聚焦“基层病例分析报导”这一具体场景的研究目前仍相对有限,但现有证据已经足以说明,把AI优先用于病例整理、文本生成、证据辅助和教学转化,是当下最现实、风险相对可控且具有推广潜力的路径。换言之,基层并不一定要等待“完美诊断AI”成熟,完全可以先从病例分析报导这一更稳妥的切入口启动应用。

5 挑战与局限

尽管AI为基层病例分析报导创立了新机会,但其推广应用绝非没有代价,也不应被简单乐观化。对于基层医生而言,关键的问题不只是“AI能不能写”,而是“AI写出来的内容是否可信、可控、可追责”。因此,在讨论前景的同时,更需要正视其潜在风险与方法学的局限性。(1)需要警惕的是幻觉与事实错误风险。生成式AI可能补写并不存在的病史、检验结果或参考文献信息,且常以流畅、专业的语言呈现,因而更具迷惑性。病例分析报导关涉医疗质量、学术诚信与患者权益,所有AI输出均须逐条回到原始资料核验。(2)偏倚与泛化不足是基层部署中的重要问题。多数模型主要基于英文数据、专科场景或理想化测试集训练,而基层真实病例常伴有资料不完整、多病共存和社会因素复杂等特点,未经本地化验证即直接应用,易出现适用性不足甚至方向性偏差。(3)隐私保护与责任边界决定AI应用能否合规、可持续。(4)现有标准体系虽已形成基础框架,但对基层病例分析报导的实施路径仍不够细化(表4)^[30-36]。因此,下一步不仅要“用技术”,更要“建规范”。

表4 AI赋能基层病例分析报导面临的主要挑战

挑战类别	具体问题	可能后果	应对思路
幻觉风险	自动补写不存在信息、错引文献	病例失真、学术不端、误导诊疗	强制人工逐条核验
偏倚风险	模型对基层真实病例适应性不足	输出失准,影响推广	强化本地化验证和持续监测
隐私风险	病例敏感信息泄露	侵犯患者权益,触发合规风险	去标识化、合规部署
责任风险	AI参与后责任归属不清	医疗和学术责任界限模糊	明确医生为最终责任主体
教学风险	学习者过度依赖AI	临床思维能力弱化	坚持教师审核与反思训练
标准不足	缺少基层应用规范和评估体系	应用质量参差不齐	建立本地标准与质控流程

6 展 望

从发展趋势看, AI赋能基层医生病例分析报导正由单点工具应用走向系统能力建设。未来的重点不只是帮助医生更快完成一篇病例, 而是推动病例在生成、整理、分析、教学和科研转化之间形成完整闭环^[20-21]。(1)应用形态将由单次写作辅助转向全流程协同。AI不应只在写作末端介入, 而应贯穿接诊、问诊、体征记录、检验影像整合、病程追踪、随访管理和总结反思全过程, 使病例生成成为诊疗流程的自然延伸。(2)数据基础将由单纯文本扩展到多模态与连续监测整合。随着可穿戴设备、家庭监测和远程医疗发展, 基层病例将越来越多地纳入血氧、呼吸频率、心率、血压、血糖、睡眠和活动等动态指标, 推动病例从1次就诊记录转变为持续健康过程的呈现。(3)赋能对象将由个体工具使用扩展至机构平台建设。真正有价值的AI应用, 应落实到病例模板、病例库、知识图谱、教学平台和质量改进系统建设中, 使病例沉淀为可教学、可研究、可评估的组织资产。(4)病例呈现方式将由二维文稿延展至元宇宙医学与数字交互场景。结合白春学团队提出的元宇宙医学、医学GPT与BAIMGPT等理念, 未来病例可在数字人辅助下实现问答交互、情景模拟、多学科讨论及物联网数据联动^[3-6]。(5)建设目标将由“写好1个病例”升级为“建设基层知识生态”, 使单个病例成为区域医学知识网络中的节点, 持续服务诊疗、教学、科研与决策改进。

7 小 结

病例分析报导是基层医生临床能力、教学能力和科研能力的重要交汇点。其意义不止于记录1个病例, 更在于通过对诊疗决策过程的结构化梳理, 把临床经验转化为可传播、可复盘、可教学、可研究的知识单元。正因如此, 病例分析报导应被视为基层能力建设的一项基础工程, 而非附属性的书写任务。

从现实路径看, AI最适合优先赋能的环节包括病史采集与语音转录、病例时间线整理、问题表征、鉴别诊断提示、证据辅助检索、病例教学设计和病例库建设。现有研究已提示, AI在这些方面具有较好的应用潜力, 但其落地仍必须坚持医生主导、人工复核、事实可核、过程可追溯与风险可控制原则。未来, 随着大语言模型、多模态AI、物联网、数字医学平台和元宇宙医学持续发展, 基层病例分析报导有望从静态文稿升级为连续、交互、智能的知识系

统, 进而推动基层医疗从经验积累走向数字赋能和高质量发展。

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 梁琼: 撰写、修改、核对文献; 白春学: 选题、撰写、定稿。

参考文献

- [1] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. Clin eHealth, 2022, 5: 1-9.
- [2] Riley D S, Barber M S, Kienle G S, et al. CARE guidelines for case reports: explanation and elaboration document[J]. J Clin Epidemiol, 2017, 89: 218-235.
- [3] 白春学. 元宇宙医学之我见[J]. 中国医药导刊, 2023, 25(1): 1-5.
- [4] 白春学. 医学新质生产力之我见[J]. 元宇宙医学, 2024, 1(3): 3-10.
- [5] 白春学. 医学GPT研发应用之吾见[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(1): 6-14.
- [6] 白春学. 肺结节专家3——BAIMGPT白皮书[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(2): 55-64.
- [7] Parente D J. Generative artificial intelligence and large language models in primary care medical education[J]. Fam Med, 2024, 56(9): 534-540.
- [8] Gordon M, Daniel M, Ajiboye A, et al. A scoping review of artificial intelligence in medical education: BEME Guide No. 84[J]. Med Teach, 2024, 46(4): 446-470.
- [9] Chan K S, Zary N. Applications and challenges of implementing artificial intelligence in medical education: integrative review[J]. JMIR Med Educ, 2019, 5(1): e13930.
- [10] Sridharan K, Sequeira R P. Artificial intelligence and medical education: application in classroom instruction and student assessment using a pharmacology & therapeutics case study[J]. BMC Med Educ, 2024, 24(1): 431.
- [11] Furfaro D, Celi L A, Schwartzstein R M. Artificial intelligence in medical education[J]. Chest, 2024, 165(4): 771-774.
- [12] Kueper J K, Terry A L, Zwarenstein M, et al. Artificial intelligence and primary care research: a scoping review[J]. Ann Fam Med, 2020, 18(3): 250-258.
- [13] Tsai T, Lee J J, Phillips R, et al. Data transformation to advance AI/ML research and implementation in primary care[J]. Ann Fam Med, 2025, 23(4): 363-367.
- [14] Hanna K, Chartash D, Liaw W, et al. Family medicine must prepare for artificial intelligence[J]. J Am Board Fam Med, 2024, 37(4): 520-524.
- [15] Duggan M J, Gervase J, Schoenbaum A, et al. Clinician experiences with ambient scribe technology to assist with documentation burden and efficiency[J]. JAMA Netw Open, 2025, 8(2): e2460637.
- [16] Stults C D, Deng S E, Martinez M C, et al. Evaluation of an ambient artificial intelligence documentation platform for

- clinicians[J]. JAMA Netw Open, 2025, 8(5): e258614.
- [17] Olson K D, Meeker D, Troup M, et al. Use of ambient AI scribes to reduce administrative burden and professional burnout [J]. JAMA Netw Open, 2025, 8(10): e2534976.
- [18] You J G, Dbouk R H, Landman A, et al. Ambient documentation technology in clinician experience of documentation burden and burnout [J]. JAMA Netw Open, 2025, 8(8): e2528056.
- [19] Shah S J, Devon-Sand A, Ma S P, et al. Ambient artificial intelligence scribes: physician burnout and perspectives on usability and documentation burden [J]. J Am Med Inform Assoc, 2025, 32(2): 375–380.
- [20] Laranjo L, Tudor Car L, Payne R E, et al. Artificial intelligence in primary care: innovation at a crossroads [J]. Lancet Prim Care, 2026, 2(3): 100078.
- [21] Allen L N, Lin J L, Segal B M, et al. Artificial intelligence in primary care: frameworks, challenges, and guardrails [J]. Lancet Prim Care, 2026, 2(3): 100079.
- [22] Kanjee Z, Crowe B, Rodman A. Accuracy of a generative artificial intelligence model in a complex diagnostic challenge [J]. Jama, 2023, 330(1): 78.
- [23] Savage T, Nayak A, Gallo R, et al. Diagnostic reasoning prompts reveal the potential for large language model interpretability in medicine [J]. NPJ Digit Med, 2024, 7(1): 20.
- [24] Cabral S, Restrepo D, Kanjee Z, et al. Clinical reasoning of a generative artificial intelligence model compared with physicians [J]. JAMA Intern Med, 2024, 184(5): 581.
- [25] Takita H, Kabata D, Walston S L, et al. A systematic review and meta-analysis of diagnostic performance comparison between generative AI and physicians [J]. npj Digit Med, 2025, 8: 175.
- [26] Zhou S, Xu Z D, Zhang M, et al. Large language models for disease diagnosis: a scoping review[J]. NPJ Artif Intell, 2025, 1(1): 9.
- [27] Packer C D, Katz R B, Iacopetti C L, et al. A case suspended in time: the educational value of case reports [J]. Acad Med, 2017, 92(2): 152–156.
- [28] Ohta R, Sano C. Case report-driven medical education in rural family medicine education: a thematic analysis [J]. Healthcare (Base1), 2023, 11(16): 2270.
- [29] 吉 萍. 医学人工智能研发与应用伦理评估考量[J]. 中华医学信息导报, 2025, 40(24): 9–9.
- [30] Daneshvar N, Pandita D, Erickson S, et al. Artificial intelligence in the provision of health care: an American college of physicians policy position paper [J]. Ann Intern Med, 2024, 177(7): 964–967.
- [31] FUTURE-AI: international consensus guideline for trustworthy and deployable artificial intelligence in healthcare [J]. BMJ, 2025, 388: r340.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Sounderajah V, Guni A, Liu X X, et al. The STARD-AI reporting guideline for diagnostic accuracy studies using artificial intelligence [J]. Nat Med, 2025, 31: 3283–3289.
- [35] Cruz Rivera S, Liu X X, Chan A W, et al. Guidelines for clinical trial protocols for interventions involving artificial intelligence: the SPIRIT-AI extension [J]. Lancet Digit Health, 2020, 2(10): e549–e560.
- [36] Liu X X, Rivera S C, Moher D, et al. Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI Extension [J]. BMJ, 2020, 370: m3164.

引用本文

梁 琼,白春学. AI赋能基层医生病例分析报导的潜力与展望[J]. 元宇宙医学,2026,3(2):96–102.

Liang Q, Bai C X. The potential and prospects of AI empowering grassroots doctors in case analysis and reporting [J]. Metaverse Med, 2026, 3(2): 96–102.

DOI: 10.61189/399481znsrud

· 论 著 ·

肺结节智能体赋能纠正病理忽略的早期肺癌病例报告

纪元^{1,2}, 江峥增^{1,2}, 赵雪莲^{1,2}, 蔡沁怡^{1,4,5}, 白春学^{1,3,4,5*}

1. 复旦附属中山医院 AI+肺癌防治中心, 上海 200032
2. 复旦大学附属中山医院分子病理中心, 上海 200032
3. 复旦大学附属中山医院呼吸危重医学科, 上海 200032
4. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032
5. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

[摘要] 肺结节管理正由传统“单次影像判断”逐渐迈向“连续风险管理”模式,尤其在磨玻璃结节与微浸润性肺腺癌领域,人工智能(AI)与医学GPT辅助决策的重要性日益凸显。本病例展示了1例经BAIMGPT肺结节智能体评估,成功纠正术后病理的典型案例。患者为67岁女性,无吸烟史,于2025年7月因左肺混合性结节至白教授AI门诊就诊。AI系统评估提示结节恶性概率高达88%,虽首次术后病理报告提示“无恶性肿瘤证据”,但经AI辅助病理复核与分子检测后,最终证实为微浸润性肺腺癌。该病例提示肺结节智能体不仅具有“发现病灶”能力,更正在进入“认知—推理—纠错—闭环随访”的新阶段,对于减少早期肺癌漏诊具有重要临床价值。

[关键词] 肺结节;病理;智能体

[中图分类号] R 563 **[文献标志码]** A

Intelligent agent empowers correction of pathologically overlooked early lung cancer cases in nodule reporting

Ji Yuan^{1,2}, Jiang Zhengzeng^{1,2}, Zhao Xuelian^{1,2}, Cai Qinyi^{1,4,5}, Bai Chunxue^{1,3,4,5*}

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

[Abstract] The management of pulmonary nodules is gradually shifting from traditional "single image judgment" to "continuous risk management" mode, especially in the fields of ground glass nodules and microinvasive lung adenocarcinoma. The importance of artificial intelligence (AI) and medical GPT assisted decision-making is becoming increasingly prominent. This case presents a typical case where postoperative pathology was successfully corrected through BAIGPT pulmonary nodule intelligent agent evaluation. The patient is a 67 year old female with no smoking history. She visited Professor Bai's AI clinic in July 2025 due to mixed nodules in the left lung. The AI system evaluation showed that the probability of malignancy of the nodule was as high as 88%. Although the first postoperative pathological report indicated "no evidence of malignant tumor", after AI assisted pathological review and molecular testing, it was ultimately confirmed to be microinvasive lung adenocarcinoma. This case suggests that pulmonary nodule intelligent agents not only have the ability to "detect lesions", but are also entering a new stage of "cognition reasoning error correction closed-loop follow-up", which has important clinical value in reducing missed diagnosis of early lung cancer.

[Key Words] pulmonary nodule; pathology; agent

1 病例资料

患者女性,67岁,无吸烟史及特殊职业暴露史,

既往有肝癌家族史。2025年7月15日于白教授AI肺结节门诊就诊。AI智能分析薄层CT(DICOM)提示左肺上叶253层可见混合性肺结节7.0×5.4 mm,

[收稿日期] 2026-03-30

[接受日期] 2026-05-29

[基金项目] 四大慢病重大专项(2024ZD0529300). Supported by Major Special Projects for Four Major Chronic Diseases (2024ZD0529300).

[作者简介] 纪元,博士,主任医师. E-mail: ji.yuan@zs-hospital.sh.cn

*通信作者(Corresponding author). 白春学,博士,主任医师、教授; E-mail: cxbai@fudan.edu.cn

体积 88 mm^3 , 平均CT值 -481 HU , 距离胸膜 13.8 mm (图1)。BAIMGPT智能体结合影像纹理、密度异质性、时序风险模型及循环染色体突变异常细胞(CAC)评估后, 判定其恶性风险概率为88%, 同时检出3个高风险CAC特征点^[1-2]。

虽然该结节体积较小, 但有典型混合磨玻璃结节特征。既往研究^[3-4]表明, 混合磨玻璃结节与肺腺癌谱系密切相关, 其恶性概率明显高于纯磨玻璃结节。Fleischner学会指南及Lung-RADS^[1-2]均强调, 对于持续存在的混合性结节, 应高度警惕微浸润性腺癌可能。

白教授建议患者: (1) 6个月内复查肺结节CT并继续AI动态分析; (2) 或考虑手术活检。这一决策体现了肺结节智能体“风险分层一个体化决策”理念, 而非单纯依赖传统直径阈值。

2 手术经过与初始病理结果

患者最终选择于2025年9月19日前往日本某医院接受左肺舌区切除术。术后病理报告提示: “无恶性肿瘤证据”。从传统医学视角, 这意味着AI“假阳性”致使过度治疗。但白教授结合AI风险评估、影像学表现及患者既往病史进行综合推理。

肺结节智能体提示该病灶虽小, 但呈混合磨玻璃结构, 且具有明显异质性特征, 其恶性概率不应

因1次阴性病理而完全被否定^[5-6]。

近年来, 多项研究^[7-8]指出, 小病灶尤其是微浸润性肺腺癌容易因切片取材不足、病理视野遗漏及局灶浸润范围有限而发生漏诊。特别是在亚厘米级结节中, 病理切片若未覆盖关键浸润区域, 可导致“假阴性”结果。

3 AI辅助病理纠错与最终诊断

患者术后再次就诊白教授AI门诊并提出疑问: “究竟是不是肿瘤?” 白教授结合智能体提示当即指出: “肯定是病理漏掉了恶变的视野。” 并当即联系中山医院病理科应用患者自日本带回的组织切片, 在AI辅助病理阅片系统支持下重新进行病理分析, 并联合EGFR基因检测进行综合判断。最终结果(图2)显示, 病灶(P25-15319)证实为微浸润性腺癌, 浸润范围约 4 mm , 以腺泡型为主; EGFR突变丰度10.2%。

这一结果高度符合AI最初的高风险预测, 不仅证实了AI对肺结节评估的价值, 更重要的是体现了肺结节智能体“认知层”与“纠错层”的能力。新一代BAIMGPT肺结节智能体已开始融合影像、病理、基因、多学科经验及真实世界随访数据, 形成更接近临床专家思维的综合推理体系^[9-11]。

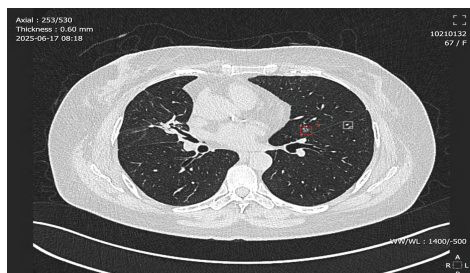


图1 本病例左肺上叶病灶

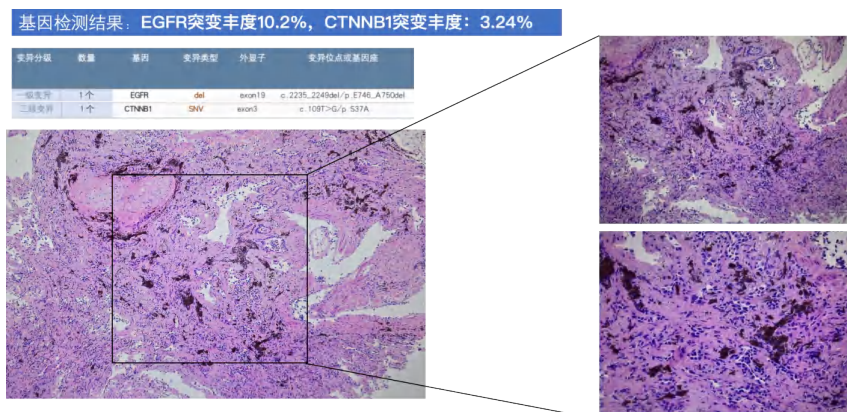


图2 本病例病灶(P25-15319)病理分析结果

4 讨论

本病例为肺结节智能体临床应用拉开帷幕。正在从“检测工具”向“连续决策主体”演进。传统 CAD 系统主要解决“看见结节”问题,而 BAIMGPT 智能体则进一步进入“理解结节”阶段,可结合影像纹理、动态变化、指南规则、分子特征及真实世界数据进行连续推理^[9-10]。本病例也体现了 AI 在减少早期肺癌漏诊中的潜在价值。微浸润性肺腺癌病灶范围小、浸润局灶有限,容易出现病理假阴性。AI 辅助病理与数字病理技术可提高微小浸润灶识别率,减少人为遗漏^[7-8]。这也提示未来肺结节管理应建立“影像—病理—分子—随访”闭环体系。单次检查结果并不一定代表疾病本质,而连续、多模态、长期动态评估才更符合肺癌自然病程。此外,本病例也体现了中国肺结节智能体发展的重要方向。BAIMGPT 不仅关注影像识别,更强调医院—社区—家庭连续管理、人机协同 MDT 及真实世界持续学习能力。这种模式符合未来“AI+医疗”从工具化走向智能化化的发展趋势^[10-11]。

5 结论

本病例表明,BAIMGPT 肺结节智能体能够在亚厘米级混合磨玻璃结节中实现高风险识别,并在术后病理阴性的复杂情况下,通过 AI 辅助病理复核成功纠正漏诊,最终确诊微浸润性肺腺癌。其核心价值不仅在于“发现结节”,更在于建立“感知—认知—决策—纠错—随访”闭环体系。未来,随着 AI、数字病理、医学 GPT 及多模态融合技术的发展,肺结节智能体有望成为早期肺癌精准防治的重要基础设施,并推动肺癌管理进入连续化、智能化和个体化新时代。

伦理声明 无

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

作者贡献 纪元、江峥增、赵雪莲:撰写,病理资料整理;蔡沁怡:撰写、修改、核对文献;白春学:选题、撰写、定稿。

参考文献

- [1] 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.
- [2] American College of Radiology. Lung CT Screening Reporting & Data System (Lung-RADS[®]) Version 2022. [EB/OL](2022-11-05). <https://www.acr.org/Clinical-Resources/Clinical-Tools-and-Reference/Reporting-and-Data-Systems/Lung-RADS>
- [3] 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.
- [4] Henschke C I, Yankelevitz D F, Mirtcheva R, et al. CT screening for lung cancer: frequency and significance of part-solid and nonsolid nodules [J]. AJR Am J Roentgenol, 2002, 178(5): 1053-1057.
- [5] Gould M K, Tang T, Liu I L, et al. Recent trends in the identification of incidental pulmonary nodules [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2015, 192(10): 1208-1214.
- [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] Robles Gómez A, Lozano J O, Fernández P R, et al. Lung adenocarcinoma: characteristic radiological presentations [J]. Radiol Engl Ed, 2024, 66(6): 542-554.
- [8] Jing J, Konopka K E. Diagnosis of lung carcinoma on small biopsy [J]. Surg Pathol Clin, 2020, 13(1): 1-15.
- [9] Topol E J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence [J]. Nat Med, 2019, 25: 44-56.
- [10] Liu X X, Cruz Rivera S, Moher D, et al. Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI extension [J]. Nat Med, 2020, 26: 1364-1374.
- [11] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT 白皮书 [J]. 元宇宙医学, 2025, 2(2): 55-64.

引用本文

纪元,江峥增,赵雪莲,等.肺结节智能体赋能纠正病理忽略的早期肺癌病例报告[J].元宇宙医学,2026,3(2):103-105.
Ji Y, Jiang Z Z, Zhao X L, et al. Intelligent agent empowers correction of pathologically overlooked early lung cancer cases in nodule reporting [J]. Metaverse Med, 2026, 3(2): 103-105.

数字人、虚拟专家赋能呼吸慢病患者健康教育和管理的模式



杨 丽¹, 蔡沁怡^{2,3,4}, 白春学^{2,3,4*}

1. 重庆医科大学附属第一医院 呼吸与危重症医学科, 重庆 400016

2. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032

3. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032

4. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

[摘要] 慢性呼吸系统疾病病程长、症状反复、治疗路径复杂,且院外管理占比较高,这对患者疾病认知、操作技能、自我监测和长期依从性提出了更高要求。因此,持续开展患者教育和管理是影响症状控制、预防急性加重、参与康复和改善长期预后的关键组成部分。近年来,随着人工智能、医学大语言模型、数字人、虚拟专家、物联网及元宇宙医学等技术快速发展,呼吸健康教育和管理已由传统“诊室单次宣教”向“连续化、个体化、情境化与交互化”模式演进。数字人和虚拟专家已显示出在对患者建立疾病认知、指导使用吸入装置、执行书面行动计划、肺康复训练、远程随访和长期健康支持中的应用潜力,为医院—社区—家庭一体化管理提供了新的实现路径。然而,当前仍存在研究异质性较大、结局证据不足、老年与低健康素养人群适配性有限、算法透明度不足及责任边界尚待明确等问题。白春学教授团队率先提出的元宇宙医学、医学GPT与BAIMGPT等概念,为数字人和虚拟专家在呼吸慢病健康教育的本土化实践提供了重要理论与技术支撑。因此,本文结合国际最新综述、重磅文章、共识指南及白教授团队相关研究,系统梳理数字人、虚拟专家与呼吸慢病患者健康教育传播中的理论基础、主要应用场景、技术支撑体系、现实挑战与未来方向,以期对呼吸慢病管理模式创新提供参考。

[关键词] 数字人;虚拟专家;BAIMGPT;物联网;元宇宙医学;患者教育和管理;呼吸慢病

[中图分类号] R 563 **[文献标志码]** A

Digital humans, virtual experts, and patient education and management: a new model for respiratory health communication

Yang Li¹, Cai Qinyi^{2,3,4}, Bai Chunxue^{2,3,4*}

1. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Yuzhong District, Chongqing 400016, China

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

3. Shanghai Research Center for Respiratory Internet of Things Medical Engineering, Xuhui District, Shanghai 200032, China

4. Shanghai Institute of Respiratory Diseases, Xuhui District, Shanghai 200032, China

[Abstract] Chronic respiratory diseases are characterized by prolonged courses, fluctuating symptoms, complex care pathways, and a substantial reliance on out-of-hospital management, placing high demands on patients' disease understanding, operational skills, self-monitoring, and long-term adherence. Patient education and management are the core determinants of symptom control, exacerbation prevention, rehabilitation participation, and improvement of long-term outcomes. Recent advances in artificial intelligence, medical large language models, digital humans, virtual experts, the Internet of Things, and metaverse medicine, are reshaping respiratory health and management from one-time in-clinic instruction toward a model that is continuous, individualized, contextualized, and interactive. In chronic respiratory disease management, these technologies of digital humans and virtual experts have shown promise in disease cognition building, inhaler instruction, interpretation of written action plans, pulmonary rehabilitation training, remote follow-up, and long-term health support, creating new opportunities for integrated hospital-community-home care.

[收稿日期] 2026-03-30

[接受日期] 2026-05-29

[基金项目] 重庆市重庆医科大学附属第一医院研究生教育教学改革研究项目(CYYY-YJSJGXM-202403). Supported by Research Project on Graduate Education and Teaching Reform of the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University (CYYY-YJSJGXM-202403).

[作者简介] 杨 丽, 博士, 副教授; E-mail: 204534@hospital.cqmu.edu.cn

* 通信作者 (Corresponding author). 白春学, 博士, 主任医师、教授; E-mail: exbai@fudan.edu.cn

Nonetheless, current evidence remains constrained by substantial heterogeneity, a lack of hard clinical endpoints, limited adaptation for older adults and people with low health literacy, insufficient algorithmic transparency, and unclear boundaries of responsibility. The concepts of metaverse medicine, medical GPT, and BAIMGPT proposed by Professor Chunxue Bai and colleagues provide important theoretical and technical support for localized practice in this field. Therefore, this study aims to integrate recent international reviews, landmark studies, consensus guidelines and research from Professor Bai's group, and systematically review the theoretical foundation, core applications, technical system, challenges and future directions of digital humans, virtual experts and patient education in respiratory health communication, so as to inform innovative strategies for chronic respiratory disease management.

[Key Words] digital human; virtual expert; BAIMGPT; internet of things; metaverse medicine; patient education and management; chronic respiratory disease

慢性呼吸系统疾病,尤其是慢性阻塞性肺疾病、哮喘、支气管扩张症、间质性肺疾病及慢性呼吸衰竭等,普遍具有病程长、症状反复、治疗持续时间长和院外管理依赖度高等特点^[1]。疾病控制效果不仅取决于药物与技术本身,也取决于患者是否真正理解疾病、是否掌握规范操作、是否能够识别风险信号,并长期坚持治疗与康复。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)关于治疗性患者教育的界定则指出:患者教育应是一个持续、结构化并以行为改变为目标的过程,而非单次信息传递。近年来,国际指南^[2-4]持续强化患者教育在呼吸慢病管理中的地位。例如慢性阻塞性肺疾病全球倡议(Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease, GOLD)2025 版将吸入装置选择与纠错、身体活动促进、肺康复治疗 and 长期随访纳入慢性阻塞性肺疾病综合管理框架^[2]。全球哮喘防治倡议(Global Initiative for Asthma, GINA)2024 版明确强调吸入技术定期复核、书面行动计划和患者自我管理支持的重要性^[3]。美国胸科协会(American Thoracic Society, ATS)临床实践指南进一步确认肺康复在呼吸慢病管理中的核心价值,并支持中心模式与远程肺康复等多种实施路径^[4]。这些共识共同表明,现代呼吸医学中的患者教育正在由“补充性解释”转向“治疗性干预”的重要组成部分。

然而,传统患者教育和管理模式仍存在明显局限^[5-12]。一方面,呼吸慢病长期吸入用药的吸入技术、患者如何自我识别急性加重、进行肺康复训练和居家监测等内容均具有较强操作属性,需要反复示教、复训和反馈,而纸质宣教与口头告知往往难以满足这一需求^[8-12]。另一方面,门诊时间有限,医务人员难以在短时接触中完成充分、分层且可重复的教育沟通^[5-7]。尤其对于高龄、低健康素养和长期居家的患者而言,患者教育常停留于“听过了”,却难以转化为“做对了”,“坚持了”^[5-6,13]。这些都是呼吸慢病管理中患者依从性不足、装置使用错误率较

高和院外支持薄弱的重要原因。近年来,人工智能数字技术的发展为患者健康教育和管理模式创新提供了现实契机。数字人通过语音、图像、动作示范和拟人化交互增强信息传递效果;虚拟专家则在医学大语言模型、知识库和规则系统支持下,使患者教育由静态知识输出走向动态问答、场景化辅导和长期陪伴^[14-16]。对于呼吸慢病教育和管理而言,解释书面行动计划、指导使用吸入装置、肺康复训练、远程随访和家庭场景支持等任务具有高频、重复和标准化程度较高等特征,因而成为数字人和虚拟专家最具落地前景的应用领域^[6-12]。

白春学教授团队率先围绕元宇宙医学、医学新质生产力、医学 GPT 研发及 BAIMGPT 白皮书等提出的一系列理念,为数字人和虚拟专家在医学传播中的本土化发展提供了系统框架^[17-21]。其核心启示在于,未来医学传播不应止于“将知识搬到线上”,而应通过数字人、物联网、医学 GPT 与沉浸式场景构建,形成以患者为中心、以流程为主线、以持续互动为特征的新型健康传播和管理体系。因此,本文结合国际最新综述、重磅文章、共识指南及白教授团队相关研究,系统梳理数字人、虚拟专家与患者教育在呼吸健康传播中的理论基础、主要应用场景、技术支撑体系、现实挑战与未来方向,以期对呼吸慢病管理模式创新提供参考。

1 数字人、虚拟专家赋能呼吸患者教育的理论基础

患者教育的本质不是单纯传递医学知识,而是帮助患者形成疾病认知、操作技能、风险识别能力与长期自我管理能力。WHO 提出的治疗性患者教育强调,教育应服务于患者在日常生活中对疾病的理解、应对与决策^[1]。呼吸慢病患者教育至少包括疾病知识建构、操作技能训练、风险信号识别和长期行为支持 4 个层面^[1-4]。传统宣教多停留于“告诉患者是什么”,而较少覆盖“如何做”,“何时做”和“做得是否正确”等关键问题^[5-7],且难以持续重复

(图1)。正因如此,患者即便接受过宣教,仍常出现行动计划执行不足、吸入技术错误和康复坚持困难等问题^[8-13]。因此,患者教育不应被置于诊疗结束

之后,而应嵌入诊断、治疗、随访和康复全过程。这提示现代呼吸患者教育应由“知识告知型”进一步转向“技能—决策—行为支持型”^[1-4]。

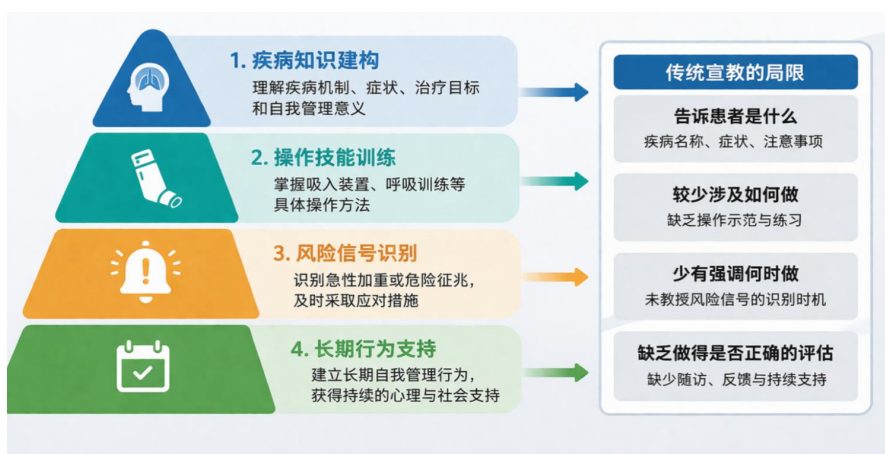


图1 呼吸慢病患者教育内容与传统宣教的局限性

数字人的出现为这一转型提供了新的传播界面。数字人并非简单的医学科普形象,而是融合语音、视觉、动作演示与对话交互能力的多模态沟通载体^[14-16]。其核心价值不在于形式上的拟人化,而在于能够将复杂医学信息转化为更易理解、可重复学习且可随时调用的内容。对高龄或低健康素养患者而言,这种多模态表达较纯文字说明更具可及性与接受度^[6,13]。因此,数字人可被视为提升患者教育可理解性和可获得性的有效接口^[6-7,14-16]。

虚拟专家则是在数字人基础上的进一步升级。其通过嵌入循证知识库、规则引擎和医学 GPT 能力,使患者教育不再停留于固定脚本式输出,能够结合疾病类型、病程阶段和患者情境提供更具针对性的解释与引导。虚拟专家解决的则是“在何种情境下向何类患者表达何种内容”。这使患者教育由单向传递转向分层输出、动态问答和持续支持^[14-16]。对于呼吸慢病而言,这种能力尤具现实意义,因为患者要解决的问题往往贯穿疾病全程,且具有高度碎片化和情境化特征^[2-4,8-12]。

总之,数字人和虚拟专家正在推动呼吸慢病患者教育由一次性沟通向连续性干预转变。其意义不在于替代医务人员,而在于把那些高频、重复、标准化且需反复强化的教育任务,从有限的诊疗现场延伸到患者的日常生活场景中^[5-13]。这为构建更连续、更可达的呼吸健康传播体系奠定了基础^[14-16]。

2 数字人在呼吸慢病患者宣教与管理中的主要应用

呼吸慢病概念抽象、病程漫长,患者在初诊阶

段往往难以一次性理解疾病机制、长期用药必要性及控制不佳的后果^[2-3,5]。数字人在呼吸慢病患者健康教育和管理中的主要应用在于辅助初始宣教、强化标准化宣教任务、持续完成院外长期管理任务,以及指导家属提高对患者的照护能力等。首要价值在于提升患者对疾病的认知,以及提高初始宣教的质量。数字人可借助图示、情境化语言和生活化表达,将抽象医学概念转化为更易理解的信息。这种方式有助于降低首诊教育门槛,提高患者对疾病和治疗逻辑的初步接受度^[6-7]。

呼吸慢病标准化宣教任务通常包括吸烟危害、疫苗接种、环境控制、诱因识别、药物类别辨识、运动与营养建议等内容,均具有重复性强、需求广泛和适合模块化表达等特征^[2-3,6-7]。传统模式下,这些内容常因时间限制而被压缩或遗漏^[5-7]。数字人尤为适合承担高频、低风险且需持续强化的支持任务,可将其拆分为短时、可重复学习的教育模块,提高教育的触达率和完成度,不仅能够补足传统门诊宣教的时间缺口,也有助于推动患者教育的标准化和同质化^[6-7]。

呼吸慢病院外长期管理包括每日用药提醒、症状变化询问、复诊前问题梳理、康复任务推送、季节性风险提示及既往教育内容回顾等,均属于对患者管理质量影响明显却又常被临床忽视的环节^[3,6-13]。对慢性阻塞性肺疾病等稳定期慢病患者而言,这种持续支持尤为重要,因为症状相对缓解后,患者往往更容易中断治疗和管理计划^[3]。数字人可通过轻量化、规律化、互动强化这些任务的执行,从而提高

患者参与度和依从性^[6-7]。

此外,数字人在家属与患者照护教育中同样具有实际价值。高龄患者、慢性呼吸衰竭患者及长期居家患者的日常管理,往往离不开家庭成员参与。照护者不仅需要理解疾病本身,还需掌握吸氧安全、药物观察、加重预警识别和基础照护等知识^[5]。数字人能够向患者和家属同步输出标准化内容,提高家庭场景下健康传播的一致性与可重复性^[5-7](图

2)。从这一角度看,数字人已不再是单纯的患者宣教工具,而正逐步成为家庭—医院—社区之间的重要沟通节点^[6-7]。

因此,数字人在呼吸慢病宣教和管理中的价值不在于其技术形式本身,而在于其能够将既往难以系统完成的教育任务流程化、模块化和长期化。这种能力使其有望从“辅助宣教工具”进一步发展为“慢病教育基础设施”的一部分^[6-7,14-16]。



图2 数字人在家庭场景中对家属与患者照护教育的指导

3 数字人是指导吸入装置使用与书面行动计划落地有力的助手

吸入治疗是哮喘和慢性阻塞性肺疾病管理的核心措施之一,即使药物方案合理,但若长期存在吸入装置使用错误,比如在装置准备、吸气速度控制、吸入配合、屏气等关键步骤上存在偏差,将直接影响药物递送效率,治疗效果仍会明显下降^[2-3,9]。因此,GINA 和 GOLD 均将吸入技术评估与纠错列为常规管理内容,指导使用吸入装置已成为呼吸慢病管理不可分割的组成部分^[2-3]。2025 年荟萃分析^[8-9]显示,教育干预可减少吸入技术相关错误,但训练效果受装置类型、培训形式和患者特征等多因素影响,且长期维持仍是难点。吸入装置教育不应被理解为一次性教学,而应作为持续复训和动态反馈的过程。

然而在现实中,吸入装置教育通常在门诊完成。门诊示教难以满足反复训练需求,患者回家后又缺乏及时反馈,容易重新形成错误操作模式,常面临“教过但不会、会了但不稳、时间不足、缺少复核”等问题。数字人高度契合这一场景,主要基于:(1)吸入技术具有标准化、步骤化和可视化特征,适合借助动画、分步骤视频、语音引导和错误对照进

行教学;(2)能够针对不同装置类型建立模块化教学路径,并依据既往常见错误推送重点纠错内容;(3)支持患者按需反复学习,显著提高训练频次与学习可及性。若进一步与电子吸入器、视频识别或传感器反馈结合,则有望由“静态示教”升级为“动态纠错”,从而提高技术训练的持续性和精准性^[8-10]。

书面行动计划的解释与执行同样是数字人具有优势的应用领域^[6-7]。GINA 明确建议为哮喘患者提供书面行动计划,但传统纸质版本往往存在阅读门槛较高、情境解释不足和可执行性有限等问题。数字人可将静态文本转化为动态交互式路径,通过症状、峰流速变化和夜间觉醒等信息,引导患者判断何时调整缓解治疗、何时加强观察以及何时及时就医。对慢性阻塞性肺疾病患者而言,数字人亦可通过每日问答、异常提醒和图示解释,强化急性加重识别教育,促进早期干预^[3,6-7]。由此可见,在吸入装置指导和行动计划落实方面,数字人有可能成为院外风险识别和自我管理支持的重要环节^[2-3,8-10]。

4 数字人在肺康复、远程随访与长期健康支持中的作用

肺康复是慢性呼吸疾病综合管理的重要组成

部分,在改善症状、运动耐量和生活质量等方面已获得较充分证据支持。然而,传统中心式肺康复受交通、资源、时间安排和患者依从性等因素影响,在可及性方面存在明显不足,实际能够坚持完成康复训练的患者比例并不理想。因此,远程肺康复成为扩大康复覆盖面的重要方向^[4,11-12]。在这一背景下,数字人在呼吸慢病的不同康复阶段均可承担关键支持角色。

在康复前阶段,许多患者对肺康复认识不足,往往将其误解为一般锻炼或额外负担,从而影响参与意愿。数字人可用于解释肺康复的目标、原理和收益,帮助患者形成对康复必要性的正确认知^[4,11-12]。采用可视化、生活化方式进行解释,可降低理解门槛,提高患者参与积极性^[6,12]。在康复执行阶段,数字人可通过动作示范、节奏提示、呼吸模式引导和完成鼓励等方式提供陪伴式支持,使家庭训练更加规范和可持续。这一功能对于居家康复患者尤为重要,因为其训练环境相对缺乏现场监督和同伴支持。在康复随访阶段,患者完成一定周期训练后,常需理解自身变化、明确后续训练重点并识别何种症状提示需要暂停训练或联系医务人员。传统模式下,这类解释往往只能在复诊时完成;而数字人可结合患者自报信息、活动数据或训练记录,提供通俗化反馈和下一阶段提示。虽然复杂评估和治疗调整仍应由专业团队完成,但数字人阶段性反馈和任务衔接功能有助于提高康复过程中的信息连续性与患者获得感^[11-12]。

除肺康复外,数字人在长期随访与健康支持中的作用同样值得重视。呼吸慢病长期管理并不只是定期复诊,还包括症状监测、依从性维护、生活方式干预、情绪支持和复诊准备等一系列高频但碎片化任务。数字人可将这些任务整合为持续、规律、低负担的互动流程,例如在季节更替时强化诱因防控,在感染高发期加强疫苗与自我监测教育,在复诊前协助患者整理问题清单等^[3,6-7]。这种持续型支持虽不直接替代专业决策,却可能显著改善患者长期管理的执行质量。因此,数字人在肺康复和长期随访中的价值,主要体现为其对基础管理质量的放大作用^[6-7,11-12]。

5 虚拟专家和医学 GPT 与物联网赋能呼吸健康传播

随着医学大语言模型和医学 GPT 的发展,患者教育正由“固定脚本式宣教”逐步转向“知识组织—场景识别—动态响应”一体化模式。在这一背景

下,虚拟专家的意义已不限于提供问答接口,而在于承担患者教育路径的组织者及情境支持者角色。但其前提在于建立可信知识底座,即以指南、共识、结构化规则和经审核知识库为基础,使输出内容具有可追溯性和相对稳定性^[14-16]。对于呼吸专科而言,这一点尤为关键,因为患者教育涉及吸入技术、行动计划、康复训练、氧疗与无创通气等多个高风险场景^[2-4,8-13]。因此,虚拟专家不应等同于一般开放式聊天机器人,而应被定位为受循证框架约束的医学传播系统^[14-16]。

白春学教授团队提出的医学 GPT、元宇宙医学与 BAIMGPT 等概念,为呼吸健康传播的本土化升级提供了具有启发性的技术框架^[17-21]。其中,BAIMGPT 可理解为以数字人医学专家为外显形态、以医学知识组织和交互能力为核心的系统平台^[20-21]。其价值不仅在于“让医学知识会说话”,更在于通过平台化整合专家经验、指南知识、患者场景和交互流程,形成连续知识增强服务入口^[17-21]。在呼吸专科中,这种平台能力尤其重要,因为患者问题往往跨越疾病解释、操作指导、康复训练、风险识别与长期生活管理等多个层面^[2-4,8-13]。仅靠孤立的宣教内容难以满足这类复合需求,而平台化的虚拟专家更有可能实现跨场景连续支持^[17-21]。

物联网则进一步赋予数字人和虚拟专家对现实场景的感知能力。若仅依赖语言交互,数字人仍主要承担宣教与解释功能;而当其接入血氧、呼吸频率、活动量、电子吸入器、家庭肺功能、氧疗和居家无创通气设备数据后,即可依据实时信息提供更具情境性的教育反馈^[7-8,10,17-21](图3)。例如,当患者活动量下降、夜间症状增多且电子吸入器使用频次升高时,系统可提示复核吸入技术、关注急性加重风险并建议尽早联系医生^[8,10]。此时,患者教育已不再是脱离场景的静态知识,而开始转向与生活状态和病情波动相耦合的连续支持^[7,17-21]。

元宇宙医学则进一步拓展了呼吸健康传播的空间形态。虚拟病房、沉浸式吸入训练、虚拟肺康复课堂和数字孪生式疾病演示等设想,提示未来患者教育可能由传统图文和视频转向更加沉浸、互动和场景化的表达模式。当然,沉浸式体验本身并不天然等同于临床有效,其最终价值仍取决于是否能够改善患者理解、促进行为改变并优化真实世界结局。但可以肯定的是,数字人、医学 GPT、物联网与元宇宙医学的融合,正在推动呼吸健康传播从“内容数字化”迈向“服务数字化”和“路径数字化”^[17-21]。



图3 物联网赋能数字人和虚拟专家对现实场景的感知能力

6 现实挑战、证据边界与未来发展方向

尽管数字人和虚拟专家在呼吸患者教育和管理中的应用前景广阔,但现阶段证据基础仍存在若干重要局限。(1)不同研究中数字人、聊天机器人、虚拟代理、医学GPT和远程教育平台定义不统一,其技术基础、内容深度与临床整合程度差异显著。这种异质性增加了证据整合难度,也限制了跨研究比较和推广应用^[12-16]。(2)虚拟专家和医学GPT还面临内容安全、幻觉风险、责任边界不清与隐私保护等关键问题。在涉及急性加重、药物调整、氧疗及无创通气等高风险场景时,不准确信息可能直接带来现实伤害^[14-16]。更重要的是,现有研究多提示其在可行性、可接受性和患者体验方面具有积极表现^[6-7,14-16],但对急性加重率、住院率、长期依从性、装置长期正确率、康复完成率等重要结局的证据仍然不足^[6-14]。许多研究关注满意度和短期认知改善,却未能充分回答其是否真正改善疾病控制和长期结局。(3)老年、低健康素养及数字弱势群体的适配问题不容忽视。呼吸慢病患者中高龄人群占比较高,而这部分患者往往也是最需要持续教育和长期支持的人群。若系统设计过于复杂、交互成本过高或表达方式不够友好,数字化工具反而可能形成新的使用障碍^[5-6,13]。

因此,从发展方向看,数字人和虚拟专家未来应在以下4个方面持续推进:(1)以指南、共识和经审核知识库为基础,构建呼吸患者教育的标准化知识图谱和模块化输出体系;(2)加强数字人与物联网、互联网医院、电子病历及远程随访平台的整合,建立更清晰的干预分类体系和标准化评价框架,划定边界,建立知识来源控制、风险分层输出、人工审

核闭环和异常升级机制。尤其对高风险问题,应具备及时转为人工的能力,而不能以完成对话替代临床安全,使其真正进入临床路径;(3)建立真实世界效果评价框架,重点观察技术正确率、依从性、症状控制、急性加重、再入院率、康复完成率和健康素养改善等更具临床意义的终点;(4)坚持适老化、低门槛、多模态和可重复原则,确保最需要帮助的人群能够真正受益。只有在上述方面取得实质性进展,数字人和虚拟专家才能由“创新尝试”走向“常规配置”^[2,4,6-7,14-21]。

7 结 论

随着诊疗模式由院内单次服务转向院内外连续管理,数字人和虚拟专家的兴起,为呼吸健康传播提供了由“信息传递”向“连续互动、技能训练、风险识别与行为支持”升级的新路径^[6-7,14-16]。数字人和虚拟专家在指导呼吸慢病患者建立疾病正确认知、指导吸入装置、解释书面行动计划、肺康复训练、远程随访和长期健康支持等方面具有较强应用潜力。其中,指导吸入治疗和肺康复因其任务标准化程度较高、需反复强化且院外实施比例大,将极有可能成为最先实现规模化应用的重点场景^[4,8-13]。但是从根本上看,数字人并非旨在替代医生作出诊疗决策,而是通过承担高频、重复、碎片化但对结局具有重要影响的教育任务,提升慢病管理的整体质量^[6-7,11-12]。

白春学教授团队长期围绕元宇宙医学、医学GPT与BAIMGPT进行探索和应用,为我国数字人和虚拟专家在呼吸健康传播中的发展提供了有益的理论与技术路径。未来,呼吸慢病健康教育和管理的新模式应以循证知识为基础,以数字人为交互界

面,以虚拟专家为知识中枢,以物联网为感知底座,以医院—社区—家庭协同为实施场景,逐步构建更加可信、可及、可评价的人机协同患者教育体系^[17-21]。只有在安全、规范和临床价值三者并重的前提下,数字人和虚拟专家才能真正推动呼吸健康传播由“被动告知”迈向“主动支持”,由“单次接触”迈向“长期陪伴”^[6-7,14-21]。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

作者贡献 杨丽:文章撰写;蔡沁怡:数据分析与整理;白春学:论文审阅、论文指导。

参考文献

- [1] World Health Organization Regional Office for Europe. Therapeutic patient education: an introductory guide [M]. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2023.
- [2] Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease. Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease; 2025 report [EB/OL]. GOLD, 2024.
- [3] Global Initiative for Asthma. Global strategy for asthma management and prevention, 2024 update [EB/OL]. Fontana (WI): GINA, 2024.
- [4] Rochester C L, Alison J A, Carlin B, et al. Pulmonary rehabilitation for adults with chronic respiratory disease: an official American thoracic society clinical practice guideline[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2023, 208(4): e7-e26.
- [5] Muijsenberg A J L, Houben-Wilke S, Spruit M A, et al. Education for people with serious chronic respiratory diseases and their informal caregivers: how to address challenges that impact learning[J]. Curr Opin Support Palliat Care, 2024, 18(4): 206-212.
- [6] Sun C, Dai H H, van der Kleij R M J J, et al. Digital health education for chronic lung disease: scoping review[J]. J Med Internet Res, 2025, 27: e53142.
- [7] Althobiani M A, Russell A M, Jacob J, et al. The role of digital health in respiratory diseases management: a narrative review of recent literature[J]. Front Med, 2025, 12: 1361667.
- [8] Ologundudu L, Rayner D G, Oppenheimer J, et al. Patient-facing digital inhalers for asthma: a systematic review and meta-analysis [J]. J Allergy Clin Immunol Pract, 2025, 13(7): 1824-1835.
- [9] Marko M, Pawliczak R. Inhalation technique-related errors after education among asthma and COPD patients using different types of inhalers – systematic review and meta-analysis [J]. NPJ Prim Care Respir Med, 2025, 35(1): 15.
- [10] Aung H, Tan R, Flynn C, et al. Digital remote maintenance inhaler adherence interventions in COPD: a systematic review and meta-analysis [J]. Eur Respir Rev, 2024, 33(174): 240136.
- [11] Bhatt S P, Casaburi R, Mosher C L, et al. Telehealth pulmonary rehabilitation: a call for minimum standards[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2024, 210(2): 145-146.
- [12] Pimenta S, Hansen H, Demeyer H, et al. Role of digital health in pulmonary rehabilitation and beyond: shaping the future[J]. ERJ Open Res, 2023, 9(2): 00212-02022.
- [13] Qin J Q, Nan Y, Li Z C, et al. Effectiveness of communication competence in AI conversational agents for health: systematic review and meta-analysis [J]. J Med Internet Res, 2025, 27: e76296.
- [14] Huynh A L, Roy T J, Jackson K N, et al. Applications of artificial intelligence-based conversational agents in healthcare: a systematic umbrella review[J]. Int J Med Inform, 2026, 207: 106204.
- [15] Adams S J, Acosta J N, Rajpurkar P. How generative AI voice agents will transform medicine [J]. NPJ Digit Med, 2025, 8(1): 353.
- [16] Mahajan A, Powell D. Transforming healthcare delivery with conversational AI platforms [J]. NPJ Digit Med, 2025, 8(1): 581.
- [17] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. Clin eHealth, 2022, 5: 1-9.
- [18] 白春学. 元宇宙医学之我见[J]. 中国医药导刊, 2023, 25(1): 1-5.
- [19] 白春学. 医学新质生产力之我见[J]. 元宇宙医学, 2024, 1(3): 3-10.
- [20] 白春学. 医学GPT研发应用之吾见[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(1): 6-14.
- [21] 白春学. 肺结节专家3——BAIMGPT白皮书[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(2): 55-64.

引用本文

杨 丽,蔡沁怡,白春学. 数字人、虚拟专家赋能呼吸慢病患者健康教育和管理新模式[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(2): 106-112.

Yang L, Cai Q Y, Bai C X. Digital humans, virtual experts, and patient education and management: a new model for respiratory health communication[J]. Metaverse Med, 2026, 3(2): 106-112.

DOI: 10.61189/232629rxugrx

· 医学教育 ·



元宇宙医学赋能呼吸专科教学创新:从课堂教学到沉浸式临床培训

余 情¹, 张 雯¹, 白春学^{2,3,4*}

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危重医学科, 上海 200032
3. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032
4. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

[摘要] 随着扩展现实、人工智能、数字人、虚拟患者、数字孪生及医疗物联网等技术快速发展,医学教育正由以课堂讲授和机会性床旁学习为主的传统模式,逐步转向以情境化、交互化、连续化和胜任力导向为特征的新模式。元宇宙医学并非单一设备或单一软件,而是以虚实融合、实时互联、沉浸交互和数据驱动为核心特征的医学应用生态。呼吸专科教学兼具知识体系复杂、动态监测要求高、程序性技能密集和团队协作依赖强等特点,因此成为元宇宙医学较具应用潜力的专科领域。现有研究表明,XR/VR/AR、虚拟患者、仿真教育及大语言模型辅助教学有助于改善知识掌握、操作技能、学习投入和病例推理能力,但其长期迁移效应、真实临床结局和成本效益证据仍需进一步积累。在呼吸专科中,数字人教师、虚拟病例、虚拟病房、支气管镜与EBUS仿真训练、呼吸衰竭识别及机械通气沉浸式教学,是当前最具现实意义的重点场景。白春学教授团队提出的元宇宙医学、医学GPT与BAIMGPT等概念,为我国呼吸教学智能化升级提供了本土化理论支点和实践路径。本文围绕元宇宙医学在呼吸专科教学中的理论基础、关键应用场景、教学价值、现实挑战及实施路径展开综述,以期对呼吸医学教学改革和人才培养体系优化提供参考。

[关键词] 元宇宙医学;呼吸教学;数字人教师;虚拟病例;虚拟病房;沉浸式临床训练;BAIMGPT

[中图分类号] R 192 **[文献标志码]** A

Metaverse medicine and innovation in respiratory education: from the classroom to immersive clinical training

Yu Qing¹, Zhang Wen¹, Bai Chunxue^{2,3,4*}

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
3. Shanghai Engineering Research Center of Internet of Things for Respiratory Medicine, Shanghai 200032, China
4. Shanghai Institute of Respiratory Diseases, Shanghai 200032, China

[Abstract] Medical education is moving beyond a model dominated by classroom teaching and opportunistic bedside exposure toward one characterized by contextualization, interactivity, continuity, and competency-based learning, driven by the rapid development of extended reality, artificial intelligence, digital humans, virtual patients, digital twins, and the Internet of Medical Things. Metaverse medicine should not be understood as a single device or software platform; rather, it represents an integrated educational and clinical ecosystem built on immersive interaction, virtual-real fusion, real-time connectivity, and data-driven learning. Respiratory education is particularly well suited to this transformation because it involves complex knowledge structures, dynamic monitoring, procedure-intensive training, and strong reliance on teamwork and workflow coordination. Current evidence suggests that XR/VR/AR, virtual patients, simulation-based education, and large language model-assisted teaching can improve knowledge acquisition, procedural performance, learner engagement, and clinical reasoning, although stronger evidence is still needed regarding long-term transfer, real-world clinical outcomes, and cost-effectiveness. In respiratory education, digital human teachers,

[收稿日期] 2026-04-15

[接受日期] 2026-05-26

[基金项目] 上海市卫生健康委员会 2026 年卫生健康行业发展课题(定向类)(2026HP30),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). Supported by Shanghai Municipal Health Commission Health Industry Development Project (Directed Category) (2026HP30), 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).

[作者简介] 余 情,博士,主任医师;E-mail: yu.qing@zs-hospital.sh.cn

*通信作者(Corresponding author). 白春学,博士,主任医师、教授;E-mail: cxbai@fudan.edu.cn

virtual cases, virtual wards, bronchoscopy and EBUS simulation, immersive training for respiratory failure recognition, and mechanical ventilation education appear to be the most practice-relevant and immediately actionable scenarios. In parallel, concepts proposed by Professor Chunxue Bai's team—including metaverse medicine, medical GPT, and BAIMGPT—provide an important localized theoretical foundation and implementation pathway for the intelligent upgrading of respiratory education in China. This review summarizes the theoretical basis, major application scenarios, educational value, practical challenges, and implementation strategies of metaverse medicine in respiratory education, with the aim of informing future educational reform and talent development in respiratory medicine.

[Key Words] metaverse medicine; respiratory education; digital human teacher; virtual case; virtual ward; immersive clinical training; BAIMGPT

现代医学教育的核心目标,已由单纯知识传授逐步转向以岗位胜任力为导向的综合能力培养^[1-2]。对呼吸专科而言,这一转变尤为迫切^[1,3-4]。呼吸疾病诊疗不仅涉及解剖、影像、肺功能、血气分析、感染与炎症评估等复杂知识体系,还高度依赖支气管镜、支气管内超声(endobronchial ultrasound,EBUS)、氧疗、无创通气、机械通气和危重症升级处理等程序性技能与情境决策能力^[3-9]。传统教学虽仍是医学教育的重要基础,但普遍存在病例机会不均、床旁教学随机性强、程序训练风险高、教学标准化不足和形成性评价薄弱等问题^[1-3,10]。

与此同时,数字技术快速发展正在深刻重塑医学教育生态^[10-16]。扩展现实(extended reality,XR)技术可将抽象知识转化为可视、可交互的空间对象^[10-14]。虚拟患者和虚拟病例可将静态病例讨论转化为动态推理训练^[17-18]。人工智能(artificial intelligence,AI)与大语言模型可在内容组织、即时反馈和个体化辅导中发挥作用^[16,18-20]。医疗物联网(internet of medical things,IoMT)和数字孪生则为真实世界监测信息、院内外连续场景及过程数据采集提供技术基础^[20]。在此背景下,元宇宙医学逐渐由概念走向应用,并成为医学教育创新的重要方向之一^[11-14,21-22]。

白春学教授团队较早提出元宇宙医学、医学新质生产力和医学GPT等相关概念,强调未来医学活

动将由“数字化辅助”进一步走向“虚实融合、智能协同、持续连接”的新形态^[21-25]。这一判断与呼吸专科教学的现实需求高度契合^[3-4,21-25]。呼吸教学对象往往具有明显的空间属性、动态属性和协作属性,如气道导航、病情演变、通气参数调节、病房升级处置及出院后连续管理等,因此更需要以场景为中心、以能力为导向的教学体系^[3-4,9-10,26]。因此,系统梳理元宇宙医学在呼吸教学中的应用价值、证据基础与建设路径,具有较强的理论意义和现实意义^[10-16,21-25]。

1 元宇宙医学与呼吸教学创新

元宇宙医学首先是一种新的医学场景组织方式,而非单纯的“虚拟现实(virtual reality,VR)教学”或“数字课程展示”^[11,13,21-22]。其核心在于借助XR、数字人、虚拟患者、AI、数字孪生与实时互联数据环境,将教师、学习者、患者、病例信息、设备数据和评价反馈整合到同一可交互、可追踪、可复用的数字空间中^[11-14,21-24]。与传统数字教学相比,元宇宙医学更强调“情境中的学习”和“交互中的能力形成”^[1,10,13]。其并非只是把知识搬到屏幕上,而是把知识、决策、行为与反馈放入同一运行环境中^[10,13]。呼吸专科教学与元宇宙医学具有较高适配性(表1)^[10,12]。

表1 呼吸专科元宇宙医学教学适配性

教学适配性维度	具体内容
空间解剖与结构可视化适配性高 ^[3,5-7]	呼吸系统大量教学内容具有空间解剖特征,如肺段结构、支气管树分支、病灶定位、淋巴结站点识别及镜下路径导航等,适合以三维可视化和沉浸式方式呈现。
动态病情演变与时序逻辑展示需求突出 ^[4,8-10]	呼吸疾病管理高度依赖动态信息,如症状演变、血气变化、生命体征波动、机械通气参数和波形联动等,传统静态授课难以完整展示其时序逻辑。元宇宙场景更有利于呈现“数据—病理生理—临床处置”的连续关系。
多场景教学整合能力强 ^[4,20,26]	呼吸医学实践广泛涉及门诊、病房、内镜中心、ICU、康复与家庭管理等多场景切换,这使其天然适合构建跨场景、跨角色和跨阶段的教学体系。

近年国际研究^[10-15]为这一趋势提供了初步而重要的证据基础。很多综述^[10-15]认为, XR/VR/增强现实(augmented reality, AR)在医学教育中总体可改善学习者的知识、技能、投入度和满意度。但研究间仍存在明显异质性, 长期迁移效果和真实患者终点证据尚不足。因此, 元宇宙医学在教育中的价值, 不宜被理解为对传统教学的替代, 而更应被视为对教学过程的强化、扩展与标准化^[10, 14-15]。对呼吸专科而言, 其意义更在于支持由“知识中心”向“能力中心”转变, 即让学生在更接近真实临床的情境中理解疾病、识别风险、完成操作并接受反馈^[1-4]。

2 数字人教师与课堂教学

数字人教师是元宇宙医学在教学端较易落地的表现形式之一^[13, 21-22]。其本质不是对教师角色的替代, 而是应用虚拟形象、语音交互、知识图谱和场景展示能力, 承担标准化讲授、重复性演示、基础答疑和学习导航等任务(图 1)^[10, 13, 16]。在呼吸专科教学中, 数字人教师尤其适合用于肺部解剖、气道分支、肺功能原理、呼吸生理、机械通气基础和典型影像判读等高频且结构化程度较高的内容^[9-10, 27]。相较于传统 PPT 授课, 其优势在于可视化更强、内容复用性更高、节奏更稳定, 也更便于嵌入互动式提问和情境化演示^[10, 13]。

白春学教授团队提出的医学 GPT 与 BAIMGPT, 为数字人教师从“内容呈现工具”进一步升级为“专科教学代理”提供了方向^[23-25]。BAIMGPT 的关键价

值, 不在于泛化地回答所有问题, 而在于依托专科知识约束、场景化提示和结构化输出, 为呼吸教学提供更有针对性的辅助^[24-25]。在实际教学中, 其既可扮演“线上呼吸导师”, 也可充当“课堂助教”, “病例讨论提示者”或“课后复盘助手”^[24-25]。例如, 在学习肺炎、呼吸衰竭或肺结节评估时, BAIMGPT 可帮助学生梳理病史采集要点, 提示鉴别诊断路径, 生成结构化总结, 并指出思维漏洞^[24-25]。

近年关于 AI 和大语言模型在医学教育中应用的研究总体持审慎乐观态度^[16-20]。一方面, AI 可提升个体化学习、即时反馈和教学资源可及性, 尤其适合高频训练和课后辅导^[16, 18]。另一方面, 模型幻觉、知识时效性不足、推理透明性有限和不当依赖等问题, 仍是其进入正规教学的重要障碍^[16, 18, 28-29]。因此, 在呼吸教学中, 数字人教师和 BAIMGPT 应定位为“增强式教学工具”, 而非教师判断的替代者^[16, 18, 24]。

从课程实施看, 数字人教师与 BAIMGPT 的价值, 不仅体现在课中讲授, 更体现在课前、课中、课后的连续教学组织。课前可用于知识预热、重点提示和预习测验^[24-25]。课中可承担情境演示和即时答疑^[16, 24]。课后则可支持错题归纳、病例延伸和形成性反馈^[16, 24-25]。这种“教师主导—数字人协同—AI 助教辅助”的模式, 有助于改善呼吸教学长期存在的知识碎片化问题^[1, 24-25]。其最终目标, 不是简单增加技术参与度, 而是提升课堂教学的一致性、连续性和个性化水平^[1, 16, 24-25]。



图 1 数字人教授在医学元宇宙教学中应用

3 虚拟病例

病例教学是医学教育中连接知识和临床实践的关键环节^[1-2]。但传统病例讨论常偏重结果呈现,推理过程训练相对不足^[1-2]。虚拟病例通过分阶段释放信息、引入多路径决策节点、模拟病情时间演化和设置反馈后果,可将病例教学由“静态讲解”转化为“动态推理训练”^[17-18]。对呼吸专科而言,这一转变尤为重要^[3-4,9]。呼吸疾病诊疗往往依赖多模态数据的连续整合,如症状变化、生命体征、影像随访、血气结果、呼吸支持反应及并发症演变等^[3-4,9]。

呼吸专科适合开发为虚拟病例的场景十分丰富,包括肺结节与早期肺癌评估、社区获得性肺炎与重症肺炎识别、慢性阻塞性肺疾病急性加重、哮喘急性加重、不明原因呼吸衰竭、免疫治疗相关肺炎、间质性肺病急性加重及肺栓塞等^[3-4,9]。这些病例的共同特点是:不仅要求学习者识别疾病本身,还要求其根据不完整且不断变化的信息作出连续判断^[9]。虚拟病例的优势正在于可将这一决策过程结构化、重复化和可评价化,从而弥补临床轮转中“病例遇见什么学什么”的局限^[1,17-18]。

相关综述^[17-18]表明,虚拟患者和大语言模型驱动的病例系统有助于提升学习参与度、部分沟通能力和临床推理表现。但其效果受病例真实性、反馈设计、课程整合程度和评价指标质量明显影响^[17-18]。

当前证据仍提示,虚拟病例更适合被视为临床推理训练平台,而不是“自动给答案”的教学捷径^[17-18]。对呼吸专科教学而言,优质虚拟病例应重点体现:(1)信息开放具有时间逻辑;(2)关键决策节点明确;(3)能够引导学习者识别红灯征象与升级信号;(4)具有复盘和纠错机制^[1,17-18]。

在BAIMGPT支持下,虚拟病例还可由单向练习进一步升级为多角色互动系统^[24-25]。学习者既可与“数字患者”进行问诊,也可与“数字护士”获取床旁补充信息,或由“数字导师”追问其决策依据^[24-25]。这一设计有助于把病例训练从单纯的知识应用拓展至沟通表达、优先级判断和错误识别等更高层次能力训练^[1,18]。

4 虚拟病房

呼吸专科的临床能力不仅体现为个体知识和单项技能,更体现为在真实工作流中识别风险、组织沟通和完成升级处置的综合能力^[4,26]。虚拟病房正是承载这类训练的重要形式^[13-14,30]。其基本逻辑是将传统病例讨论扩展为多角色、连续化和流程化的数字临床场景,使学习者在其中完成查房、监测解读、病情识别、团队沟通和转运升级等任务^[13-14,30]。呼吸专科尤其适合虚拟病房训练(表2)^[4,9]。

表2 呼吸专科虚拟病房训练的高价值教学场景及其优势

教学场景	具体内容
虚拟病房训练 ^[4,9]	呼吸专科尤其适合虚拟病房训练。
高价值临床教学场景 ^[4,9]	普通病房患者突发低氧、无创通气效果欠佳后的升级评估、重症肺炎或急性呼吸窘迫综合征的早期处置、呼吸机相关问题识别、围术期呼吸并发症管理以及出院前氧疗和家庭监测交接,均是典型的高价值场景。
虚拟病房训练的教学优势 ^[26,30]	虚拟病房训练的优势,正是能够把这些常在传统课堂中被弱化的要素重新纳入教学过程之中。
训练难点所在 ^[26]	这些场景的难点不在于孤立知识点,而在于时间压力下的信息整合、任务排序和跨角色沟通。

团队训练文献^[26,30]提示,情境模拟有助于改善沟通流程、角色认知和部分安全相关行为。将这一思路引入呼吸教学,可使学习者在低风险环境中反复演练“早识别—早汇报—早升级—早干预”的工作流能力^[4,26,30]。对于初学者而言,这类训练不仅利于建立临床优先级意识,还有助于理解呼吸专科管理并非单人行为,而是医师、护士、治疗师、设备与信息系统共同参与的协同过程^[26]。

值得关注的是,呼吸专科虚拟病房还可与

IoMT、远程监测和居家医疗教学结合^[20]。在未来更成熟的平台中,病房场景并不局限于住院病区,还可延伸至门诊随访、出院后氧疗、居家无创通气(noninvasive ventilation, NIV)和家庭病房相关教学^[20]。这意味着呼吸教学可由传统“住院中心”模式进一步走向“医院—社区—家庭”连续管理能力训练^[4,20]。不过,虚拟病房设计也需防止过度复杂化^[10,14]。若信息源过多、角色设置过杂或反馈逻辑不清,反而可能增加认知负荷并削弱学习效果^[10,14]。

因此,其课程设计应强调分层递进、目标对齐及高质量总结讨论^[30-31]。

5 虚拟操作训练

在所有元宇宙医学场景中,虚拟操作训练是呼吸专科最具现实可行性和证据基础的应用方向之

一^[3-9]。其中,支气管镜和EBUS培训证据相对最为成熟^[3,5-7]。这类操作具有学习曲线长、解剖定位复杂、并发症风险高和床旁练习机会有限等特点,因此尤其需要仿真训练作为正式临床上手前的关键环节(图2)^[3,5]。



图2 气管镜虚拟操作训练

系统综述^[3,5]已显示,柔性支气管镜与支气管内超声引导下经支气管针吸活检仿真训练可改善学习者的技能表现,并有助于缩短学习曲线和提高训练安全性。这表明,现代呼吸内镜教学已逐渐由“依赖病例数量积累”转向“理论学习—仿真训练—监督下临床实践”的递进式模式^[3,5-7]。从教学角度看,仿真训练的价值不仅在于让学习者“敢操作”,更在于帮助其建立解剖定位、路径规划、镜身控制和规范流程意识^[3,5,7]。

AI的引入为虚拟操作训练进一步升级提供了可能。AI辅助可改善支气管镜表现,这提示未来有望通过路径识别、盲区提醒、轨迹分析和错误反馈等方式,构建“智能数字导师”^[6]。若与BAIMGPT和元宇宙平台结合,则有望实现对学习者操作轨迹、错误类型、学习曲线和达标情况的自动化记录与评估^[6,24-25]。这将推动操作训练由经验评价向数据驱动评价转变^[1,6]。

除呼吸内镜外,呼吸衰竭识别与机械通气教学同样适合沉浸式训练^[4,8-9]。相关研究^[4,8]提示,沉浸式VR课程能够改善学习者对呼吸窘迫和呼吸衰竭前状态的识别能力。机械通气虚拟模拟则可帮助学习者理解参数调整、波形变化、氧合状态和呼吸力学之间的联动关系,从而降低传统课堂中抽象概念的理解难度^[9]。

从课程设计看,呼吸专科虚拟操作训练应遵循“先认知、后操作;先模拟、后临床;先单项、后整合”的基本原则^[1,3]。支气管镜训练宜从解剖识别和基

础操控起步,逐步进入定位、采样和复杂场景^[3,5,7]。机械通气训练则宜先建立参数与病理生理的对应,再过渡到病情升级和团队协作决策^[8-9]。

6 建设路径、评价体系与伦理治理

元宇宙医学在呼吸教学中的应用,若要由单点创新走向体系化实施,必须同步建设课程架构、评价体系与治理机制^[10,21]。现实中,数字教学项目的主要瓶颈往往并非硬件不足,而是目标不清、内容碎片化、课程嵌入不足和效果评价薄弱^[10,30]。因此,呼吸元宇宙教学平台建设必须以教学问题为中心,而非以技术展示为中心^[10]。较为理想的平台架构,可包括采集层、治理层、内容层、交互层、评价层和安全层6个部分(表3)^[21,24-25]。

这一架构既体现元宇宙医学虚实融合和持续连接的特征,也符合现代医学教育强调可追踪、可迭代和可评价的基本要求^[10,21]。

评价体系建设尤为关键^[1,30-31]。现有仿真教育标准强调,教学效果不能仅停留在满意度层面,而应进一步考察知识掌握、技能表现、行为迁移、团队协作和患者安全相关结果^[30-31]。对呼吸专科而言,评价指标至少应涵盖基础知识达标率、临床推理质量、支气管镜或通气操作表现、危急事件识别时效、沟通与团队协作能力、课程依从性和临床迁移情况^[6,30]。只有建立多维评价框架,元宇宙医学教学才能真正成为可验证、可优化的教育体系,而非停留于技术体验层面^[30-31]。

表 3 元宇宙医学教学平台的核心层级、功能与任务

层级	功能与任务
采集层 ^[20,24-25]	负责接入课程资源、病例数据、影像资料、肺功能与监测信息、操作日志等。
治理层 ^[24-25]	负责术语标准化、质量控制与权限管理。
内容层 ^[24-25]	用于构建数字人课程、虚拟病例、虚拟病房和虚拟操作模块。
交互层 ^[13,24-25]	承载数字人教师、虚拟患者和沉浸式情境等教学交互场景。
评价层 ^[11,6,30]	负责形成性评价、阶段考核与学习曲线分析。
安全层 ^[28-29]	负责隐私保护、伦理审查、算法审计和数据安全。

伦理治理同样不可忽视。世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 有关卫生领域 AI 治理文件明确强调透明性、公平性、人类监督、责任落实和可持续治理等原则^[28-29]。对应到教学场景, 数字人教师和 BAIMGPT 的应用需关注模型幻觉、知识偏差、信息过时及不当依赖问题^[16,18]。虚拟病例与虚拟病房建设需处理病例来源合法性、隐私脱敏和数据使用边界^[17-18]。平台对学习过程的追踪则涉及学习者知情、数据归属与评价公平性等问题^[28-29]。因此, 元宇宙呼吸教学不应只谈技术赋能, 更应同步建立制度与规范^[28-29]。

此外, 相关教育研究亦应提升方法学质量。CONSORT-AI、SPIRIT-AI 和 DECIDE-AI 等规范虽主要服务于 AI 医疗研究, 但其关于算法角色、数据质量、偏差控制、外部验证与真实场景适用性的要求, 对教学研究同样具有借鉴价值。未来围绕元宇宙医学呼吸教学开展研究时, 应更多采用前瞻性设计、客观结局指标和跨场景验证, 以提升证据质量和推广价值^[32]。在我国实践中, 可考虑分阶段推进: 先建设数字人课程、BAIMGPT 辅助问答和虚拟病例, 再发展虚拟病房和沉浸式操作训练, 最终逐步联通 IoMT、院外监测和连续照护教学场景^[20-25]。这一渐进式路径更符合当前资源条件, 也更有利于形成具有中国特色的呼吸元宇宙教学体系^[21-25]。

7 小 结

元宇宙医学正在推动医学教育由静态、分散和机会性学习, 向沉浸式、连续性和胜任力导向学习转变^[10-14,21]。对呼吸专科而言, 这一转变具有较强现实针对性^[1,3-4]。呼吸教学对象兼具空间解剖复杂、动态监测密集、程序性技能突出和团队协作依赖强等特点, 传统课堂与床旁教学虽仍不可替代, 但已难以单独满足现代人才培养需求^[1,3-4]。数字人教师、BAIMGPT、虚拟病例、虚拟病房和虚拟操作训练, 为呼吸教学提供了由课堂延伸至沉浸式临床训

练的连续化新路径^[17-25]。

现有证据支持 XR/VR/AR 与仿真训练在知识掌握、技能训练和学习体验方面具有积极作用^[10-15]。虚拟患者和大语言模型也在病例教学与个性化辅导中显示出明显潜力^[16-20]。其中, 支气管镜、EBUS、呼吸衰竭识别、机械通气和病房升级处置, 是当前最值得优先推进的呼吸专科场景^[3-9]。但同时亦应看到, 长期迁移效应、真实临床结局、成本效益及伦理治理机制仍需进一步完善^[28-29]。

综上所述, 元宇宙医学在呼吸教学中的价值, 不在于技术形式的新颖, 而在于是否能够服务于明确的教学目标、嵌入系统的课程设计和接受严格的效果评价, 并在伦理和治理框架下安全运行^[1,28-30]。未来, 应在白春学教授团队提出的元宇宙医学、医学 GPT 和 BAIMGPT 等思路基础上, 逐步构建覆盖课堂讲授、病例推理、团队训练、程序技能培养和院内外连续管理教学的一体化平台^[21-25]。由此方能推动呼吸专科教学模式由“知识传授”为主, 进一步迈向“能力建构”为核心的新阶段^[1,21-25]。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

作者贡献 余情: 撰写、修改; 张雯: 修改, 核对文献; 白春学: 选题、撰写、修改、应用 OpenAI 生成图片。

参考文献

[1] Boyd V A, Whitehead C R, Thille P, et al. Competency-based medical education: the discourse of infallibility[J]. Med Educ, 2018, 52(1):45-57.

[2] Motola I, Devine L A, Chung H S, et al. Simulation in healthcare education: a best evidence practical guide. AMEE Guide No. 82[J]. Med Teach, 2013, 35(10): e1511-e1530.

[3] Gerretsen E C F, Chen A B, Annema J T, et al. Effectiveness of flexible bronchoscopy simulation-based training: a systematic review[J]. Chest, 2023, 164(4): 952-962.

[4] Zackoff M W, Real F J, Sahay R D, et al. Impact of an immersive virtual reality curriculum on medical students' clinical assessment of infants with respiratory distress [J].

- Pediatr Crit Care Med, 2020, 21(5): 477-485.
- [5] Naur T M H, Nilsson P M, Pietersen P I, et al. Simulation-based training in flexible bronchoscopy and endobronchial ultrasound-guided transbronchial needle aspiration (EBUS-TBNA): a systematic review[J]. *Respiration*, 2017, 93(5): 355-362.
 - [6] Cold K M, Agbontaen K, Nielsen A O, et al. Artificial intelligence improves bronchoscopy performance: a randomised crossover trial[J]. *ERJ Open Res*, 2025, 11(1): 00395-02024.
 - [7] Lee H J, Corbetta L. Training in interventional pulmonology: the European and US perspective[J]. *Eur Respir Rev*, 2021, 30(160): 200025.
 - [8] Raab D L, Ely K, Israel K, et al. Impact of virtual reality simulation on new nurses' assessment of pediatric respiratory distress[J]. *Am J Crit Care*, 2024, 33(2): 115-124.
 - [9] Lino J A, Gomes G C, Nancy Delma Silva Vega Canjura Sousa, et al. A critical review of mechanical ventilation virtual simulators: is it time to use them?[J]. *JMIR Med Educ*, 2016, 2(1): e8.
 - [10] 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.
 - [11] Eng E S L, Liaw S Y, Tan R X R, et al. Metaverse in healthcare education: a scoping review of definitions and challenges[J]. *Nurse Educ Today*, 2026, 162:107039.
 - [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] Hulsen T. Applications of the metaverse in medicine and healthcare[J]. *Av En Med De Lab*, 2024, 5(2): 159-165.
 - [14] Bernardes A, Gardim L, Araújo A A C, et al. Exploring the metaverse in the education of healthcare students: a scoping review[J]. *Rev Lat Am Enfermagem*, 2024, 32: e4347.
 - [15] Elendu C, Amaechi D C, Okatta A U, et al. The impact of simulation-based training in medical education: a review[J]. *Medicine*, 2024, 103(27): e38813.
 - [16] Gordon M, Daniel M, Ajiboye A, et al. A scoping review of artificial intelligence in medical education: BEME Guide No. 84[J]. *Med Teach*, 2024, 46(4):446-470.
 - [17] Faferek J, Cariou P L, Hege I, et al. Integrating virtual patients into undergraduate health professions curricula: a framework synthesis of stakeholders' opinions based on a systematic literature review[J]. *BMC Med Educ*, 2024, 24(1): 727.
 - [18] Zeng J W, Qi W H, Shen S Y, et al. Embracing the future of medical education with large language model-based virtual patients: scoping review[J]. *J Med Internet Res*, 2025, 27: e79091.
 - [19] Gandhi B, Morjaria L, Illamperuma I, et al. Large language model-based virtual patients for simulated clinical learning: a scoping review[J]. *AI Med*, 2026, 1(1): 7.
 - [20] Behmanesh A, Shams R, Soleimanpour S, et al. Internet of Things in medical education: a systematic mapping review[J]. *Med J Islam Repub Iran*, 2025, 39:39.
 - [21] Yang D W, Zhou J, Chen R C, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. *Clin eHealth*, 2022, 5: 1-9.
 - [22] 白春学. 元宇宙医学之我见[J]. *中国医药导刊*, 2023, 25(1):1-5.
 - [23] 白春学. 医学新质生产力之我见[J]. *元宇宙医学*, 2024, 1(3):3-10.
 - [24] 白春学. 医学GPT研发应用之吾见[J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(1):6-14.
 - [25] 白春学. 肺结节专家3——BAIMGPT白皮书[J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(2):55-64.
 - [26] Weaver S J, Dy S M, Rosen M A. Team-training in healthcare: a narrative synthesis of the literature[J]. *BMJ Qual Saf*, 2014, 23(5): 359-372.
 - [27] Sonicki Z. Large multi-modal models - the present or future of artificial intelligence in medicine?[J]. *Croat Med J*, 2024, 65(1): 1-2.
 - [28] World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health [EB/OL]. [2021-06-28] (2026-01-25). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240029200>.
 - [29] World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health: guidance on large multi-modal models [EB/OL]. [2025-03-25] (2026-01-25). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240084759>.
 - [30] Decker S, Sapp A, Bibin L, et al. Healthcare simulation standards of best practice®: the debriefing process[J]. *Clin Simul Nurs*, 2025, 105: 101775.
 - [31] Sharon Decker R F A F, Ahip A S M, Lauren Bibin DNP, et al. Healthcare Simulation Standards of Best Practice: The Debriefing Process[J]. *Clinical Simulation in Nursing*, 2025, 105(000).
 - [32] Liu X, Cruz Rivera S, Moher D, et al. Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI extension[J]. *Lancet Digit Health*, 2020, 2(10): e537-e548.

引用本文

余 情,张 雯,白春学. 元宇宙医学赋能呼吸专科教学创新:从课堂教学到沉浸式临床培训[J]. *元宇宙医学*, 2026, 3(2): 113-119.

Yu Q, Zhang W, Bai C X. Metaverse medicine and innovation in respiratory education: from the classroom to immersive clinical training[J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(2): 113-119.

DOI: 10.61189/973490kwuyfr

· 医学教育 ·

元宇宙创新模式在耳鼻咽喉科临床及教学中的应用 现状与建设思路

周 雷¹, 张 雯², 于浩然¹, 李光耀¹, 高 丽¹, 黄新生¹, 余 情^{2*}

1. 复旦大学附属中山医院耳鼻咽喉头颈外科, 上海 200032

2. 复旦大学附属中山医院教育处, 上海 200032

[摘要] 随着元宇宙技术进步及头显设备的成功商业化,元宇宙在医学教育领域的应用前景日益凸显。本文系统综述了耳鼻咽喉头颈外科元宇宙应用的最新进展,并提出专科建设思路。VR手术模拟器、3D打印联合VR技术等能显著提升学员考核成绩和操作信心,优化手眼协调与空间感知能力。AR显微镜系统通过手势识别实现免接触交互,可提高手术效率。AR导航平台在颅颌面手术中展现出实时3D可视化优势,VR和360°视频培训有效提升了低年资医师的前鼻孔填塞技能。VR辅助扁桃体周围脓肿引流教学显著提高了医学生的结构化临床考试评分、操作信心和参与度。经口机器人手术中整合3D虚拟模型与图像叠加技术,为图像引导手术提供了实用价值。VR技术能有效缓解耳鼻喉科手术患者的疼痛和焦虑,提高满意度,并可作为非药物干预手段减少阿片类药物使用。VR联合可穿戴设备可降低术后阿片用量,VR前庭康复训练能提高耳石症患者的治疗依从性和生活质量。VR已成为ENT数字化教学的创新组成部分,在解剖、生理与病理教学中展现出与传统方法等效甚至更佳的效果。基于上述进展,本文提出依托“复旦中山惠生智育”元宇宙平台,建设耳鼻咽喉专科教学体系的思路:构建高保真三维数字孪生模型与结构化病例资源库,形成覆盖院校教育、毕业后教育和继续医学教育的分层培养路径,促进优质教学资源下沉与共享,推动国内耳鼻咽喉医学教育的创新发展。

[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;虚拟现实**[中图分类号]** R 856.76 **[文献标志码]** A

Current applications and development strategies of metaverse innovation models in otolaryngology clinical practice and education

Zhou Lei¹, Zhang Wen², Yu Haoran¹, Li Guangyao¹, Gao Li¹, Huang Xinsheng¹, Yu Qing^{2*}

1. Department of Otorhinolaryngology and Head and Neck Surgery, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

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

[Abstract] With the advancement of metaverse technology and the successful commercialization of head-mounted displays, the application prospects of the metaverse in medical education are increasingly prominent. This article systematically reviews the latest advancements in the application of the metaverse in otolaryngology and head and neck surgery, and proposes ideas for specialty construction. VR surgical simulators, 3D printing combined with VR technology, can significantly improve trainee assessment scores and operational confidence, optimizing hand-eye coordination and spatial perception abilities. AR microscope systems enable contactless interaction through gesture recognition, enhancing surgical efficiency. AR navigation platforms demonstrate real-time 3D visualization advantages in craniofacial surgery, and VR and 360° video training effectively improve the anterior nares packing skills of junior doctors. VR-assisted teaching for peritonsillar abscess drainage significantly enhances medical students' structured clinical examination scores, operational confidence, and engagement. Integrating 3D virtual models and image overlay technology in transoral

[收稿日期] 2026-04-25**[接受日期]** 2026-05-30

[基金项目] 国家自然科学基金(82000980, 82401356),上海市科学技术委员会项目(23SHS05000-01, 23SHS05000-03),上海市卫生健康委员会2026年卫生健康行业发展课题(定向类)(2026HP30),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),复旦大学医工结合项目(XM03241807)。Supported by National Natural Science Foundation of China (82000980, 82401356), Shanghai Science and Technology Commission Projects (23SHS05000-01, 23SHS05000-03), Shanghai Municipal Health Commission's 2026 Health Industry Development Project (Directional) (2026HP30), Shanghai Shenkang Hospital Development Center Management Research Project (2025SKMR-21), Higher Education Science Research Planning Project (24CX0201), Management Science Foundation of Zhongshan Hospital, Fudan University (2024ZSGL14), Medical-Engineering Integration Project of Fudan University (XM03241807).

[作者简介] 周 雷, 硕士, 主治医师; E-mail: zhou.lei@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

robotic surgery provides practical value for image-guided surgery. VR technology can effectively alleviate pain and anxiety in patients undergoing otolaryngological surgery, improve satisfaction, and serve as a non-pharmacological intervention to reduce opioid use. VR combined with wearable devices can reduce postoperative opioid consumption, and VR vestibular rehabilitation training can enhance treatment compliance and quality of life for patients with otolith disorders. VR has become an innovative component of ENT digital teaching, demonstrating equivalent or even superior effects compared to traditional methods in anatomy, physiology, and pathology teaching. Based on these advancements, this article proposes the idea of relying on the "Fudan Zhongshan Huisheng Zhiyu" metaverse platform to build a specialized teaching system for otolaryngology: constructing high-fidelity 3D digital twin models and a structured case resource library, forming a tiered training path covering institutional education, post-graduation education, and continuing medical education, promoting the dissemination and sharing of high-quality teaching resources, and driving the innovative development of otolaryngology medical education in China.

[Key Words] full-cycle medical education; training and management; Fudan Zhongshan Huisheng Zhiyu; metaverse platform; virtual reality

随着性能愈发强大的头显,如 Oculus Meta Quest、雷鸟、Pico、HTC Vive、索尼、苹果头显等的成功商业应用,虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、区块链,人工智能(AI)等科技手段的进步。元宇宙的概念逐渐被人们更多地提及,我们也比以往任何时候都更加接近元宇宙的普及应用。而正如罗德里格兹执导的电影《阿丽塔》所描述的场景,元宇宙可以让我们在其中沉浸式、低成本、低危险地实践并实现高复杂技能的快速掌握^[1]。虚拟现实已明确显示出了在辅助学习上的强大助力^[2-4]。然而,目前仍处于元宇宙建立的初始阶段,技术手段、应用场景和法律法规仍在不断地探索和完善之中。其中,针对医学应用的医学教育和模拟手术场景应是医学教育中极其重要的一环^[5]。Hudise 等^[6]在一篇综述中纳入了6项针对医学生的随机对照(RCT)试验(来自丹麦和澳大利亚),研究使用了 Visible Ear Simulator、MediseusVR 外科钻磨模拟器和 Geomagic 触觉设备等平台。结果表明,VR 训练有望改善耳鼻喉手术中的手眼协调、空间感知和手术表现,但与传统方法相比的优越性结论不一,部分研究显示无显著差异。总体而言,VR 提供可控、无风险的训练环境,可能增强 ENT 外科技能的习得和保持,但需进一步研究以确立其有效性并探索在手术教学中的更广泛应用。

但遗憾的是,先一步建立的如手术仿真平台由大公司掌握,其手术模拟平台售价动辄 100 万元以上^[7],并非普通单位和机构所能承担,而高级医疗单位亦不缺乏相关训练和实践的机会。导致最该需要获得训练的中层和基层医生得不到有效的训练。优秀学习资源得不到有效地下沉,由于技术瓶颈,且需要专业人员的参与,新应用的开发活力亦受到限制。

随着国内科技的发展,增加高质量教学资源的

可及性应是新时代毕业后医学教育的努力出发点。我们应大力探索和支持本土元宇宙应用和技术的发展。医学教育和实践,以复杂、高精确性和容错率低为特点,其内容的提供需要依赖专业人士。而元宇宙应用的建立,需要工程技术人员的支持,因此,其本身高度依赖资源和技术。而一旦不以营利为目的去开发产品,可能会最终导致项目的落地十分困难,且产品的最终维护亦是一个重要的资金投入点。因此,其中的平衡需要医学教育从业者和科研人员的多方努力和推动。为进一步探索行之有效的方法,本文总结了近些年与耳鼻咽喉科相关的元宇宙项目,并提出元宇宙建设的思路,力争促进和进一步推动国内相关领域的发展。

1 解剖及手术学习相关的元宇宙应用

1.1 耳科元宇宙应用 人耳结构精密,功能复杂,解剖学习难度大、门槛高,元宇宙技术的进步毫无疑问地促进了耳科学的发展。Binnersley 等^[1]探讨了新手学员使用 VR 颞骨钻磨模拟器进行外科技能习得的影响因素。研究对象在 8 个月内完成 16 次、每次 3 小时的 Voxel-Man TempoSurg 虚拟乳突切除术训练。结果表明 VR 颞骨钻磨模拟器有助于优化培训项目设计和学习体验。杨媛媛等^[8]报道了一个自研、且拥有完全自主知识产权的耳内镜手术虚拟仿真训练系统,具有广泛的应用前景。李兴程等^[9]选取 2020 年 1 月至 2024 年 12 月在郑州大学第一附属医院耳科临床医学专业的本科实习生及住培医师共 50 名作为研究对象,并随机分为研究组和对照组,各 25 名。研究组采用 3D 打印教具联合 VR 技术进行教学,对照组则采用传统的临床实践教学法。通过客观结构化临床考试(OSCE)和自制问卷,对 2 组的学习效果、教学效果和满意度进行评估。结果显示研究组学员的基础理论成绩、临床技能考核成

绩以及 OSCE 总分均高于对照组;研究组学员的各项教学效果评分均高于对照组;研究组的教学满意度高于对照组,差异均有统计学意义($P<0.05$)。表明在耳科手术技能训练中应用 3D 打印联合 VR 技术进行教学,能够提高学员的考核成绩,提升教学效果,且获得较高的教学满意度。

Lamtara 等^[10]通过分析不同解剖结构虚拟颞骨上的学习曲线,评估 VR 模拟在传统外科培训中的效果。将 30 名参与者分为 3 组(10 名医学生/新手、10 名耳鼻喉科住院医师/中级、10 名高年资耳外科专家/专家),在墨尔本大学颞骨手术模拟器上对 8 个解剖结构不同的颞骨进行乳突切除术,由高年资耳鼻喉科医师使用墨尔本乳突切除术评分量表(MMS)评估。结果显示,除中级与专家组平均力度比较外,所有绩效指标(MMS 评分、操作次数、平均力度、钻磨时间、总时间)在 3 组间均存在显著差异。组内分析显示,专家组总时间和钻磨时间、中级组平均力度、新手组总时间存在显著差异;中级组个体学习曲线呈现多样化学习行为。结果表明,经过 8 次不同解剖结构标本重复训练,学员表现仍未达到专家水平,提示需通过个性化反馈和增加重复次数优化技能习得。Everad 等^[11]评估了 VR 颞骨模型与标准塑料模型在耳鼻喉科住院医师培训中的学习效果差异。来自 2 所德国大学医院的耳鼻喉科住院医师和专科医师分别接受 VR 或塑料模型培训,通过颞骨解剖知识测试进行客观评估,并进行 VR 培训前后知识对比及主观体验调查。结果显示,85% 参与者认为 VR 优于传统模型,是教授复杂解剖的有用工具;客观评估显示 VR 培训后知识显著提高,尤其在已有知识水平较高的参与者中;但与塑料模型直接比较时 VR 未显示优越性。研究表明,VR 模型不仅具有吸引力和激励作用,且能客观提升住院医师解剖知识(尤其是高级住院医师),同时相比塑料模型具有进一步优化开发的潜力。

Chemaly 等^[12]开发并评估了基于手势识别和手部追踪的免接触交互技术,用于耳显微外科 AR 显微镜系统,以减少术中操作中断并保持无菌环境。方法采用电磁追踪手术显微镜,通过定制 3D 打印校准板实现术前 CT 分割虚拟模型与显微镜视频流的叠加增强;集成 Ultraleap Leap Motion Controller 2 实现手部追踪功能,收集外科医师开发阶段反馈,并让用户完成虚拟模型交互、物理目标配准及 AR 可视化调整等任务。结果显示,基于观察和用户反馈升级后的手部交互系统被认为对手术流程干扰最小、虚拟内容交互更直观。表明将头戴显示器

(HMD)常用的手势交互概念整合到耳显微外科 AR 立体显微镜系统中,展现了更有利的人机交互方式,有望提高显微 AR 引导下手术任务的执行效率。Lai 等^[13]研究评估了中颅窝(MCF)入路 VR 模拟的效度及连续模拟中的效度变化。使用 CardinalSim 软件基于高分辨率人体尸体数据集构建高保真视觉和触觉渲染 MCF 入路模拟,来自 2 所加拿大学术中心的神经外科和耳鼻喉头颈外科住院医师进行 MCF 解剖操作。结果显示,表面效度和内容效度在各领域均已达到;而结构效度未确立(因所有学员均无 MCF 入路经验)。模拟后测试成绩显著高于模拟前($P<0.001$);学员在完成解剖时间、内听道轮廓化、岩骨切除的完整性及关键结构损伤减少等方面均显著改善($P<0.001$ 或 $P=0.001$)。结论表明,该 MCF VR 模拟具有表面效度和内容效度,虽然结构效度未确立,但进一步强调了模拟训练的重要性,作为形成性教育辅助工具有助于增强对复杂神经血管解剖关系的理解。Frendø 等^[14]进行了一项 RCT 试验,评估了在 VR 模拟训练中加入人工耳蜗植入操作对后续尸体解剖表现及自主学习能力的影响。18 名耳鼻喉科住院医师被随机分为两组,均在尸体操作前接受 VR 训练:干预组接受乳突切除术加人工耳蜗植入的 VR 训练,对照组仅接受乳突切除术 VR 训练。结果显示,干预组在尸体解剖中的平均得分(22.9/44)略高于对照组(21.8),但差异无统计学意义($P=0.51$);干预组平均需要指导 1.3 次,对照组为 1.9 次(减少 41%),亦无显著差异($P=0.21$)。研究认为,在尸体解剖课程中引入人工耳蜗植入 VR 模拟训练是可行的,但相较于单纯乳突切除术训练,增加此项训练并未显著提升手术表现或自主学习能力。这表明掌握人工耳蜗植入这类高级颞骨手术需要比学习乳突切除术更为充分的训练。

1.2 鼻科元宇宙应用 与耳科学类似,鼻窦的解剖结构亦十分复杂,尤其变异众多,且毗邻眼眶和颅底,也是通往前颅底的重要解剖通道,是一个十分热门的应用领域。Priel 等^[15]研究开发并评估了一种新型 VR 工具,用于增强泪囊鼻腔吻合术(DCR)患者对鼻部解剖结构的理解。研究将 10 例术前眼眶 CT 扫描数据通过 D2P 软件进行组织分割(包括颅骨、泪囊、鼻中隔、下鼻甲和中鼻甲),生成 3D 模型并通过 VR 头显可视化。6 名耳鼻喉科和眼整形外科专家(含高年资医师和住院医师)对 VR 模型进行评估。结果显示,使用 VR 工具时,耳鼻喉科医师对病变侧别的判断正确率为 73.3%,显著高于眼科医师的 43.3%($P=0.018$);对鼻中隔偏曲的判断正确率分

别为72.8%和47.2% ($P=0.094$)。高年资医师与住院医师在病变判断上无显著差异(60% vs 57.7%, $P=0.853$),但高年资医师对鼻中隔偏曲的判断正确率更高(81.7% vs 58.3%, $P=0.198$)。研究表明,耳鼻喉科医师和高年资医师的CT解读能力优于眼科医师和住院医师,但VR系统并未显著提升其解读准确性,未来需进一步优化VR系统以辅助DCR手术的术前和术中CT解读。

Strong等^[16]在一项多中心回顾性病例系列研究中开发了基于Microsoft HoloLens 2用于颅颌面(CMF)及头颈外科的AR导航平台,并评估其临床应用价值。研究纳入33例病例(创伤、正颌、肿瘤、颅面畸形),结果显示AR平台相较传统导航具有实时3D手术计划可视化、关键结构识别及实时追踪等优势。该研究首次报道了AR在中面部截骨术器械追踪、颧上颌复合体骨折复位追踪、正颌手术下颌追踪、腭骨截骨导板及红外血管实时可视化等方面的应用。结论认为,尽管技术仍在发展中,AR导航为CMF及头颈外科提供了抬头交互式3D可视化、关键解剖识别和实时追踪等显著优势。Mould等^[17]研究开发并评估了针对低年资医师的新型VR和360°视频前鼻孔堵塞培训方案。研究将16名低年资医师随机分为3组:单纯VR模拟、单纯360°视频、视频+VR模拟联合组,通过专家共识设计干预前后问卷,评估信心、能力、客观知识、可用性、表面效率、内容效率及定性数据。结果显示,整体队列在干预后信心、能力和知识均显著提高;360°视频单独使用及联合VR使用均被认为用户友好;所有方案均达到内容效率,但VR模拟未达表面效率,反馈提示触觉反馈需改进。参与者认为培训方案具有吸引力和沉浸感,能以愉快方式鼓励安全实践。结论表明,新型VR和360°视频是有效提升前鼻堵塞信心、能力和知识的沉浸式方法,未来需改进VR模拟器的触觉反馈以增强真实感。

Espinell等^[18]研究并开发了一种无需外部追踪设备的内镜经鼻手术AR新方法,可显示与手术相关的隐藏解剖结构。方法通过两阶段ICP配准算法,将术前鼻腔3D模型与术中3D模型进行刚性缩放变换,再将隐藏结构从术前模型转移至术中模型并投影叠加到内镜图像中。对12例临床病例进行定性和定量验证。定性由耳鼻喉科医师目视检查增强图像中的隐藏结构,定量采用新型透照法测量目标配准误差。结果显示,大多数病例目标隐藏结构均在预期位置实现增强。结论表明,当术中鼻腔相对于术前状态无明显变形时,该方法能以足够精

度增强内镜图像,是迈向无追踪器经鼻内镜手术AR的重要一步。Ruggiero等^[19]评估了HoloLens 2 AR头显在儿科前额眶部重塑术中的精度。研究由3名外科医生和3名工程师在3D打印模型上完成截骨操作。结果显示,大多数操作者在 ± 1.5 mm精度下能成功完成截骨操作;鼻部截骨的成功率高于额部截骨。尽管是体外研究,作者认为AR技术在临床患者中的应用前景令人鼓舞。

1.3 咽喉科元宇宙应用 尽管相较于耳科和鼻科,咽喉部结构尺寸更大,更容易教学,但亦能够通过元宇宙应用而提高教学效果。McCormick等^[20]进行了RCT试验评估了VR作为三年级医学生扁桃体周围脓肿引流辅助教学工具的效果。将20名学生随机分为VR教学组和传统教学组,各接受90分钟培训后进行OSCE考试及知识测试。VR组使用HTC Vive Focus 3头显及Virti、3D Organon和EXR平台。结果显示,VR组OSCE评分显著更高(26.9 vs 21.5, $P=0.005$),操作信心($P=0.008$)和参与度($P=0.003$)更强;两组知识均显著改善($P<0.001$),但课后无显著差异($P=0.701$)。VR有效性评分9.6/10,沉浸感8.5/10,晕动症仅1.8/10。表明VR能显著增强操作信心和表现,其沉浸式形式支持融入外科教育,值得在更大规模研究中进一步验证。Chan等^[21]探讨了在经口机器人手术(TORS)中整合3D虚拟模型与成像技术以实现图像引导手术的应用。在尸体实验中,研究团队将3D虚拟模型显示于外科医生控制台,并与手术视野叠加,用于口咽部手术。模型通过上颌牙列配准,实现了颈内动脉系统的实时图像叠加,在尸体解剖中呈现了定性准确的实时可视化效果。研究表明,虚拟模型与图像叠加技术在经口机器人手术的头颈部不同部位操作中,对图像引导手术具有实用价值。

2 对缓解围手术期疼痛和焦虑的影响

由于VR头显能够提供身临其境的真实感,因此十分有助于提升参与者在AR场景中的参与度和沉浸感,因此,越来越多的学者探索了VR元宇宙应用在缓解围手术期疼痛和焦虑的作用。Alotaibi等^[22]发起了一项RCT研究,评估了VR技术在成人鼻科手术(如鼻内镜检查)中的镇痛和抗焦虑效果。将64例患者随机分为VR组和对照组,结果显示在鼻内镜检查中使用VR头显观看景色组的疼痛评分显著降低(1.78 vs 2.56, $P<0.01$),患者满意度更高(4.91 vs 4.69, $P<0.05$),93%患者非常满意。焦虑评分虽有下降趋势(15 vs 18.1),但未达统计学意义。

研究表明VR是一种安全有效的非药物镇痛方法,可提升患者舒适度和满意度,但样本量较小且为单中心研究,焦虑缓解效果需进一步验证。Do等^[23]评估了VR干预对耳鼻喉科手术患者焦虑/压力、疼痛和满意度的影响。研究遵循PRISMA方法,检索1994年10月至2024年8月的文献,最终纳入9项RCT共370例患者(182例接受VR干预)。结果显示,VR干预显著降低焦虑/压力($SMD=-0.84, P<0.001$)和疼痛评分($SMD=-0.36, P=0.01$),并显著提高满意度($SMD=0.55, P<0.001$)。结论表明,VR作为非药物干预手段可有效改善耳鼻喉科手术患者的围手术期体验,未来研究可比较VR与其他非药物干预的效果。Amaya等^[24]进行了一项单中心前瞻性RCT评估了基于VR的术前教育工具对6-12岁耳鼻喉科手术患儿及其监护人术前焦虑的影响。研究纳入107对患儿-监护人组合(51例VR组,56例对照组),主要结局为6项状态-特质焦虑量表评估的术前焦虑水平。结果显示,VR组患儿感到平静的几率显著更高($OR=4.95, P<0.001$),感到担忧的几率显著更低($OR=0.25, P<0.001$);监护人结果类似(平静 $OR=3.55, P=0.001$;担忧 $OR=0.45, P=0.03$)。VR组患儿和监护人中重度焦虑发生率均显著低于对照组(OR 分别为0.15和0.14, $P<0.001$)。结论表明,VR术前教育可有效减轻儿科患者及监护人的术前焦虑,有望成为药物镇静的替代方案。Alseneid等^[25]评估了VR在耳鼻喉科及头颈外科手术围手术期护理中的疗效。研究遵循PRISMA 2020指南,检索PubMed、Embase和Cochrane Library至2025年4月,纳入9项研究共527例参与者。结果显示,VR显著降低术后疼痛评分($SMD=-0.41, 95\%CI -0.78$ 至 -0.05),敏感性分析进一步支持该结果($SMD=-0.47$);亚组分析显示儿童人群效应更大($SMD=-0.59$),但未达统计学意义。围手术期焦虑虽有降低趋势($SMD=-0.85$),但未达显著性。患者满意度显著提高($SMD=0.32, P<0.05$)。VR相关不良事件罕见,退出率低,安全性良好,并可能减少阿片类药物使用。结论支持VR作为耳鼻喉科围手术期护理的可行辅助手段,可改善疼痛和满意度,但需更大规模标准化试验验证其长期效果。

3 在康复中的作用

Pandurangi等^[26]进行了一项前瞻性4臂RCT评估了VR和Fitbit可穿戴活动设备在头颈外科术后恢复中的应用。研究纳入80例住院头颈手术患者(2021年11月至2022年7月),随机分为对照组、VR

组、Fitbit组和VR+Fitbit联合组。VR组患者每日使用VR头显,Fitbit组佩戴设备并鼓励每日完成2 000步,主要结局为平均每日阿片类药物使用量(吗啡毫克当量,MME)。结果显示,仅VR+Fitbit联合组显著降低平均每日阿片用量(8.8 vs 26.4 MME, $P=0.02$);干预组患者住院满意度更高($P=0.02$)。VR实际使用率为提供时间的26%,平均使用时长23.8 min,使用后主观疼痛评分平均降低1.0分,发生3例轻度不良事件(颈部或鼻部不适)。Fitbit组无不良事件,45%天数达成 $\geq 2 000$ 步目标。结论表明,VR和可穿戴活动设备在术后恢复中耐受性良好,可能促进加速康复外科(ERAS)方案的进一步发展,但最大化设备使用仍面临挑战。李广丹等^[27]研究探讨VR技术下前庭康复训练在耳石症眩晕患者倍他司汀片治疗中的作用。86例患者随机分为研究组(VR前庭康复训练)和对照组(常规前庭康复训练)。结果显示,研究组康复训练依从性显著高于对照组($P<0.05$);干预7 d和14 d后,研究组眩晕障碍程度评定量表(DHI)评分、焦虑量表(HADS-A)评分、抑郁量表(HADS-B)评分均低于对照组,前庭疾病日常生活量表(VADL)评分高于对照组($P<0.05$)。研究表明,沉浸式VR前庭康复训练配合倍他司汀片治疗可提高耳石症眩晕患者的训练依从性,缓解眩晕症状,改善生活能力,消除焦虑抑郁情绪,应用效果良好。

4 医学教育相关的元宇宙应用

Offergeld等^[28]评估了VR在ENT数字化教学中的应用效果。2023年夏季学期对180名ENT轮转实习医学生和住院医师进行问卷调查,评估新实施的VR数字教学方法(耳解剖和环甲膜切开术)的满意度和主观有效性。结果显示,学生对ENT教学整体评价良好(平均11.7/15分),但对VR学习有效性和价值的评价存在差异;住院医师的评价更为积极。结论表明,VR是ENT教学组合中的创新组成部分,被视为面向未来的工具。值得注意的是,参与医师一致持积极态度,而学生评价更为批判性,指出了个体和主观层面的局限性,这与学生利益团体对创新教学方法进一步发展的需求形成对比。沙骥超等^[29]以耳鼻咽喉头颈外科学教学中的难点急症教学为例,融合VR能够高保真地再现耳鼻喉相关急诊环境,从而模拟操作情景。以此反复训练,培养医学生紧急情况下分析处理病患的能力,提高学习兴趣和成绩,提高对耳鼻咽喉头颈外科学临床急症应变分析及处理能力。von Schnakenburg

等^[30]评估了VR在耳鼻喉科教学中替代传统解剖模型的可行性。177名学生在一次中耳主题研讨会上被随机分为VR学习组和传统模型学习组。形成性测试结果显示两组差异无统计学意义,但VR组在自我评估知识能力、对教学方法的积极态度以及解剖内容呈现的感知方面均表现出优势。研究结论认为,VR可作为中耳解剖、生理与病理教学的替代方式,其与传统教学方法等效,并展现出在未来教学任务中的巨大潜力。

5 元宇宙设备的舒适性

VR元宇宙应用的建设是传统教学的极大补充,弥补了传统解剖教学和医疗实践中的短板,但我们也不得不注意到,由于现有的虚拟现实设备体积和重量的原因,其佩戴的舒适性以及对虚拟3D空间的前庭不适感,可能会降低人们对沉浸式元宇宙空间的体验感。Du等^[31]探讨了AR眼镜的物理负荷对长时间视频观看任务中主观舒适度的影响。将96名受试者按眼镜使用习惯、性别、年龄和体重指数分组,评估了4种镜架重量下的不适感(鼻部、耳部及整体)。结果显示,随着鼻部物理负荷的增加,各部位的主观不适感均显著上升。此外,非眼镜佩戴者、女性、年长用户以及中等体重指数人群对不适感更为敏感。研究提出,可调宽度、符合人体工学的镜腿和固定重心3项设计干预有助于提升舒适度,为AR眼镜的人体工学设计和可穿戴显示器行业提供了重要参考。

6 耳鼻咽喉元宇宙建设思路

在“复旦中山惠生智育”元宇宙平台总体框架下,耳鼻咽喉相关教学版块可作为面向全周期医学教育的重要专科拓展方向,服务于院校医学教育、毕业后医学教育和继续医学教育不同阶段的教学需求。依托平台已形成的医学知识生态系统、虚拟教学场景、综合教学智能体和全周期教学管理中枢,耳鼻咽喉元宇宙教学内容建设具备了较为完整的资源、技术与管理基础。

耳鼻咽喉元宇宙建设的重点,在于形成高质量、结构化、可复用的专科教学内容体系,主要包括基于真实解剖结构构建的高保真三维模型与数字孪生模型,以及来源于临床实践、可用于教学设计、情境训练与能力评价的病例资料库。临床一线积累的病例、影像、检查及手术资料,是相关教学场景持续迭代的重要基础。

以耳科为例,基于团队前期在数字孪生相关研

究中的积累,已建立以真实人耳颞骨标本为基础、采用逆向成型方式重建的三维有限元人耳数字孪生模型。结合Blender、Maya等三维建模与渲染工具,可进一步形成适用于元宇宙教学场景的高保真耳科解剖与操作模型;结合有限元参数后,还可模拟不同病变状态下听觉功能变化及其机制,并用于手术重建效果的可视化展示与教学推演。

在应用层面,该教学版块可根据不同培养阶段形成分层使用路径:院校医学教育阶段侧重解剖认知与基础理解,毕业后医学教育阶段侧重专科能力训练与临床思维培养,继续医学教育阶段侧重复杂病例分析、新技术训练和高阶能力提升。在此基础上,可进一步整合耳内镜、颞骨高分辨CT等多模态临床资料,逐步构建耳鼻咽喉专科教学病例资源库、情境任务脚本和学习过程证据链,以促进优质教学资源的结构化沉淀与共享应用,为耳鼻咽喉专科人才的分层培养与持续发展提供支撑。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

作者贡献 周雷:论文具体构思与撰写;张雯:论文框架指导;于浩然、李光耀、高丽:文献收集整理;黄新生、余倩:论文审核与优化、整体设计与修改。

参考文献

- [1] Binnersley T W, Richards E, Whittaker J D, et al. Virtual reality simulation as a tool for ENT training: an autoethnographic study [J]. J Surg Educ, 2025, 82 (4): 103439.
- [2] Bolton W S, Shaikh S, Mathew R K, et al. IDEAL stage 0 evaluation of the use of epon MOVERIO augmented reality headset in neuroendoscopic procedural training [J]. Robotics Computer Surgery, 2026, 22: e70137.
- [3] Srivatsan S, Lee D K, Tran A Q, et al. Trainee experience in virtual reality simulation in orbital surgery [J]. Orbit, 2025, 44 (3): 274-280.
- [4] Blanchard J R, Bean T, Koshal S. Augmented reality: a digital transformation tool to enhance the patient consent process in oral surgery [J]. Br Dent J, 2025.
- [5] Aweeda M, Adegboye F, Yang S F, et al. Enhancing surgical vision: augmented reality in otolaryngology-head and neck surgery [J]. J Med Ext Real, 2024, 1(1): 124-136.
- [6] Hudise J Y, Mojiri M E, Shawish A M, et al. The role of virtual reality in advancing surgical training in otolaryngology: a systematic review [J]. Cureus, 2024, 16(10): e71222.
- [7] 巴广益, 茆松, 孙汐文, 等. Voxel-man ENT手术模拟系统在鼻科技能教学中的应用 [J]. 山东大学耳鼻喉眼学报, 2021, 35(5): 56-61.
- [8] 杨媛媛, 周雅琪, 刘洪宇, 等. 耳内镜虚实结合手术培训系统

- 的研发[J]. 中华耳科学杂志, 2023, 21(2): 277-281.
- [9] 李兴程, 王 漾, 徐 静. 3D打印教具联合VR技术在耳科手术技能训练中的应用[J]. 中国继续医学教育, 2025, 17(10): 144-148.
- [10] Lamtara J C, Wijewickrema S, Gerard J M, et al. Evaluating learning curves in virtual reality cortical mastoidectomy training across expertise levels[J]. and, 2025, 46(5): 607-615.
- [11] Everad F, Albrecht T, Kromeier J, et al. A virtual reality anatomy model of the temporal bone in ORL residency training—gain or gadget? [J]. J Med Educ Curric Dev, 2024, 11: 23821205241281506.
- [12] El Chemaly T, Athayde Neves C, Fu F R, et al. From microscope to head-mounted display: integrating hand tracking into microsurgical augmented reality [J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2024, 19(10): 2023-2029.
- [13] Lai C, Lui J T, de Lotbiniere-Bassett M, et al. Virtual reality simulation for the middle cranial Fossa Approach: a validation study[J]. Oper Neurosurg, 2024, 26(1): 78-85.
- [14] Frændø M, Frithioff A, Konge L, et al. Cochlear implant surgery: virtual reality simulation training and transfer of skills to cadaver dissection—a randomized, controlled trial [J]. J Int Adv Otol, 2022, 18(3): 219-224.
- [15] Priel A, Hadida Barzilai D, Tejman-Yarden S, et al. Pre-operative planning of a DCR surgery using virtual reality [J]. Semin Ophthalmol, 2025, 40(1): 35-38.
- [16] Strong E B, Patel A, Marston A P, et al. Augmented reality navigation in craniomaxillofacial/head and neck surgery [J]. OTO Open, 2025, 9(2): e70108.
- [17] Mould H, Kinshuck A, Abbas J R, et al. A feasibility study of virtual reality and 360° video training for anterior nasal packing [J]. Laryngoscope Investig Otolaryngol, 2025, 10(5): e70243.
- [18] Espinel Y, Lombion N, Compagnone L, et al. Preliminary trials of trackerless augmented reality in endoscopic endonasal surgery [J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2024, 19(7): 1385-1389.
- [19] Ruggiero F, Cerenelli L, Emiliani N, et al. Preclinical application of augmented reality in pediatric craniofacial surgery: an accuracy study [J]. J Clin Med, 2023, 12(7): 2693.
- [20] McCormick M, Jegatheeswaran L, Homer-Vanniasinkam S, et al. Virtual reality meets ENT: a low-cost high-fidelity teaching course for peritonsillar abscess drainage [J]. J Laryngol Otol, 2025, 139(10): 990-995.
- [21] Chan J Y K, Holsinger F C, Liu S, et al. Augmented reality for image guidance in transoral robotic surgery [J]. J Robot Surg, 2020, 14(4): 579-583.
- [22] Alotaibi N H, Alromaih S, Alshenaifi L, et al. The role of virtual reality in nasal procedures: a randomized controlled trial [J]. Ann Med Surg (Lond), 2026, 88(1): 321-326.
- [23] Do K, Sagalow E S, Kawana E, et al. Virtual reality in otolaryngology patient outcomes: a systematic review and meta-analysis [J]. Laryngoscope, 2025, 135(9): 2993-3004.
- [24] Amaya S, Kalsotra S, Yemele Kitio S A, et al. Virtual reality exposure therapy and patient education for preoperative anxiety in pediatrics: randomized controlled trial [J]. JMIR Perioper Med, 2025, 8: e73392.
- [25] Alseneid A, Ibrahim M, Alseneid A, et al. Virtual reality for the improvement of perioperative care in otorhinolaryngology-related procedures: a systematic review and meta-analysis [J]. Cureus, 2025, 17(5): e84238.
- [26] Pandrangi V C, Araujo A V, Buncke M, et al. Postoperative implementation of virtual reality and wearable devices: opportunities and challenges [J]. Laryngoscope, 2025, 135(6): 2044-2050.
- [27] 李广丹, 蔡 丽, 史 夏等. 沉浸式虚拟现实技术下前庭康复训练在耳石症眩晕患者药物治疗期间的效果[J]. 中国药物滥用防治杂志, 2024, 30(6): 1030-1034.
- [28] Offergeld C, Kuhn S, Kromeier J, et al. Wird der Einsatz der virtuellen Realität in der HNO-Heilkunde-Lehre von Studierenden automatisch positiv bewertet? : Eine Fragebogenevaluation bei Studierenden [Is the use of virtual reality in otorhinolaryngology teaching automatically positively rated by students? : A questionnaire-based evaluation among students] [J]. HNO, 2024, 72(5): 367-374.
- [29] 沙骥超, 孟粹达, 刘奕麟, 等. 耳鼻咽喉头颈外科急症教学与虚拟现实技术深度融合的教学实践[J]. 国际老年医学杂志, 2023, 44(5): 636-638.
- [30] von Schnakenburg P, Heermann S, Kromeier J, et al. Einsatz von Virtual Reality in der HNO-Lehre: eine Alternative zum konventionellen Anatomiemodell [J]. Hno, 2023, 71(2): 106-113.
- [31] Du Y J, Liu K X, Ju Y X, et al. A comfort analysis of AR glasses on physical load during long-term wearing [J]. Ergonomics, 2023, 66(9): 1325-1339.

引用本文

周 雷, 张 雯, 于浩然, 等. 元宇宙创新模式在耳鼻咽喉科临床及教学中的应用现状与建设思路[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(2): 120-126.

Zhou L, Zhang W, Yu H R, et al. Current applications and development strategies of metaverse innovation models in otolaryngology clinical practice and education [J]. Metaverse Med, 2026, 3(2): 120-126.

DOI: 10.61189/431069dfoozt

· 医学教育 ·

基于“复旦中山惠生智育”平台的神经内科元宇宙教学体系构建设想

毛玲艳¹, 余 情², 张 雯², 张 敏², 张宇浩¹, 刘 旭¹, 丁 晶^{1*}

1. 复旦大学附属中山医院神经内科, 上海 200032

2. 复旦大学附属中山医院教育处, 上海 200032

〔摘要〕 神经内科专科医学教育面临低频高危情境训练不足、关键操作机会不均、伦理敏感沟通场景复现困难以及跨阶段评价体系薄弱等结构性瓶颈。本文基于“复旦中山惠生智育”元宇宙平台, 提出面向神经内科全周期医学教育培训与管理的专科元宇宙平台构建思路。以扩展现实与人工智能为技术底座, 围绕神经系统查体、脑卒中急救决策、癫痫持续状态处理、帕金森病长期管理与坏消息告知等核心教学场景, 构建神经内科知识生态系统、沉浸式虚拟教学场景、专科综合教学智能体与全周期教学管理中枢四大版块。平台支持跨院区同步教学与过程留痕, 旨在形成“情境训练—过程评价—个性化导学—治理闭环”的专科教育新范式。以“急性缺血性脑卒中溶栓决策元宇宙教学单元”为例, 展示了该平台在场景设计、任务链组织与技术实现上的可行思路。本文为神经内科专科元宇宙教学的体系化建设提供了可复制的工程化框架与设计参考, 后续将基于实际运行数据进一步开展效果验证。

〔关键词〕 神经内科; 元宇宙医学; 全周期医学教育; 沉浸式训练; 溶栓决策; 胜任力评价

〔中图分类号〕 R 741; R-05 **〔文献标志码〕** A

Design concept for a neurology metaverse teaching system based on the Fudan Zhongshan “huisheng intelligent education” platform

Mao Lingyan¹, Yu Qing², Zhang Wen², Zhang Min², Zhang Yuhao¹, Liu Xu¹, Ding Jing^{1*}

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

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

〔Abstract〕 Specialty education in neurology faces structural bottlenecks including insufficient training in low-frequency, high-risk clinical scenarios, unequal opportunities for performing key procedures, difficulty in replicating ethically sensitive communication situations, and a weak cross-stage evaluation system. Based on the “Huisheng Intelligent Education” metaverse platform of Zhongshan Hospital, Fudan University, this paper proposes a conceptual framework for building a neurology-specific metaverse platform targeting full-cycle medical education, training, and management. Using extended reality (XR) and artificial intelligence (AI) as the technological foundation, and focusing on core teaching scenarios such as neurological examination, emergency decision-making in stroke, status epilepticus management, long-term care of Parkinson’s disease, and breaking bad news, the platform constructs four major modules: a neurology knowledge ecosystem, immersive virtual teaching scenarios, a specialized teaching intelligence system, and a full-cycle teaching management hub. The platform supports cross-campus synchronous teaching and process tracking, aiming to establish a new paradigm of specialty education characterized by “scenario-based training — formative evaluation — personalized guidance — governance closed loop”. Taking the “acute ischemic stroke thrombolysis decision-making metaverse teaching unit” as an example, this paper demonstrates the feasible approach of the platform in scenario design, task chain organization, and technical implementation. This paper provides a replicable engineering framework and design reference for the systematic construction of metaverse teaching in neurology, with future effectiveness validation to be conducted based on actual operational data.

〔Key Words〕 neurology; metaverse in medicine; full-cycle medical education; immersive training; thrombolysis decision-making; competency evaluation

神经内科疾病具有高发病率、高致残率、高复发率及高伦理敏感性的特点。从急性脑卒中的黄

金时间窗决策, 到癫痫持续状态的生命支持, 再到肌萎缩侧索硬化等终末期神经疾病的坏消息告知

〔收稿日期〕 2026-04-03

〔接受日期〕 2026-06-01

〔作者简介〕 毛玲艳, 博士, 主治医师; E-mail: mao.lingyan@zs-hospital.sh.cn

* 通信作者 (Corresponding author). 丁 晶, 博士, 主任医师; E-mail: ding.jing@zs-hospital.sh.cn

与预立医疗照护沟通,神经内科医师的胜任力高度依赖低频高危情境的规范化训练与复杂沟通能力的反复打磨。然而,当前国内神经内科专科医学教育仍面临以下突出瓶颈:(1)关键临床操作与急危重症决策机会不均,不同基地、不同轮转阶段的学员实际暴露量差异显著;(2)终末期沟通等伦理敏感内容难以在真实临床中反复演练;(3)从医学生到住培、专培、继续教育的纵向能力发展缺少连续、可量化的过程评价工具;(4)师资与标准化病人资源紧张,难以支撑高频次、个性化的反馈训练。

近年来,元宇宙技术因其沉浸性、可重复性、过程留痕与多用户协作等优势,正在推动医学教育体系的重构^[1-3]。我院前期提出了“复旦中山惠生智育”元宇宙平台,面向全周期医学教育构建了医学知识生态系统、虚拟教学场景、综合教学智能体、全周期教学管理中枢四版块架构,并在多学科会诊教学中验证了其可行性与跨院区协同能力^[4]。在此基础上,本文进一步将平台能力垂直下沉至神经内科专科领域,提出神经内科专科元宇宙平台的构建思路,以期为国内神经内科教学的同质化、可评价与可持续发展提供可复制的解决方案。

1 神经内科元宇宙平台的总体架构

神经内科元宇宙平台并非独立重建,而是作为“复旦中山惠生智育”平台的垂直领域子平台,复用其底层数据底座、AI引擎与教学管理中枢,在此基础上定制专科知识图谱、虚拟场景与评价模型。总体架构仍分为四大版块。

1.1 版块一:神经内科元宇宙知识生态系统 本版块为所有虚拟教学场景提供统一、可追溯、可持续更新的知识来源。在知识底座层面,平台整合了神经解剖三维图谱,典型影像库(非对比头颅CT、CT血管造影、CT灌注成像、磁共振成像及数字减影血管造影),以及常用评分量表(如美国国立卫生研究院卒中量表、格拉斯哥昏迷评分、改良Rankin量表、Essen卒中风险评分、统一帕金森病评定量表、Hoehn-Yahr分期量表)。同时纳入国内外权威指南与共识,包括《中国急性缺血性脑卒中诊治指南》《中国成人惊厥性癫痫持续状态诊治指南》《帕金森病诊疗指南》等,以及经过脱敏处理的真实病例数据。在AI增强能力方面,平台利用自然语言处理与生成式人工智能技术,实现指南要点的自动摘要、试题与虚拟患者对话脚本的智能生成,以及影像征象的自动标注与检索。最后,通过标准化输出机制,将上述知识内容封装为可被虚拟场景调用的

“知识单元”,支持版本管理、循证引用与跨场景复用,从而确保教学内容的准确性、一致性与可持续迭代能力。

1.2 版块二:神经内科虚拟教学场景谱系 围绕神经内科全周期培养所要求的核心胜任力,本平台设计并构建了一系列典型虚拟教学场景(表1)。这些场景覆盖了从基础技能到复杂临床决策的多个关键环节,例如神经系统规范化查体、腰椎穿刺操作流程、急性缺血性卒中的溶栓决策与时间窗管理、癫痫持续状态的阶梯式药物抢救与气道保护与法律文书沟通、肌萎缩侧索硬化等终末期神经疾病的坏消息告知与预立医疗照护计划讨论,以及帕金森病长期随访中的运动与非运动症状综合评估等。其中,腰椎穿刺操作流程场景重点训练学习者的解剖定位、无菌操作技术、测压与脑脊液采集规范,以及常见并发症(如脑疝、低颅压头痛)的识别与处理,通过增强现实与力反馈设备实现操作步骤的实时纠错与评分。每一场景均严格遵循统一的底层设计规范,即“任务脚本、关键决策点与行为轨迹采集、即时反馈”三位一体的流程。任务脚本明确了学习目标与预期行为路径;关键决策点与行为轨迹采集模块可自动记录学习者在每一环节的操作选择、时序安排、沟通语句与偏离次数;即时反馈则在任务节点或场景结束时生成针对性的评估与改进建议。所有场景既可支持学习者的单人自主训练与反复打磨,也能满足多学科团队或跨专业协作演练的需求,从而为神经内科专科能力的系统化、可重复培养提供了坚实的技术基础。

1.3 版块三:神经内科综合教学智能体 神经内科综合教学智能体是实现个性化、数据驱动教学的核心模块。该智能体首先依托过程性评价机制,自动采集学习者在各虚拟场景中的多维度行为数据,包括关键决策点的选择、操作顺序的合理性、任务完成的时间消耗、沟通中的关键语句使用情况以及偏离预设标准流程的次数。这些数据并非简单记录,而是通过结构化建模转化为可量化的教学指标。在此基础上,智能体动态生成学习者的专科能力画像,以雷达图形式直观呈现其在神经查体能力、急救决策能力、操作技能、沟通共情能力、伦理法律素养以及病历文书质量6个维度的当前水平。每一维度均基于多个场景任务的综合表现计算得出,并可追踪其随时间的变化趋势。进一步地,智能体引入个性化导学功能,采用强化学习算法识别学习者能力画像中的短板与薄弱环节,并据此自动推送针对性的补充训练任务。

表 1 神经内科元宇宙典型教学场景

场景模块	教学重点	适用阶段	技术载体
神经系统查体	意识水平、颅神经、运动/感觉/反射/共济	院校/住培	VR+手势交互
腰椎穿刺操作流程	体位、定位、无菌、测压、并发症识别	院校/住培	AR/MR+力反馈
急性缺血性卒中溶栓决策	院前识别、NIHSS、影像判读、适应症/禁忌症、家属沟通	住培/专培	VR+AI 虚拟患者
癫痫持续状态处理	药物阶梯、气道管理	专培	AR/MR+数字人
坏消息告知(肌萎缩侧索硬化)	SHARE 模型、情绪回应、预嘱讨论	住培/专培	VR+多分支对话
帕金森病长期管理与随访	UPDRS 评分、药物调整、非运动症状、居家安全	继续教育	AI 增强虚拟患者

例如,若学习者在溶栓决策的连续多个任务中表现出适应证把握不牢或禁忌症筛查遗漏等问题,系统将为其补充 3 个不同变异类型的卒中病例虚拟训练,以强化其在变异性情境下的决策迁移能力。通过“评价、画像、导学”的闭环机制,综合教学智能体实现了从统一化教学向个体化成长路径的转变,显著提升了训练的针对性与效率。

1.4 版块四:全周期教学管理中枢 全周期教学管理中枢致力于打破传统医学教育中不同阶段之间的数据孤岛,实现从院校教育到毕业后教育再到继续教育的纵向贯通。在跨阶段追踪方面,中枢将学员从院校医学教育阶段的神经系统查体训练,到住院医师规范化培训阶段的急性卒中决策训练,再到专科医师规范化培训阶段的脑死亡判定与终末期沟通训练,全部纳入同一终身学习档案,从而完整记录其能力成长轨迹。与此同时,中枢配备了质量监测仪表盘,可实时呈现各教学基地、各轮转小组在不同虚拟场景中的完成率、平均决策正确率、平均沟通评分等关键绩效指标,支持教学管理者及时发现异常波动与共性薄弱环节,进而触发教学预警与资源优化调配。为确保过程数据的公信力与可审计性,中枢进一步引入区块链存证与认证机制,将学习者在关键操作中的行为记录、评价结果等核心证据进行上链存证,实现数据不可篡改、来源可追溯。这为专科胜任力的可信认证、教学审计以及跨机构互认提供了坚实的技术基础,推动神经内科专科教学管理从经验驱动走向证据驱动、从阶段割裂走向全周期闭环。

2 早期实践:急性缺血性脑卒中溶栓决策元宇宙教学单元

2.1 教学定位 本单元面向神经内科住院医师(第 3 年)及专科医生,训练其在急性缺血性卒中发病 4.5 h 内完成快速评估、影像判读、溶栓决策、家属沟

通、文书交接的全流程能力。该场景在真实临床中高度时间敏感、决策风险大、家属情绪复杂,传统教学中难以反复演练。

2.2 场景流程与关键决策点 学员通过 VR 头戴显示设备或 PC 端进入卒中急诊虚拟空间,在仿真的时间压力下按以下任务链条推进(以下预设参数仅为示例,平台可根据教学需要灵活配置不同临床情境)。

2.2.1 接诊与快速评估 例如,虚拟患者表现为突发言语不清、右侧肢体无力,发病时间设为 2.5 h。学员需完成格拉斯哥昏迷评分与美国国立卫生研究院卒中量表评分(示例中预设评分 12 分),快速建立神经功能缺损基线。

2.2.2 影像判读 学员在增强现实与混合现实环境中依次查看影像。例如,头颅 CT 平扫排除出血,CTA 未见大血管闭塞,CTP 显示存在缺血半暗带。平台可替换为其他影像特征组合(如大血管闭塞、无半暗带等)以训练不同决策情境。

2.2.3 溶栓决策 学员综合时间窗、影像学表现与禁忌证评估获益与风险,决定是否使用 rt-PA。示例中设置了 2 个关键陷阱:血压 185/110 mmHg(需先降压处理)、血糖 2.8 mmol/L(需纠正),以训练对溶栓禁忌证的敏感性。实际训练中可调整血压、血糖、时间窗等参数,生成多样化的病例变体。

2.2.4 家属沟通 AI 增强的虚拟患者家属表现出紧张、犹豫并反复追问“会不会出血”(示例情绪反应类型可替换为愤怒、沉默、过度乐观等)。学员需在此高情绪负荷情境下练习坏消息告知、风险解释与知情同意获取过程。

2.2.5 记录与交接 学员填写溶栓记录单,准确记录用药时间、剂量与注意事项,并完成虚拟交接。平台提供标准化模板,同时支持不同医疗机构的格式适配。

以上链条环环相扣,既考核了临床决策的准确

性,也强化了时间管理与团队协作意识。通过替换每个环节的预设参数,平台可衍生出数十种不同难度的溶栓决策场景,满足分层递进训练的需求。

2.3 技术实现与过程留痕 平台突破了物理院区的限制,支持复旦大学附属中山医院(总部)与分院、医联体单位的教学同步进行。各院区的住院医师可同时进入同一虚拟空间,共同参与卒中溶栓决策场景的训练与复盘,从而确保不同基地学员接受同口径的教学内容与评价标准。在训练过程中,平台采用“5A 流程+专家数字人”引导结构化决策,将评估、建议、安排、协助等环节嵌入专家数字人的交互对话中,帮助学员在标准化框架下完成从信息采集到决策落地的完整路径。与此同时,系统对所有关键决策点(例如是否启动溶栓、血压与血糖的异常值处理策略、与家属的沟通方式选择)进行自动打点与行为轨迹记录,并在任务结束后生成形成性反馈报告。报告不仅指出决策正误,还会将典型错误(如忽略血压临界值即直接溶栓)自动关联至知识生态系统中的对应指南段落,方便学员即时查阅、对比与纠正,从而实现训练、反馈、知识溯源的学习闭环。

3 讨 论

本平台首次尝试将“复旦中山惠生智育”通用元宇宙医学教育能力垂直下沉至神经内科专科领域,其设计价值体现在多个层面。(1)平台拟推动神经内科教学从“机会依赖”向“标准化覆盖”转变。模拟教学已被国际学界公认为神经内科教育中日益重要的组成部分,研究表明基于模拟的培训能够为学习者提供结构化机会以练习临床推理、识别常见诊断与治疗陷阱,并改善卒中救治中多学科协作与方案依从性,例如有证据显示模拟训练可缩短卒中救治的入院至穿刺时间^[5]。然而,真实临床环境中神经系统急危重症与高伦理敏感场景的出现频率存在客观不均衡性。本平台通过将神经系统查体、溶栓决策、脑死亡判定、终末期沟通等关键场景转化为可重复、可量化的虚拟训练任务,设计上预期能够有效缩小不同培训基地、不同轮转学员之间因病例资源不均而导致的训练机会差异。(2)平台拟实现从“经验评价”向“证据驱动的形成性评价”的跃升。一项包含 30 项研究、1 560 名参与者的系统综述^[6]表明,元宇宙技术在医学教学中的有效性已得到初步验证,多数研究报告了学生能力提升、训练时间缩短以及学习兴趣与信心的增强。借助虚拟场景中的过程数据自动采集与专科能力画像

的动态生成,本平台的教学评价有望从依赖出科考试的一次性成绩,转变为贯穿整个培养周期的持续跟踪与精准补训机制。(3)平台设计上支持跨院区同步训练与复盘,为多院区、医联体背景下的神经内科教学同质化提供可落地的工程化解决方案。(4)平台拟构建全周期贯通的培养链条,覆盖从院校教育阶段的神经系统查体训练,到住院医师规范化培训阶段的卒中决策训练,再到专科医师规范化培训阶段的脑死亡判定与终末期沟通训练,直至继续医学教育阶段的帕金森病长期管理训练,以期实现神经内科人才成长的纵向衔接与能力递进。

在国际上,已有部分研究探索将模拟教学技术应用于神经内科教育。例如,有学者^[7]利用虚拟现实技术训练医学生的卒中量表评分能力,也有研究^[8]采用标准化患者演练坏消息告知的沟通技巧。一项遵循 PRISMA 指南的系统综述^[9]对元宇宙技术在神经外科、神经内科与精神科教育中的应用进行了评估,从 420 篇文献中筛选出 24 项纳入分析,发现神经内科可从虚拟患者模拟中获益,有助于提升诊断敏锐度。在卒中教学领域,一项纳入 59 项研究的范围综述系统梳理了卒中急救模拟教学的研究现状,发现多数研究聚焦于短期结局、依赖单次模拟训练,在能力评估、继续教育以及特定场景(如脑出血、院前应用)方面存在明显数据空白。然而,上述实践多为单一场景、单一技术模态、短周期的教学干预,缺乏与全周期培养体系及综合性管理平台的深度整合,难以形成系统化、可持续的专科教育解决方案。在腰椎穿刺等操作技能教学领域,已有研究^[10]尝试将混合现实与增强现实技术引入培训。在国内,神经内科领域的元宇宙教学尚处于起步阶段,尚未见到集知识生态、虚拟场景、智能评价与全周期管理于一体的专科平台报道。与现有研究相比,本平台在 3 个维度上展现出明显特色:(1)技术架构的系统性,基于“复旦中山惠生智育”通用平台进行垂直定制,保证了底层数据与功能的高度复用与一致性;(2)内容的专科系统性,覆盖了神经内科从基础技能到复杂决策、从急危重症到慢病管理、从技术操作到伦理沟通的完整能力谱系;(3)评价与管理的数据闭环,通过过程留痕、能力画像与个性化导学的联动,实现了教学活动的可测量、可追溯与持续改进。

本研究目前主要报告平台的设计思路与早期可行性验证,尚存在若干局限性。本文报告了神经内科元宇宙平台的设计思路与初步建设方案,目前仍处于平台搭建与内部验证阶段。在标准化与可

推广性方面,不同场景之间的脚本一致性、评价标准以及跨中心实施的同质化程度仍需进一步通过多中心验证来确认。未来研究将重点围绕3个方向展开:(1)设计并实施多中心随机对照试验,比较元宇宙教学与传统小班教学在溶栓决策知识保留率、模拟病例决策正确率以及学习迁移效果等方面的差异,为平台的有效性提供高等级循证证据;(2)联合国内多家神经内科培训基地,共同构建神经内科元宇宙教学的“场景脚本库、话术模板库、评价量表库”,推动行业标准的形成,降低不同机构间的实施异质性;(3)在严格的数据脱敏与伦理审批前提下,探索平台与医院电子病历系统的安全对接,开展虚拟训练表现到真实临床行为的效度研究,验证元宇宙训练所习得的能力是否能够有效迁移至实际患者管理之中,从而完成从“可用”到“可证”、从“可证”到“可信”的跨越。

综上所述,本文基于“复旦中山惠生智育”元宇宙平台,提出了神经内科元宇宙平台的完整构建思路,并展示了以“急性缺血性脑卒中溶栓决策教学单元”为代表的实践范例。平台通过知识生态系统、虚拟教学场景、综合教学智能体、全周期教学管理中枢四版块协同,初步实现了神经内科低频高危与伦理敏感情境的标准化、可重复、可评价训练,支持跨院区同质化教学与全周期能力追踪。该平台为神经内科专科医学教育的数字化转型提供了可复制的工程框架,有望推动神经内科教学从“经验依赖”走向“数据驱动、证据闭环”的高质量发展范式。

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 毛玲艳:论文构思与撰写;余情:论文整体设计与修改、论文框架指导;张雯、张敏:论文框架指导;张宇

浩、刘旭:场景设计;丁晶:论文整体设计与修改。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Huh Y J, Shin J S, Yoon N, et al. Metaverse-based objective structured clinical examinations: an exploratory approach to advancing clinical competency assessment [J]. Korean J Med Educ, 2026, 38(2): 139-148.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Singla L, Jamal F, Abu A, et al. Sim and learn: simulation and its value in neurology education [J]. Fed Pract, 2025, 42(11):430-436.
- [6] 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.
- [7] Maltby S, Mahadevan J J, Spratt N J, et al. Implementation and sustainment of virtual reality stroke workflow training for physician trainees at comprehensive stroke centres: a quantitative and qualitative study [J]. BMC Med Educ, 2024, 24(1): 1494.
- [8] Lemmon M E, Stowd R E 3rd. Right Brain: Breaking bad news: Communication education for neurology trainees [J]. Neurology, 2016, 87(24): e285-e287.
- [9] Luisa E, Joseph D, Rishi M, et al. NeuroMetaverses for neurology, neurosurgery and psychiatry [C]//NeuroMetaverses for Neurology, Neurosurgery and Psychiatry. BMJ Publishing Group Ltd, 2024: A78. 3-A79.
- [10] Roehr M, Wu T, Maykowski P, et al. The feasibility of virtual reality and student-led simulation training as methods of lumbar puncture instruction [J]. Med Sci Educ, 2021, 31(1): 117-124.

引用本文

毛玲艳,余情,张雯,等. 基于“复旦中山惠生智育”平台的神经内科元宇宙教学体系构建设想[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(2):127-131.

Mao L Y, Yu Q, Zhang W, et al. Design concept for a neurology metaverse teaching system based on the Fudan Zhongshan “huisheng intelligent education” platform[J]. Metaverse Med, 2026, 3(2):127-131.

DOI:10.61189/098550omimvp

· 医学教育 ·

基于“复旦中山惠生智育”元宇宙平台的中西医协同 “旗舰”医院中医药传承创新教学版块构建设想



张 雯^{1,2}, 侯风刚², 杨云柯², 蔡定芳², 朱 雯², 杨 峰², 向 军², 王翔宇^{1,2},
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中医/中西医结合科, 上海 200032

[摘要] 中西医协同“旗舰”医院建设对中西医结合人才培养、名老中医经验传承、协同诊疗模式创新及信息化支撑提出了更高要求。复旦大学附属中山医院作为国家第一批中西医协同“旗舰”医院试点单位,已依托“复旦中山惠生智育”元宇宙平台形成覆盖院校医学教育—毕业后医学教育—继续医学教育的全周期总体架构。在此基础上,针对现有平台主要服务现代医学教育,且对西学中培养对象和中医高年资医师在中医药传承创新与中西医协同能力培养方面支持不足的问题,构建中医药传承创新教学版块。该版块依托元宇宙医学知识生态系统、元宇宙虚拟教学场景、综合教学智能体和全周期教学管理中枢4个既有平台底座,围绕名老中医工作室元宇宙教学模块、中西医协同虚拟门诊模块、中西医联合查房/多学科诊疗模块和中医适宜技术与情境训练模块进行设计,形成“传承资源沉淀—门诊协同训练—复杂病例协同决策—适宜技术应用”的连续性教学链条。进一步以上海市名中医蔡定芳工作室元宇宙教学模块为例,阐述知识资源整合、教学场景重建、智能体支持和过程管理评价的具体构想。该版块有望为中西医协同“旗舰”医院背景下中医药传承创新教学的数字化转化与协同育人模式构建提供新的实践路径。

[关键词] 复旦中山惠生智育;元宇宙;中西医协同“旗舰”医院;中医药传承创新;教学版块

[中图分类号] R 2-031 **[文献标志码]** A

A conceptual framework for constructing an innovative teaching module for traditional chinese medicine inheritance in a collaborative “flagship” hospital integrating chinese and western medicine based on the “huisheng intelligent education” metaverse platform

Zhang Wen^{1,2}, Hou Fenggang², Yang Yunke², Cai Dingfang², Zhu Wen², Yang Feng², Xiang Jun², Wang Xiangyu^{1,2}, Yu Qing^{1*}

1. Department of Education, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China
2. Department of Traditional Chinese Medicine/Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

[Abstract] The construction of collaborative “Flagship” hospitals integrating Chinese and Western medicine has placed higher demands on talent cultivation in integrated medicine, inheritance of the experience of renowned veteran TCM experts, innovation in collaborative diagnostic and therapeutic models, and information-based support. As one of the first batch of national pilot institutions for collaborative “Flagship” hospitals integrating Chinese and Western medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, has already established a full-cycle framework spanning undergraduate medical education, postgraduate medical education, and continuing medical education based on the “Huisheng Intelligent Education” metaverse platform. On this basis, an innovative teaching module for Traditional Chinese Medicine (TCM) inheritance is proposed to address the current gap whereby the existing platform primarily serves modern medical education and provides insufficient support for Western medicine physicians receiving TCM training and senior TCM physicians in the cultivation of TCM inheritance and innovation as well as collaborative Chinese-Western medicine competencies.

[收稿日期] 2026-03-15

[接受日期] 2026-05-06

[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), Zhongshan Hospital, Fudan University Management Science Fund (2024ZSGL14), Zhongshan Hospital, Fudan University Medical Humanities and Ideological-Political Education Research Project (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

Relying on the four existing platform foundations—namely the metaverse medical knowledge ecosystem, metaverse virtual teaching scenarios, comprehensive teaching intelligent agents, and the full-cycle teaching management hub—the module is designed around four core components: a metaverse teaching module for renowned veteran TCM experts’ studios, a virtual outpatient module for collaborative Chinese–Western medicine practice, a collaborative ward-round/MDT module integrating Chinese and Western medicine, and a TCM appropriate techniques and situational training module. Together, these form a continuous teaching chain of “inheritance resource accumulation—outpatient collaborative training—complex case collaborative decision-making—application of appropriate techniques.” Furthermore, taking the metaverse teaching module for the studio of Shanghai Famous TCM Expert CAI Dingfang as an example, this paper illustrates the specific design for knowledge resource integration, reconstruction of teaching scenarios, intelligent-agent support, and process-based management and evaluation. This module is expected to provide a new practical pathway for the digital transformation of TCM inheritance and innovative collaborative training models in the context of collaborative “Flagship” hospitals integrating Chinese and Western medicine.

[Key Words] huisheng intelligent education; metaverse; collaborative “Flagship” hospital integrating Chinese and western medicine; TCM inheritance and innovation; teaching module

近年来,随着扩展现实、数字孪生与人工智能等技术的融合演进,元宇宙正成为医学教育创新的重要技术场域^[1-5]。元宇宙增强模拟并非单纯虚拟技术的叠加,而是通过重构学员、环境、任务与反馈之间的关系,为医学教育提供兼具沉浸性、交互性、协同性与连续性的教学新空间。元宇宙及其相关沉浸式技术在医学与卫生职业教育中具有支持复杂技能训练、多角色协作学习、跨地域同步教学和形成性反馈强化等潜力,为医学教育由知识传递走向能力建构提供了新的技术支撑。

与此同时,国家中西医协同发展战略的深入推进,为中医药传承创新教学的数字化重构提供了重要政策契机^[6-10]。中西医协同“旗舰”医院建设试点项目明确提出,以中西医结合医疗模式创新为牵引,统筹推进重点优势专科建设、人才培养、科研能力提升与信息化建设,打造兼具诊疗示范、人才培养和模式推广功能的高水平平台;相关建设要求还特别强调健全中西医协同发展机制与多学科诊疗体系,将中西医联合查房、会诊纳入医院管理制度,并加强名老中医药专家传承工作室建设、中医药师承教育及西医学习中医高层次人才培养。可见,人才培养与教学体系建设是“旗舰”医院建设的重要支撑环节,也是推动中西医协同模式落地与推广的关键基础。复旦大学附属中山医院(中山医院)作为国家第一批中西医协同“旗舰”医院(简称旗舰医院)试点单位,已依托“复旦中山惠生智育”元宇宙平台初步形成覆盖院校医学教育—毕业后医学教育—继续医学教育的全周期总体架构。然而,现有平台的主要应用场景仍集中于现代医学教育,对于西学中培养对象及中医高年资医师,在名老中医经验传承、中西医协同门诊、联合查房、联合多学科诊疗(multidisciplinary team, MDT)和中医适宜技术训

练等具有鲜明中医药特色教学需求方面,尚缺乏针对性的专题化设计。基于此,亟需在既有平台基础上进一步构建聚焦中医药传承创新与中西医协同育人的教学特色版块,以更好回应“旗舰”医院建设对教学体系、传承模式与协同能力培养提出的新要求。

1 建设需求

1.1 “旗舰”医院建设对中医药传承创新教学提出新要求 “旗舰”医院建设旨在以中西医协同医疗模式创新为牵引,统筹推进重点优势专科建设、人才培养、科研能力提升与信息化建设,打造兼具诊疗示范、人才培养和模式推广功能的高水平平台。这表明,中医药传承创新教学并非“旗舰”医院建设的附属内容,而是支撑中西医协同诊疗能力形成和协同模式推广的重要基础。尤其在综合性医院背景下,其培养对象既包括接受西学中培训的现代医学背景的西医医师,也包括需要强化协同诊疗视野与整合能力的中医高年资医师,因此教学体系不能局限于传统理论传授或单项技能训练,而应更加注重名老中医经验传承、中西医协同思维建构及真实临床场景中的综合能力培养。

1.2 传统教学模式难以满足中西医协同育人需求 传统教学模式在中医药传承创新与中西医协同能力培养方面存在明显局限。一方面,名老中医经验具有较强的情境性、个体性和隐性知识特征,其辨证思路、遣方逻辑和随诊调整过程难以通过常规课堂或碎片化教学资源得到系统呈现;另一方面,中西医协同门诊、联合查房、联合MDT及中医适宜技术应用等教学内容,往往涉及多角色参与、多维信息整合与动态决策过程,传统讲授、跟诊抄方或单次示教难以实现连续化、可重复和可评价的训练,

因而难以充分满足西学中培养对象及中医高年资医师(学员)对协同思维建构和复杂场景能力提升的需求。

1.3 既有元宇宙平台为特色版块建设提供基础
“复旦中山惠生智育”元宇宙平台已在知识组织、虚拟场景构建、智能交互和过程留痕等方面形成一定基础,为中医药传承创新教学版块建设提供了重要支撑。依托既有平台,可进一步将名老中医工作室、中西医协同门诊、联合查房、联合MDT及中医适宜技术应用等真实教学需求转化为可沉浸、可交互、可追踪的数字化教学场景,从而推动中医药传承、中西医协同诊疗训练与形成性评价的有机整合,为“旗舰”医院背景下构建更加系统、连续和可推广的中医药特色教学体系提供数字化载体。

2 建设逻辑

中医药传承创新教学版块,是在前期已构建的元宇宙医学知识生态系统、元宇宙虚拟教学场景、综合教学智能体和全周期教学管理中枢四大平台版块基础上,遵循“平台底座赋能—特色版块承载—协同能力导向”的建设逻辑,围绕名老中医工作室元宇宙教学模块、中西医协同虚拟门诊模块、中西医联合查房/MDT模块和中医适宜技术与情境训练模块4个核心模块进行设计,形成具有中医药特色、协同导向和场景驱动特征的教学子系统。

3 版块设计

3.1 名老中医工作室元宇宙教学模块 (1)依托元宇宙医学知识生态系统,沉淀名老中医经验与传承资源。围绕名老中医经典医案、诊疗思路、证候辨析要点、治法治则、方药加减规律及随诊调整经验,构建可持续积累、动态更新的中医药传承知识资源库,为教学内容组织、经验表达和案例复用提供基础支撑。(2)依托元宇宙虚拟教学场景,重建名老中医工作室与跟师学习环境。通过数字化重构名老中医工作室、门诊接诊、带教讨论和跟师侍诊等真实教学场景,将传统门诊抄方、跟师学习、医案复盘等过程转化为可沉浸体验、可反复进入的教学空间,增强中医药传承教学的情境性与连续性。(3)依托综合教学智能体,提供数字导师与辨证推演支持。围绕病机分析、证候判断、方药选择和治疗调整等关键环节,构建数字导师、智能问答和辨证推演辅助功能,为学员提供交互式学习支持,帮助其更好地理解名老中医临证思路与诊疗逻辑。(4)依托全周期教学管理中枢,实现学习留痕与形成性评

价。对跟师过程、学习频次、交互记录、思维轨迹、反思内容和阶段性表现进行过程留痕与综合评价,形成可追踪、可分析、可反馈的学习证据链,为中医药传承教学的持续改进和个性化指导提供依据。

3.2 中西医协同虚拟门诊模块 (1)依托元宇宙医学知识生态系统,构建中西医协同门诊知识资源。围绕中西医协同门诊常见病种、典型证候、诊疗路径、辨病与辨证结合要点、协同干预策略及随访管理要求,构建兼具现代医学诊疗逻辑与中医辨证论治特点的知识资源体系,为门诊教学脚本设计、病例调用和方案训练提供内容支撑。(2)依托元宇宙虚拟教学场景,重建中西医协同门诊诊疗流程。通过数字化复现接诊问诊、体征采集、辅助检查判读、四诊信息获取、证候分析、协同处置和健康宣教等真实门诊过程,将传统中西医协同门诊中难以重复、难以标准化呈现的教学内容转化为可沉浸、可反复练习的情境化教学空间,增强学员对协同门诊完整流程的理解与把握。(3)依托综合教学智能体,强化协同诊疗决策支持。围绕病史采集提示、辨证思路引导、诊疗方案比对、用药逻辑解释及医患沟通训练等环节,构建智能问答、数字患者和方案推演辅助功能,帮助学员在现代医学诊断框架与中医辨证框架之间建立有效衔接,提升其对协同门诊诊疗思维和整合决策过程的理解。(4)依托全周期教学管理中枢,实现门诊学习过程评价与能力画像。对学员在协同门诊场景中的问诊表现、四诊采集完整性、辨证分析质量、协同方案制定能力及沟通表现进行全过程留痕与形成性评价,逐步形成反映中西医协同临床思维、门诊处置能力和综合沟通能力的学习画像,为分层培养和持续改进提供依据。

3.3 中西医联合查房/MDT模块 (1)依托元宇宙医学知识生态系统,构建中西医联合查房/MDT知识资源。围绕住院患者管理、典型疑难病例、多学科会诊流程、中西医协同干预路径及疗效评估要点,系统整合病种知识、证候演变特征、查房重点、会诊模板及共识形成依据,形成支撑联合查房与MDT教学的结构化知识资源体系,为病例设计、角色分工和方案讨论提供基础支撑。(2)依托元宇宙虚拟教学场景,重建联合查房与MDT协同决策空间。通过数字化重构病房查房、病例汇报、会诊讨论和方案复盘等真实场景,将传统教学中时机有限、参与人数受限、复盘困难的联合查房与MDT过程转化为可多次进入、可角色切换、可跨地域同步参与的沉浸式教学空间,使学员能够更直观地理解复杂病例中中西医协同决策的动态过程。(3)依托综合教学智能

体,强化复杂病例分析与协同讨论支持。围绕病例要点提炼、证候变化提示、治疗方案比较、关键决策节点提醒及讨论过程辅助,构建智能摘要、交互问答和决策推演支持功能,帮助学员在复杂信息条件下提升对病情演变、中西医结合干预时机和多学科协作逻辑的把握能力。(4)依托全周期教学管理中枢,实现团队协作评价与过程复盘。对学员在联合查房与MDT场景中的角色参与度、病例分析质量、协同决策表现、团队沟通能力和复盘反思情况进行全过程留痕与综合评价,形成兼顾个体能力与团队协作的学习证据链,为复杂临床场景中的协同育人提供评价支撑。

3.4 中医适宜技术与情境训练模块 (1)依托元宇宙医学知识生态系统,构建中医适宜技术教学资源。围绕中医适宜技术的理论基础、适应证与禁忌证、操作规范、常见风险点及临床协同应用路径,系统整合相关知识内容,形成兼顾理论认知、操作原则与临床决策的教学资源体系,为技术教学内容组织和训练脚本设计提供基础支撑。(2)依托元宇宙虚拟教学场景,重建中医适宜技术应用环境。通过将中医适宜技术嵌入门诊、病房、康复及症状管理等真实临床场景,重构技术应用前评估、操作实施、疗效观察和安全管理等过程,使学员不再孤立地学习操作步骤,而是在具体情境中理解技术选择、实施时机和协同应用逻辑,增强技术教学的情境性与临床贴近性。(3)依托综合教学智能体,强化技术应用决策与规范提示。围绕适宜技术选择、适用人群判断、操作要点提醒、风险预警及治疗后管理等环节,构建智能引导和交互辅助功能,帮助学员在掌握技术基本规范的基础上,进一步理解不同临床情境下中医适宜技术与整体治疗方案之间的关系。(4)依托全周期教学管理中枢,实现技术训练过程管理与能力评价。对学员在情境训练中的操作流程完成度、规范性、安全意识、适应证判断能力及综合应用表现进行全过程记录与评价,形成反映中医适宜技术学习质量和临床应用能力的学习画像,为后续分层培训和持续改进提供依据。

4 内部联系

中医药传承创新教学板块的4个核心模块并非彼此割裂、平行并置的功能单元,而是在既有元宇宙平台底座支持下,围绕中医药传承、中西医协同诊疗训练和能力评价逐步递进、相互衔接的教学链条。(1)名老中医工作室元宇宙教学模块主要承担中医药知识传承与师承经验沉淀功能,是整个版块

的知识源头与传承起点;(2)中西医协同虚拟门诊模块则在此基础上进一步将名医经验、中医辨证思维与现代医学诊疗流程相衔接,使学员在门诊情境中训练辨病与辨证相结合的协同诊疗能力;(3)中西医联合查房/MDT模块则将训练场景由门诊延展至住院管理和复杂病例综合决策,强化学员在多学科参与和动态病情演变背景下的协同分析与整合判断能力;(4)中医适宜技术与情境训练模块则贯穿门诊、病房和康复等不同临床环节,为中医特色干预方式的规范应用与协同使用提供具体训练支撑。由此,4个模块共同形成了“传承资源沉淀—门诊协同训练—复杂病例决策—适宜技术应用”的连续性教学路径。

5 示例性应用设想——以上海市名中医蔡定芳工作室元宇宙教学模块为例

5.1 依托元宇宙医学知识生态系统整合工作室传承资源 蔡定芳教授长期从事中医内科及中西医结合神经内科临床、教学与科研工作,在脑血管病、帕金森病、睡眠障碍、抑郁障碍等领域形成了较为鲜明的临床特色,并兼具上海市名中医、国家岐黄学者、中西医结合专家等多重学术身份。在知识组织层面,可围绕《中医与科学》《肾虚与科学》《中国医药学教程》《中国医药学理论基础》《中国方药医学》《病证结合传染病学》《病证结合神经病学》《病证结合内科学》《中西结合病理学》《南山书屋文集》等病证结合系列专著,以及《恽铁樵全集》《陆渊雷全集》《姜春华全集》《沈自尹全集》等中西医汇通流派著作,系统提炼其中关于中医理论基础、方药应用规律、病证结合方法、流派传承脉络和医案经验的核心内容。同时,将“恽铁樵中西医汇通流派代表人物萃谈”系列论文及《论病证结合临床诊疗模式》《病证辨治创建中国中西结合临床医学体系》等文章纳入知识库建设,围绕“流派谱系—学术思想—理论框架—代表病种—典型医案—核心方药—加减规律—随访调整”构建多层次知识单元,为后续虚拟场景生成、智能体训练与学习评价提供稳定支撑。

5.2 依托元宇宙虚拟教学场景重建工作室教学环境 以名老中医工作室真实教学环境为原型,重点重建专家门诊、门诊抄方、诊后讨论、病例复盘和连续随访等核心教学环节。其工作室教学资源本身包含较为完整的门诊记录、医案医话和临证体悟,能够为“首诊—复诊—调方—疗效观察”的连续病例链设计提供内容基础。在此基础上,可围绕脑血

管病、帕金森病、睡眠障碍等代表性病种构建沉浸式教学场景,将接诊问诊、四诊信息采集、现代医学检查结果判读、辨证分析、方药处置及诊后复盘等关键步骤嵌入统一教学流程。通过场景化重建,传统工作室中的门诊侍诊、抄方学习和医案讨论可转化为可进入、可反复、可复盘的元宇宙教学空间,从而增强名老中医经验传承的情境性、连续性和临床贴近性。

5.3 依托综合教学智能体表达病证结合与中西医汇通逻辑 蔡定芳学术体系的重要特征,在于以恽铁樵中西医汇通流派为学术渊源,以病证结合为临床主线,强调中医辨证论治与现代医学辨病体系的贯通应用。基于这一特点,可围绕流派学术谱系、病证结合理论、代表病种诊疗路径、核心方药运用原则和中西医协同时机构建数字导师、智能问答和辨证推演功能。学员可在模块中围绕“为何辨此病”“为何辨此证”“何以处方如此加减”“何时采用中西医协同干预”等问题开展交互式学习,并在典型病例推演中比较不同辨证与处置方案。通过智能体支持,蔡定芳工作室中原本依赖长期跟师和临床体悟逐步形成的辨证论治逻辑与中西医汇通方法,可转化为可追问、可推演、可比较的数字化学习过程,进一步提升学员对病证结合思维和协同决策逻辑的理解深度。

5.4 依托全周期教学管理中枢支持工作室教学转化与分层培养 依托教学管理中枢,可对学员在工作室模块中的经典阅读路径、病例练习、辨证选择、方药分析、交互提问和反思记录进行全过程留痕,并据此形成多维学习证据链。针对不同类型学员,可设置差异化训练任务与评价重点:对西学中培养对象,重点强化中医理论理解、辨证分析与病证结合能力;对中医高年资医师,重点强化现代医学流程衔接、复杂病例协同决策和跨学科沟通能力。通过过程管理与分层评价,工作室教学可由传统经验性传授进一步转向结构化、可评价和可推广的数字化教学模式。

6 讨 论

6.1 从元宇宙总平台到中医药传承创新教学板块的专题化延展 中医药传承创新教学板块是在既有“复旦中山惠生智育”元宇宙平台总体架构基础上的专题化拓展,而非独立于前期平台之外的重复建设。前期平台已形成“元宇宙医学知识生态系统—元宇宙虚拟教学场景—综合教学智能体—全周期教学管理中枢”的总体框架,并在单一教学单元中

验证了四大板块的协同运行路径。在此基础上,面向中西医协同“旗舰”医院建设进一步构建中医药传承创新教学板块,有助于将前期主要服务现代医学教育的元宇宙底座能力,进一步转化为服务中医药传承、中西医协同育人和特色场景训练的专题化教学功能,从而实现由平台底座建设向特色教学功能落地的深化推进。

6.2 教学版块建设应立足中山医院优势专科、优势病种与多学科协同基础“旗舰”医院 建设强调围绕中西医结合医疗模式创新,统筹推进重点专科建设、人才培养、科研能力提升与信息化建设,并围绕优势病种形成临床、教学与科研相衔接的发展路径。中山医院在心脏、肝脏、肾脏、肺脏、消化道、泛血管等领域具有突出的学科优势,拥有多个国家级高能级科创与诊疗平台,同时院内已成立近40个以疾病为中心的多学科临床诊疗中心,并为国家中西医协同“旗舰”医院试点单位,设有3个国家中西医协同“旗舰”科室。基于这一基础,中医药传承创新教学版块建设不宜停留于一般化、普适化设计,而应按照“优势专科牵引、优势病种聚焦、真实场景嵌入、协同机制支撑”的思路推进,优先围绕中医药介入基础较好、协同诊疗需求较明确、教学资源较为集中的领域开展专题化组织,将名老中医工作室教学资源与医院真实专科场景、多学科协同机制和优势病种路径相衔接,从而提升教学模块的针对性、真实性和可推广性。

6.3 “病证结合”与“中西医汇通”可构成教学版块的重要学术主轴 中医药传承创新教学版块的建设,不仅需要技术平台支撑,也需要明确的学术主轴加以统领。以上海市名中医蔡定芳工作室为例,其著作体系涵盖中医基础理论、方药医学、病证结合临床学科与名家全集整理,相关研究又系统梳理恽铁樵、陆渊雷、姜春华、沈自尹等恽铁樵中西医汇通流派代表人物,并围绕“病证结合临床诊疗模式”和“病证辨治创建中国中西结合临床医学体系”等主题展开论述。在“旗舰”医院背景下,中医药传承创新教学版块的内容组织不宜局限于名老中医经验的数字化保存,而应进一步将流派思想、病证结合方法和中西医汇通逻辑转化为可组织、可推演、可评价的教学内容,从而增强“传承”与“协同”在同一教学体系中的内在一致性。

6.4 中医适宜技术模块可拓展为教学、研发与临床转化并重的功能单元 相关政策已将中药药事服务能力建设、传统中医康复区建设和中医治未病服务能力建设纳入“旗舰”医院内涵建设重点。在此基

础上,中医适宜技术模块可围绕针刺、热奄包、艾灸、推拿、耳穴压豆、拔罐等技术,构建涵盖适应证、禁忌证、操作规范、风险点及临床路径嵌入的教学与知识体系。结合中山医院中医科实际,近年来以科主任侯风刚教授等为代表的中医团队持续推进针灸、热奄包等中医适宜技术的临床应用与拓展,为相关技术的情境化教学、流程化训练和标准化转化提供了现实基础。基于此,中医适宜技术模块的建设应由单项操作训练进一步拓展至适用场景识别、协同应用路径构建、规范流程形成与教学转化支持等层面。

6.5 中西医联合查房/MDT模块具有探索性与牵引性双重价值 中西医联合查房/MDT的制度化、规范化开展,是“旗舰”医院建设的重要内容之一。现行建设要求已明确提出,应将中西医联合查房、会诊纳入医院管理制度,并建立中西医协同发展机制和多学科诊疗体系。但从综合性医院实际出发,此类协同模式在组织流程、角色分工、实施口径和教学评价等方面仍处于逐步探索和持续完善阶段。因此,中西医联合查房/MDT模块的元宇宙化建设,不仅具有教学模拟意义,也具有流程预演、路径统一和规范牵引意义。通过在虚拟场景中预设病例链、角色任务、决策节点和评价规则,有助于为现实中的联合查房/MDT提供训练、复盘与优化空间,从而为中西医协同教学和临床协同机制建设提供前期支撑。

6.6 教学版块建设有望成为“旗舰”医院育人模式升级的重要抓手 “旗舰”医院建设同时承担诊疗示范、人才培养和模式推广等多重任务,相关验收指标亦覆盖人才培养、学科建设、团队建设和标志性成果等方面。在此背景下,中医药传承创新教学版块的建设意义不仅体现在单一教学环节优化层面,更体现在对综合性医院中西医协同育人模式的整体支撑作用。由此,教学版块建设可望成为“旗舰”医院背景下中西医协同育人体系升级的重要抓手。

综上所述,中医药传承创新教学版块是在既有“复旦中山惠生智育”元宇宙平台总体架构基础上的专题化拓展,有望将名老中医经验传承、中西医

协同门诊、联合查房/MDT及中医适宜技术等典型教学需求,转化为可组织、可沉浸、可交互、可评价的数字化教学场景,从而为中西医协同“旗舰”医院背景下中医药传承创新教学模式构建提供新的实践路径。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

作者贡献 张雯:论文具体构思与撰写;侯风刚:论文框架指导;杨云柯,蔡定芳,朱雯,杨峰:文献收集整理;向军,王翔宇:论文审核与优化;余情:论文整体设计与修改。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张文利,陈晨,孙雪,等. 医学教育元宇宙的设计开发与应用[J]. 中国数字医学, 2025, 20(10):83-90.
- [4] 涂子行,孟晓凡,翁旭荣,等. 元宇宙平台与Kolb学习风格在提升住院医师临床胜任力中的研究[J]. 中国毕业后医学教育, 2025,9(04):258-261+272.
- [5] 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.
- [6] 国家中医药局综合司,国家发展改革委办公厅,国家卫生健康委办公厅. 关于印发《中西医协同“旗舰”医院建设试点项目管理办法》的通知[EB/OL]. (2023-05-24)[2026-03-10]. <http://www.natcm.gov.cn/zxyjhyssmzyys/zhengcewenjian/2023-06-20/31002.html>.
- [7] 国家中医药管理局,国家数据局. 关于促进数字中医药发展的若干意见[EB/OL]. (2024-08-14)[2026-03-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6968519.html.
- [8] 石娜,夏庆. 中西医协同“旗舰”医院中医人才培养策略与实践探索[J]. 四川中医, 2025, 43(8):198-203.
- [9] 朱芳仪,翟理祥,张慧,等. 我国中西医协同“旗舰”医院建设现状与路径探析[J]. 中国医院管理,2024,44(6):30-33.
- [10] 徐志林,苏锦英. 中西医协同“旗舰”科室建设评价指标体系的构建[J]. 中医药管理杂志, 2024, 32(22):194-198.

引用本文

张雯,侯风刚,杨云柯,等. 基于“复旦中山惠生智育”元宇宙平台的中西医协同“旗舰”医院中医药传承创新教学版块构建设想[J]. 元宇宙医学,2026,3(2):132-137.

Zhang W, Hou F G, Yang Y K, et al. A conceptual framework for constructing an innovative teaching module for traditional chinese medicine inheritance in a collaborative “flagship” hospital integrating chinese and western medicine based on the “huisheng intelligent education” metaverse platform[J]. Metaverse Med,2026,3(2):132-137.

DOI:10.61189/559198tidrry

· 医学教育 ·

精准教育背景下医学教育治理数字孪生的构想与路径



张雯¹, 张敏¹, 马畅畅¹, 张梦瑶¹, 魏丽萍¹, 黄家祺¹, 王翔宇¹, 郑玉英¹,
余情^{1,2,3*}

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康复医学科, 上海 200032
3. 上海市老年医学中心康复医学科, 上海 201104

[摘要] 精准医学教育持续推进背景下, 教学医院医学教育治理已由传统经验型管理逐步走向数据支持型管理, 但现有模式整体上仍主要停留于教育证据链形成、画像分析和风险预测阶段, 对于干预后果推演、治理方案比较及系统级优化的支撑相对不足。基于此提出“医学教育治理数字孪生 (medical education governance digital twin, MEGDT)”概念, 并通过结合数字孪生相关理论、教学医院数据治理实践及国际前沿案例, 讨论 MEGDT 的概念内涵、实现构想及其治理价值。MEGDT 的潜在价值不仅在于提升医学教育治理的动态感知、推演和反馈能力, 还在于为教学医院在培养效果、资源投入、组织效率与教育公平之间寻求更优平衡提供决策支持。当前, MEGDT 仍处于概念提出与路径探索阶段, 后续宜围绕毕业后医学教育等场景开展最小可行原型研究, 并同步关注数据质量、模型可信度、隐私安全及成本效果平衡等问题。

[关键词] 精准医学教育; 数字孪生; 医学教育治理; 循证决策

[中图分类号] R 192 **[文献标志码]** A

Conceptualization and pathways of the medical education governance digital twin in the context of precision education

Zhang Wen¹, Zhang Min¹, Ma Changchang¹, Zhang Mengyao¹, Wei Liping¹, Huang Jiaqi¹, Wang Xiangyu¹, Zheng Yuying¹, Yu Qing^{1,2,3*}

1. Department of Education, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China
2. Department of Rehabilitation Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China
3. Department of Rehabilitation Medicine, Shanghai Geriatric Medical Center, Shanghai 201104, China

[Abstract] In the context of the ongoing advancement of precision medical education, governance in medical education within teaching hospitals has gradually shifted from traditional experience-based management to data-supported management. However, current approaches still largely remain at the stages of educational evidence-chain construction, profiling analysis, and risk prediction, with relatively limited capacity to support intervention consequence simulation, governance strategy comparison, and system-level optimization. Against this background, the concept of the medical education governance digital twin (MEGDT) is proposed. By integrating digital twin theory, data governance practices in teaching hospitals, and international frontier cases, this paper discusses the conceptual connotation, implementation framework, and governance value of MEGDT. The potential value of MEGDT lies not only in enhancing the dynamic perception, simulation, and feedback capabilities of medical education governance, but also in providing decision support for teaching hospitals to achieve a better balance among educational effectiveness, resource input, organizational efficiency, and educational equity. At present, MEGDT remains at the stage of conceptual proposal and pathway exploration. Future work should prioritize minimum viable prototype studies in scenarios such as postgraduate medical education, while also addressing data quality, model credibility, privacy and security, and cost-effectiveness balance.

[Key Words] precision medical education; digital twin; medical education governance; evidence-informed decision-making

[收稿日期] 2026-04-01

[接受日期] 2026-05-06

[基金项目] 上海市卫生健康委员会 2026 年卫生健康行业发展课题 (定向类) (2026HP30), 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 Municipal Health Commission Health Industry Development Project (Directed Category) (2026HP30), Shanghai Shenkang Hospital Development Center Management Research Project (2025SKMR-21), Higher Education Science Research Planning Project (24CX0201), Zhongshan Hospital, Fudan University Management Science Fund (2024ZSGL14), Zhongshan Hospital, Fudan University Medical Humanities and Ideological-Political Education Research Project (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

近年来,胜任力导向医学教育(competency-based medical education, CBME)在全球范围内逐步由能力框架建构走向临床真实场景中的实施与验证。2025年《新英格兰医学杂志》述评^[1]指出,CBME的关键已不再局限于能力框架本身,而在于如何将能力培养更紧密地嵌入患者照护与日常诊疗流程之中。在此基础上,2026年《新英格兰医学杂志》述评^[2]进一步提出通过人工智能(artificial intelligence, AI)贯通医学院校教育、毕业后教育和继续教育各阶段的多源数据,识别学习者在知识、技能和沟通等方面的关键缺口,并通过定向轮转、病种补充、模拟训练、强化督导与持续反馈等,推动医学终身学习由统一路径走向更精准的动态支持^[2]。精准医学教育(precision medical education, PME)的核心^[3-6]并不在于单纯增加教育精细度,而在于借助纵向、多源、动态数据,实施持续识别、精准干预与反馈迭代,从而改进教育、临床和系统层面的结果。

对于教学医院而言,承担医学院校教育、毕业后教育和继续教育等多阶段任务,学习者来源异质、培养路径复杂、临床实践机会不均、评价节点密集,且教育教学过程与临床诊疗、科研发展和组织管理深度耦合。由此,PME在教学医院中的落地,已不只是个体教学优化问题,而是一个涉及复杂系统的科学治理问题。在此背景下,数字孪生^[7]作为一种集动态映射、预测分析和决策支持于一体的新兴技术,其强调的持续更新、前瞻预测与决策优化能力,恰可为PME在教学医院复杂场景中的治理落地提供新的方法学参照。本文拟对“精准教育背景下医学教育治理数字孪生”这一概念的提出背景、演进路径、核心能力、关键应用场景与实施路径进行初步讨论,以期在教学医院智慧治理中枢建设提供一种可能的分析框架。

1 PME模式下的治理挑战

1.1 PME对教学医院治理提出的新要求 PME强调基于纵向、多源、动态数据识别学习者差异,并据此实施更有针对性的培养支持,其目标不仅在于提升个体学习效果,也在于推动项目和组织层面的持续改进。与传统相对均质化、时间框架主导的培养模式相比,PME的推进意味着教育治理需要同时具备:(1)持续汇聚和整合多源数据的能力;(2)识别学习者差异和形成阶段性支持策略的能力;(3)对高风险对象进行前移预警的能力;(4)围绕有限资源开展动态配置和治理优化的能力。换言之,PME

模式下的医学教育治理,不再只是把培训流程管好,而是要逐步形成一种能够面向差异、响应变化并支撑优化决策的精准治理体系。

1.2 数据驱动治理的现实进展 (1)证据链形成:在PME持续推进的背景下,教学医院医学教育管理已由传统经验型管理逐步走向数据支持型管理。近年来,围绕教育数据底座建设、学习者画像、基地画像、成长报告、风险预警和教学数据平台等方面的探索不断增多,教育治理的数字化水平明显提升。尤其在医学教育三阶段即院校教育、毕业后教育和继续教育的多源数据开始被纳入统一治理视野,原本分散于不同阶段和不同系统中的数据逐步形成连续的教育证据链。这使管理者能够较系统地回答“有哪些人”“学习了什么”“结果如何”等基础问题,也为后续更深层的分析奠定了数据基础。(2)画像分析:借助纵向数据,学员画像不仅能够呈现学习者的基本特征,还可以描述其培养轨迹、成绩变化、能力短板和阶段性风险变化;基地画像则能反映不同专业基地在培养质量、学员表现、资源供给和运行特征上的差异。其核心价值,在于帮助管理者回答“谁存在差异”“差异表现在哪里”“风险可能集中于哪些对象或环节”等问题,从而把教育治理由笼统判断推进到分层识别。(3)模型预测:进一步基于过程数据对未来风险进行前移判断,包括对学员培养结果、阶段性达标风险及潜在能力短板的预测分析,强调回答“谁未来更可能出现风险”“哪些问题需要优先干预”等前瞻性问题。

1.3 国际前沿治理水平实例 以纽约大学格罗斯曼医学院^[8-9]为例,其依托医学院与医院一体化管理模式,建设覆盖临床医疗、医学教育、科研及管理的全方位仪表盘系统,实现全系统、全领域、各层级的数据互联互通;在此基础上,进一步发展个性化智能课程平台、临床模拟训练系统、全流程教学评估及管理系统等。其DX Mentor平台可联通电子病历系统与数字化教育资源,基于患者诊断信息为学生实时推荐研究论文、临床指南、病例分析及诊疗方案,并推送个性化学习指引;其NYUTron模型则利用大规模电子病历数据开展临床预测分析;相关系统还可追踪医学生进入临床见习及毕业生进入住院医师规范化培训阶段后的临床表现与胜任力指标。总体而言,这类实践已明显超越单纯静态画像,进入“数据整合—画像分析—模型预测—个性化支持”的中高阶阶段,代表了当前国际教学医院医学教育数字化治理的前沿水平。

1.4 从识别走向推演的关键缺口 在PME模式下,

现有治理模式仍存在待改进缺口:(1)已较擅长“识别问题”,但对“若在当前节点实施某种干预,未来可能出现何种变化”这一类前瞻性问题的支撑相对不足。(2)现有数据分析多集中于差异识别、风险提示和结果呈现,对不同培养策略、支持路径或资源配置方案之间的潜在效果比较,仍缺乏系统化模拟与推演机制。(3)在复杂教学医院场景中,学员培养、基地运行、资源供给和治理决策之间存在明显联动关系,而现有治理模式在系统级联动优化方面的支撑仍较有限。基于此,教学医院医学教育治理有必要在现有基础上进一步探索新治理技术,以回应PME模式下由“识别差异”走向“推演未来”和“优化系统”的需求。

2 医学教育治理数字孪生的构想与实现路径

2.1 数字孪生作为PME治理工具的理论契合 数字孪生最初源于工程与复杂系统管理领域。美国国家科学院、工程院和医学院在2024年报告^[7]中指出,数字孪生是对自然、工程或社会系统的虚拟信息构造集合,能够模拟其结构、情境与行为,并由真实系统数据动态更新,具备预测能力,且能够支持实现价值的决策;虚拟与物理之间的双向交互是数字孪生的核心。这一定义提示数字孪生是一种集动态映射、预测分析和决策支持于一体的系统形态。从这一意义上说,数字孪生所强调的持续更新、前瞻预测与决策优化能力,恰可为PME在教学医院复杂场景中的治理落地提供新的方法学参照。

2.2 医学教育治理数字孪生的概念 需要强调的是,本文所讨论的数字孪生,并非面向理论或技能训练的教学内容型数字孪生,而是面向教学医院教育管理与治理场景、服务于精准教育实施的治理型数字孪生。基于此,本文尝试将“医学教育治理数字孪生(medical education governance digital twin, MEGDT)”界定为:以教学医院医学教育运行体系为对象,基于多源异构数据构建学员、培养过程、专业基地、教育资源与组织运行的动态数字映射,并通过持续监测、差异识别、风险预警、情景推演和决策优化,支撑精准教育实施与教育治理改进的新型技术体系。

2.3 MEGDT的属性 借鉴数字孪生核心特征的概括^[7],MEGDT应具备以下基本属性:(1)面向特定教育运行对象,而非抽象平均人群;(2)能够基于教育运行过程中的真实数据持续更新;(3)具有预测、预警或情景推演能力,并能够进一步支持培养优化与治理决策;(4)现实教育运行中的决策与反馈结果

能够反过来影响后续数据采集、模型修正与系统运行。由此可见,MEGDT更接近一种服务于教育运行、培养优化与组织治理的复合型系统形态。

2.4 MEGDT的实现构想 MEGDT实现路径可考虑遵循“由基础到高级、由局部到系统、由识别到优化”的渐进策略。(1)以三阶段贯通的数据底座为前提,建设稳定的数据集成层,围绕统一身份主索引、核心指标口径、教育事件结构化表达、跨系统数据映射和更新机制,形成可持续流动的教育证据链,为数字孪生提供连续、可信的数据输入。(2)在数据底座之上构建面向学员、师资、基地、资源与培养过程的虚拟表示层,使系统不再停留于阶段性报告生成,而能够形成伴随教育运行持续更新的动态镜像。(3)建设模型更新与校准机制,即通过持续数据回流,对镜像状态、风险判断和关键参数进行动态修正;从方法学看,这一环节实质上是数字孪生区别于静态画像和一次性预测模型的关键所在。(4)在此基础上发展情景推演与仿真层,使系统能够围绕轮转优化、督导、补训、资源倾斜等治理动作,对不同方案进行前瞻性模拟与结果比较,从而支持管理者回答“若现在采取某种干预,未来可能发生什么变化”这一类关键问题。(5)进一步建立治理输出与反馈层,将风险识别、情景推演和方案比较结果转化为可执行的治理建议,并在干预实施后利用新数据对模型进行再训练、再校准和再评价,逐步形成“动态镜像—风险预警—情景推演—决策反馈—模型修正”的持续闭环。

3 MEGDT的治理新能力及其循证优化价值

3.1 MEGDT的治理新能力 相较于现有以证据链、画像分析和风险预警为主的数据驱动治理模式,MEGDT的新增价值在于其有望形成一种更高阶的治理新能力,包括(1)在持续数据更新基础上形成可动态感知的教育运行镜像,不再仅依赖阶段性状态呈现;(2)围绕轮转优化、督导、补训和资源倾斜等治理动作开展前瞻性方案比较,使治理由“识别问题”进一步走向“试算改法”;(3)将学员、基地、资源与组织运行纳入同一分析框架,提升跨层级联动诊断能力;(4)在干预实施后持续追踪结果变化,对策略和模型进行反馈修正,使教育治理逐步形成“实施—反馈—校正”的持续迭代机制。由此,MEGDT所指向的,不再只是更精细的状态识别工具,而是一种能够整合动态镜像、方案比较、联动诊断和反馈优化的高阶治理形态。

3.2 MEGDT的循证优化价值 MEGDT意义并不止

于提升医学教育治理的技术能力,还在于为教学医院教育决策提供一种更具循证特征的分析框架。PME已被界定为一种利用数据与技术改进个体化、效率与学习者能动性的系统性教育框架,其作用对象不仅包括个体学员,也包括项目和组织层面的持续改进。因此,在教学医院场景中,治理选择往往并非单纯的教学问题,而是同时涉及培养效果、资源投入、组织效率与教育公平的综合平衡。无论是高风险学员补训、基地督导强化、轮转结构调整还是师资投入增加,管理者真正需要回答的,不只是“哪种方案可能有效”,还包括“哪种方案在现实资源约束下更值得优先实施”“其增量收益是否足以覆盖新增投入”“不同策略在效率与公平之间如何权衡”。已有卫生职业教育研究^[10]提示,教育决策中的成本、价值和成本意识判断不应被忽视,而应成为资源配置讨论的重要组成部分。从这一意义上说,MEGDT可被进一步理解为一种面向循证治理与资源优化配置的决策支持工具,其潜在价值不仅在于预测和推演,更在于支持教学医院在培养效果、资源投入、组织效率与公平性之间寻求更优平衡。

4 讨 论

本文提出的MEGDT并非对数字孪生概念的简单移植,而是试图在PME持续推进背景下,为教学医院复杂场景中的教育治理提供一种新的分析框架。相较于现有围绕教育证据链、画像分析和风险预警展开的数据驱动治理模式,MEGDT的关键意义不在于进一步增加数据规模或叠加技术标签,而在于推动教育治理由阶段性识别走向持续更新,由风险发现走向方案比较,由局部判断走向系统联动,由经验决策走向循证优化。国际前沿实践表明,教学医院已可推进至数据整合、个性化支持和预测分析的中高阶阶段,但面向干预后果推演、治理方案比较、反馈校正与资源优化平衡的治理型数字孪生,整体上仍处于探索之中。就此而言,MEGDT更适合被理解为一种值得提出和前瞻布局的治理概念,而非已经成熟定型的现成系统。

综上所述,MEGDT所指向的,不是脱离现实的

技术想象,而是教学医院医学教育治理在证据链、画像分析和预测模型基础上进一步走向动态推演、方案比较与循证优化的可能方向,也为本土医学教育三阶段贯通背景下医学教育治理能力的进一步升级提供了新的思考框架。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

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、黄家祺:文献收集整理;王翔宇、郑玉英:论文审核与优化;余情:论文整体设计与修改。

参考文献

- [1] Iyer A A, Dubosh N M, Schwartzstein R M. Competency-based medical education at the front lines of patient care[J]. *N Engl J Med*, 2025, 393(15): 1548.
- [2] Desai S V, Khan S, Lomis K. AI-enabled precision-education systems—transforming lifelong learning in medicine[J]. *N Engl J Med*, 2026, 394(9): 838–841.
- [3] Patocka C, Harper L, Ellaway R H. Focusing on “precision” in precision education [J]. *Acad Med*, 2025, 100(12): 1421–1424.
- [4] Triola M M, Burk-Rafel J. Precision medical education [J]. *Acad Med*, 2023, 98(7): 775–781.
- [5] Desai S V, Burk-Rafel J, Lomis K D, et al. Precision education: the future of lifelong learning in medicine [J]. *Acad Med*, 2024, 99(4S Suppl 1): S14–S20.
- [6] Burk-Rafel J, Drake C B, Sartori D J. Characterizing residents’ clinical experiences—a step toward precision education [J]. *JAMA Netw Open*, 2024, 7(12): e2450774.
- [7] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. Washington, DC: The National Academies Press; 2024.
- [8] 解静,刘久畅. 人工智能时代美国医学教育改革前沿案例分析及其启示[J]. *医学信息学杂志*. 2025, 46(8): 18–22.
- [9] Schaye V, Triola M M. The generative artificial intelligence revolution: How hospitalists can lead the transformation of medical education [J]. *J Hosp Med*, 2024, 19(12): 1181–1184.
- [10] Yaros J, Egbrink M O, Langenberg B, et al. Educator perspectives on costs and cost-conscious decision-making in health professions education: a Q-Method study [J]. *Adv Health Sci Educ Theory Pract*, 2026, 31(2): 619–640.

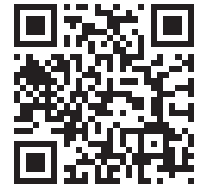
引用本文

张雯,张敏,马畅畅,等. 精准教育背景下医学教育治理数字孪生的构想与路径[J]. 元宇宙医学, 2026, 3(2): 138–141.
Zhang W, Zhang M, Ma C C, et al. Conceptualization and pathways of the medical education governance digital twin in the context of precision education [J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(2): 138–141.

DOI:10.61189/431884kthiqo

· 医学教育 ·

冠心病术后元宇宙沉浸式训练体系构建及教学模式研究

赵伟林¹, 张 雯², 余 倩^{2*}

1. 复旦大学附属中山医院康复医学科, 上海 200032

2. 复旦大学附属中山医院教育处, 上海 200032

[摘要] 冠心病患者血运重建术后规范化地进行康复训练,是改善患者心功能、提高运动耐力、改善预后的重要治疗方式。然而目前的心脏康复方式存在着训练场景单一、个体化方案把控不准、居家锻炼执行力缺乏等问题。近年来,随着人工智能技术的不断创新与成熟,具备中山特色的元宇宙虚实融合平台为打破康复训练瓶颈提供了新思路。本文依托元宇宙沉浸式交互技术与穿戴式动态心电图监测技术,拟构建适配冠心病患者血运重建术后规范化心脏康复的一体化干预应用体系,并明确该应用体系的实施流程、风险管控标准与临床适配规范。通过“体系构建、场景模块化设计、循证指南对标、教学分层建模”四法并驱的方式进行探讨。整体冠心病术后康复构架设计将分为虚拟现实(virtual reality, VR)沉浸式运动训练模块、穿戴式动态心电图实时采集模块、人工智能(artificial intelligence, AI)心电风险预警模块三大核心单元。根据冠心病患者术后功能状态划分康复分期,并以此建立个体化康复场景、分级运动干预标准、心电异常分级判定体系及应急处置流程。同时结合康复科临床教学需求,依托“复旦中山惠生智育”探讨可落地的专科教学转化模式,为后续临床正式开展该新型康复方案提供完整理论框架、技术路径与实践依据。

[关键词] 元宇宙;沉浸式运动训练;心脏康复;医学教学转化**[中图分类号]** R 541 **[文献标志码]** A

Research on the construction of metaverse-based immersive training system and teaching modes for postoperative coronary artery disease patients

Zhao Weilin¹, Zhang Wen², Yu Qing^{2*}

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

2. Education Department, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

[Abstract] Standardized rehabilitation training for patients with coronary artery disease following coronary revascularization surgery is a core therapeutic strategy to improve postoperative cardiac function, boost exercise tolerance and optimize long-term prognosis. However, mainstream cardiac rehabilitation methods currently suffer from three prominent limitations: monotonous training scenarios, poorly individualized regimen titration, and poor adherence to home-based exercise regimens. In recent years, alongside iterative advances and technical maturation in artificial intelligence (AI), the Zhongshan-specific metaverse platform featuring virtual-physical integration has offered novel insights into overcoming bottlenecks in cardiac rehabilitation training. Leveraging metaverse-based immersive interactive technology and wearable dynamic electrocardiogram (ECG) monitoring technology, this study aims to develop an integrated intervention system tailored to standardized cardiac rehabilitation for coronary artery disease patients post coronary revascularization. It further defines the system's implementation workflow, risk control protocols and clinical eligibility criteria. The research adopts four methodological approaches: system architecture development, scenario-based modular design, alignment with evidence-based clinical guidelines, and hierarchical competency-based teaching modeling. The postoperative cardiac rehabilitation framework consists of three core functional modules: virtual reality (VR) immersive exercise training, wearable real-time

[收稿日期] 2026-04-30**[接受日期]** 2026-05-29

[基金项目] 上海申康医院发展中心管理研究项目(2025SKMR-21),上海市卫生健康委员会2026年卫生健康行业发展课题(定向类)(2026HP30),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 Research Project of Shanghai Shengkang Hospital Development Center (2025SKMR-21), 2026 Health Industry Development Project (Targeted Program) of Shanghai Municipal Health Commission (2026HP30), Higher Education Scientific Research Planning Project (24CX0201), Management Science Foundation of Zhongshan Hospital, Fudan University (2024ZSGL14), and Medical Humanities and Ideological and Political Research Project of Zhongshan Hospital, Fudan University (SZ2024-4).

[作者简介] 赵伟林,博士,住院医师;E-mail: 1105971524@qq.com

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

dynamic ECG data acquisition, and AI-powered ECG risk early warning. Rehabilitation phases are stratified according to patients' postoperative functional capacity. On this basis, we established individualized immersive rehabilitation scenarios, graded exercise intervention thresholds, a tiered judgment system for ECG abnormalities, and standardized emergency response workflows. Meanwhile, to meet clinical teaching demands in cardiac rehabilitation departments, this study explores a sustainable specialty teaching transformation model supported by the *Fudan Zhongshan Huisheng Intelligent Education* platform. The findings will provide a comprehensive theoretical framework, technical roadmap and empirical evidence for the large-scale clinical translation of this innovative cardiac rehabilitation protocol.

[Key Words] metaverse; immersive exercise training; cardiac rehabilitation; medical teaching transformation

心血管疾病是全球范围内导致残疾和死亡的首要原因,对我国居民健康构成严重威胁^[1]。其中冠心病的发病率和死亡率呈逐年上升趋势^[1-2]。冠脉血运重建(包括经皮冠脉介入治疗和冠脉旁路移植术)是治疗冠心病的重要方式^[3-5]。然而冠脉血运重建术后,患者多发生活动耐力下降、危险因素控制不佳、感染、焦虑抑郁、谵妄等问题^[6-7]。不仅严重阻碍患者重归家庭和工作,且使社会经济负担加重、家庭劳动力损失^[8]。大量循证医学证据^[9-10]显示:冠心病患者冠脉血运重建术后规范化地进行心脏康复可显著改善患者运动耐力、恢复心功能、降低远期主要不良心血管事件发生率、提升远期生存质量。心脏康复是冠心病患者冠脉血运重建术后的核心治疗方式^[11-12]。

目前国内心脏康复已形成统一分期干预标准,院内Ⅰ期康复、居家Ⅱ期康复、社区长期维持Ⅲ期康复模式逐步普及^[11]。基于《中国冠心病心脏康复循证实践指南》及《中国心血管疾病患者居家康复专家共识》,中等强度有氧运动训练和阻抗运动训练成为常规心脏康复运动模式^[11,13]。冠心病术后心脏康复形成了分期明确、运动统一的常规康复模式。但上述常规心脏康复模式在临床实际推行过程中存在诸多难以突破的现实短板:(1)康复运动形式单一、内容枯燥,中老年术后患者普遍存在运动恐惧、参与积极性不足问题,整体康复长期依从性偏低;(2)传统康复中心电监测多为阶段性定时检测,无法实现运动全程同步心电实时监控,对于运动负荷诱发的无症状心肌缺血、隐匿性室性心律失常等高危异常事件难以早期识别,运动康复安全阈值难以精准把控;(3)现有康复干预多采用同质化运动处方,缺少依据患者实时心脏电生理状态进行动态调整的个体化调控机制;(4)心脏康复专科人才培养体系尚不健全,青年医师普遍存在运动康复方案制定能力薄弱、运动负荷心电判读经验不足等问题,制约整体心脏康复规范化、智能化发展。

随着数字医疗、智慧康复产业快速发展,以VR/

AR沉浸式交互、虚拟场景构建、动作姿态捕捉为核心的元宇宙技术,逐步进入心脏康复临床应用领域^[14-17]。相较于传统康复模式,元宇宙沉浸式训练可通过多元化虚拟自然场景、休闲运动场景替代单一平地步行训练,具备趣味性强、场景贴近生活、心理疏导作用突出等优势,能够有效缓解冠心病术后患者焦虑情绪与运动抵触心理^[18]。穿戴式长时程动态心电监测设备日趋小型化、便携化、医用化,可实现全天候、全场景心电数据连续采集,搭配边缘端智能分析算法,可快速识别运动状态下各类心电异常改变,实现从“事后回顾分析”向“事中实时预警”转变^[19-21]。将二者进行技术融合,打造虚实结合、生理数据实时联动、风险动态可控的新型智慧心脏康复模式,成为现阶段心脏康复领域重要探索方向。目前国内极少有研究系统性完成二者联合应用的完整流程架构、分级实施标准、风险管控体系与院内教学转化模式一体化构建。

基于此,本文旨在提出一套完整、规范、符合临床指南、可直接落地执行的元宇宙+动态心电冠心病术后心脏康复应用实施方案,同时搭建配套医学教学转化体系,明确项目开展必备条件、人员配置、设备需求、实施步骤、安全管控要点,为早期实践提供全套标准化依据,从而发挥元宇宙心脏康复体系的临床实践指导价值与医学教育应用价值。

1 体系构建总体思路

本研究以临床实际应用落地为导向,严格遵循《中国冠心病心脏康复循证实践指南》、《中国心血管疾病患者居家康复专家共识》等心血管疾病心脏康复相关权威指南,整合元宇宙智慧康复硬件技术,依次完成:技术架构搭建→分期康复场景设计→动态心电监测标准建立→运动强度分级调控规范→三级风险预警与应急流程建立→院内医学教学转化模型构建→整体方案可行性综合论证,最终形成完整成套可执行应用体系。

1.1 模块化体系构建 将整体康复体系拆分为硬

件支撑模块、沉浸式训练场景模块、动态心电采集分析模块、临床康复管理模块、安全风险管控模块五大独立模块。五大模块分别进行单独设计,再完成模块之间数据互通、流程串联、指令联动,实现整体一体化协同运行。

1.2 场景分层设计 延续冠心病患者冠脉血运重建术后康复分期标准,依据冠心病患者术后恢复时间、心功能分级、运动耐受能力,划分早期、中期、后期三大康复阶段。针对不同的康复阶段,设计差异化虚拟沉浸式训练场景、运动时长、运动频率及活动强度,实现分层适配。平台构建成功后,初期适用患者需符合《中国冠心病心脏康复循证实践指南》I、II、III期康复指征,接受冠脉介入治疗或冠脉旁路移植术,术后病情稳定的冠心病患者,患者无视觉、前庭功能严重障碍,可耐受VR设备使用并且配合完成VR沉浸式训练及穿戴设备佩戴。

1.3 教学分层建模 按照实习医师、规范化培训医师、在职临床康复医师3类不同医师类型,分别设计基础型、提升型、实战型3类元宇宙心脏康复教学内容,建立理论学习、虚拟仿真操作、病例方案推演三级教学流程,完成教学转化模式定型。

2 元宇宙沉浸式训练联合动态心电监测心脏康复应用体系构建

2.1 整体四层协同技术架构搭建 目标是建立患者端数据采集、数据传输及智能分析研判、康复调控及终端医患管理“四位一体”的协同技术方案。(1)前端数据采集主要承担患者端数据采集及沉浸式场景体验功能,包含虚拟场景视觉沉浸、肢体运动姿态捕捉、穿戴式心电信号连续采集及生命体征同步固定,从而实现患者运动行为、心电活动、基础生命体征多源数据同步采集。(2)依托院内数据无线传输模式,实现前端采集所有运动数据、心电数据、体征数据实时上传,搭载元宇宙AI智能数据分析,保障运动过程中心电异常信号可快速完成传输与后台识别,满足临床实时风险监控基本需求。同步匹配预设运动康复安全阈值,完成自动化风险等级初步判定。(3)康复医师根据实时数据反馈结果,结合患者基础病情,调整患者运动强度及训练时长,切换沉浸式训练场景,实现个体化康复方案调控。(4)在医师终端层实现患者全程数据的康复档案管理,并进行康复阶段性评定。根据阶段性评定结果,微调康复方案,彻底改变传统统一化康复处方模式,实现精准化智慧康复。在患者终端层实现训练任务接收、虚拟场景体验、运动引导、健康知识推

送等基础功能。

2.2 冠心病患者血运重建术后元宇宙沉浸式康复场景标准化设计 核心是通过VR、AR技术构建逼真且可交互的模拟训练场景,以适用于不同康复阶段的患者。(1)早期康复阶段以躯体活动能力恢复及消除运动恐惧为核心目标。可设定虚拟病房舒缓活动场景、自然林间慢走场景、静水湖畔静坐放松场景、全身关节舒缓拉伸场景等。通过低负荷主被动运动,舒缓心理情绪和恢复躯体运动适应性。(2)中期康复阶段的主要目标是逐步提升躯体运动耐力、改善心肺储备功能。理想的模拟运动场景为城市休闲步道匀速步行、园林沉浸式太极康复训练、肢体协同运动、平缓坡道缓步上行。在动态心电全程监控的前提下,循序渐进提升活动量,逐步达到临床常规二期康复运动负荷标准。(3)后期康复为长期康复维持阶段。可通过虚拟户外休闲骑行、平缓山地徒步、轻量休闲互动运动等贴近日常生活的休闲运动模式,以期达到巩固康复效果、维持心肺功能状态、养成长期规律运动习惯。

2.3 动态心电监测临床应用标准建立 通过康复训练前静息基线心电采集、元宇宙沉浸式运动全程同步监测、运动结束后心脏恢复阶段连续监测,实现一次完整康复训练全流程心电全覆盖采集。结合心血管运动心电诊断标准,将运动过程中心电异常划分为轻度异常、中度异常、重度高危异常3个等级,明确各级初步干预原则,为后续自动化预警提供统一判定依据。

2.4 AI心电预警模块技术细节 (1)算法基础:采用基于卷积神经网络(CNN)+长短期记忆网络(LSTM)的混合深度学习模型,依托本院既往万余例运动心电数据完成模型训练与验证,专注识别运动状态下心肌缺血、各类室性心律失常、ST-T段异常等特征波形。(2)数据处理:穿戴设备采样频率250 Hz,实时降噪、去除运动伪影,保障复杂运动状态下心电信号有效性。

2.5 三级智能风险预警与临床应急处置流程建立 建立三级风险预警。一级轻度风险预警触及后系统自动语音提醒患者放缓运动节奏、调整呼吸模式,康复医师后台持续观察。二级中度风险预警后系统自动下调沉浸式训练运动强度,弹窗推送风险提示信息,康复医师场评估患者主观症状,决定是否终止运动,短时休息。三级重度高危风险预警时,系统立即自动终止所有沉浸式康复训练,同步向医护工作站推送高危预警信息,现场康复医师第一时间开展临床症状评估、生命体征监测,严格遵

循冠心病术后心血管不良事件应急流程完成处置,全面保障康复训练临床安全性。

2.6 VR设备相关核心安全性防控体系 针对中老年冠心病患者使用VR设备及运动训练的特有风险,建立专项防控方案,解决晕动症、跌倒、交感神经应激三大核心问题:(1)VR晕动症防控。设备选型:选用低延迟、高刷新率医用VR设备,降低视觉眩晕;场景优化:初期采用静态、低速、广角柔和场景,避免快速镜头切换、高空、旋转类画面;分级适应:首次使用单次时长 ≤ 10 min,逐步延长;若出现头晕、恶心,立即停止使用,休息观察。(2)跌倒风险防控。环境改造:院内训练区域铺设防滑软垫,移除障碍物;居家康复要求患者在固定座椅/扶手区域开展训练;姿态监测:依托动作捕捉技术,实时识别躯体失衡状态,及时语音提醒。(3)交感神经应激防控。场景规避:删除刺激、紧张类虚拟画面,全部采用自然、舒缓场景;体征联动:实时监测心率、血压,若心率较静息状态增幅超过50%,自动下调运动负荷。(4)通用应急流程:所有不良事件均同步记录入研究数据库,建立不良事件上报台账。

3 元宇宙心脏康复配套医学教学转化模式构建

3.1 教学转化总体定位 在“复旦中山惠生智育”元宇宙平台总体框架下,心脏康复可作为面向全周期医学教育的重要专科拓展方向,服务于院校医学教育、毕业后医学教育和继续医学教育不同阶段的教学需求。填补智能化心脏康复教学空白。院校医学教育重点掌握冠心病术后康复基础分期知识、熟悉沉浸式康复基本设备操作、识别常见康复期正常与异常心电图表现。毕业后医学教育要求熟练掌握运动负荷下心电图异常判读方法、独立完成基础沉浸式康复训练方案制定、掌握康复运动风险初步识别能力。继续医学教育的目标则是熟练应用整套联合康复体系运行流程、具备高危心电图风险研判能力、可独立完成个体化精准康复方案设计与不良事件处置。

3.2 全周期标准化教学实施流程 结合理论知识学习、元宇宙虚拟仿真实训、临床实操实践、教学过程管理与能力评价4个方面,实现全周期标准化心脏康复教学实施。(1)理论知识学习以《中国冠心病心脏康复循证实践指南》《中国心血管疾病患者居家康复专家共识》等心血管疾病心脏康复相关权威指南为基础,结合元宇宙智慧康复技术原理、穿戴式动态心电图临床应用价值、运动康复心血管风险防控要点开展系统化课堂教学,搭建扎实理论基础。(2)

依托元宇宙虚拟教学场景,虚拟标准化患者病例,模拟不同术后恢复阶段患者开展沉浸式康复模拟推演。使学员不再孤立地学习操作步骤,而是在具体情境中理解技术选择、实施时机和协同应用逻辑,增强技术教学的情境性与临床贴近性。(3)组织学员现场观摩整套联合康复模式完整实施流程,协助完成心电图数据整理、康复档案录入、阶段性康复效果汇总等基础工作,实现虚拟实训向真实临床场景平稳过渡。(4)依托全周期教学管理中枢,实现技术训练过程管理与能力评价。对学员在情境训练中的操作流程完成度、规范性、安全意识、适应证判断能力及综合应用表现进行全过程记录与评价,为后续分层培训和持续改进提供依据。

4 讨论

4.1 元宇宙沉浸式训练联合动态心电图监测体系的临床应用价值 在传统心脏康复模式发展进入平台期的背景下,本研究整合前沿数字医疗技术与经典心血管康复诊疗思维,搭建形成一套流程完整、标准统一、安全可控的新型智慧康复应用体系。该体系从患者体验层面,依靠多元化虚拟沉浸场景改善康复体验,缓解术后负面情绪与运动恐惧,从根源上提升康复主观参与意愿;从临床安全层面,依靠全程动态心电图实时监测,打破传统阶段性监测的局限性,实现运动康复风险早发现、早预警、早干预,最大程度规避运动诱发心血管不良事件;从康复精准性层面,建立心电图数据反向调控运动处方的运行逻辑,推动冠心病术后心脏康复从“经验型康复”向“数据驱动型精准康复”转型,契合当下智慧医疗、精准康复整体发展趋势。

4.2 元宇宙联合监测模式相较传统心脏康复的差异化核心优势 传统冠心病术后心脏康复长期存在训练场景单一、运动内容枯燥、中老年患者运动恐惧突出、长期康复依从性偏低等现实难题,同时常规心电图监测无法覆盖运动全程,难以识别潜在高危心血管事件,且康复处方多同质化制定,缺乏个体化精准化的动态调整机制。本研究构建的元宇宙沉浸式训练联合穿戴式动态心电图监测体系,针对传统心脏康复模式存在的瓶颈,建立多维度不可替代的差异化突破。

(1)场景维度突破,依托VR/AR虚拟交互技术构建林间慢走、湖畔静坐、城市步道、山地徒步等生活化沉浸式场景,替代传统单调平地步行与简单拉伸,将机械性康复训练转化为趣味化、场景化身心体验,有效消解患者运动抵触心理。(2)监测维度升

级,实现静息基线、运动全程、恢复阶段全流程不间断心电数据采集,由传统“事后回顾式分析”转变为“事中实时预警式管控”,精准捕捉运动负荷诱发的隐匿性心电异常,补齐传统康复安全监测短板。(3)处方维度个体化赋能,以实时心电生理指标、运动耐受能力为依据,动态调节运动强度、训练时长与虚拟训练场景,实现精准医疗,摆脱同质化康复处方弊端。(4)双心康复协同增益,元宇宙舒缓虚拟场景兼具运动训练与心理干预双重效应,可有效改善术后焦虑、抑郁、谵妄等心理问题,同步实现躯体功能康复与精神心理调适,契合现代双心医学康复理念。

4.3 教学转化模式对于心脏康复人才培养的推动作用 目前国内心脏康复专科人才缺口较大,传统以课堂讲授为主的教学模式难以培养具备实战能力的康复从业人员。本研究依托“复旦中山惠生智育”元宇宙平台,借助数字化虚拟病例实现无限制反复实操训练,即可提高学习舒适度与积极性,又可丰富教学病种,避免临床实例教学时的病种空缺。此外涵盖院校教育、毕业后教育与继续教育的全周期教育模式能够快速批量提升不同学习阶段的医护人员对于智能化心脏康复的认知水平与实操能力,为科室长期开展新型心脏康复项目储备稳定专业人才队伍。

4.4 体系构建的循证契合性与临床规范化适配价值 本体系构建方案整体架构、康复分期划分、运动干预原则均严格对标《中国冠心病心脏康复循证实践指南》《中国心血管疾病患者居家康复专家共识》等权威循证依据,并非脱离临床实际的完全性创新。方案将元宇宙沉浸训练、穿戴式心电监测、AI风险预警等数字技术嵌入现有成熟康复体系,既保留传统心脏康复的诊疗逻辑、运动负荷标准与干预原则,又通过技术赋能补齐传统模式短板。三级风险预警机制及应急处置流程,与不良事件急救流程高度契合,临床兼容性与可落地性强。采用“循证指南为基底、数字技术为赋能”的建设思路,使整套体系既契合数字化医疗的医学发展前景,又具备较高的可行性。

4.5 一体化康复延伸应用与普惠推广前景 当前我国心脏康复存在院内康复落实较好、Ⅱ期居家康复与Ⅲ期社区维持康复断层明显的现状,普遍存在居家锻炼缺乏专业指导、无实时心电监护、运动方案不规范、依从性难以管控等痛点。本方案构建的元宇宙联合动态心电康复体系具备极强的外延适配性,穿戴式心电设备小型便携、元宇宙虚拟场景可

适配家庭终端、AI风险预警可脱离中心独立运行,康复医师可通过后台远程实时监控患者居家运动状态、心电波动变化,在线调整康复处方、推送健康宣教与心理疏导内容。同时将标准化康复场景、心电监测规范、风险预警流程下沉至社区与家庭,降低基层开展智慧心脏康复的准入门槛,助力心脏康复的全程康复服务向普惠化、同质化、网格化方向发展。

4.6 人工智能算法迭代与体系远期智能化升级空间 本方案目前仅实现AI心电信号基础识别、三级风险规则化预警与运动强度初步调控,整体仍处于结构化规则应用阶段,深层次智能研判与自主决策能力仍有较大提升空间。后续随着临床病例积累、运动心电大数据归集,可训练心脏康复专属深度学习模型,实现心电异常精准分型、运动耐力自动评估、康复预后风险预测及个体化运动处方智能生成。未来可整合心率、血压、血氧、运动姿态、心理量表等多模态数据,构建多因子综合康复风险预测模型,由单一心电风险预警升级为全身多维度康复态势研判。推动心脏康复向自动化、智能化服务方向持续演进。

4.7 方案局限性与未来研究推进方向 本方案仅完成整套联合康复应用体系的理论架构、实施流程、安全标准与教学模式构建,尚未进入临床实际应用阶段,缺乏真实临床应用过程中的流程优化经验与实际运行问题总结,这是本研究现阶段最主要局限性。后续科室正式启动该智慧心脏康复项目后,可沿用本研究确立的康复分期标准、心电监测方案、风险管控流程开展临床实践,逐步纳入符合标准的冠心病术后康复患者,系统收集运动耐力、心功能状态、心电异常事件、康复依从性等相关临床数据,并设计前瞻性对照研究,进一步论证该联合干预模式的真实临床康复疗效,不断完善优化整套应用体系内容。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突。

作者贡献 赵伟林:论文具体构思与撰写;张雯:论文框架指导及审核;余倩:论文整体设计与修改。

参考文献

- [1] 国家心血管病中心,中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2024 概要[J]. 中国循环杂志, 2025, 40(6): 521-559.
- [2] Canan A, Kay F U. Coronary artery disease reporting and data system update[J]. Radiol Clin N Am, 2025, 63(4): 669-680.

- [3] Kittleson M M. Chronic coronary artery disease[J]. *Ann Intern Med*, 2025, 178(10): ITC145–ITC160.
- [4] Zhang N, Xie B Q, Du J X, et al. Effect of acupuncture and exercise rehabilitation on quality of life in acute coronary syndrome patients after percutaneous coronary intervention[J]. *Am J Transl Res*, 2024, 16(6): 2662–2669.
- [5] 林 深, 马涵萍, 袁 硕, 等. 复杂冠心病血运重建策略内外科专家共识[J]. *中国循环杂志*, 2022, 37(11): 1073–1085.
- [6] Simon M, Korn K, Cho L, et al. Cardiac rehabilitation: a class 1 recommendation [J]. *Clevel Clin J Med*, 2018, 85 (7) : 551–558.
- [7] 国家心血管病中心,《冠状动脉旁路移植术后心脏康复专家共识》编写委员会. 冠状动脉旁路移植术后心脏康复专家共识[J]. *中国循环杂志*, 2020, 35(1): 4–15.
- [8] Huang Y J, Zhang R, Culler S D, et al. Costs and effectiveness of cardiac rehabilitation for dialysis patients following coronary bypass[J]. *Kidney Int*, 2008, 74(8): 1079–1084.
- [9] McMahon S R, Ades P A, Thompson P D. The role of cardiac rehabilitation in patients with heart disease [J]. *Trends Cardiovasc Med*, 2017, 27(6): 420–425.
- [10] Rauch B, Salzwedel A, Bjarnason-Wehrens B, et al. Cardiac rehabilitation in German speaking countries of Europe—evidence-based guidelines from Germany, Austria and Switzerland LLKardReha-DACH—part 1[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(10): 2192.
- [11] 中华医学会物理医学与康复学分会, 四川大学华西医院. 中国冠心病康复循证实践指南(2024版)第一部分[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2024, 46(6): 481–491.
- [12] 中华医学会物理医学与康复学分会, 四川大学华西医院. 中国冠心病康复循证实践指南(2024版)第二部分[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2024, 46(7): 577–586.
- [13] 中国心血管疾病患者居家康复专家共识编写组. 中国心血管疾病患者居家康复专家共识[J]. *中国循环杂志*, 2022, 37 (2): 108–121.
- [14] García-Bravo S, Cuesta-Gómez A, Campuzano-Ruiz R, et al. Virtual reality and video games in cardiac rehabilitation programs. A systematic review[J]. *Disabil Rehabil*, 2021, 43 (4): 448–457.
- [15] Peinado-Rubia A B, Verdejo-Herrero A, Obrero-Gaitán E, et al. Non-immersive virtual reality-based therapy applied in cardiac rehabilitation: a systematic review with meta-analysis [J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(3): 903.
- [16] Chen Y Y, Cao L, Xu Y N, et al. Effectiveness of virtual reality in cardiac rehabilitation: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Int J Nurs Stud*, 2022, 133: 104323.
- [17] Wang S K, Jiang J J, Zhang C Y, et al. Effect of virtual reality-based cardiac rehabilitation on mental health and cardiopulmonary function of individuals with cardiovascular disease: a systematic review and meta-analysis [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2025, 106(6): 949–960.
- [18] Cortés-Pérez I, Obrero-Gaitán E, Verdejo-Herrero A, et al. Immersive virtual reality reduces depression, anxiety and stress in patients with cardiovascular diseases undergoing cardiac rehabilitation: a systematic review with meta-analysis [J]. *Heart Lung*, 2025, 70: 102–111.
- [19] Harbi A S, Soh K L, Yubbu P B, et al. Digital health intervention in patients undergoing cardiac rehabilitation: systematic review and meta-analysis [J]. *F1000Res*, 2024, 13: 596.
- [20] Indraratna P, Biswas U, McVeigh J, et al. A smartphone-based model of care to support patients with cardiac disease transitioning from hospital to the community (TeleClinical care) : pilot randomized controlled trial [J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2022, 10(2): e32554.
- [21] 仲艳丽, 李丽娟, 曹晓红. 穿戴式长程动态心电监测记录仪在冠心病患者 PCI 术后的应用研究[J]. *临床误诊误治*, 2025, 38(9): 77–81.

引用本文

赵伟林, 张 雯, 余 倩. 冠心病术后元宇宙沉浸式训练体系构建及教学模式研究[J]. *元宇宙医学*, 2026, 3(2): 142–封三.

Zhao W L, Zhang W, Yu Q. Research on the construction of metaverse-based immersive training system and teaching modes for postoperative coronary artery disease patients[J]. *Metaverse Med*, 2026, 3(2): 142–inside back over.

《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

