

《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



Metaverse in Medicine 元宇宙医学

ISSN 3006-4236



元宇宙医学

二〇二五年十二月 第二卷第四期



2025 年 12 月 第 2 卷第 4 期

《元宇宙医学》简介

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

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



栏目设置

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

征稿选题

包括但不限于如下方向:

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

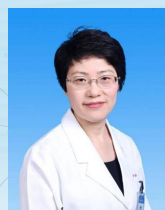
主编介绍



白春学

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

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



顾建英

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

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

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

编辑出版:复旦大学附属中山医院期刊中心《元宇宙医学》编辑部;

联系地址:上海市徐汇区枫林路179号复旦大学附属中山医院18号楼516室;

邮编:200032;联系电话:021-51217570,联系人:孙编辑

邮箱:metamedsh@vip.163.com



元宇宙医学

YUAN YU ZHOU YIXUE



季刊

2024 年创刊

第 2 卷第 4 期 (总第 8 期)

2025 年 12 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

2025 年版权归复旦大学附属中山医院《元宇宙医学》编辑部所有

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

目 次

专家述评

如何应用 GPT 赋能高中学生身心健康.....

..... 蒋维芃, 杨达伟, 白春学(1)

综 述

AI+赋能胸片和 CT 诊治肺部疾病研究进展及展望.....

..... 叶晓丹, 白春学(10)

AI+控制体重研究进展及展望..... 陈 颖, 白春学(17)

医学教育

死亡教育与元宇宙技术融合的新进展: 对本土医学教育全周期分层

探索的启示 张 雯, 张 敏, 马畅畅, 等(25)

AI+赋能呼吸病学教学: 构建面向新质生产力的数字健康胜任力培

养体系 白 莉, 杨达伟, 余 情, 等(30)

产学研融合

元宇宙医学场景下医疗支付体系的结构性挑战与演化路径.....

..... 高承实(39)

基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术:系统设计、协同流程与展望.....
..... 林栩之,王 源,杨达伟(48)

伦理与法规

医学 GPT 安全、合规与伦理治理框架研究 高承实,张 烽(53)
医疗数据知识产权登记的挑战与法律路径构建..... 郭国中,刘帅君(61)

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

METaverse IN MEDICINE

Established in 2024; Volume 2, Number 4, December 30, 2025

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 © 2025, Zhongshan

Hospital, Fudan University

CONTENTS IN BRIEF

Commentary

How can GPT be applied to empower the physical and mental health of high school students JIANG Weipeng, YANG Dawei, BAI Chunxue(1)

Review

Research progress and prospects of AI+ empowering chest X-ray and CT in the diagnosis and treatment of lung diseases

..... YE Xiaodan, BAI Chunxue(10)

Research progress and prospects of AI+ weight control

..... CHEN Ying, BAI Chunxue(17)

Medical education

New Advances in the integration of death education and metaverse technologies: implications for a tiered, full-cycle approach to medical education in China.....

..... ZHANG Wen, ZHANG Min, MA Changchang, et al(25)

AI+ empowering respiratory medicine education: building a digital health competence training system oriented towards new quality productivity ...

..... BAI Li, YANG Dawei, YU Qing, et al(30)

Integration of IUR

Structural challenges and evolution paths of the medical payment system in the metaverse medical scenario GAO Chengshi(39)

Intelligent knee arthroplasty based on digital twin and mixed reality: system design, collaborative process and prospects..... LIN Xuzhi, WANG Yuan, YANG Dawei(48)

Ethics and law

Research on the safety, compliance and ethical governance framework of medical GPT GAO Chengshi, ZHANG Feng(53)

Challenges and legal path construction for intellectual property registration of medical data GUO Guozhong, LIU Shuaijun(61)

Acquisitions editor YANG Dawei

Executive editors ZANG Tianru, SUN Mengyao

Executive proofreaders YIN Yue, JI Jingfang, WANG Di, ZHAI Chengcheng

DOI:10.61189/235821zajbip

· 专家述评 ·

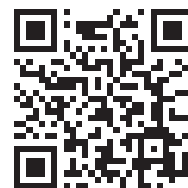
如何应用 GPT 赋能高中生身心健康

蒋维芃¹, 杨达伟^{1,2,3}, 白春学^{1,2,3*}

1. 复旦大学附属中山医院呼吸危重症医学科, 上海 200032

2. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

3. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032



[摘要] 保障高中生身心健康, 乃全面发展之基石, 对学习成效、心态塑造及未来人生轨迹影响深远。然而, 现实挑战重重, 学业压力大、睡眠不足、运动不足、心理关怀薄弱等问题屡见不鲜。为破解此困局, GPT 技术应运而生, 以其强大的自然语言处理能力为助力。GPT 可通过收集学生的睡眠、饮食、运动及学业压力等身心健康数据, 实现个性化指导的精准微调, 让建议更加贴心实用。同时, 构建便捷对话界面, 使学生能随时与 GPT 互动, 享受即时反馈与长期陪伴。面对潜在风险, GPT 能迅速预警, 提出干预建议, 守护学生心理健康。在心理教育层面, GPT 化身智能对话伙伴, 为学生提供情绪慰藉、专业建议与资源链接。它还能生成多元化教育材料, 满足学生差异化需求, 通过互动应用提升自我调适力。心理咨询中, GPT 更是得力助手, 从初步筛查心理问题到引导求助, 再到辅助咨询、监测社交媒体以识别危机, 全方位守护学生心理健康。家校合作亦不可或缺。GPT 作为桥梁, 为家长生成心理健康教育内容, 促进家校共育, 共同守护学生身心健康。当然, GPT 应用亦面临数据隐私、信息准确等挑战, 需加强数据保护, 融合专家智慧确保信息无误, 并持续优化指导策略。要充分发挥 GPT 效用, 还需教育者、技术开发者、家长及社会各界携手并进, 共同探索, 确保技术进步与人文关怀并重, 为学生身心健康保驾护航。

[关键词] 生成式预训练转换器; 人工智能; 高中生; 身心健康

[中图分类号] G479 **[文献标志码]** A

How can GPT be applied to empower the physical and mental health of high school students

JIANG Weipeng¹, YANG Dawei^{1,2,3}, BAI Chunxue^{1,2,3*}

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

2. Shanghai Respiratory Research Institution, Shanghai 200032, China

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

[Abstract] Safeguarding the physical and mental health of senior secondary students is the cornerstone of all-round development, which has a profound impact on learning effectiveness, mindset shaping and future life trajectory. However, there are many challenges, such as high academic pressure, lack of sleep, lack of exercise, and weak psychological care. To solve this dilemma, GPT technology came into being, with its powerful natural language processing capabilities to help. GPT can collect physical and mental health data such as students' sleep, diet, exercise, and academic stress to achieve accurate fine-tuning of personalized guidance, making suggestions more intimate and practical. At the same time, a convenient dialogue interface is built so that students can interact with GPT at any time and enjoy instant feedback and long-term companionship. In the face of potential risks, GPT can quickly warn and propose intervention suggestions to protect students' mental health. At the psycho-educational level, GPT acts as an intelligent dialogue partner, providing students with emotional comfort, professional advice and resource links. It can also generate a variety of educational materials to meet the differentiated needs of students and improve self-adjustment through interactive applications. In psychological counseling, GPT is a powerful assistant, from the initial screening of psychological problems to the guidance of help, to the assistance of counseling, and the monitoring of social media to identify crises, to protect the mental health of students in an all-round way. Home-school cooperation is also indispensable. GPT serves as a bridge to generate mental health education content for parents, promote home-school co-education, and jointly protect students' physical and mental health. Of course, GPT applications also face challenges such as data privacy and information accuracy, so it is necessary to strengthen data protection,

[收稿日期] 2025-12-02

[接受日期] 2025-12-22

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

[作者简介] 蒋维芃. E-mail: 13301050231@fudan.edu.cn

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

integrate expert wisdom to ensure that the information is correct, and continuously optimize guidance strategies. To give full play to the effectiveness of GPT, educators, technology developers, parents and all sectors of society need to work together to explore and ensure that technological progress and humanistic care are equally important, to protect the physical and mental health of students.

[Key Words] generative pre-trained transformer; artificial intelligence; high school students; physical and mental health

高中时期是学生身心成长的关键阶段,学习压力、生活节奏及心理状态均对学生未来产生深远影响。确保高中学生的身心健康,不仅对其当前学业至关重要,更关乎其长远的个人发展、社会适应力及生活质量。身心健康的学生能更高效地学习,增强抗压能力,减少心理问题,并培养积极、乐观、自信的性格。此外,高中时期养成的健康习惯和观念将伴随学生一生,对其未来职业发展及人际关系产生重要影响^[1-4]。

但是,当前高中学生在身心健康方面面临诸多挑战,如学习压力大、竞争激烈,导致学生长时间精神紧张,易出现焦虑、抑郁等心理问题。同时,课业负担重,学生缺乏运动和休息,身体健康状况堪忧。部分学校和家长对身心健康的重视不足,缺乏有效的引导和支持。结果表现出很多具体问题:(1)心理健康问题日益突出,焦虑、抑郁等心理问题在学生中普遍存在上升趋势;(2)身体健康状况不佳,缺乏运动、睡眠不足、饮食不规律等问题严重;(3)学校和家长在身心健康方面的教育和引导不足,学生自我保护和调节能力欠缺;(4)资源分配不均,部分地区和学校的身心健康教育资源匮乏^[1-4]。

然而,生成式预训练转换器(generative pre-trained transformer, GPT)^[5-6]的出现,为解决上述问题提供了新的利器。GPT可通过对话与学生互动,识别其心理状态,提供个性化心理支持和建议,帮助学生及时缓解压力。它能生成丰富的健康教育

内容,辅助学生树立正确的健康观念。GPT还能根据学生学习需求和兴趣,智能推荐学习资源和活动,帮助学生平衡学习与休息。此外,它还可作为家长学校(以下简称家校)沟通的桥梁,促进家长了解孩子身心健康状况,提供针对性教育建议。需要注意的是尽管 GPT 等人工智能(artificial intelligence, AI)技术具有巨大潜力,也不能完全替代人类的教育和关怀。在应用过程中,应充分考虑学生实际情况和需求,结合 AI 与人类教师和保健医师的优势,共同为学生的身心健康护航^[7-13]。

1 目前高中学生身心健康存在的问题

高中学生身心健康面临多重挑战,学业压力巨大。尤其是高考前夕,繁重课业和频繁考试常导致学生焦虑、抑郁。熬夜学习,睡眠不足影响身心健康,免疫力下降,记忆力减退。同时,学业繁忙令学生忽视体育锻炼,身体机能下降,疾病风险增加,心理健康也受影响。学校和家庭往往更因重视成绩,心理健康关注不足,专业咨询资源匮乏对学生帮助不够。此外,饮食不均衡因时间紧张或经济条件限制,长期影响身体健康。学业压力还限制了学生社交,影响其社交能力发展。家庭环境紧张或父母期望不当也给学生带来心理压力。亟需要学校、家长和社会共同努力,营造全面健康的成长环境(表 1)^[1-3, 14-15]。

表 1 影响高中学生身心健康的问题

问题	对身心健康影响
学业压力过大	高中学生面临着巨大的学业压力,尤其是面临高考的学生,需要应对繁重的课业负担和频繁的考试。这种压力可能导致学生出现焦虑、抑郁等心理问题。
睡眠不足	由于学业负担重,很多学生需要熬夜学习,导致睡眠不足。长期睡眠不足会影响学生的身体健康,如免疫力下降、记忆力减退等,同时也会影响心理健康。
缺乏体育锻炼	高中学生往往因为学业繁忙而忽视体育锻炼。缺乏足够的运动会导致身体机能下降,容易引发各种疾病,同时也会影响心理健康,如产生压抑情绪等。
心理健康关注不足	学校和家长往往更关注学生的学业成绩,而忽视了学生的心理健康。很多学校缺乏专业的心理咨询师,无法及时为学生提供心理支持和帮助。
饮食不均衡	高中学生可能因为时间紧张或经济原因而选择快餐或方便食品,导致饮食不均衡。长期下来,这种不健康的饮食习惯会影响学生的身心健康。
社交能力发展受限	学业压力使得一些学生缺乏社交活动,导致社交能力发展受限。缺乏与同龄人的交流和互动,可能会对学生的心理健康产生负面影响。

续表 1

问题	对身心健康影响
家庭环境影响	家庭环境对学生的身心健康也有重要影响。如家庭关系紧张、父母期望过高或过低等都可能给学生的心理带来压力,影响其身心健康。
保障高中学生身心健康存在的问题涉及学业压力、睡眠、体育锻炼、心理健康关注、饮食、社交能力以及家庭环境等多个方面。急需要重视,为学生提供更加全面、健康的成长环境。	
2 目前改善高中学生身心健康的策略及限制	号召采取多种积极策略,优化课程设置,减轻学业负担,确保学生有足够休息。建立家校合作机制,加强沟通,使家长给予孩子更多关爱。然而,部分学校师资和设施不足,家长和学校过于重视学业,政策落实不到位,以及学生需求差异大,难以得到个性化关注和辅导(表 2),同时也面临很多限制(表 3) ^[1-2,4] 。
目前已经重视解决高中学生身心健康问题,并	

表 2 目前保障高中学生身心健康的策略

策略	方法和技术路线
加强心理健康教育	通过开设心理健康教育课程,增强学生的心理素质和应对压力的能力。定期组织心理健康讲座和心理咨询活动,为学生提供专业的心理支持和指导。
优化课程设置与学业负担	合理安排课程,避免过度集中或过度分散,确保学生有足够的休息和娱乐时间。减轻学业负担,避免过多的作业和考试压力,让学生有更多的时间进行体育锻炼和兴趣发展。
改善学校环境	提供安全、舒适、卫生的校园环境,包括教室、宿舍、食堂等。加强校园绿化和美化,创造宜人的学习环境。
加强体育锻炼	鼓励学生积极参与体育活动,增强身体素质。学校应提供充足的体育设施和器材,满足学生的运动需求。
建立家校合作机制	加强家长与学校的沟通与合作,共同关注学生的身心健康。家长应积极参与孩子的学习和生活,给予他们足够的关爱和支持。
提供心理咨询服务	学校应设立心理咨询室,配备专业的心理咨询师,为学生提供个性化的心理咨询服务。通过热线电话、网络咨询等方式,为学生提供便捷的心理支持。

表 3 目前高中学生身心健康工作受到的限制与原因

限制	原因
资源有限	一些学校可能缺乏足够的心理健康教育师资和设施,难以开展有效的心理健康教育活动。体育设施和器材的更新和维护也需要大量的资金投入。
观念束缚	部分家长和学校可能过于重视学生的学业成绩,而忽视了学生的身心健康。传统观念中对于心理健康问题的偏见和误解也可能影响心理健康教育工作的开展。
政策执行不力	尽管有相关政策支持学生的身心健康,但在实际执行过程中可能存在落实不到位的情况。监管和评估机制的不完善也可能导致政策效果不佳。
学生个体差异	每个学生的身心健康状况和需求都是不同的,这增加了制定统一策略的难度。需要针对学生的个体差异进行个性化的关注和辅导。

解决高中学生身心健康问题时需要综合考虑多种策略,克服相应的限制。通过加强心理健康教育、优化课程设置、改善学校环境、加强体育锻炼、建立家校合作机制以及提供心理咨询服务等措施,可以为学生的身心健康提供更好的保障。同时,也需要不断克服资源有限、观念束缚、政策执行不力以及学生个体差异等限制,以确保策略的有效实施。但是,目前因为各种原因,难以克服这些限制

的原因。如何解决这些问题? 一直是一大难题。GPT 的出现,为我们解决这些问题带来了希望,可以赋能我们在现有条件下事半功倍地改善高中学生的身心健康^[1-2,4,13]。

3 GPT 赋能高中学生心理健康教育

应用 GPT 赋能并增强心理健康教育,突破目前常规方法在保障高中学生身心健康方面的不足非

常重要。这需要应用GPT拓展心理健康教育能力,为高中学生提供创新支持,打破传统方法的限制。通过构建智能对话系统,GPT能识别学生情绪,提供个性化安慰与资源,并根据学生状况生成定制内容,如压力管理技巧,多渠道推送。此外,还可以应用GPT丰富教育资源库,开发互动工具,促进学习

参与。同时,情绪监测与效果评估功能可助力帮助及时发现并应对心理问题。GPT可赋能培训平台提升教师技能,改善资源共享促进交流。家校合作方面,GPT可助力家长教育,搭建沟通桥梁。实施过程中,也会重视数据保护与伦理原则,确保技术的正面影响(表4)^[13,16-19]。

表4 GPT赋能高中学生心理健康教育的策略和方法

策略	方法	技术路线
心理健康辅导	智能对话系统	应用GPT构建智能对话机器人,为学生提供心理健康支持。这些机器人可以识别学生的情绪状态,提供安慰、建议和资源链接。
	定制化内容推送	根据学生的心理健康状况和学习压力,GPT可以生成定制化的心理健康内容,如放松技巧、应对压力的方法等,通过邮件、短信或应用内通知推送给学生。
增强心理健康教育资源	丰富教育资源库	应用GPT生成多样化的心理健康教育材料,如文章、视频脚本、讲座大纲等,涵盖焦虑、抑郁、压力管理、自我认知等多个主题。
	互动式学习工具	开发基于GPT的互动式学习应用,如心理健康问答、情境模拟等,使学生在参与中学习心理健康知识,提升自我调适能力。
监测与评估	情绪监测	通过GPT分析学生的社交媒体言论、作业提交情况等数据,间接监测学生的情绪状态,及时发现潜在的心理问题。
	效果评估	应用GPT对学生的心理健康状况进行定期评估,为教师和家长提供反馈,以便他们更好地了解学生的心理状态,并调整辅导策略。
教师培训与支持	技能提升	为心理健康教师提供基于GPT的培训课程,帮助他们掌握使用GPT进行心理健康辅导的技能。
	资源共享	建立一个基于GPT的心理健康教育资源共享平台,供教师们交流经验、分享资源和案例。
家校合作	家长教育	应用GPT生成针对家长的心理健康教育内容,帮助他们更好地理解孩子的心理状态,提供有效的家庭支持。
	沟通桥梁	通过GPT建立家校之间的沟通桥梁,让家长能够及时了解孩子在学校心理健康状况,并与教师共同制定辅导计划。
隐私与伦理考虑	数据保护	确保所有涉及学生个人信息的数据都得到妥善保护,遵守相关法律法规和隐私政策。
	伦理指导	在使用GPT进行心理健康辅导时,应遵循伦理原则,确保技术的使用不会对学生造成负面影响。

应用GPT赋能并增强心理健康教育能力,可为高中学生提供高效和便捷的心理健康支持,有效突破常规策略和方法的限制。然而,这也需要教育者、技术开发者、家长和社会各界的共同努力和持续探索。

4 GPT个性化指导保障高中学生身心健康

应用GPT等大型语言模型为高中学生提供个性化身心健康指导,需全面收集学生的健康数据,了解其个性化信息,以便定制指导。构建GPT指导系统,微调模型以适配高中学生需求,并设计友好对话界面。系统应能实时反馈,提供即时建议,并

长期跟踪学生状况,适时调整策略,且具备预警功能。结合线下资源,如心理健康课程,优化常规方法。定期评估系统效果,持续改进以提升用户体验。同时注意确保数据安全和伦理指导,保护学生隐私。实施案例包括学业压力管理、睡眠改善计划和心理健康支持,可充分展示GPT在个性化指导方面的潜力(表5)^[13,17,20-22]。

在实施过程中,还应该注意其中关键环节。(1)减轻学业压力:GPT可以根据学生的学业负担和考试压力,提供个性化的时间管理、放松技巧和学习策略建议。(2)睡眠改善计划:根据学生的睡眠习惯和睡眠质量,GPT可以制定个性化的睡眠改善计划,

表 5 GPT 个性化指导高中学生身心健康的策略和方法

策略	方法	技术路线
数据收集与分析	学生健康数据	收集学生的身心健康数据,包括但不限于睡眠质量、饮食习惯、运动频率、学业压力感受、心理健康状况等。
	个性化信息	了解学生的个人兴趣、爱好、学习习惯、家庭背景等,以便提供更具针对性的指导。
构建 GPT 个性化指导系统	定制模型	基于收集到的数据,对 GPT 进行微调或定制,使其更擅长于提供针对高中学生的个性化身心健康建议。
	对话界面	设计一个用户友好的对话界面,让学生可以轻松地与 GPT 进行交互,获取个性化建议。
个性化指导与干预	实时反馈	GPT 可以根据学生的实时输入,提供即时的身心健康建议,如应对学业压力的方法、改善睡眠的技巧等。 长期跟踪:建立长期跟踪机制,定期评估学生的身心健康状况,并根据评估结果调整指导策略。
	预警系统	当检测到学生可能面临身心健康风险时,GPT 可以及时发出预警,并建议采取适当的干预措施。
整合常规策略与方法	结合线下资源	将 GPT 的个性化指导与学校的心理健康教育课程、体育活动、心理咨询等常规策略相结合,形成线上线下相结合的全方位保障体系。
	优化常规方法	根据 GPT 收集到的数据和分析结果,对现有的常规策略和方法进行优化,使其更加符合学生的实际需求。
评估与反馈	效果评估	定期对 GPT 个性化指导系统的效果进行评估,包括学生的身心健康状况改善情况、学生对系统的满意度等。
	持续改进	根据评估结果,不断对 GPT 系统进行优化和升级,以提高其指导效果和用户体验。
隐私与伦理考虑	数据保护	确保学生数据的安全性和隐私性,避免数据泄露或被滥用。
	伦理指导	在设计和实施 GPT 个性化指导系统时,遵循伦理原则,确保系统的公正性、透明性和可解释性。

包括调整作息時間、改善睡眠環境等。(3)心理健康支持:当学生遇到心理困扰时,GPT可以提供初步的心理支持和引导,并建议寻求专业的心理咨询帮助。最终,使GPT作为一种有效的工具来弥补常规策略和方法,确保克服目前方法在高中学生身心健康方面的限制,为学生提供更加个性化、全面和有效的身心健康支持^[13,21-22]。

5 GPT 实时监测保障高中学生身心健康

为了解决目前常规策略和方法在保障高中学生身心健康方面的限制,需要应用GPT赋能高中学

生身心健康实时监测与预警。具体实施包括应用GPT分析社交媒体、学习平台文本,识别消极情绪与行为异常;结合可穿戴设备监测生理数据,初步分析健康问题;设定阈值触发多级预警,轻度预警予以关怀沟通,重度则启动紧急干预。同时,由GPT聊天机器人提供即时心理支持,定制学习计划,必要时连接专业资源。整个过程均需要注重隐私保护,确保数据安全与合法使用,避免偏见歧视,并通过试点项目持续评估优化,调整预警阈值与干预措施,使系统有效运行,为学生身心健康提供全面保障(表6)^[18,20-21,23]。

表 6 GPT 赋能实时监测改善身心健康的策略和方法

策略	方法	技术路线
实时监测与数据分析	情感分析	应用 GPT 对学生在社交媒体、学习平台或心理健康应用上的文本输入进行情感分析。识别出消极情绪、压力信号或潜在的心理问题。
	行为模式识别	通过 GPT 分析学生的学习行为、社交互动和日常活动数据。识别出异常行为模式,如学习动力下降、社交隔离等。
	生理数据监测(如果可行)	结合可穿戴设备,收集学生的生理数据(如心率、睡眠质量等)。使用 GPT 对生理数据进行初步分析,识别出可能的健康问题。

续表 6

策略	方法	技术路线
预警系统构建	阈值设定与预警触发	根据情感分析、行为模式识别和生理数据监测的结果,设定合理的阈值。当数据超过阈值时,触发预警信号,通知相关人员(如教师、心理咨询师或家长)。
	多级预警机制	设立不同级别的预警,对应不同的干预措施。例如,轻度预警可能只需要进行简单的关怀和沟通,而重度预警则需要启动紧急干预计划。
个性化干预与支持	智能对话与辅导	应用 GPT 的聊天机器人功能,为学生提供即时的心理支持和辅导。根据学生的具体情况,提供个性化的建议和资源。
	定制化学习计划	根据学生的学习状态和兴趣,应用 GPT 生成定制化的学习计划。帮助学生提高学习效率,减轻学习压力。
	连接专业资源	当 GPT 识别出学生需要更专业的帮助时,自动连接到学校的心理咨询师、医生或其他专业资源。
隐私与伦理考虑	数据保护	确保所有收集的数据都受到严格的保护,遵守相关的隐私法规。只在必要时和合法的情况下分享数据。
	透明度与知情同意	向学生和家长明确说明数据收集、分析和使用的目的和方法。获取学生和家长的知情同意。
	避免偏见与歧视	确保 GPT 模型在训练和应用过程中不产生偏见或歧视。定期对模型进行审查和更新,以确保其公正性和准确性。

为达到上述实时监测保障高中学生身心健康的效果,建议系统地实施与评估。(1)试点项目:在小范围内实施试点项目,评估 GPT 在实时监测与预警方面的效果。收集反馈和意见,对系统进行优化和改进。(2)持续评估与调整:定期对系统进行评估,确保其准确性和有效性。根据评估结果,对预警阈值、干预措施等进行调整和优化。通过应用 GPT 来赋能实时监测与预警系统,可以更有效地保障高中学生的身心健康。然而,这只是一个起点,未来还需要不断地探索和创新,以更好地满足学生的需求^[13,22]。

6 应用 GPT 赋能辅助心理咨询

GPT 在心理咨询领域也具有广阔的应用前景,有望在高中学生身心健康领域展现巨大潜力。可通过开发智能对话系统,为学生提供匿名安全倾诉空间,个性化支持情绪调节。应用 GPT 生成趣味心理健康教育内容,深化学生理解。它还能辅助初步心理筛查与评估,为咨询师提供工具,提升咨询效率。在危机干预中,GPT 能实时监测预警,提供紧急支持,还能助力家校合作,教育家长。应用过程中需注重隐私保护,且 GPT 应与人类咨询相结合,确保全面有效支持学生心理健康(表 7)^[16-17,24-25]。

表 7 GPT 赋能辅助心理咨询的策略和方法

策略	方法	技术路线
个性化心理支持	智能对话系统	开发基于 GPT 的智能对话系统,为高中学生提供一个匿名、安全的倾诉空间。系统可以根据学生的输入,提供个性化的心理支持和建议。
	情绪识别与反馈	应用 GPT 的自然语言处理能力,识别学生的情绪状态,并提供相应的情绪调节技巧或引导。
心理健康教育与预防	内容创作	应用 GPT 生成易于理解、引人入胜的心理健康教育内容,如压力管理、情绪调节、人际关系处理等,通过社交媒体、校园广播、电子报等形式传播。
	互动式学习	开发基于 GPT 的互动式学习平台,让学生通过问答、角色扮演等方式,更深入地了解心理健康知识。
辅助专业心理咨询	初步筛查与评估	应用 GPT 进行心理健康问题的初步筛查和评估,帮助学生及时识别自己的问题,并引导他们寻求专业的心理咨询帮助。
	咨询辅助	在心理咨询过程中,GPT 可以作为辅助工具,为咨询师提供案例参考、心理评估量表等工具,提高咨询效率和质量。

续表 7

策略	方法	技术路线
危机干预与应对	实时监测与预警	通过监测学生在社交媒体、校园论坛等平台的言论,应用GPT识别可能的危机信号,及时发出预警,并启动干预措施。
	紧急支持	在危机事件发生时,提供基于GPT的紧急心理支持服务,如热线电话、在线聊天等,帮助学生度过难关。
家校合作与沟通	家长教育	应用GPT生成针对家长的心理健康教育内容,帮助他们更好地理解和支持孩子的心理健康发展。
	家校沟通平台	开发基于GPT的家校沟通平台,促进家长、学生和学校之间的有效沟通,共同关注学生的身心健康问题。
持续评估与改进	效果评估	定期收集学生的反馈和数据,应用GPT进行数据分析,评估心理健康策略和方法的有效性。
	持续优化	根据评估结果,不断调整和优化基于GPT的心理健康策略和方法,以适应学生不断变化的需求。

在应用GPT赋能心理咨询时,需要注意以下事项。(1)隐私保护:应严格遵守隐私保护法规,确保学生的个人信息和咨询内容不被泄露。(2)伦理规范:遵循心理咨询的伦理规范,确保GPT的应用不会对学生造成负面影响。(3)人机结合:虽然GPT具有强大的智能处理能力,但它并不能完全替代人类心理咨询师的作用。因此,在应用GPT时,应与人类专业心理咨询相结合,共同为学生提供更全面、更有效的心理健康支持。通过巧妙地应用GPT,可以为高中学生提供更加个性化、高效、便捷的心理健康支持和服务,有效解决目前常规策略和方法在保障高中学生身心健康方面的限制^[18,22,25]。

7 GPT 赋能高中学生身心健康面临的挑战及对策

在应用GPT等AI技术保障高中学生身心健康时,也将面临很多挑战(表8)。为有效应对这些挑战,需要探索原因,研究相应对策,加强数据加密,限制访问权限以确保隐私安全。同时,也需要结合专家知识,定期更新模型,设置内容审核,保障信息准确可靠;收集学生健康数据,定制个性化健康计划,并持续跟踪调整;通过宣传教育提高接受度,优化界面设计,提供技术支持,降低使用难度;强调人文关怀,建立伦理准则,培养批判性思维,确保技术使用恰当^[22,26-29]。

表 8 应用 GPT 赋能高中学生身心健康时面临的挑战及对策

挑战	原因	解决问题的策略和方法
数据隐私与保护	GPT 在处理学生数据时可能涉及隐私泄露风险。	1. 加强数据加密:确保学生数据在传输和存储过程中得到加密保护。 2. 明确数据使用政策:制定并公布清晰的数据使用政策,说明数据将如何被收集、使用和保护。 3. 限制数据访问:仅允许授权人员访问敏感数据,并定期进行数据访问审计。
信息准确性与可靠性	GPT 可能提供不准确或误导性的健康建议。	1. 结合专家知识:将 GPT 的输出与医疗健康专家的建议相结合,确保信息的准确性。 2. 定期更新模型:根据最新的医学研究和健康指南更新 GPT 模型。 3. 设置内容审核机制:对 GPT 生成的内容进行人工或自动审核,确保其符合健康、积极的标准。
个性化与适应性	GPT 可能难以针对每个学生的独特需求提供个性化的健康建议。	1. 收集学生健康数据:通过问卷、调查等方式收集学生的健康状况、生活习惯等信息。 2. 定制健康计划:基于收集到的数据,应用 GPT 生成个性化的健康计划和建议。

续表 8

挑战	原因	解决问题的策略和方法
技术接受度与可用性	学生可能对使用 GPT 进行健康管理持怀疑态度,或者技术本身存在使用障碍。	3. 持续跟踪与调整:定期评估学生的健康状况,并根据需要调整健康计划。
		1. 开展宣传教育:向学生介绍 GPT 在健康管理中的应用和优势,提高他们的接受度。
		2. 优化用户界面:设计简洁、易用的用户界面,降低使用难度。
伦理与道德考量	使用 GPT 进行健康管理可能引发伦理和道德问题,如过度依赖技术、忽视人际交流等。	3. 提供技术支持:设立技术支持团队,及时解决学生在使用过程中遇到的问题。
		1. 强调人文关怀:在应用 GPT 的同时,强调人与人之间的交流和支持的重要性。
		2. 建立伦理准则:制定并遵守使用 GPT 进行健康管理的伦理准则和道德规范。
		3. 培养批判性思维:教育学生如何批判性地评估和使用 GPT 提供的健康信息。

通过加强数据隐私保护、确保信息准确性、提供个性化服务、提高技术接受度以及考虑伦理道德因素,可以有效地解决 GPT 在保障高中学生身心健康时面临的挑战^[6,29-31]。

8 应用 GPT 赋能高中学生身心健康的前景

随着医学 GPT 研究的深入^[32],对于高中学生的身心健康将产生显著的积极影响及广阔的应用前景。通过深入分析学生的语言模式与行为习惯,GPT 将能精准识别情绪问题,如焦虑、抑郁,并提供个性化的心理疏导,助力学生情绪管理。它还能设计压力管理课程,即时分享缓解技巧,帮助学生有效应对学业与社交压力,提升学生的心理素质。在学习方面,GPT 将根据学生的学习习惯、能力及兴趣,量身定制个性化学习计划,提高学习效率。它还能作为智能答疑助手,即时解答学生疑问,减少学习障碍,激发学习动力。在社交与情感发展上,GPT 将通过模拟社交场景,为学生提供实践机会,提升社交技能。对于遇到情感困扰的学生,它将给予情感支持和建议,助力构建积极的人际关系。展望未来,随着技术的不断进步,GPT 在高中学生身心健康领域的应用将更加深入。它有望成为学生学习与生活的得力助手,守护心理健康,丰富学习体验。同时,也将关注数据隐私、算法偏见等潜在风险,确保技术的健康、可持续发展。通过合理利用,将为学生提供更全面、个性化的支持,促进其全面发展,开创更加美好的未来。^[7-13,26]

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 蒋维芃、杨达伟:选题、撰写论文;白春学:修改、审阅论文。

参考文献

[1] BIDDLE S J H, ASARE M. Physical activity and mental health in children and adolescents: a review of reviews[J]. Br J Sports Med, 2011, 45(11): 886-895.

[2] VAILLANT G E. Mental health [J]. Am J Psychiatry, 2003, 160(8): 1373-1384.

[3] 雷开春, 杨 雄. 中日韩高中生的身心健康: 指标、现状及影响因素[J]. 青年研究, 2011(3): 11-21.

[4] PURTLE J, NELSON K L, COUNTS N Z, et al. Population-based approaches to mental health: history, strategies, and evidence[J]. Annu Rev Public Health, 2020, 41: 201-221.

[5] GHASSEMI M, BIRHANE A, BILAL M, et al. ChatGPT one year on: who is using it, how and why?[J]. Nature, 2023, 624 (7990): 39-41.

[6] MINSSEN T, VAYENA E, COHEN I G. The challenges for regulating medical use of ChatGPT and other large language models[J]. JAMA, 2023, 330(4): 315-316.

[7] YANG D W, SUN M T, ZHOU J, et al. Expert consensus on the “Digital Human” of metaverse in medicine [J]. Clin eHealth, 2023, 6: 159-163.

[8] YANG D W, ZHOU J, SONG Y L, et al. Metaverse in medicine [J]. Clin eHealth, 2022, 5: 39-43.

[9] 白春学. 医学新质生产力之我见[J]. 元宇宙医学, 2024; 3 (1): 3-10.

[10] 韦 球, 蒋维芃, 杨超勉, 等. 医学数字人 GPT 的研究现状及展望[J]. 元宇宙医学, 2024; 1(1).

[11] 蒋 里. AI 驱动教育改革: ChatGPT/GPT 的影响及展望[J].

- 华东师范大学学报(教育科学版), 2023; 41(7): 143-50.
- [12] 顾建英, 宋振举, 白春学. 拥抱新质生产力, 开创医学新时代[J]. 元宇宙医学, 2024; 3(1): 1-2.
- [13] Vial T, & Almon A. Artificial intelligence in mental health therapy for children and adolescents[J]. JAMA Pediatr, 2023, 177(12): 1251-1252.
- [14] 常发伟, 马亚平, 林源. 高三学生焦虑抑郁情绪与生活事件和应对方式的相关性[J]. 中国行为医学科学, 2008, 17(1): 70.
- [15] 杨群芳, 刘朵, 王建晶, 等. 疫情下高中生身心健康状况及影响因素分析[J]. 世界最新医学信息文摘(连续型电子期刊), 2023; 23(96): 81-6.
- [16] KOHRT B A, OTTMAN K, PANTER-BRICK C, et al. Why we heal: The evolution of psychological healing and implications for global mental health[J]. Clin Psychol Rev, 2020, 82: 101920.
- [17] LEE E E, TOROUS J, DE CHOUDHURY M, et al. Artificial intelligence for mental health care: clinical applications, barriers, facilitators, and artificial wisdom[J]. Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging, 2021, 6(9): 856-864.
- [18] GRAHAM S, DEPP C, LEE E E, et al. Artificial intelligence for mental health and mental illnesses: an overview[J]. Curr Psychiatry Rep, 2019, 21(11): 116.
- [19] 白春学, 王悦虹, 蒋维芃. 元宇宙赋能健康管理意义及展望[J]. 元宇宙医学, 2024; 3(1): 16-21.
- [20] GALATZER-LEVY I R, ONNELA J P. Machine learning and the digital measurement of psychological health[J]. Annu Rev Clin Psychol, 2023, 19: 133-154.
- [21] D'ALFONSO S. AI in mental health[J]. Curr Opin Psychol, 2020, 36: 112-117.
- [22] OPEL D J, KIOUS B M, COHEN I G. AI as a mental health therapist for adolescents[J]. JAMA Pediatr, 2023, 177(12): 1253-1254.
- [23] DORSEY E R, TOPOL E J. Telemedicine 2020 and the next decade[J]. Lancet, 2020, 395(10227): 859.
- [24] VAN HEERDEN A C, POZUELO J R, KOHRT B A. Global mental health services and the impact of artificial intelligence-powered large language models[J]. JAMA Psychiatry, 2023, 80(7): 662-664.
- [25] KING D R, NANDA G, STODDARD J, et al. An introduction to generative artificial intelligence in mental health care: considerations and guidance[J]. Curr Psychiatry Rep, 2023, 25(12): 839-846.
- [26] 畅肇沁, 陈丽. 基于人工智能对教育影响的反思[J]. 教育理论与实践, 2019, 39(1): 9-12.
- [27] 王同聚, 伍文臣, 刘小莲. 人工智能与教育教学深度融合的区域发展趋势与推进建议[J]. 中国教育信息化, 2022, 28(7): 73-81.
- [28] LE L K, ESTURAS A C, MIHALOPOULOS C, et al. Cost-effectiveness evidence of mental health prevention and promotion interventions: a systematic review of economic evaluations[J]. PLoS Med, 2021, 18(5): e1003606.
- [29] NING Y L, TEIXAYAVONG S, SHANG Y Q, et al. Generative artificial intelligence and ethical considerations in health care: a scoping review and ethics checklist[J]. Lancet Digit Health, 2024, 6(11): e848-e856.
- [30] WANG C Y, LIU S R, YANG H, et al. Ethical considerations of using ChatGPT in health care[J]. J Med Internet Res, 2023, 25: e48009.
- [31] MARKS M, HAUPT C E. AI chatbots, health privacy, and challenges to HIPAA compliance[J]. JAMA, 2023, 330(4): 309-310.
- [32] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT白皮书[J]. 元宇宙医学, 2025(2): 55-64.

引用本文

蒋维芃, 杨达伟, 白春学. 如何应用GPT赋能高中学生身心健康[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(4): 1-9.

JIANG W P, YANG D W, BAI C X. How can GPT be applied to empower the physical and mental health of high school students[J]. Metaverse Med, 2025, 2(4): 1-9.

AI+赋能胸片和CT诊治肺部疾病研究进展及展望



叶晓丹¹, 白春学^{2*}

1. 复旦大学附属中山医院放射科, 上海 200032

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

[摘要] 肺部疾病长期居全球死亡与致残前列, 胸片与CT虽是筛查、诊断与随访的基础入口, 但在高负荷与复杂病谱下暴露出漏诊、误诊及定量不足等局限。深度学习、影像组学与多模态大模型的兴起, 使人工智能(artificial intelligence, AI)成为胸部影像从“读片工具”迈向“系统工程”的关键驱动力。AI已在肺结节/肺癌、结核、肺炎、间质性肺疾病(interstitial lung disease, ILD)、慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)、小气道及肺血管疾病等多谱系任务中显著提升检测、分割、表型量化与风险预测能力, 并稳定量化倍增时间、纤维化负荷和气道重塑等关键指标, 成为落实 Fleischner、亚洲及中国指南的重要技术基础。在预防与筛查中, AI支持高危人群识别、胸片大规模筛查、低剂量CT(low-dose computed tomography, LDCT)风险分层及间质性肺异常(interstitial lung abnormality, ILA)、小气道病等亚临床异常的早期发现, 可与健康管理、数字孪生和元宇宙平台结合, 构建防线前移式干预模式。在诊断中, 影像大模型与医学GPT可生成结构化报告, 提供“指南在线”的决策支持, 并面向医生与患者输出差异化解释; 在治疗与随访中, AI赋能放疗计划、术前导航、治疗反应预测及肺功能估测, 推进影像—功能一体化和个体化长期管理。未来将聚焦通用胸部影像大模型构建、5P医学深度融合、联邦学习与全球协同数据网络建设, 并从“影像环节智能化”走向“医院—社区—家庭—云端—元宇宙”贯通的全病程系统工程, 使胸片与CT成为数字呼吸健康生态的关键基础设施。

[关键词] 人工智能; 肺癌筛查; 影像组学与多模态大模型; 肺间质病与慢阻肺定量表型; 数字孪生与元宇宙医学; 医学GPT与智能决策支持

[中图分类号] R 814.42 **[文献标志码]** A

Research progress and prospects of AI+ empowering chest X-ray and CT in the diagnosis and treatment of lung diseases

YE Xiaodan¹, BAI Chunxue^{2,3,4*}

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

2. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai Respiratory Research Institution, Shanghai Engineer & Technology Research Center of Internet of Things for Respiratory Medicine, Shanghai 200032, China

[Abstract] Lung diseases have long been at the forefront of global mortality and disability, although chest X-ray and CT are the basic entrances for screening, diagnosis and follow-up, they are exposed to limitations such as miss diagnosis, misdiagnosis and insufficient quantification under high load and complex disease spectrum. The rise of deep learning, radiomics, and multimodal large models has made Artificial Intelligence (AI) a key driving force for chest images to move from "reading tools" to "system engineering". AI has significantly improved detection, segmentation, phenotypic quantification, and risk prediction capabilities in multi-spectrum tasks such as lung nodules/lung cancer, tuberculosis, pneumonia, interstitial lung disease (ILD), chronic obstructive pulmonary disease (COPD), small airways, and pulmonary vascular diseases, and has stabilized key indicators such as doubling time, fibrosis burden, and airway remodeling, becoming an important technical basis for the implementation of Fleischner, American College of Chest Physicians (ACCP), and China guidelines. In prevention and screening, AI supports the identification of high-risk groups, large-scale chest X-ray screening, LDCT risk stratification, and early detection of subclinical abnormalities such as ILA and small airway disease, which can be combined with health management, digital twins, and metaverse platforms to build a forward-moving defense line intervention model. Physicians and patients generate structured reports, provide "guide online" decision support, and output differentiated explanations by using imaging diagnostic models and medical GPTs. AI also empowers radiotherapy planning, preoperative navigation, treatment response prediction, and lung function estimation, promoting image-function integration and individualized long-term management for treatment and follow-up. In the future, it will focus on the construction of general chest imaging large models, the deep

[收稿日期] 2025-12-10

[接受日期] 2025-12-23

[作者简介] 叶晓丹, 博士, 主任医师. E-mail: yuanyxd@163.com

* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

integration of 5P medicine, the construction of federated learning and global collaborative data networks, and move from "intelligent imaging links" to the whole course of the disease system project that connects "hospital-community-family-cloud-metaverse", so that chest X-ray and CT will become the key infrastructure of the digital respiratory health ecosystem.

[Key Words] AI; Lung cancer screening; radiomics and multimodal foundation models; quantitative phenotyping of ILD and COPD; digital twin and metaverse medicine; medical GPT and intelligent decision support

在全球呼吸健康中,肺部疾病长期位居死亡和致残负担前列,严重威胁人群寿命与生活质量,是核心公共卫生问题^[1-3]。胸片和CT作为最基础、最易获得且覆盖人群最广的“入口影像”,几乎贯穿肺部疾病从筛查、初诊到随访的全流程,是呼吸专科、急诊、全科与公共卫生项目依赖的关键工具^[1-3]。

随着低剂量CT肺癌筛查项目的推广,以及结核病和慢性阻塞性肺病(简称慢阻肺)等慢性呼吸疾病负担不断上升,各类胸部影像检查需求呈指数级增长,影像科和临床科室面临前所未有的读片压力。在高工作量和复杂病谱交织的多模态影像环境中,漏诊、误诊及关键征象识别延迟风险显著增加,既影响个体预后,也削弱筛查与慢病管理项目的整体效益。因此,在保证甚至提升诊断质量的前提下支撑如此庞大的影像服务需求,已成为现代呼吸影像亟待解决的关键命题。

尽管胸片和CT技术本身已相对成熟,传统“人工读片+经验决策”模式在现代精准医学语境下暴露出明显局限^[2,4]。影像解读高度依赖个人经验与训练背景,不同医师和中心在病灶识别、严重程度评估与随访建议上差异显著,“漏小灶、漏早期结节、漏轻微间质异常”在基层与高负荷场景中尤为常见。对于肺气肿负荷、纤维化体积、小气道病变或肺血管重构等复杂表型,临床多仍停留在“定性描述”层面,缺乏稳定可重复的定量指标,难以支撑精准分层、疗效评价与长期病程对比。大量影像报告也仍以非结构化文本存在,难以与电子病历、基因组学、肺功能及可穿戴/远程监测数据直接对接,“数据资产”价值未能充分释放^[3]。仅依靠传统模式已难以满足未来呼吸疾病综合防治的精细化需求。

在此背景下,AI深度学习、影像组学和多模态大模型快速发展,为胸片和CT“智能升级”提供了关键的技术基础^[1-2,4-5]。大量研究表明,AI系统在结节检测、肺炎识别、纤维化定量等任务中已从“简单检测+二分类”迈向“风险预测+多任务联合学习+多模态决策支持”,部分任务表现已达到或接近资深专家水平。技术焦点也随之从追求单一算法性能转向“如何嵌入真实临床 workflow”,使AI从实验室成果转变为可持续运行的数字基础设施。

最新肺结节AI研究与多地区指南共同指出,AI不应仅被视为孤立的“第二读片者”,而应作为贯穿筛查、诊断、随访、治疗决策及患者教育的“系统性支撑层”,帮助规范落实复杂指南并缓解人力压力^[4-6]。同时,以“元宇宙医学+医学GPT+数字孪生”为代表的新模式提出,将AI影像分析与云端平台、虚拟仿真训练及数字人专家(如BAIMGPT)深度耦合,可在虚实融合环境中实现影像知识的可视化传播、技能训练与患者赋能^[7-9]。新时代影像工作的核心在于高效的人机协同。在这一整体愿景下,胸片和CT不再只是静态图像,而是构成“影像智能系统工程”的数据纽带与算法载体,为未来呼吸医学的结构性重塑奠定基础。

1 AI+赋能预防和筛查

1.1 人群风险预测与筛查路径智能优化 肺部疾病防控的首要问题,是在有限资源下精准识别高危人群并合理安排筛查频次。依托电子病历(electronic health record, EHR)、长期随访队列和健康管理平台,构建了整合吸烟史、职业暴露、环境污染、家族史、既往病史及社会决定因素的多维风险预测模型,用以估算肺癌和慢性呼吸病发生风险。将上述模型与LDCT及胸片资源配置结合,AI系统可自动给出筛查起始年龄、间隔与终止时点的“个体化方案”,在避免“一刀切”过度筛查的同时降低高危人群漏筛风险,从而在群体层面实现更优资源配置。

在策略设计层面,将肺结节亚洲共识、Fleischner指南和中国2024版肺结节专家共识中的风险分层规则与随访算法编码为AI决策树或大模型提示系统,可形成“指南级”的智能筛查与随访路径。系统在识别结节类型和危险因素后,可自动匹配推荐随访间隔及补充检查,并提示是否需要多学科会诊,从而将复杂文本指南转化为临床一线可直接调用的“结构化逻辑”。

1.2 AI赋能胸片大规模人群筛查 在资源受限地区,胸片依然是最具可及性的成像工具,也是结核、肺炎及部分慢性病早期识别的主力手段^[8-10]。基于大规模胸片数据库训练的深度学习模型,可在短时间内完成批量筛查,对可疑异常按风险排序并优先

呈交放射科或呼吸科医师审阅。

在结核防控方面,CAD4TB类系统及多家厂商AI胸片软件已在多国完成前瞻性评估。相较人工阅读,AI在结核征象检出方面可显著提高敏感度,并在维持合理特异性的前提下降低人力成本与报告时间,尤其适合移动筛查车与社区项目。在肺部感染领域,多数深度学习模型在胸片肺炎检测中的AUC>0.9,但同时提示现有研究仍存在数据集偏倚、标签质量不均以及缺乏多中心外部验证等问题^[10]。未来需在多地区、多设备和多种病原体谱系中开展前瞻性研究,以验证其真实世界效能。

针对慢性气道病人群,AI可由常规胸片估算肺容量、部分肺功能参数及胸廓形态异常,在体检或基层就诊人群中识别隐匿肺功能下降与高危表型,为早期干预、戒烟管理和长期健康管理提供低成本影像入口^[11-12]。这对尚不具备广泛肺功能检测能力的地区具有重要补位意义。

1.3 AI赋能LDCT肺癌与肺结节筛查 低剂量CT是肺癌早筛基石,其大规模应用却带来结节数量庞大、读片负担沉重及随访路径复杂等问题^[3-4]。深度学习LDCT筛查模型(如Google提出的端到端三维网络)在大样本验证中显示,在结节恶性风险预测方面优于传统体积或规则评分,并可在不依赖既往影像的情况下对多时相变化进行隐式建模^[4]。这种模型可作为“前置筛查器”,从大量LDCT检查中快速筛出最值得关注的高危结节和人群。

最新肺结节AI文献综述^[5]表明,AI已贯穿“结节检测与分割—良恶性预测—生长模型—治疗效应评估”的全生命周期管理链条,从单点辅助工具逐步演变为支撑动态管理的关键技术模块。在指南层面,共识将结节体积测量、倍增时间、病灶类型和患者危险因素整合为更精准但复杂的管理策略。AI量化工具能提供高精度、可重复的体积与密度测量并自动计算倍增时间,因此被视为落地指南推荐的重要技术支撑。

1.4 隐匿性病变与亚临床异常的早期发现 在强调“防线前移”的呼吸医学中,隐匿性病变与亚临床异常的早期识别具有重要价值^[13-15]。肺间质异常(interstitial lung abnormalities, ILA)常在体检或非肺部指征CT中偶然发现,Fleischner ILA官方文件指出,部分ILA可进展为特发性肺纤维化等显性间质性肺病,因而需要精准识别与动态随访。AI通过纹理分析和体素级分割,可在大规模CT数据中自动筛查疑似ILA人群,并定量其程度和分布,为早期干预与临床研究提供基础队列。

借助深度学习、肺纹理及小血管/小气道特征定量,AI还能在肺功能尚正常或仅轻度异常阶段识别小气道疾病、微小肺气肿及肺血管异常,将“检测窗口”前移至真正的预防阶段^[11,16]。这一“影像先于症状与功能变化”的策略,有望推动临床模式从“症状驱动就诊”向“影像—功能一体化早筛”转变^[17-19]。

1.5 与健康管理和元宇宙预防生态的融合 AI影像技术正逐步融入全生命周期健康管理和元宇宙医学生态^[20-21]。依托元宇宙医学和数字孪生理念,可构建可交互虚拟肺模型,使吸烟、职业暴露及长期空气污染对肺结构和功能的累积损伤能以可视化形式呈现,帮助公众直观理解“看不见的伤害”,强化戒烟与防护动机。对高危人群,平台可生成个体化风险仪表盘,使预防策略从抽象宣教转向具象化、情境化干预。

在服务交付层面,基于BAIMGPT等数字人医学GPT,可将AI筛查结果、指南推荐与个体风险信息以通俗语言推送给患者与基层医生,实现“云端—社区—家庭”一体化的预防与筛查协同^[22]。数字人专家既可在院内门诊提供实时解释和决策支持,也可在院外通过移动终端和元宇宙门诊持续陪伴,形成覆盖人群和个体层面的预防闭环。

2 AI+赋能诊断

2.1 数据与模型基础 AI赋能诊断依赖充足多样的数据。长期积累形成的大规模胸片与CT数据库,包含结构化报告、关键征象标注及基于结局的弱监督标签,为多任务、多病种联合模型与自监督预训练提供了良好基础^[1-2]。在此之上,结节检测网络、肺炎分类网络、肺气肿定量网络等任务特异模型相继建立,为后续大模型发展积累了方法学经验。

近年兴起的影像大模型在训练策略上更为多样,广泛采用掩码重建、对比学习及“影像—报告”跨模态训练,能够在粗标甚至无标数据上学习通用潜在表征。这些表征可经轻量化微调服务于结节识别、肺炎检测及间质性肺疾病分型等多种任务,显著减少对高质量标注的依赖,提升在不同机构与场景中的可推广性。

2.2 肺结节与肺癌的AI诊断体系 在肺结节管理中,AI已从单一“检出工具”发展为涵盖检测、分割、良恶性预测和随访管理的综合诊断体系^[4-6]。多维卷积网络与转换器结构可在三维CT数据中识别可疑结节并完成精细分割,通过候选筛选控制假阳性率,使AI在LDCT筛查中充当“第一读片者”,大幅度减轻初筛负担^[4-6]。

在良恶性预测与风险分层方面, AI通过整合结节大小、形态、边缘特征、实性比例、纹理及时间序列变化等多维信息, 以非侵袭方式提高恶性风险评估精度^[4-5, 17-19]。模型输出的概率值或风险等级可直接对接“继续观察”“缩短随访问隔”或“建议进一步侵袭性检查/干预”等决策, 为“可观察对标: 需活检/切除”提供量化依据。

在更高层面, 以影像组学为基础整合临床信息、实验室指标、血液生物标志物和分子分型, 构建“影像—临床—分子”端到端模型, 全面评估肺癌生物学行为、分期及预后风险^[18-19]。这类多模态模型承接 Fleischner 及亚洲/中国共识倡导的个体化管理理念, 使影像解读从形态描述走向生物学推断。

2.3 感染性与炎症性肺病的 AI 诊断 感染性与炎症性肺病是胸片和 CT 最常见的适应证之一。对社区获得性肺炎及病毒性肺炎(包括 COVID-19), 多项研究表明, 深度学习模型可显著提高胸片识别敏感度, 尤其提升非放射科医师和基层机构对多样影像表现的识别能力。但病原体特异性诊断仍需依赖临床与实验室检查, 仅凭影像 AI 难以完全替代综合判断, 这也强调了 AI“辅助而非替代”的定位^[7, 10]。

在结核领域, 多款 AI 胸片软件已在多国应用, 其在结核征象检出方面表现接近甚至优于普通读片者, 且可显著缩短报告时间^[8-9]。在高负荷地区, AI 适合作为前置筛查与分级诊疗工具: 对高度可疑影像给予优先提示, 对低风险个案进行快速“排除”, 从而优化人力资源配置。

对于支气管扩张、非结核分枝杆菌病等复杂感染性/炎症性疾病, AI 可自动量化支扩程度、黏液栓负荷与病灶体积, 为严重程度分级、治疗策略选择及疗效监测提供客观指标^[2, 23]。

2.4 慢性气道和肺血管疾病 已经逐步从影像描述到量化表型拓展。COPD 及相关气道疾病具有高度异质性, 不同患者在肺气肿分布、小气道病变及气道重塑方面差异显著^[11, 15-16]。AI 算法可自动量化肺气肿负荷、气道壁厚度、PRISm 表型与小气道病特征, 构建与肺功能、急性加重频率和长期预后密切相关的 CT 表型谱。这为精准药物治疗、肺减容策略和个体化康复方案提供了数据基础。

在肺血管疾病方面, 机器学习可基于 CT 肺动脉造影及常规胸片推断肺动脉压力、血流动力学参数与小血管稀疏程度, 辅助早期筛查肺动脉高压和慢性血栓栓塞性肺高压。虽然相关研究仍在探索, 但已显示出在非侵袭风险分层和监测中的潜在价值。

2.5 ILD 与弥漫性肺病的智能分型与定量 ILD 及

弥漫性肺病的影像解读高度依赖经验, 传统目测分级的一致性有限^[13-15, 23]。基于 Fleischner ILA 立场文件和 IPF 相关白皮书, AI 通过定量纤维化体积、蜂窝肺比例、磨玻璃密度和网格影分布, 可在客观、可重复基础上优化亚型区分和进展预测, 为临床试验设定影像终点、筛选高危人群和评估治疗反应提供了可靠工具。

在基层和资源有限地区, CT 检查机会有限, 胸片仍为主要成像手段。利用深度学习从胸片估算肺总量、纤维化占比和预后风险, 可为 ILD 患者提供初步分层与随访建议, 使高级定量理念下沉至低成本应用场景^[12, 16]。

2.6 多模态、结构化报告和决策支持 临床落地层面, AI 既要“看得准”, 也要“说得清、用得上”。报告结构化是关键环节: AI 可自动将胸片/CT 所见映射至标准化模板, 生成包含病灶位置、大小、数量、类型及相关征象的要素化报告, 降低漏报风险, 同时为后续研究提供统一数据源。

将 Fleischner 和区域共识的管理算法嵌入 AI 报告系统, 可在读片时实时给出随访问隔、补充检查和 MDT 讨论建议, 实现“指南同步”的决策支持模式。医师在阅读 AI 生成报告的同时即可获得对应指南条款与推荐等级提示, 在不显著增加负担的前提下提升决策规范度。

通过 BAIMGPT 等医学 GPT 调用影像 AI 结果, 可面向医生输出要点式决策支持与风险摘要, 面向患者则提供通俗问答、图形化解释和个体化随访建议^[22]。“同一事实+差异化叙事”的双面板输出, 有助于在专业决策与患者理解之间取得平衡。

3 AI+赋能治疗与精准治疗

3.1 肺癌治疗中治疗决策与疗效预测 在肺癌管理中, 影像已从单纯诊断工具转变为贯穿治疗全程的评估平台, AI 的重要性日益凸显, 可用于放疗计划优化, 以支持个体化放疗方案设计。

在系统治疗中, AI 模型通过分析肿瘤负荷、形态、血供及微环境相关征象, 可预测免疫和靶向治疗的疗效与毒性风险, 将 LDCT 及治疗中 CT 转化为个体化反应预测模型^[3-4, 24-25]。结合 Fleischner、亚洲及中国肺结节共识关于亚实性/多发结节长期随访与干预指征的推荐, AI 还可持续量化病灶体积、密度和新发病灶, 帮助判断“继续观察对标: 干预升级”, 在保障疗效的同时减少过度治疗。

3.2 介入、手术与放疗中的导航与虚拟仿真 介入与外科治疗高度依赖精确影像导航。基于 CT 三维

重建与实时导航, AI 可优化经皮消融路径、支气管镜路径及胸腔镜切除范围, 在保证病灶完整切除的前提下最大限度保留正常肺组织, 缩短手术时间并降低并发症风险。

在“元宇宙医学”框架下, 可将 AI 重建生成的三维虚拟肺模型呈现于沉浸式环境, 用于术前演练、MDT 讨论及患者沟通^[20-21]。团队成员可在虚拟手术室反复推演不同策略、模拟突发情况处理, 而患者也能通过可视化方式理解病变位置及拟行操作, 从而提升团队协作效率与患者依从性。

3.3 药物治疗与疾病进程的影像量化随访 在慢性肺病药物治疗与自然史研究中, 需要敏感且客观的指标以评估病程与治疗反应。针对 ILD 及抗纤维化治疗, AI 量化纤维化负荷及形态变化, 较传统目测更易捕捉细微改变, 为以影像为终点的试验和真实世界研究提供可靠工具。

在 COPD 与支气管扩张等疾病中, AI 可定量气道直径、壁厚、肺实质密度与支扩程度, 用于评估长效支气管扩张剂、肺减容手术和支气管热成形等干预效果, 并在长期随访中绘制“影像指纹”演变轨迹, 为预后评估提供新视角。

3.4 AI 估测肺功能与“影像—功能”一体化管理 AI 正推动肺功能与影像从“平行评估”走向一体化。CT 和胸片深度学习模型可从影像估测 FVC、FEV₁ 等关键肺功能参数, 多项研究提示二者具有良好一致性和泛化能力, 为无法完成肺功检测的老年、重症和远程人群提供重要替代。

在数字孪生肺框架下, 将多时点 CT/胸片与 AI 估测肺功能整合为个体化“功能轨迹”, 并以可视化曲线呈现疾病进展、治疗响应及短期风险, 可直观支撑治疗调整和康复计划制定, 同时提升患者对自身病程的理解与参与度。

3.5 BAIMGPT 与影像驱动的个体化管理路径 数字人医学 GPT 在整合复杂影像与指南逻辑方面具有独特优势。“肺结节专家——BAIMGPT 白皮书”提出, 通过将肺结节 AI 分析结果、Fleischner 及区域指南规则和个体风险信息整合进数字人专家, 可为不同层级医院及公众提供分层化、循证的随访与转诊建议^[22]。BAIMGPT 是医生端的“智能助手”, 也是患者端的“全时空解释者”, 有助于减少信息不对称。

在 ILD、COPD 和肺高血压等慢病场景中, BAIMGPT 可拓展为调用影像 AI 与云端 PACS 自动生成“病程时间线+关键影像节点+风险预测”, 用于治疗优化与患者赋能^[22]。结合随访系统、远程监测与康复平台, BAIMGPT 可将单次影像检查转化为全

程管理入口, 推动真正意义上的动态个体化管理。

4 AI+赋能胸片和 CT 诊治肺部疾病的挑战与解决方案

4.1 数据质量、偏倚与外部可推广性 胸部影像的 AI 性能高度依赖训练数据质量与代表性。现有模型多基于单一国家、高收入地区或单一厂商数据训练, 若直接用于不同种族、疾病谱或设备条件的人群, 可能出现性能下降甚至系统性偏倚^[1-2, 6, 8]。标签质量参差、病程阶段分布不均和随访不足亦影响模型稳健性与泛化能力。

为此需推动多中心、跨设备、跨疾病谱联合数据库建设, 通过统一标准与质量控制提升样本多样性。联邦学习与隐私增强技术为跨机构、跨区域协同训练提供途径, 在不共享原始数据前提下实现模型共建。同时, 在模型说明书中披露训练数据结构、适用人群与潜在局限, 有助于临床正确理解 AI 工具“适用边界”。

4.2 可解释性与临床信任 深度神经网络常被视为“黑箱”, 缺乏透明的决策路径, 限制了医生对 AI 结论的采纳^[3, 14]。在肺结节生物学行为判断、复杂 ILD 分型及多病灶鉴别诊断等高风险场景中, 医生往往更看重“能否解释”, 而非单一性能指标。当 AI 输出与临床直觉不符且不能给出合理解释时, 使用者可能选择忽略甚至对系统失去信任。

提升可解释性可通过注意力可视化、原型学习与因果推断等方法, 在病灶层面展示 AI 关注区域和关键特征。在报告界面同步呈现 AI 推荐及其依据(如倍增时间、密度变化、纤维化体积分数等), 有助于医生将 AI 输出与自身判断交叉验证。通过 RCT 评估 AI 对诊断一致性、决策质量与患者结局的真实影响, 亦是建立循证信任的重要路径。

4.3 监管、伦理与责任划分 目前监管多将 AI 定位为“辅助诊断软件”, 主要围绕特定任务审批。然而, 随着大模型和多任务系统的出现, AI 在诊疗路径中的参与深度不断增加, 部分场景已具备半自主决策能力, 对现有监管模式和责任划分提出挑战。

未来需建立以 AI 介入程度为核心的分级监管体系, 对不同风险等级应用设定差异化的质量、可解释性与审计要求, 同时明确数据安全与隐私保护标准, 规范模型更新与再训练流程。对于责任划分, 应界定医生在采纳或忽略 AI 建议时的责任边界, 以及医疗机构在选型、部署与持续监控中的职责, 以在创新与安全之间取得平衡。

4.4 workflow 整合与经济学评价 从“技术先进”到

“临床可用”,关键在于与工作流的深度整合。研究显示,合理部署的 AI 系统可减少漏诊误诊、缩短报告时间;但若触发规则或界面设计不合理,则可能增加额外点击和“警报疲劳”,抵消其收益。

实践中,应针对急诊、门诊、体检与结核筛查中心等场景制定差异化触发与优先级策略,将 AI 结果融入现有报告工作站,而非额外增加独立界面,从而减少流程割裂。同时开展成本效果和成本效益分析,量化 AI 对再入院率、住院时长、床位周转和长期预后的影响,为管理者与支付方提供决策依据,支撑 AI 的可持续应用。

4.5 与指南、共识和 MDT 模式的深度耦合 肺结节相关 Fleischner、亚洲及中国共识在风险分层、随访间隔和干预指征上愈加精细,虽提升科学性,却增加一线医生完整遵循的难度。在高负荷环境中,医生难以在每次读片时逐条核对最新指南,这为 AI 提供了重要切入点。

通过将指南与共识路径编码为机器可读规则,并与影像 AI 输出对接,系统可在 MDT 讨论前自动生成“初步建议”,包括风险等级、推荐方案及争议焦点。专家在此基础上进行修订,可形成“AI+MDT”的混合决策模式,兼顾规范化与个体化,也为质量控制和学习型系统建设沉淀数据。

4.6 元宇宙医学、数字人专家与教育监管 元宇宙医学共识指出,沉浸式仿真环境可用于放射与呼吸专科培训、质量控制和公众科普,但亦伴随过度娱乐化、信息过载及内容真实性监管等问题。AI 可自动生成典型病例库和个性化训练路径,元宇宙则将其转换为交互场景,显著提升学习效率^[20-21]。

对于 BAIMGPT 等数字人医学 GPT,在影像解释和健康咨询中必须坚持“赋能+分流”定位,而非取代医生。面向公众时,系统不得提供具体剂量调整或侵袭操作指导,遇潜在危险信号应明确建议及时就医或急诊。同时,需建立数字人内容的审核与更新机制,确保其基于最新指南与证据,避免知识陈旧或误导。

5 展 望

5.1 从任务特异模型到“通用胸部影像大模型” 期待从“AI 工具”到“影像智能生态系统”的迅速发展。未来胸部影像 AI 将从“任务特异模型”走向“通用胸部影像大模型”。这类模型在预训练阶段即覆盖多病种、多任务和多模态数据,可通过少样本甚至零样本学习快速适应新任务、新疾病与新设备,显著

降低开发与部署成本。同时,它们将与融合影像、文本、基因组及时序生理数据的多模态医学大模型深度耦合,成为数字人专家中的核心视觉模块,为多系统综合管理提供“平台级能力”。

5.2 5P 医学与 AI 赋能胸片/CT 的深度融合 5P 医学为 AI 赋能胸片和 CT 提供了系统框架。在预测层面,AI 整合影像与多模态数据预测疾病发生、进展与不良结局;在预防层面,通过识别 ILA、小气道病和早期结节等亚临床异常,实现前移预警和干预;在个体化层面,基于影像表型与分子分型制定个体化治疗方案。在参与层面,元宇宙与数字人专家帮助患者以更直观方式理解影像与疾病状态,提升参与度;在精准医学层面,稳定可重复的影像定量指标是精准医学和药物研发的重要终点。

5.3 开放数据、联邦学习与全球协同 要实现上述愿景,开放协作与全球协同不可或缺。构建跨国、跨厂商、跨疾病的大规模开放影像库与联邦学习网络,有助于降低偏倚、提高泛化能力,并使低收入国家同享 AI 红利。在这一过程中,需要在隐私保护、数据主权与科研开放间取得平衡,通过标准化数据格式和互操作协议推动多方共建共享。

5.4 从“影像环节智能化”到“全病程系统工程” 未来的 AI 胸片/CT 系统应从“单次检查工具”演进为“全病程系统工程”的关键模块^[22,24-25]。以肺结节、ILD、COPD、肺高血压与结核为例,可将 AI 影像分析与门诊决策支持、数字随访、远程康复和患者自我管理平台贯通,构建“医院—社区—家庭—云端—元宇宙”的闭环管理体系。在这一体系中,一次影像检查成为触发后续风险评估、随访计划、数字人解释与远程监测的起点,推动形成持续迭代的学习型健康系统。

5.5 元宇宙医学与医学 GPT 引领的新模式 结合元宇宙医学共识与 BAIMGPT 实践,可预见一种新的影像诊疗模式逐步成形。在这一模式下,胸片和 CT 由云端多模态大模型自动分析与结构化,生成适用于医生与患者的多层次报告;医生在实体或虚拟 MDT 环境中与 AI 共同审阅影像、讨论决策;患者通过元宇宙门诊与数字人专家获得个性化解释与随访支持,实现真正的参与式医疗。

在这样的演进路径中,胸片与 CT 不再只是静态二维或三维图像,而是支撑医学新质生产力、连接现实与数字空间的关键数据枢纽。AI、元宇宙与医学 GPT 的协同,将传统“读片艺术”升级为“影像智能系统工程”,为全球肺部疾病防控和呼吸医学发

展开启新篇章。最终实现“名医治未病,元医惠众生”愿景。

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 叶晓丹:撰写、修改论文,核对参考文献;白春学:选题、撰写、修改、定稿,使用AI技术生成图片。

参考文献

- [1] HWANG E J, GOO J M, PARK C M. AI applications for thoracic imaging: considerations for best practice [J]. *Radiology*, 2025, 314(2): e240650.
- [2] LIM W H, KIM H. Application of artificial intelligence in thoracic radiology: a narrative review [J]. *Tuberc Respir Dis*, 2025, 88(2): 278–291.
- [3] NISHINO M, SCHIEBLER M L. Advances in thoracic imaging: key developments in the past decade and future directions[J]. *Radiology*, 2023, 306(2): e222536.
- [4] 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.
- [5] LI X, ZHANG W Z, FANG J L, et al. Advance in the use of artificial intelligence of pulmonary nodule: evolution, trends, and future directions [J]. *Int J Surg*, 2025, 111(10): 7135–7154.
- [6] WIDMANN G, LUGER A K, SONNWEBER T, et al. Machine learning based multi-parameter modeling for prediction of post-inflammatory lung changes [J]. *Diagnostics*, 2025, 15(6): 783.
- [7] LEE H W, JIN K N, OH S, et al. Artificial intelligence solution for chest radiographs in respiratory outpatient clinics: multicenter prospective randomized clinical trial [J]. *Ann Am Thorac Soc*, 2023, 20(5): 660–667.
- [8] HAN Z L, ZHANG Y Y, LI J, et al. Performance of artificial intelligence-powered chest X-ray for detection of pulmonary tuberculosis: a systematic review and meta-analysis. *J Thorac Dis*. 2025;17(3):3223–3237.
- [9] KHAN F A. Chest x-ray analysis with deep learning-based software as a triage test for pulmonary tuberculosis. *EClinical Medicine*. 2020, 28:100472.
- [10] SIDDIQI R, JAVAID S. Deep learning for pneumonia detection in chest X-ray images: a comprehensive survey [J]. *J Imaging*, 2024, 10(8): 176.
- [11] PARK H, YUN J, LEE S M, et al. Deep learning - based approach to predict pulmonary function at chest CT [J]. *Radiology*, 2023, 307(2): e221488.
- [12] UEDA D, MATSUMOTO T, YAMAMOTO A, et al. A deep learning-based model to estimate pulmonary function from chest x-rays: multi-institutional model development and validation study in Japan [J]. *Lancet Digit Health*, 2024, 6(8): e580–e588.
- [13] HATABU H. Interstitial lung abnormalities detected incidentally on CT: a position paper from the fleischner society [J]. *Lancet Respir Med*. 2020, 8(7):726–737.
- [14] HATA A, SCHIEBLER M L, LYNCH D A, et al. Interstitial lung abnormalities: state of the art [J]. *Radiology*, 2021, 301(1): 19–34.
- [15] ALMEIDA S D, NORAJITRA T, LÜTH C T, et al. Prediction of disease severity in COPD: a deep learning approach for anomaly-based quantitative assessment of chest CT [J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(7): 4379–4392.
- [16] CHEN B, LIU Z Y, LU J J, et al. Deep learning parametric response mapping from inspiratory chest CT scans: a new approach for small airway disease screening [J]. *Respir Res*, 2023, 24: 299.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 中华医学会呼吸病学分会肺癌学组, 中国肺癌防治联盟专家组. 肺部结节诊治中国专家共识(2024年版) [J]. *中华结核和呼吸杂志*. 2024, 47(8):716–729.
- [20] Bai C, Yang D, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine [J]. *Clin eHealth*. 2022(5):1–9.
- [21] 白春学. 元宇宙医学之我见 [J]. *中国医药导刊*, 2023, 25(1): 1–6.
- [22] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT 白皮书 [J]. 2025(2): 55–64.
- [23] NAKAMURA H. Current advances in pulmonary functional imaging [J]. *J Thorac Imaging*. 2024;39(3):e45–e60.
- [24] NATHANI A, DINCER H E. Advancements in imaging technologies for the diagnosis of lung cancer and other pulmonary diseases [J]. *Diagnostics*, 2025, 15(7): 826.
- [25] RAHOUMA M, MOHSEN H, MAHMOUD A, et al. Artificial intelligence (AI) applications and their impact on thoracic surgery: a narrative review [J]. *Curr Chall Thorac Surg*, 2025, 7: 27.

引用本文

叶晓丹,白春学. AI+赋能胸片和CT诊治肺部疾病研究进展及展望 [J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(4): 10–16.

YE X D, BAI C X. Research progress and prospects of AI+ empowering chest X-ray and CT in the diagnosis and treatment of lung diseases [J]. *Metaverse Med*, 2025, 2(4): 10–16.

DOI:10.61189/158176zcoley

· 综述 ·

AI+控制体重研究进展及展望

陈颖¹, 白春学^{2,3,4*}

1. 复旦大学附属中山医院内分泌科, 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] 肥胖/超重已成为累及多系统的复杂代谢性疾病, 传统依赖门诊随访与短期减重的模式难以解决预测不足、干预粗放、依从性差和资源不均等问题。近年来, 人工智能(AI/ML)、大语言模型(LLM/GPT)、物联网(IoT)、元宇宙和数字人被引入体重管理全链条: 在预防阶段, 多模态风险模型与可穿戴设备实现高危人群早期识别和行为预警, 元宇宙场景提升健康教育与参与度; 在诊断阶段, AI支持肥胖表型重构、体成分自动分析及并发症“红灯信号”识别, 推动体重控制从“以BMI为中心”转向“以表型与并发症为中心”; 在治疗与康复阶段, AI辅助GLP-1等减重药物精准获益预测、数字疗法与行为教练个性化推送、代谢手术的全流程风险评估, 并通过VR/GDTx与数字孪生促进功能恢复与防复胖。管理层面, 形成以云—边—端架构为基础、嵌入5P医学理念的综合平台, 医学GPT/BAIMGPT作为“减重数字人专家”连接医生、患者与管理者。当前主要挑战包括数据质量与泛化性、公平性与隐私保护、临床流程与支付模式适配以及GPT安全监管。展望未来, AI与数字孪生、元宇宙深度融合, 有望实现从单纯“减重”走向“代谢健康与自我管理能力”的系统性提升。

[关键词] 体重控制; 人工智能; 物联网; 医学GPT; 元宇宙

[中图分类号] R 589.2 **[文献标志码]** A

Research progress and prospects of AI+ weight control

CHEN Ying¹, BAI Chunxue^{2,3,4*}

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

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

3. Shanghai Respiratory Research Institution, Shanghai 200032, China

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

[Abstract] Obesity/overweight has become a complex metabolic disease involving multiple systems, and the traditional model of relying on outpatient follow-up and short-term weight loss is difficult to solve the problems of insufficient prediction, extensive intervention, poor adherence and unequal resources. In recent years, artificial intelligence (AI/ML), large language models (LLM/GPT), Internet of Things (IoT), metaverse and digital humans have been introduced into the whole chain of weight management: in the prevention stage, multimodal risk models and wearable devices achieve early identification and behavior warning of high-risk groups, and metaverse scenarios improve health education and participation; In the diagnostic stage, AI supports obesity phenotype reconstruction, automatic body composition analysis, and complication “red light signal” recognition, promoting weight control from “BMI-centric” to “phenotype and complication-centric”; In the treatment and rehabilitation stage, AI-assisted accurate benefit prediction of weight loss drugs such as GLP-1, personalized push of digital therapy and behavioral coaching, full-process risk assessment of metabolic surgery, and promotion of functional recovery and anti-obesity through VR/GDTx and digital twins. At the management level, a comprehensive platform based on cloud-edge-end architecture and embedded with 5P medical concepts has been formed, and medical GPT/BAIMGPT connects doctors, patients and managers as a “weight loss digital human expert”. The main challenges include data quality and generalization, fairness and privacy protection, clinical process and payment model adaptation, and GPT security regulation. Looking forward to the future, the deep integration of AI, digital twins, and the metaverse is expected to achieve systematic improvement from simple “weight loss” to “metabolic health and self-management ability”.

[Key Words] weight control; AI; Internet of Things; medical GPT; metaverse

[收稿日期] 2025-12-08

[接受日期] 2025-12-24

[作者简介] 陈颖. E-mail: chen.ying4@zs-hospital.sh.cn

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

肥胖/超重已被公认为最重要的可预防死亡与致残因素之一,其危害远超“体重超标”,而是一类累及心、脑、肝、肺、内分泌与生殖等多系统的复杂代谢性疾病,与 2 型糖尿病、动脉粥样硬化性心血管病、OSA、NAFLD/MAFLD、多囊卵巢综合征及多种肿瘤呈现高度共病与相互放大的风险链^[1]。现行以门诊随访和人力密集干预为主的传统模式,正越来越难以满足这一“慢性—终生”疾病的管理需求:其一,仅依赖常规体检与主观问诊,难以及时在儿童、青少年和“代谢性肥胖高危人群”中识别早期风险,形成“预测不足”的结构性短板^[2];其二,以 BMI 单一指标分层、以短期减重为目标的方式,忽视遗传、生活方式、心理状态、环境暴露与社会决定因素,导致干预策略普遍“粗放”^[3]。与此同时,零散随访与面对面宣教难以支撑行为长期改变,依从性下降与医护投入不足并存^[4];肥胖专科、营养师与心理师资源分布不均,更扩大了地区间服务质量差异。在此背景下,如何依托数字技术突破“预测不足、干预粗放、依从性差与资源不均”等瓶颈,成为肥胖管理模式转型的核心命题。

在这一进程中,AI+ 正成为重构肥胖防治体系的关键“基础设施升级”。近 5 年的综述与指南显示,人工智能(artificial intelligence, AI)、大语言模型(large language model, LLM)、可穿戴与家庭物联网(Internet of Things, IoT),以及元宇宙与数字人技术,正在从风险预测—精准分型—个体化治疗—康复—长期管理的全链条,系统性重塑肥胖照护^[5-10]。AI/机器学习(machine learning, ML)可整合电子病历、影像、组学、生活方式与环境暴露等多源数据,构建用于分型、并发症预测与疗效评估的多模态模型;LLM/生成式预训练转换器(generative pre-trained transformer, GPT)结合医学知识图谱,可作为“对话式专家”,实时解答个体化问题并将循证证据转化为可执行建议;IoT 持续记录体重、活动、睡眠与饮食,用作动态风险评估与干预定位的“数据底座”;元宇宙与数字人则通过沉浸式场景提升患者参与度与长期坚持意愿^[11-14]。由此形成的“云—边—端一体化”AI+ 管理生态,为 5P 医学在肥胖领域的系统化落地奠定基础。

5P 医学为 AI+ 控制体重提供了清晰的价值框架。在预测(predictive)层面,多模态模型可前瞻性评估肥胖及并发症风险,为人群筛查与资源配置提供量化依据;在预防(preventive)层面,基于风险分层的生活方式强化与早期药物干预使“治未病”真正可实施;在个体化(personalized)层面,结合基因、

代谢表型、行为与心理特征,可量身定制饮食、运动、药物与数字疗法组合;在参与(participatory)层面,GPT 与数字人以自然语言作为交互界面,增强患者对疾病与治疗路径的理解与共决策能力;在精准(precision)层面,借助真实世界数据与持续学习算法,可不断校准干预策略,实现“越用越准”。

在这一总体框架中,白春学教授提出的“元宇宙医学”“医学新质生产力”与 BAIMGPT 白皮书,强调以 MIoT+AR/VR+数字人专家构建未来医疗基础设施^[15-19]。由此,医学 GPT 不再是单一工具,而是贯穿 5P 全链条的“减重数字人专家”,连接云端智能、临床决策与公众参与,为构建“AI+控制体重”蓝图奠定理论与技术基石,并自然引出后续关于预防、诊断、治疗、康复与管理的系统部署。

1 AI+ 赋能预防:从人群风险分层到个体化“数字生活方式处方”

1.1 多模态 AI 风险预测与人群分层 在 5P 医学框架中,多模态 AI 风险预测是肥胖防控由“被动应对”转向“前瞻预警”的起点。通过整合电子病历、基因与多组学、体检与影像、饮食与体力活动,以及收入、教育与居住环境等社会决定因素,可构建 ML/深度学习模型,在儿童、青少年与成年人中提前多年预测肥胖及其并发症风险。2025 年系统综述显示,纳入饮食、运动、睡眠和心理特征的 AI 模型,其儿童肥胖预测 AUC 多超过 0.80,显著优于传统风险评估。同时,结合 GIS 与环境暴露数据,AI 可生成城市级“肥胖风险热力图”,将食品可及性、步行友好度及绿地覆盖等因素量化,为控糖饮料税与城市设计等政策提供依据^[5-6]。上述多层级分层体系不仅识别高危个体,也定位高危区域,为后续精准预防奠定基础。5P 映射表明,该类模型是“Predictive”的核心抓手,并直接服务“Preventive”。

1.2 IoT 可穿戴设备的早期预警与行为刻画 IoT 可穿戴设备首次使肥胖防控具备“连续观察真实行为轨迹”的能力。智能手表、联网体重秤、睡眠监测与膳食记录 App 可长期捕捉体重趋势、活动水平、心率变异性、睡眠结构与进食模式。借助 ML,这些高频时序数据可转化为可操作的早期预警信号,如体重滚动平均上升、久坐时间延长、睡眠明显不足等^[7,20],从而在症状之前识别“生活方式失衡”。系统综述亦提示,mHealth 与可穿戴辅助干预可额外带来 1~3 kg 减重,且效果与使用频度呈正相关^[8,21]。进一步应用强化学习(RL)后,系统能根据用户反馈动态调整推送频率与内容,避免“提醒疲劳”,同时

在关键节点增强干预^[5]。IoT+AI 因此构成一套基于行为轨迹与风险走势的连续预防体系,而非依赖零散问诊。

1.3 元宇宙健康教育与体重污名化干预 在行为预防中,让公众“理解并愿意改变”与“知道如何改变”同样重要。“元宇宙医学”专家共识将医学元宇宙定义为由医疗 IoT、AR/VR 与数字人构成的新型健康空间,强调沉浸式体验在教育与行为改变中的价值^[11-12,15-16]。医学 GPT 可作为“减重数字人导师”:在虚拟厨房演示如何阅读营养标签、辨识高能量食品;在虚拟健身场景中根据体能和共病情况指导有氧与抗阻训练,并实时反馈动作质量与安全边界;借助沉浸式体验呈现体重污名化造成的心理伤害,促进社会环境更包容^[17,22]。从 5P 视角看,元宇宙与数字人显著提升公众“参与(participatory)”度,并根据年龄、性别、文化背景与健康素养实现教育内容个性化(personalized)。因此,AI+ 赋能预防已不仅是“风险告知”,而是将抽象风险转译为可感、可执行的“数字生活方式处方”,并自然衔接至诊断与治疗阶段。

2 AI+ 赋能诊断

2.1 AI 驱动的肥胖表型识别与多病共存评估 AI 在肥胖诊断中的核心价值,首先体现在对疾病异质性的重新建模。传统依赖 BMI/腰围的分层方式虽便于筛查,却无法识别“代谢健康型肥胖”“代谢不健康型肥胖”“肌少性肥胖”等关键表型³,而这些表型在脂肪分布、肌肉量、炎症水平及代谢风险上差异巨大。另外肥胖基于病理生理可分为脑饥饿型、胃肠饥饿型、情绪饥饿型和低代谢型,有助于肥胖的治疗方案的选择。AI/ML 能整合实验室指标、心肺功能、睡眠监测(如 OSA)、心理测评及社会经济因素,构建由生物学与行为共同驱动的多维表型网络,涵盖内脏脂肪优势、肝脂肪沉积、炎症-心代谢高危表型,以及抑郁/暴饮、睡眠剥夺、药物相关等行为-心理亚型^[5,23]。

这一趋势已快速进入指南体系。包括 JOMES 2025、ADA 2025 与 ACC/AHA/TOS 在内的多国指南均强调,应从“以 BMI 为中心”转向“以并发症与多维表型为中心”的诊疗框架^[1,24-27]。AI 将海量多源数据压缩为可解释的表型结构,有助于临床从“单指标判断”跃迁至“个体特异性评估”,并为精准治疗奠定关键基础。

2.2 影像与体成分的自动化分析 AI 的第二个突破点在于影像体成分测量的自动化。传统 CT/MRI

分割脂肪与肌肉依赖大量人工操作,难以规模化推广。深度学习可自动、稳定提取内脏脂肪、皮下脂肪与肌肉量,提高效率并推动“肌少性肥胖-代谢风险-运动处方”链条落地^[5]。同时,基于 3D 光学与姿态估计的“无接触体成分评估”逐步成熟,可在门诊与家庭场景快速生成体脂率与腰臀比^[28],为基层与自我管理提供低门槛方案。

更重要的是,当影像 AI 与临床模型耦合后,可构建“体成分-代谢-心肺生理”立体图谱。例如,内脏脂肪体积可与胰岛素抵抗指数、NAFLD/NASH 风险评分及最大摄氧量(VO_{2max})自动关联,形成更完整的“代谢健康画像”。该图谱为随访、疗效评估与治疗个体化提供量化基线,使诊断体系更加精细可追踪。

2.3 AI 识别肥胖相关红灯信号与高危并发症 AI 的第三个诊断价值在于提升对高危并发症的识别能力。NLP 技术可自动结构化电子病历,识别 OSA、NAFLD/NASH、T2DM、心衰、抑郁及部分肿瘤等高危共病组合,并生成个体化随访清单^[2,5]。与人工筛查相比,AI 更能捕捉跨专科隐性风险,从而降低漏诊率。

在儿童与青少年群体中,该能力尤为重要。儿科肥胖指南强调“生长追踪曲线”与“共病聚类”对早诊意义重大³⁷,但依赖连续数据且执行复杂。AI 工具可在学校体检与儿科门诊自动完成轨迹预测、共病聚类与预警提示^[3,29],显著提升早期干预覆盖率,使生命早期健康管理真正可行。

综合来看,AI 诊断模块通过精准识别表型、体成分与并发症网络,拓展了肥胖诊断的深度与广度。从 5P 医学视角,其贡献集中于 precision 与 predictive:既让预测更前置,也让诊断更细化,为后续个体化治疗自然铺路。

3 AI+ 赋能治疗和精准治疗

AI 技术深度融入肥胖治疗,使原本依赖经验和单指标的决策体系逐步升级为以“数据-模型-反馈”为核心的精准干预框架。本节从药物、数字疗法与代谢手术三个层面阐述 AI 的作用,并进一步说明医学 GPT 的专业定位。

3.1 GLP-1 及新一代药物治疗的 AI 精准决策 最新 WHO GLP-1 指南、AGA 指南、JOMES 2025 及 ACC 专家共识均指出,GLP-1RA、GIP/GLP-1 及 GLP-1/GCGR 双重促效剂已成为成人肥胖治疗主干,同时 GLP-1/GIP/GCGR 的多重激动剂类药物的研发取得突破性进展;其选择应基于患者肥胖程

度、肥胖共病和心肾结局、患者可能存在的药物相关风险和禁忌症,以及患者偏好,并以 GRADE 证据等级为依据^[1,24-27,30]。高质量循证医学 RCT 研究显示 Semaglutide(司美格鲁肽)2.4 mg、Tirzepatide(替尔泊肽)10 mg/15 mg 在中国人群可实现 12%~20% 体重下降,并带来显著心肾获益。

AI 的核心贡献在于实现“人药匹配”。ML 模型可结合 BMI、体成分、代谢谱、遗传标记、行为特征及共病结构,预测药物反应、不良反应风险及停药后复胖模式^[5,31],为“药物 vs 手术 vs 强化生活方式”提供量化证据。

同时,“营养与 GLP-1 协同管理”研究指出,此类药物影响饱腹感、食欲与进食节律³²。AI 可基于膳食图像、进食时间与症状记录生成干预建议,如调整餐次结构、优化蛋白摄入或提示微量营养素补充,使药物治疗从“给药”延伸至“管理”。

3.2 数字疗法(DTx)与 AI 行为教练 DTx 将传统难以量化的行为改变转化为可监测、可追踪的数字流程。多项 RCT 显示,基于 App 的 DTx 可在 6~12 个月额外实现 2~5 kg 减重,并改善饮食行为与心理状态^[8,21,32-33]。其中,zanadio 在真实世界研究中达成约 7%~8% 体重下降³³;DEMETRA 试验显示使用率 ≥ 40% 者获益更显著;Lifeness 在奖赏相关饮食

行为改善方面具有优势。系统综述指出,AI 行为教练的效果可接近面对面干预^[9]。

AI/GPT 的加入使 DTx 从“内容推送”转向“策略干预”:① 图像识别自动估算餐食营养并提供即时反馈;② 对话式 GPT(如医学 GPT 减重子模型)识别情绪性进食与暴饮触发点,并推送 CBT 风格调节建议^[20,22];③ 强化学习根据用户行为动态优化推送策略,使提示更贴合个人偏好^[5]。这一模式以高频微干预嵌入真实生活,使行为改变更具持续性。

3.3 代谢/减重手术的 AI 全流程辅助 代谢手术仍是中重度肥胖及重要代谢并发症患者的高效选择。AI 正在手术全流程提供量化支持。术前,ML 模型可利用年龄、肝脏脂肪量、糖代谢状态、心理特质与社会支持等变量,预测手术并发症、体重下降轨迹及糖尿病缓解概率,使决策更依据数据而非经验。术后,AI 与 IoT 联合构成敏感随访体系,通过体重曲线、饮食记录与情绪量表识别营养不良、复胖趋势或心理问题,并自动触发营养及心理干预。该“前瞻式随访”显著提升术后质量与安全性。

3.4 医学 GPT:减重数字人专家的临床级应用 在“医学新质生产力”理念下,医学 GPT 被定位为可解释、可验证、可问责的智能医疗伙伴^[17-19],其在肥胖治疗中承担三大角色(表 1)。

从 5P 视角,本节集中体现 personalized 与 precision: AI 进行精准预测与靶向决策,医学 GPT 将复杂方案转译为患者可理解、可执行且可坚持的路径,为随后的康复与长期管理奠定基础。

4 AI+ 赋能康复

康复阶段的核心不只是“维持减重成果”,更在于促进代谢改善、恢复身体功能并降低复胖风险。AI、IoT 与元宇宙技术使康复管理从依赖主观感受与零散随访,转向连续监测和动态反馈的智能体系。本节从复胖监测、运动康复与肌少性肥胖管理三方面阐述 AI+ 的关键作用。

4.1 防复胖智能监测与行为微调 长期随访显示,多数患者在减重后 5 年内不同程度回升^[4],提示康复的重点在于持续调整而非一次性干预。AI 的优

表 1 医学 GPT 作为“减重数字人专家”的应用路线

策略	技术路径
循证处方顾问	嵌入 WHO、AGA、ADA 等指南与本地路径,按 GRADE 证据生成用药建议(剂量、滴定、停药、手术转诊)。
虚拟 MDT 协调者	整合多学科意见,生成结构化治疗解释,并以通俗语言回答关键问题。
个体化治疗规划师	基于云端 AI 与 IoT 数据,为患者制定包含药物、营养、运动、睡眠与心理支持的综合方案。

势在于能从高频数据中捕捉早期失衡信号,并提前识别复胖轨迹。例如体重滚动平均持续上升、夜间进食增多、周末活动下降或睡眠不足导致食欲调节紊乱等^[5]。

整合体重曲线、膳食图像、活动量、心率变异性与睡眠结构后,AI 可推送“微量行为调整”,如优化早餐蛋白比例、重设活动目标或减少睡前电子产品使用等。强化学习算法进一步提升干预“适配性”,根据近期完成度动态调整提醒频率与难度^[5],避免信息过载,同时保持必要推动力。

从康复管理角度看,这一 AI 监测体系相当于“数字化体重维持护栏”,有效填补随访间的管理空窗。

4.2 元宇宙康复与“运动处方游戏化” 在运动康复方面,AI 与元宇宙技术使运动处方由“任务执行”转

为“沉浸体验”。依据元宇宙医学共识^[11,23],VR/AR可构建安全、互动的“虚拟健身房”,通过姿态估计实时反馈动作质量与关节角度,降低损伤风险,并通过能量消耗和心率区间的可视化让患者理解训练收益。

“数字孪生身体”可展示体成分的动态变化,如内脏脂肪下降、肌肉量提升,即便体重变化有限也能增强坚持动力。游戏化数字疗法(GDTx)借助积分、挑战与社交机制显著提升运动依从性与持续率。

在此过程中,医学GPT作为“虚拟康复教练”,可结合IoT数据实时调整运动处方(类型、强度、频率),并解释心率区间、安全警示和恢复策略,使康复指导从冰冷指令转为可理解的陪伴式教学。

4.3 关注肌少性肥胖与老年功能康复 对老年或合并慢病患者而言,康复重点从“减重”转向肌肉量、力量与功能维持。肌少性肥胖由于兼具脂肪过多与肌肉减少,其管理不能简单套用一般减重方案。

AI可利用CT/MRI体成分、BIA、步态与握力等多模态信息识别肌少性肥胖表型^[28],并制定以“高质量蛋白摄入+阻力训练”为核心的处方。对于营养不足或跌倒风险较高人群,AI的实时评估尤为关键,可提示疲劳、代偿或训练不均衡。IoT力量训练设备(智能弹力带、阻力器械等)可自动记录训练量与动作质量,为AI提供连续反馈,使康复更具量化与可追踪性,也拓展了居家康复的可及性。

AI+ 康复实现了从体重维持到功能重建、从行为纠偏到运动指导的全链路升级,使康复成为“可测量、可反馈、可持续”的过程。借助医学GPT作为智能接口,患者获得一个可长期共同进化的数字康复伙伴,也为下一章节的长期管理体系奠定逻辑基础。

5 AI+ 赋能管理

随着肥胖管理从“阶段性治疗”迈向“全生命周期健康管理”,单点式干预已难支撑复杂需求。AI、IoT与数字人技术为此提供了“云一边一端”协同架构,使个体管理、群体策略与公共卫生工具统一于一个动态、自学习体系。本节从平台架构、5P落地与医学GPT三方面展开。

5.1 云一边一端闭环架构 借鉴AI驱动慢病管理经验,可将“AI+ 控制体重”构建为三层闭环体系^[9-10],使信息流、决策流与服务流贯通。

(1) 云端(cloud):智能计算与人群管理中心。云端整合多机构EHR、可穿戴数据、药物与支付记录,并运行核心模型:①肥胖及并发症风险预测;②药物/手术/数字疗法成本一效果评估;③公共卫生干预模拟工具。同时构建“人群级数字孪生队列”,预测不同策略在5~10年内的健康与经济影响,为区域决策提供量化依据。

(2) 边缘(edge:医院/社区):临床与基层执行枢纽。边缘层承担个体诊疗与重点人群管理:①CDSS为医生提供药物、手术与数字疗法组合建议,并附简明GRADE摘要;②社区健康管理师依据“高危复胖”“低依从性”名单开展随访。该层既支持个体治疗,也落实人群分层管理。

(3) 终端(end:家庭/个人):行为改变与自我管理中心。患者通过App、可穿戴与元宇宙场景形成连续的自我管理体系:①可与医学GPT对话获得行为指导与药物管理;②“健康仪表盘”展示体重、体成分、睡眠与实验室指标趋势,强化正向反馈。终端层构成“每日可用、即时反馈”的闭环入口。

5.2 5P医学在平台中的具体落地 “云一边一端”正是5P医学的工程化体现(表2)。

表2 5P医学的理念与落地路径

理念	路径
Predictive	云端模型预测肥胖、并发症与复胖风险,为资源配置与随访频率提供依据。
Preventive	医院/社区据预测结果组织生活方式门诊、药物预防与公共卫生干预。
Personalized	依据深度表型与行为画像定制饮食、运动、药物与数字疗法组合。
Participatory	BAIMGPT通过自然语言解释与共创目标,促进患者主动参与。
Precision	平台基于真实世界数据持续学习与迭代,提高干预效果与安全性。

5P构成从预测到精准执行、从个体到人群的闭环,使体重管理成为可测量、可反馈、可迭代的过程。

5.3 医学GPT的多方角色 在平台中,医学GPT不

只是交互工具,而是联通临床、个人与公共卫生的“数字桥梁”。

临床医生视角。医学GPT作为循证助手,提供最新指南(含GRADE等级)的一页式摘要,将复杂

选择转化为决策树与风险—获益图,并坚持“辅助而非替代”原则,提高诊疗一致性与效率。

患者与家庭视角。医学 GPT 作为健康素养友好的伙伴,以易懂语言解释“药物是否会反弹”“如何协调饮食”等问题;并通过本地化表达减少健康素养差异带来的不平等,同时提供持续的情绪与行为支持。

管理者与支付方视角。医学 GPT 可自动生成肥胖患病率、治疗模式、数字疗法覆盖率与健康经济报告,并按地区、年龄与共病结构提供动态分析,支持支付与公共卫生策略制定^[4]。

总体而言,“AI+ 管理”通过平台整合、5P 驱动与医学 GPT 交互,使体重管理从“临床孤岛”走向

“系统协同”,并为后续挑战与解决方案奠定坚实基础。

6 挑战与解决方案

AI 正在重塑肥胖防治全链条,但其真正价值取决于能否在真实世界中“安全、可靠、可持续”地落地。一个可信赖的 AI+ 控制体重体系需同时解决数据、伦理、公平性、流程与监管等关键挑战。

6.1 数据质量、泛化性与可解释性 多数 AI 模型仍基于单中心或单一族群数据,存在泛化性不足与潜在偏倚^[5,23],导致开发阶段表现优异但在不同地区与疾病结构中可能失效。破解该瓶颈需聚焦三方面(表 3)。

表 3 确保模型“可信”而非“好看”的策略

策略	实施技术路线
提升数据多样性	建立跨机构、多地区联合数据库,并用联邦学习提升数据代表性;
强化可解释性	采用 SHAP、LIME 等 xAI 展示特征贡献,增强医生与患者对算法的理解 ⁵ ;
遵循方法学规范	按 TRIPOD+AI、CONSORT-AI 进行设计与报告,使研究可复现、可监管 ³⁷ 。

上述措施共同构成模型“科学落地”的基石。

6.2 公平性、隐私与伦理治理 医疗 AI 存在“健康数据贫困”现象:弱势群体最需要干预,却最缺乏高质量数据。若缺乏治理,AI 可能放大既有不平等。STANDING Together 等倡议提出,数据采集必须保证多样性,且需提前评估少数族裔与弱势群体的性能。可行路径如下(表 4)。

6.3 临床流程整合与支付体系适配 AHA 指出,“肥胖科学”与“临床实践”之间的鸿沟源于循证方案复杂且门诊时间有限^[4]。AI 能否真正发挥作用,关键在于与临床工作流和支付体系的匹配。整合原则如下(表 5)。一旦工作流与支付体系对接,AI 才能从试点走向常规。

表 4 防止 AI 成为“不平等放大器”的策略

战略	实践战术
技术层面	差分隐私、同态加密、脱敏以降低风险;
治理层面	多学科伦理委员会定期审查模型在不同人群的表现;
设计层面	将公平性设为核心性能指标,而非事后修补。

6.4 GPT/数字人的可靠性、安全与监管 白春学教授在“医学 GPT 研发应用之吾见”与“BAIMGPT 白皮书”中强调:医学 GPT 必须坚持“安全优先、循证优先、医生主导、分级授权”^[17-19]。其落地路径可概括为三类(表 6)。

表 5 让 AI“用得上、用得动”的策略

策略	实践方法
少而精的信息推送	仅在筛查、治疗选择、复胖预警等关键节点提供简明建议;
严格对齐指南	所有输出须可追溯至现行指南或高质量证据;
支付激励	将数字疗法、AI 行为教练纳入医保或人头付费体系,使长期管理获得制度支撑。

表 6 让医学 GPT 可用、能用、可信的策略

策略	实践技术路线
明确权责边界	限于教育、辅助决策与行为管理,不独立处方或诊断;
双轨安全架构	LLM 输出经知识图谱与规则引擎过滤,高风险建议需人工确认;
沙箱监管	先在限定场景试点,逐步推广,并建立“AI 风险事件”监测与反馈机制。

7 展 望

面向未来, AI、IoT、数字孪生、元宇宙与医学 GPT 的融合, 将推动体重管理从“治疗肥胖”迈向“治理体重”, 再提升至“塑造健康能力”的更高维度。随着多模态大模型、联邦学习和可解释 AI 的成熟, 个体的代谢、行为、环境与社会因素将被整合进更立体的风险图谱; 数字孪生人体也可在云端同步“学习”患者真实世界变化, 并动态更新最佳干预策略。届时, 医学 GPT 不再只是决策助手, 而将成为人人可及的“数字体重与代谢健康伙伴”, 陪伴日常生活的每一次决策。与此同时, 医疗支付体系、隐私保护架构与伦理监管也将持续演进, 为 AI 的大规模应用提供制度化保障。未来的体重管理平台或将如“智能电网”般运行: 在云端调度资源, 在社区精准触达, 在家庭持续反馈, 使健康干预真正实现按需、实时与个体化。最终, AI+ 控制体重的目标并非减重本身, 而在于帮助公众重新获得代谢稳态、身体功能与生活掌控感。随着技术演进、临床循证与公共卫生协同推进, 一个低肥胖率、高健康素养、具备自我管理能力的群体形态将逐步成形。这亦是 AI 时代慢病治理的核心愿景——让更健康的未来, 不再依赖偶然, 而能通过系统智能实现。

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 陈颖: 撰写、修改论文, 核对参考文献; 白春学: 选题、撰写、修改、定稿, 使用 AI 技术生成图片。

参考文献

- [1] TEKE J, MSISKA M, ADANINI O A, et al. Artificial intelligence for obesity management: a review of applications, opportunities, and challenges [J]. *Obes Med*, 2025, 58: 100657.
- [2] HUANG L, HUHULEA E N, ABRAHAM E, et al. The role of artificial intelligence in obesity risk prediction and management: approaches, insights, and recommendations [J]. *Medicina*, 2025, 61(2): 358.
- [3] AZMI S, KUNNATHODI F, ALOTAIBI H F, et al. Harnessing artificial intelligence in obesity research and management: a comprehensive review [J]. *Diagnostics*, 2025, 15(3): 396.
- [4] KOO T H, LEONG X B, JET KWAN N G, et al. Emerging trends in telehealth and AI-driven approaches for obesity management: a new perspective [J]. *Malays J Med Sci*, 2025, 32(1): 26–34.
- [5] HALLOCK R, MEHTA N, PATEL N, et al. A systematic review of AI-enabled behavioral coaching for obesity and cardiometabolic risk [J]. *Curr Obes Rep*. 2025, 19(1):24.
- [6] KIM M, CHOI H J. Digital therapeutics for obesity and eating-related problems [J]. *Endocrinol Metab*, 2021, 36 (2) : 220–228.
- [7] GEMESI K, WINKLER S, SCHMIDT-TESEH S, et al. Efficacy of an app-based multimodal lifestyle intervention on body weight in persons with obesity: results from a randomized controlled trial [J]. *Int J Obes*, 2024, 48(1): 118–126.
- [8] THORGEIRSSON T, TORFADOTTIR J E, EGILSSON E, et al. Randomized trial for weight loss using a digital therapeutic application [J]. *J Diabetes Sci Technol*, 2022, 16(5): 1150–1158.
- [9] BERTOLI S, CAPODAGLIO P, COLOSIMO S, et al. Effectiveness of a digital therapy on 6-month weight loss in people living with obesity: the DEMETRA randomized clinical trial. *J Med Internet Res*. 2025, 27:e72054.
- [10] AUKAN M I, LARSEN M A, MELAN T I, et al. Beyond weight loss: digital therapeutic for behavioral change and psychological well-being for individuals with overweight and obesity in a primary healthcare setting—a randomized controlled pilot study [J]. *Front Digit Health*, 2025, 7: 1671649.
- [11] ROTH L, ORDUNUNG M, FORKMANN K, et al. A randomized-controlled trial to evaluate the app-based multimodal weight loss program *zanadio* for patients with obesity [J]. *Obesity*, 2023, 31(5): 1300–1310.
- [12] CHEW H S J, CHEW N W, LOONG S S E, et al. Effectiveness of an artificial intelligence-assisted app for improving eating behaviors: mixed methods evaluation [J]. *J Med Internet Res*, 2024, 26: e46036.
- [13] CHEW H S J, ACHANANUPARP P, DALAKOTI M, et al. Public acceptance of using artificial intelligence-assisted weight management apps in high-income Southeast Asian adults with overweight and obesity: a cross-sectional study [J]. *Front Nutr*, 2024, 11: 1287156.
- [14] ZHU X, et al. How do gamified digital therapeutics work on obesity self-management. *Digital Health*. 2024, 10.
- [15] CELLETTI F, et al. WHO guideline on the use and indications of GLP-1 therapies for adults living with obesity. *JAMA*. 2025, 324.
- [16] GRUNVALD E L, et al. AGA clinical practice guideline on pharmacological interventions for adults with obesity [J]. *Gastroenterology*. 2022;163(5):1198–1225.
- [17] BAE J H, et al. 2024 clinical practice guidelines for the diagnosis and treatment of obesity in Korea [J]. *J Obes Metab Syndr*. 2025;34(1):1–39.
- [18] AMERICAN DIABETES ASSOCIATION. Obesity and weight management for the prevention and treatment of type 2 diabetes: Standards of Care in Diabetes—2025 [J]. *Diabetes Care*. 2025; 48(Suppl 1):S167–S176.
- [19] Gilbert O. 2025 concise clinical guidance: an ACC expert consensus decision pathway on obesity pharmacotherapy [J]. *J Am Coll Cardiol*. 2025;85(2):123–149.
- [20] KUSHNER R F. A review of current guidelines for the treatment of obesity [J]. *Am J Manag Care*. 2022;28(2):e55–e64.

- [21] KELLY A S. Clinical practice guideline for the evaluation and treatment of children and adolescents with obesity [J]. *Pediatrics*. 2023;151(2):e2022060640.
- [22] YURISTA S R, EDER R A, FEELEY M, et al. A closer look at ACC/AHA and ESC guidelines for managing obesity and overweight in adults[J]. *JACC Adv*, 2023, 2(7): 100570.
- [23] AMERICAN HEART ASSOCIATION. Significant gaps between science of obesity and care patients receive [J]. *Circulation*. 2024;149(10):e1 - e15.
- [24] MOZAFFARIAN D. Nutritional priorities to support GLP-1 therapy for obesity[J]. *Am J Clin Nutr*. 2025.
- [25] YANG D, ZHOU J, SUN M, et al. Expert consensus on the metaverse in medicine[J]. *Clin eHealth*. 2022;5:1 - 9.
- [26] YANG D W, ZHOU J, SONG Y L, et al. Metaverse in medicine [J]. *Clin eHealth*, 2022, 5: 39-43.
- [27] YANG D W, SUN M T, ZHOU J, et al. Expert consensus on the “Digital Human” of metaverse in medicine [J]. *Clin eHealth*, 2023, 6: 159-163.
- [28] MASSETTI M, CHIARIELLO G A. The metaverse in medicine [J]. *Eur Heart J Suppl*, 2023, 25: B104-B107.
- [29] JAGATHEESAPERUMAL S K, BARRETO A G, CDE ALBUQUERQUE V H. Metaverse platforms for immersive healthcare: a survey on telemedicine solutions [J]. *ACM Comput Surv*, 2026, 58(2): 1-31.
- [30] COUTINHO W. Noncontact assessment of body composition by 3D optical imaging: a scoping review [J]. *Obesity (Silver Spring)*. 2023;31(6):1234 - 1245.
- [31] ARORA A, ALDERMAN J E, PALMER J, et al. The value of standards for health datasets in artificial intelligence-based applications[J]. *Nat Med*, 2023, 29(11): 2929-2938.
- [32] ALDERMAN J E, PALMER J, LAWS E, et al. Tackling algorithmic bias and promoting transparency in health datasets: the STANDING Together consensus recommendations [J]. *Lancet Digit Health*, 2025, 7(1): e64-e88.
- [33] 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, 385: e078378.

引用本文

陈 颖,白春学. AI+控制体重研究进展及展望[J]. 元宇宙医学,2025,2(4):17-24.

CHEN Y,BAI C X. Research progress and prospects of AI+ weight control[J]. *Metaverse Med*,2025,2(4):17-24.

DOI: 10.61189/429601aigxuz

· 医学教育 ·

死亡教育与元宇宙技术融合的新进展:对本土医学教育全周期分层探索的启示



张 雯, 张 敏, 马畅畅, 张梦瑶, 魏丽萍, 周逸飞, 王翔宇, 郑玉英, 余 情*

复旦大学附属中山医院教育处, 上海 200032

[摘要] 以国际顶刊《柳叶刀》“将死亡带回生活”倡议为背景, 针对我国死亡教育供给不足的突出问题, 首先综述近 3 年元宇宙医学教育技术赋能死亡教育中的脑死亡诊断、坏消息告知、预立医疗照护/预嘱沟通、临终与死后护理、终末期沟通 5 个典型案例; 其次在欧美及中国相应指南指导下, 提出认知与价值、情感与心理、沟通与关系、文化与行为 4 版块死亡教育内容, 并按照本土院校、毕业后、继续医学教育的三阶段实施分层递进, 同时阐述元宇宙医学教育技术(VR、AR、MR、AI 增强虚拟患者等) 赋能路径, 以供国内同行讨论合力推动死亡教育本土化、体系化、可持续的高质量发展。

[关键词] 死亡教育; 元宇宙医学教育技术; 分层递进; 赋能路径; 本土化

[中图分类号] R 48 **[文献标志码]** A

New Advances in the integration of death education and metaverse technologies: implications for a tiered, full-cycle approach to medical education in China

ZHANG Wen, ZHANG Min, MA Changchang, ZHANG Mengyao, WEI Liping, ZHOU Yifei, WANG Xiangyu, ZHENG Yuying, YU Qing*

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

[Abstract] Against the backdrop of The Lancet's international initiative to “bring death back to life,” and in response to the pressing issue of insufficient death education in China, this paper first reviews five representative cases over the past three years in which metaverse-based medical education technologies have empowered death education — namely, brain death diagnosis, breaking bad news, advance care planning and advance directives communication, end-of-life and postmortem care, and terminal communication. Guided by relevant European, American, and Chinese guidelines, the study further proposes four core modules of death education: cognition and values, emotions and psychology, communication and relationships, and culture and behavior. These are structured into a tiered and progressive three-phase framework spanning undergraduate, postgraduate, and continuing medical education. Finally, the paper elaborates on the empowerment pathways of metaverse medical education technologies — including VR, AR, MR, and AI-enhanced virtual patients — to promote the localization, systematization, and sustainable high-quality development of death education in China through collective academic effort.

[Key Words] death education; metaverse medical education technology; tiered progression; empowerment pathways; localization

2022 年医学顶刊《柳叶刀》死亡价值报告^[1]提出“将死亡带回生活”的倡议, 指出世界各地的卫生和社会保障系统无法为临终者及其家属提供适当且富有同情心的照护, 死亡教育的缺位导致了照护失衡和人文关怀的流失, 亟待推进与质量提升。死亡

教育^[2]是指导人们认识和对待死亡而进行的特殊教育, 包含对大众的普及性教育和医学专业人员的专业性教育, 旨在向人们传递死亡相关的知识, 树立科学的生死观, 提升死亡事件的应对能力。一项面向国内院校医学教育阶段的横断面研究^[3]显示, 在

[收稿日期] 2025-10-12

[接受日期] 2025-12-22

[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). Tel: 021-64041990, E-mail: yu.qing@zs-hospital.sh.cn

校医学生在死亡认知、临终沟通与情绪调适方面的需求突出,但接受系统化训练者比例较低。我国人口老龄化加剧,慢性病及癌症患者逐年增长,医院往往被默认为死亡发生的最终场所,对临床医师更需加强死亡教育体现人文精神^[4],然而由于师资供给、课程与评价体系不完善等因素,制约了毕业后医学教育及继续医学教育培养阶段的落实与拓展。

近年元宇宙技术因其能够提供沉浸式学习体验、互动性与协作性、个性化与自适应学习、现实与虚拟的无缝融合等众多优势,正在推动医学教育体系的革新^[5],其在死亡教育的高敏感场景中也形成了丰富可验证的教学证据与评价路径^[6-10]。本文首先分析 5 个代表性实例,其次结合本土医学教育全周期特点,提出死亡教育分层递进内容框架,同时阐述元宇宙技术赋能路径,以供国内同行讨论推进其高质量发展。

1 死亡教育与元宇宙技术融合新进展

1.1 脑死亡诊断与元宇宙技术融合 德国明斯特大学根据《德国脑死亡诊断指南》,在重症监护室虚拟环境中开发并实施了虚拟现实(virtual reality, VR)脑死亡诊断训练模块^[6],并将其纳入本科阶段“器官移植与脑死亡周”的必修课程,以 VR 替代原有的模型人示教。课程保持每组 6 人的小班结构,但将传统只能单次演示的模型人环节重构为可反复练习、具有多分支演进的沉浸式流程,涵盖瞳孔反射、角膜反射、前庭冷热试验、疼痛刺激等关键诊断步骤,并辅以硬件操作视频与预习播客以适配不同 VR 使用经验的学生。自 2021 至 2024 年,共有近 800 名医学生参与(混合式 242 人,全 VR 616 人),问卷响应率为 93%。

结果显示,学生对 VR 训练的总体偏好显著高于传统模型人方式,模拟后自我感知的脑死亡诊断胜任力显著提升;与传统方法相比,VR 组的个体练习时间更长,情境更为多样,并在多轮迭代中通过引入反射模拟、结构优化与流程管理改进降低了体验差异、提升了稳定性。研究团队同时开展了随机对照试点,验证了 VR 在可替代性与可扩展性方面的潜力。该项目表明,VR 技术在临床实践难以真实再现且伦理敏感度极高的死亡教育主题中,能够在不增加伦理风险的前提下提供标准化、可重复与可评估的训练,并与标准化病人及小班沟通教学模块形成“认知—流程—沟通”的连续教学链,为后续基于 VR 的客观考核与胜任力评价奠定了可行性基础。

1.2 坏消息告知与元宇宙技术融合 台湾长庚大学医学院附属林口长庚纪念医院采用随机三臂实验设计^[7],比对线下小班沟通技能训练(in-person communication skills training, iCST)、基于虚拟现实的多分支情境训练(VR),以及二者结合(iCST+VR),研究对象为五年级医学生。

所有受试者均先接受 30 min 视频微课,聚焦日本精神肿瘤学会提出并在台湾广泛使用的 SHARE 沟通模型,随后依组别进入实践环节:iCST 组在小班设置中进行两次角色扮演并接受教师反馈;VR 组进入“肿瘤真相告知”虚拟现实模块,涵盖“新发乳腺癌确诊”“结直肠癌复发转移”“肺癌临终阶段”三类临床情境,每一模块包含正向与负向演示以及互动测评题;iCST+VR 组则依次完成两种训练。研究主要终点为癌症真相告知观念量表(truth-telling questionnaire-20, TTQ-20),次要终点为沟通信心与学习满意度。评价时点设为基线(T0)、干预后即刻(T1)、3 个月(T2)及 6 个月(T3)。共 79 名学生入组并随机分配至 iCST 组($n=28$)、VR 组($n=29$)、iCST+VR 组($n=22$)。结果显示,iCST+VR 组在 6 个月随访时 TTQ-20 改善幅度显著优于任一单一路径;iCST 与 VR 两组在 TTQ-20 上无显著差异,提示 VR 在主要结局上可与小班训练等效。三组沟通信心均随时间显著提升,但组间无显著差别;学习满意度则以 iCST 组最高,而 VR 及 iCST+VR 两组相近。

研究结论认为,VR 在癌症真相告知这一高难度、伦理敏感的沟通场景中具备等效于小班面对面训练的教育效果,可作为巩固课程与小班训练的互补组合。在师资与资源受限时,VR 亦可作为可扩展替代路径。作者进一步建议结合录像回放与客观化量表强化测评,以构建“沉浸式情境预演—小班微技能打磨—随访评估”的混合式教学模式。

1.3 预立医疗照护/预嘱沟通与元宇宙技术融合 预立医疗照护(advance care planning, ACP)是指病人在健康或疾病早期阶段,通过沟通与讨论明确自身医疗照护意愿的过程;预立医疗决定/预嘱(advance decisions/directives, ADs)则是病人在充分知情下,以法律文件形式预先表达临终或重大疾病情境下的医疗选择。二者已成为提升临终照护质量与尊重患者自主的重要制度。面向 ACP/ADs 这一制度化沟通主题,台湾台北慈济医院开发了嵌入式测评的 VR 教学模块^[8],在场景中设置 7 个知识问答,并于模块前后及 3 个月随访时分别测量知识、态度、实施自我效能与 ADs 相关临床行为。2020 年 7 月至 2022 年 6 月,共有 89 名医护(医师 30 名、护士 59 名;

其中 78.7% 无安宁照护经验)完成训练。结果显示,学习后所有受试者均能正确回答 7 个知识项;态度量表得分由 (32.29 ± 3.80) 升至 (33.06 ± 3.96) ($P < 0.05$),实施自我效能由 (13.96 ± 2.68) 升至 (16.24 ± 2.67) ($P < 0.001$);在 3 个月随访时,ADs 相关行为得分由 (11.23 ± 4.01) 升至 (13.87 ± 4.11) ($P < 0.001$),表现为更主动地向患者介绍 ADs、与家属讨论 ADs 等。研究指出 VR 在动机激发与行为迁移上的独特价值:不仅改善知识与信心,更能在短期内促进临床行为改变。实施层面,VR 可降低师资投入的成本并支持自定步调学习;评价层面,可结合学习分析与行为随访强化证据链条。

1.4 临终与死后护理与元宇宙技术融合 韩国一项准实验研究将增强现实(augmented reality, AR)临终体验嵌入“死后护理”仿真导师计划^[9],纳入入职未满 12 个月的三级医院新护士 18 名,采用前后测评估临终/丧亲照护舒适度、死亡焦虑、同情能力等指标。

结果显示,干预后临终/丧亲照护舒适度与同情能力均显著提高。作者认为,以 AR 触发情境体验+导师制结构化反思,可在不增加伦理风险的前提下,提升学习者的情感与行动准备度,特别适用于流程细节与“仪式敏感性”的训练。

1.5 终末期沟通与元宇宙技术融合 SOPHIE (standardized online patient for healthcare interaction education,用于医疗保健互动教育的标准化在线患者模型)由美国罗切斯特大学开发,核心为基于网页的虚拟患者与自动化个性化反馈,用于支持医护人员在终末期沟通中的日常化练习与改进。该研究^[10]开展随机、对照的试点:纳入 30 名学习者(医学生、护士、住培医师、医师助理、心理师、灵性照护人员等),随机分配至 SOPHIE 训练组或对照组(不训练),随后由标准化病人进行客观化评估。结局指标基于“medical situation-values-plan (MVP)”模型的三大核心域(同理、清晰表达、患者赋能)构建。

结果显示,SOPHIE 组在综合得分、总体沟通质量、患者赋能与同理方面均显著优于对照。受试者普遍认为系统易用、响应贴近临床且能通过语音与语言表达情绪。研究者认为,人工智能(artificial intelligence, AI)增强的虚拟患者可作为可获得性高、可扩展且可定制的沟通训练工具,在资源受限或需高频练习的情境中与小班/标准化病人训练形成互补。

2 本土医学教育全周期分层内容框架与元宇宙技术融合路径

2.1 本土化死亡教育内容界定 参考美国 *Clinical Practice Guidelines for Quality Palliative Care, 4th edition*^[11]、欧洲 EDUPALL 项目^[12]、我国《医学人文关怀提升行动方案(2024—2027 年)》^[13]及《安宁疗护实践指南(2025 年版)》^[14],将本土化死亡教育内容界定为以下 4 版块。

2.1.1 认知与价值 A1 生死观与生命终末学——强调“将死亡带回生活”的公共卫生取向与专业使命;A2 公共“死亡素养”——以“知识—态度—行动”的协同为导向,支撑校园—医院—社区协同教育;A3 伦理、法律与意愿沟通——围绕“尊重患者意愿—共同决策—规范记录与调用”的流程目标展开对话。

2.1.2 情感与心理 B1:死亡态度/死亡焦虑与情绪调适——系统评估患者与家属的认知、情绪与支持系统,并提供分层心理干预与社会支持;B2:悲伤/丧亲支持——遵循“陪伴—倾听—仪式—随访”要点,尊重家庭习俗并鼓励家属参与遗体料理;B3:专业人员的道德伤害与自我关照——将同情疲劳与道德困境的识别、团体督导与资源链接纳入纵贯主题。

2.1.3 沟通与关系 C1:传递坏消息与预后沟通——采用结构化脚本(开场—探询—信息—情感—总结),以录像回放促进反思;C2:家庭会议与共同决策——以建立信任、坦诚沟通为原则,完成价值澄清与目标设定;C3:死亡通知、临终告别与遗愿工作——规范死亡通知的话语与流程,推动生命回顾与愿望清单的实现。

2.1.4 文化与行为 D1 仪式与文化敏感性——尊重宗教/民族差异与家庭习俗,关注儿童与丧亲父母等特殊人群;D2 濒死期识别与死后护理——掌握濒死征象,并完成家属准备与规范交接;D3 校园/社区死亡教育与社会资源链接——制定个体化支持计划,推进家属健康教育与社会资源对接,形成院内外联动。

2.2 内容分层框架与元宇宙技术融合路径 根据我国医学教育全周期特点,遵循分层递进、螺旋上升的规律,设计框架如下。

2.2.1 院校医学教育阶段 内容组合:建议聚焦 A1 - A3、B1、B2(基础)、C1(入门)、D1、D2(观摩)、D3,形成对死亡的科学认知、伦理敏感与基础沟通能力,同时认识濒死征象与家属准备、死后护理与仪式敏感性。

元宇宙技术赋能路径:以 VR/社交虚拟空间重建“坏消息初谈、首次家属沟通、死亡通知”多分支情境并录像回放,AR/混合现实(Mixed Reality, MR)用于临终与死后护理教学中的环境—体位—声学线索(如喉鸣)的可视化观摩,AI 增强虚拟患者承接课前/后高频微练及即时反馈,固化对话节点与记录要点。

2.2.2 毕业后医学教育阶段 内容组合:围绕 C1 - C3、A3、D2,并以 B2 - B3 纵贯,构建“坏消息—价值澄清—目标设定—家庭会议—意愿沟通与意愿记录—濒死识别与死后护理交接”的链式任务;坚持“尊重意愿—共同决策—规范记录”的流程要求。

元宇宙技术赋能路径:采用 VR 高级分支完成“家庭会议/目标设定”的链式演练;在重症监护室/肿瘤/老年病区以 MR/数字孪生病区推演“急变—镇静—家属沟通—记录—转归”的跨岗位协作;以 AI 虚拟标准化病人支持在岗微练(如意愿沟通话术与记录要点),提升练习频次与可及性。

2.2.3 继续医学教育阶段 内容组合:以 C2 - C3、D1 - D2 为主线,延展 D3,聚焦复杂/冲突情境的共同决策(含撤机等)、院内—院外转衔路径(急诊—病房—临终病区—社区/居家)、死后护理与哀伤随访、团队身心健康与同情疲劳防治等。

元宇宙技术赋能路径:以 AR/VR 复杂场景推演及回放复盘统一“做法—说法—记法”,以 MR/数字孪生进行跨部门转运/会诊/交接的流程再设计与演练,借助社交虚拟空间开展跨院区/跨学科策略演练与共识构建。

3 讨 论

以美国为代表的发达国家较早将死亡教育系统化纳入医学教育序列。研究表明^[15],美国自 20 世纪早期即出现死亡相关研究与课程探索,1960—1970 年在学术出版与社会话题推动下迅速兴起,随后形成了讲授—小组讨论—角色扮演—标准化病人—临终/安宁机构参访等“组合式”教学,并持续追踪课程普及与学习成效。大众传媒的引导、学术研究的支撑与社会发展的需求,共同促使医学院校课程从零散探索走向结构化与常态化实施。我国死亡教育整体起步较晚,大致经历 20 世纪 80 年代的序幕—90 年代的起步—21 世纪初的探索三个阶段:1991 年武汉大学开设“死亡哲学”选修课,1997 年出版国内医学院校首部死亡教育教材《人的优逝》,此后多地启动课程与教材建设,近年在政策倡议与学术讨论层面亦有推进;但从整体看,仍存在课程供

给不足、师资与教学资源薄弱、制度化与评价体系不健全等共性问题。

近 5 年我国学者^[16-20]从“理念—路径—工具”三层提出本土死亡教育推进策略包括:(1)厘清死亡教育的本质、目标与功能,把“唤醒与转化死亡意识—促进生命意义澄明—提升死亡质量”作为核心旨归,以应对现实推进中的环境、概念与组织三重困境。(2)优化课程与师资体系:在医学人文/伦理课程中嵌入系统化模块,强化标准化病人与情境式训练,联动医院与社区资源,加快教材与教案的标准化。(3)技术赋能与跨学科:基于可视化计量研究,建议引入 VR、AR 等新技术提升教学质量,同时关注医学生心理支持与职业倦怠预防,以实现知识—态度—行为的协同改变。基于上述共识与痛点,本文以“4 版块—12 模块”统摄死亡教育核心内容,按照院校—毕业后—继续医学教育的全周期路径实施分层递进;并将元宇宙医学教育技术(VR、AR、MR、AI 增强虚拟患者等)用于高敏感、难常态化复制的教学情境,以可控可重复的方式弥补真实临床训练的伦理与资源约束。这一导向与目前国内大力倡导 AI 赋能,以及推进安宁疗护实践的政策语境是完全契合的。

在后续建设过程中需考虑诸多待改进之处。(1)循证基础待加强:现有国内外证据多为单中心、短随访或前后测设计,长期结局(患者/家属体验、医疗决策质量)、系统性指标(如终末期不恰当侵袭处置的下降)与成本—效果证据仍显不足,亟待多中心随机对照与纵向研究予以填补;(2)标准化与共享不足:脚本、量表与流程存在机构间差异,建议在国家与学术共同体层面建设可共享的“场景脚本库—话术与文书模板库—文化与仪式素材库”,并与院内培训和病历质控系统对接,提升可比性与可推广性。(3)治理与伦理边界:沉浸式训练可能带来情绪负荷与“去敏感化”风险,同时存在数据安全与隐私治理要求;建议建立分级暴露—退出与心理支持—数据最小化与权限管理的治理框架,并形成“主带教+技术助教”的复合型师资。

美国等发达国家的长期化与体系化实践证明:社会文化支持、课程体系化与证据驱动是死亡教育持续演进的核心动力;我国在“迟启动、快追赶”的进程中,需在理念澄清、课程与师资、技术与评价三端协同推进。本文的构想方案,旨在在本土政策与文化语境下,构筑可获得、可扩展、可验证的死亡教育新范式,并以循证改进与标准治理为抓手,推动死亡教育体系化、在地化与可持续的高质量发展。

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

参考文献

- [1] SALLNOW L, SMITH R, AHMEDZAI S H, et al. Report of the Lancet Commission on the Value of Death: bringing death back into life[J]. *Lancet*, 2022, 399(10327): 837-884.
- [2] 周雨欣, 周明飞, 纪光伟. 死亡素养: 安宁缓和医疗的新公共卫生视角[J]. *医学与哲学*, 2024, 45(4): 1-5.
- [3] FAN L Q, PAN L Y, YAN Y J, et al. Death education needs and their influencing factors among Chinese medical and nursing students[J]. *Death Stud*, 2025: 1-12.
- [4] 衣婷婷, 程春梅, 黄湘楠, 等. 开展死亡教育和临终关怀, 提高医师人文素养[J]. *中国毕业后医学教育*, 2024, 8(7): 530-534.
- [5] 杨达伟. 元宇宙医学对医学教育的颠覆[J]. 2024(2): 33-38.
- [6] JUNGA A, KOCKWELP P, VALKOV D, et al. Teach the unteachable with a virtual reality (VR) brain death scenario - 800 students and 3 years of experience[J]. *Perspect Med Educ*, 2025, 14(1): 44-54.
- [7] CHEN S Y, FANG J T, HSIEH M J, et al. Enhancing cancer truth-telling perspectives using virtual reality in communication skills training: an experimental study among medical students[J]. *Perspect Med Educ*, 2025, 14(1): 539-548.
- [8] CHANG Y K, WU Y K, LIU T H. The effectiveness of a virtual reality teaching module on advance care planning and advance decision for medical professionals[J]. *BMC Med Educ*, 2024, 24(1): 112.
- [9] KYONG K, KIM B. Effects of a simulation-based care after-death mentoring program for new nurses: augmented reality end-of-life experience[J]. *J Palliat Med*, 2024, 27(12): 1631-1638.
- [10] HAUT K G, EPSTEIN R, CARROLL T M, et al. SOPHIE: Testing a virtual, interactive, AI-augmented end-of-life communication training tool (RP122). *Journal of Pain and Symptom Management*, 2024, 67(5): e794-e795.
- [11] National Consensus Project for Quality Palliative Care. Clinical Practice Guidelines for Quality Palliative Care, 4th edition. [EB/OL]. (2018-01-01) [2025-10-12]. <https://www.nationalcoalitionhpc.org/npcp>.
- [12] MASON S R, LING J L, STANCIULESCU L, et al. From European association for palliative care recommendations to a blended, standardized, free-to-access undergraduate curriculum in palliative medicine: the EDUPALL project[J]. *J Palliat Med*, 2020, 23(12): 1571-1585.
- [13] 国家卫生健康委办公厅. 关于印发医学人文关怀提升行动方案(2024-2027年)的通知. [EB/OL]. (2024-09-29) [2025-10-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6979036.htm
- [14] 国家卫生健康委办公厅. 安宁疗护实践指南(2025年版). (2025-08-26) [2025-10-12]. <https://www.nhc.gov.cn/yzygj/c100068/202508/77bbbf599f894e40bbefff938e8a577.shtml>
- [15] 赵忻怡, 陈奕帆, 刘 姝, 等. 美国医学院校死亡教育及其启示[J]. *中华医学教育杂志*, 2020, 40(11): 940-944.
- [16] 王流芳, 胡志民. 中国死亡教育发展现状与思考[J]. *医学研究杂志*, 2022, 51(10): 180-182.
- [17] 兰霞萍, 王云岭. 死亡教育的本质意蕴、目标追求与功能实现[J]. *医学与哲学*, 2024, 45(23): 49-54.
- [18] 谷晓阳, 姜 珊. 医学史课程中的死亡教育[J]. *医学教育管理*, 2024, 10(5): 511-516.
- [19] 骆庆萍, 赵 婷. 医者仁心, 敬畏生命——我国医学生死亡教育研究[J]. *叙事医学*, 2024, 7(4): 258-262.
- [20] 安玉泽, 王晶晶, 付静茹, 等. 国内外医学生生死教育研究热点及可视化分析[J]. *医学与哲学*, 2024, 45(22): 57-62.

引用本文

张 雯, 张 敏, 马畅畅, 等. 死亡教育与元宇宙技术融合的新进展: 对本土医学教育全周期分层探索的启示[J]. *元宇宙医学*, 2025, 2(4): 25-29.

ZHANG W, ZHANG M, MA C C, et al. New Advances in the integration of death education and metaverse technologies: implications for a tiered, full-cycle approach to medical education in China[J]. *Metaverse Med*, 2025, 2(4): 25-29.

AI+赋能呼吸病学教学:构建面向新质生产力的数字健康胜任力培养体系



白莉¹, 杨达伟², 余情³, 白春学^{2*}

1. 陆军军医大学新桥医院呼吸与危重症医学中心, 重庆 400037

2. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032

3. 复旦大学附属中山医院教育处, 上海 200032

[摘要] 在元宇宙医学与医学新质生产力的双重驱动下,呼吸病学教学亟需从传统的“知识讲授与指南复述”模式,升级为面向未来的“AI+呼吸病学新质生产力中心”——兼具教学原型探索与复合型人才孵化功能的前沿阵地。新时代的呼吸科医生,除扎实的临床专业能力外,还需具备数字健康胜任力,能够批判性地理解、评估并合理应用人工智能(AI)、物联网(IoT)、数字孪生(digital twin)及扩展现实(extended reality, XR)等新兴技术,在人机协同的多学科诊疗团队(MDT)与“数字人专家”辅助框架下,开展安全可靠的临床决策、风险分层评估与治疗方案推演。国际循证教育研究显示,AI已在医学影像判读、临床技能评估、自适应学习与即时反馈等场景中初步应用,但多呈现为孤立的“点状创新”,尚未形成跨学科融合、结构化设计与治理机制前置的一体化课程体系。呼吸病学因其天然的多模态特征与高度可视化的过程数据(涵盖影像学、肺功能、血气分析、症状动态轨迹、可穿戴设备监测指标、机械通气参数及睡眠监测数据等),是最适宜通过数字孪生与沉浸式XR场景,系统性弥补传统课堂“不可见、难模拟、难推演”等核心短板的学科领域。本方案以国际数字健康与AI胜任力共识为引领,系统对标《欧洲医生数字教育能力成果框架》(DECODE)与《医学教育最佳证据协作组》(BEME)等权威教育框架,构建“知识—工具—临床推理—伦理治理”四维教学目标。课程以“AI+病例链”为核心进行模块化重构:课前通过诊断式预习与学习画像精准识别认知起点;课中融合多模态数据可视化与对话式标准化病人(或交互式智能病例),实现沉浸式、情境化的临床思维训练;课后依托学习分析技术推动个性化反馈,并反哺科研创新,形成“教—学—研”有机闭环。在评价与保障机制上,采用基于客观结构化临床考试(OSCE)的多元评估体系,坚持“AI支撑、绝不替考”原则,同时将伦理合规与可信AI治理(包括数据隐私保护、算法偏见防控、人机责任边界界定及学术诚信规范)作为教学底线。最终,依托跨学科创新中心与可复用的数字基础设施,推动传统课堂向“可视化呈现、深度互动、推理驱动”的新型智慧教学模式转型,系统培养面向2035年“智慧呼吸中心”与“元宇宙医学实践”的先锋种子团队。

[关键词] 元宇宙医学;数字健康胜任力;数字人专家;数字孪生肺;多模态学习与可视化推演;可信AI治理与伦理

[中图分类号] R 56 **[文献标志码]** A

AI+ empowering respiratory medicine education: building a digital health competence training system oriented towards new quality productivity

BAI Li¹, YANG Dawei², YU Qing³, BAI Chunxue^{2*}

1. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Xinqiao Hospital, Army Medical University, Chongqing 400037, China

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

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

[Abstract] Driven by the converging forces of metaverse medicine and the new quality productive forces in healthcare, respiratory medicine education must evolve from the traditional model of ‘knowledge delivery and guideline recitation’ toward a forward-looking ‘AI+ Respiratory New-Quality Productive Center’ – a pioneering hub that integrates pedagogical prototyping with the incubation of interdisciplinary talent. Contemporary respiratory physicians, beyond mastering core clinical competencies, must also cultivate digital health literacy: the ability to critically understand, evaluate, and appropriately apply emerging technologies such as artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), digital twins, and extended reality (XR). Within human – AI collaborative

[收稿日期] 2025-12-20

[接受日期] 2025-12-28

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

[作者简介] 白莉, 博士, 副主任医师. E-mail: blpost@126.com

* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: bai.chunxue@zs-hospital.sh.cn

multidisciplinary teams (MDTs) and frameworks augmented by ‘digital expert avatars,’ they should be empowered to make safe clinical decisions, conduct risk stratification, and simulate therapeutic strategies. International evidence-based medical education research indicates that AI has already been piloted in areas such as radiological interpretation, clinical skills assessment, adaptive learning, and real-time feedback. However, these efforts largely remain fragmented ‘point innovations,’ lacking an integrated curriculum that embeds cross-disciplinary integration, structured design, and proactive governance. Respiratory medicine – by virtue of its inherently multimodal nature and richly visualizable longitudinal data (including imaging, pulmonary function tests, blood gas analysis, dynamic symptom trajectories, wearable-derived metrics, ventilator parameters, and sleep monitoring data) – is uniquely positioned to leverage digital twin and immersive XR scenarios to systematically address the core limitations of conventional classrooms: phenomena that are ‘invisible, difficult to simulate, and hard to reason through.’ This proposal is grounded in international consensus on digital health and AI competencies, systematically aligning with authoritative frameworks such as the Digital Education Competency Outcomes for Doctors in Europe (DECODE) and the Best Evidence Medical Education (BEME) Collaboration. It establishes a four-dimensional instructional framework encompassing Knowledge – Tools – Clinical Reasoning – Ethical Governance. At its core is an ‘AI + Case Chain’ modular curriculum: Pre-class: diagnostic pre-assessments and learner profiling to identify cognitive baselines; In-class: multimodal data visualization integrated with conversational standardized patients or interactive intelligent cases to enable immersive, context-rich clinical reasoning training; Post-class: learning analytics-driven personalized feedback loops that feed back into scholarly inquiry, creating a seamless teaching – learning – research cycle. Assessment and safeguard mechanisms center on a multi-modal evaluation system based on Objective Structured Clinical Examinations (OSCEs), adhering strictly to the principle of ‘AI-supported, never AI-substituted’ assessment. Ethical compliance and trustworthy AI governance –including data privacy protection, algorithmic bias mitigation, clear delineation of human –AI responsibility boundaries, and academic integrity – are embedded as non-negotiable safeguards. Ultimately, by leveraging interdisciplinary innovation centers and reusable digital infrastructures, this initiative transforms the traditional classroom into a next-generation smart learning environment characterized by visualizability, deep interactivity, and reasoning-driven pedagogy, systematically cultivating a vanguard cohort of talent ready to lead ‘smart respiratory care centers’ and ‘metaverse medicine’ practices by 2035.

[Key Words] metaverse medicine; digital health competency; digital expert avatars; digital twin lung; multimodal learning and visualized reasoning; trustworthy AI governance and ethics

在元宇宙医学与医学新质生产力的整体视角下,《呼吸病学》课堂已不再只是局限于向学生“讲清楚疾病谱和诊疗指南”,而正逐步演变为建设未来呼吸病学新质生产力中心的起点与前哨阵地^[1-3]。传统教学重在知识传授,而未来的呼吸科医生必须同时具备扎实的临床能力与驾驭人工智能 (artificial intelligence, AI)、物联网 (Internet of Things, IoT)、数字孪生 (digital twin) 和拓展现实/虚拟现实 (extended reality, XR)/虚拟现实 (virtual reality, VR) 等工具的“数字健康胜任力”,可在真实与虚拟交织的环境中进行临床实践,即整合多模态数据 (如病史、胸部影像、肺功能、血气、病理等),依托 AI 赋能,独立、安全、高效地完成临床决策与诊疗推演,依托 AI 赋能,独立、安全且高效地完成临床决策。

近年关于元宇宙医学、医学新质生产力和医学 GPT 的系列文章,为我们勾勒出一个逐步演进的可操作的未来图景:临床决策不再由单一医生孤立完成,而是由“人机多学科团队” (human-AI multidisciplinary team, human-AI MDT), 或“数字人专家 + 多学科医生团队”协同完成;BAIMGPT 这类

专科 GPT 将作为数字人专家的“中枢引擎”,在知识整合、风险评估与方案推演中发挥关键作用^[1-5]。借助这些工具,复杂的呼吸病学知识得以动态呈现、个体化模拟,并在持续反馈中不断优化迭代。

与此同时,国际关于 AI 与医学教育的《医学教育最佳证据协作组》 (best evidence medical education, BEME) 组织发布的指南显示, AI 已广泛应用于影像判读、临床技能评估、自适应学习和智能反馈等环节,但真正将 AI 体系化融入课程结构、有效支撑核心能力培养与职业价值观塑造的教育项目仍相对有限,多数项目仍停留在“某一门课中的点状创新”,缺乏跨学科、一体化设计^[6-10]。这意味着,如果呼吸病学课程能够率先完成“系统重构”,就有机会打造区域层面的“AI+医学教育”示范场景,成为“数字健康胜任力”培训的先驱。

呼吸病学之所以特别适合作为 AI+赋能教学的“试验田”,还源于其独特的学科特质:该学科是一个天然的高度多模态信息汇聚与动态过程高度可视化的领域。从症状轨迹、影像学、肺功能、血气分析、物联网可穿戴监测、呼吸机参数、睡眠监测等多源数据,构成了一个极具代表性的“数字健康生态

缩影”,非常适合用数字孪生、机器学习和元宇宙场景进行再现和推演^[6]。传统课堂难以在有限时间内完整动态地呈现此类复杂生理与病理过程的变化,而 AI 和 XR 工具恰好可以弥补这一结构性短板,使抽象过程可见、可交互、可推演,将“静态讲授”升级为“沉浸式推演”。

因此,我们建议将《呼吸病学》明确定位为“AI+呼吸病学新质生产力中心的教学原型”。从课程教学目标设计开始,即跳出“单纯讲知识”的框架,确立三大相互支撑的核心目标。(1)培养“呼吸专业能力+数字健康与 AI 素养”:将 AI 理解与批判性使用作为本科和继续医学教育(continuing medical education, CME)的基础能力之一^[11-14]; (2)实现从“知识灌输”到“AI 支撑的主动学习与临床思维训练”:学生通过和智能系统的互动中形成系统化推理与循证决策能力^[7-11, 15-16]; (3)构建未来“AI+呼吸病学新质生产力中心”的雏形:将 VR/元宇宙病房、医学 GPT 接口与学习分析平台纳入统一规划,实现教-学-研一体化运行^[3, 6, 17]。

AI 赋能的《呼吸病学》课堂,应当把原来“看不见、想不到、说不清”的病理生理和复杂决策,转化为“看得见、能互动、推得动”的动态学习体验,推动传统课堂向“可视化呈现、深度互动、推理驱动”的新型智慧教学模式转型,孕育出面向 2035 的智慧呼吸中心和元宇宙医学实践的“种子团队”^[1-5]。

1 总体设计

总体设计旨在应用国际数字健康与 AI 胜任力框架重构《呼吸病学》课程。要让 AI 真正成为提升教学质量与培养新型人才的“底座”,必须首先从课程教学目标与结构设计入手,与国际数字健康胜任力与 AI 医学教育框架进行系统对标,而不是简单

地“在现有 PPT 上加一点修改”。

1.1 对标数字健康与 AI 胜任力的国际共识 发表于 JAMA Network Open 的综述^[12]将《欧洲医生数字教育能力成果框架》(DECODE)列为“数字健康与 AI 胜任力”领域的重要国际共识,该框架将数字健康能力拆解为 4 个维度、19 项核心能力,强调从基础数据素养,到数字工具的合理选择与批判性使用,再到隐私保护、伦理治理与人机协作,均应成为医学生培养体系的重要组成部分。相关系统综述^[13]通过德尔菲法和多轮专家论证,也进一步提出:将数字健康与 AI 相关内容应当横向贯穿多门课程,而不是被“封装”在某一门选修课中。

由 BEME 合作组织发布的教育循证指南第 84 号以及数篇关于 AI 医学教育的系统综述指出,“理解 AI 基本原理、识别其优势与局限、并能在临床情境中批判性地使用 AI 工具”,应被纳入医学教育的通用能力框架^[7-9, 15]。聚焦生成式人工智能的研究进一步警示:大语言模型/生成式预训练变换器(large language model, LLM)/(generative pre-trained transformer, GPT)具有巨大潜力,但同样存在事实性错误、偏倚与学术不端风险,因此,教学设计必须将“如何正确使用与限制 AI 本身作为一项明确的学习目标”^[10-12, 16]。

基于上述国际共识,我们提出:《呼吸病学》课程不应仅被视为“系统讲解呼吸系统疾病”的课程,而应是数字健康胜任力培养体系中最适合嵌入 AI+实践场景的核心课程之一。

1.2 锚定从“知识+技能”到“四类维度”能力目标 基于上述国际共识并结合呼吸病学的学科特点,建议将传统以知识点传授与操作技能训练为主的课程目标,系统升级为涵盖四个维度的“数字健康胜任力”可操作学习框架(表 1)。

表 1 四类维度“数字健康胜任力”学习流程

维度	“数字健康胜任力”学习流程
知识维度	学生应能系统理解 AI 在慢性阻塞性肺病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)、哮喘、肺癌、间质性肺疾病(interstitial lung disease, ILD)、睡眠呼吸暂停(obstructive sleep apnea, OSA)等疾病的筛查、诊断、分型和长期管理中的应用场景、主要算法思路以及现实局限,包括对数据质量、样本代表性和偏倚的依赖 ^[6-7, 14-15] 。
技术与工具使用维度	学生应掌握 1~2 个专科 GPT 工具的基本使用方法,能用其进行文献检索、指南比对、风险评估和辅助诊断思考,并且学会主动识别其输出中的错误与不确定性,避免盲目依赖 ^[4-5, 10, 16] 。
临床思维与决策维度	在 AI 提供的多模态信息(影像、肺功能、物联网监测数据、实验室结果等)基础上,学生仍需形成独立的病情评估与决策方案,能够清晰解释自己的推理路径,并与 AI 建议进行比较与取舍,而不是将 AI 视为“标准答案” ^[6, 17-18] 。
职业素养与伦理治理维度	学生应理解并践行 AI 相关伦理规范,正确处理隐私保护、数据安全、算法偏倚、学术诚信与责任边界等问题,能够以“批判性信任”的态度运用 AI 工具 ^[11, 14-15] 。

四个维度互相支撑:知识维度提供理论基础,技术与工具维度扩展工具箱,临床思维与决策维度决定学生能否真正胜任未来复杂临床场景中的核心任务,而职业素养与伦理治理维度则确保 AI 使用不会偏离医学的专业价值与社会责任,最后达到预定的“数字健康胜任力”培养目标。

1.3 AI+课程结构设计 课程结构可设计为以“AI+呼吸病例链”为主线的模块化重构。基于前述四维能力目标,可以考虑在现有按疾病种类分章节讲授基础上,重新组织“疾病主题模块”,每个模块都围绕一条包含临床演进逻辑的“AI+呼吸病例链”展开,从急性上呼吸道感染开始,逐步延伸至社区获得性肺炎、重症肺炎和急性呼吸衰竭,继而过渡到 COPD/哮喘急性加重,再进一步拓展到间质性肺病(ILD)、肺结节/肺癌和阻塞性睡眠呼吸暂停(OSA)等^[5-7,17]。在每条病例链中,学生都会多次接触以下典型 AI 赋能场景。

(1)来自物联网设备的时间序列数据,如峰流速仪、电子吸入器使用、脉搏血氧和睡眠监测时间序列数据;(2)由医学 GPT 和影像 AI 模型生成的肺结节风险评分、病灶演变预测和个体化随访建议;(3)由数字孪生肺模型呈现的通气/灌注比变化、肺泡塌陷与复张过程等动态演示。

与传统课程按器官或疾病分章讲授模式不同,这种结构更接近临床实际与真实世界多源数据流:学生在“同一病程时间轴上”反复看到 AI 工具如何介入筛查、诊断、治疗、随访和康复,从而理解“一个病人在不同时间与场景中的连续管理”,而不是只记住孤立的疾病定义和指南条文。

在整体设计层面,AI 因而不仅是“课堂辅助工具”,而是贯穿课程目标设定、教学活动组织、“数字健康胜任力”培养,多元评价与质量保障体系的结构要素,使《呼吸病学》课程得以承担起学校层面“AI+医学教育示范课程”的引领角色^[12-13,15]。

2 AI+赋能呼吸病课前教学

高质量的课堂并不是从上课铃响起才开始,而是从课前的学习准备就已启动。通过融合生成式人工智能(如医学 GPT)与自适应测评技术,可构建一个智能预习与诊断式学习系统,使学生带着问题进入课堂,同时帮助教师在课前精准掌握学生的认知起点与知识盲区。

2.1 利用 GPT 生成多层次预习材料与自测题 首先,教研团队可以根据教学目标、权威指南和共识,设计特定的提示词(prompt),让医学 GPT 生成结构

化的“多层次预习包”。(1)A 版(基础强化型):以图解、类比和通俗语言为主,重点阐明呼吸生理基础(顺应性、气道阻力、通气/血流比值失调)及常见症状、发病机制,适合基础薄弱或低年级学生。(2)B 版(进阶探索型):在关键诊疗节点旁嵌入指南原文片段、高质量综述链接和代表性随机对照试验(randomized controlled trial, RCT)摘要,引导高年级或有科研兴趣的学生进一步查阅原始文献,深入探究循证依据^[10,16]。

在技术上,生成式 AI 极大降低了多版本资源开发的成本,但基于《医学互联网研究杂志·医学教育(JMIR Medical Education)》和 BEME 的共识,教师必须作为内容的“二次把关者”,具体包括以下职责^[10-11]。

(1)对 GPT 输出内容进行审核与修订,纠正其中的事实错误与不当简化;(2)有意识地保留一些“边缘争议点”或“典型错误示例”,转化为课堂讨论素材,用于培养学生的批判性思维;(3)坚决避免将未经审查的 AI 生成内容直接推送给学生,以免在关键概念上造成系统性误导。

通过这一角色转变,GPT 不再仅仅是“替代教师备课的自动化工具”,而是升级为多功能教学协作者——既能高效生成结构化学习素材,又能提供可辨析、可辩论、可反思的智能案例,从而真正服务于高阶临床思维的培养。

2.2 预习前测与“学习画像” 学生完成预习包后,可通过在线测评平台,结合简单的机器学习或规则引擎,生成每位学生的“呼吸病学学习画像”^[7,9,12]。即基于多源学习数据如答题记录、阅读时长、交互行为),对学习者的呼吸病学知识结构、能力水平、学习行为、学习风格与发展轨迹进行系统建模与动态刻画,为后续课堂教学提供精准的学情依据。测评内容可聚焦三个关键板块(表 2)。

系统根据学生答题正确率、反应时间和选项模式,自动在后台进行聚类或规则划分,将学生分为 3 个组,以实现分层教学与精准培养(表 3)。

这种“诊断式预习+分层分组教学”模式,不仅为后续翻转课堂、小组讨论与元宇宙情景任务的难度分级提供了坚实数据支撑,也帮助学生在课前清晰地认识自身知识水平与学习定位,从而更有效地参与课堂学习。

2.3 AI 支撑“智能预习”接口课堂 结合上文的预习包和学习画像,我们可以构建一个面向学生的“AI 智能预习系统”,实现精准化、个性化的课前学习支持。(1)输入交互:学生上传预习笔记或在平台

表 2 三个关键板块测评内容和技术路线

板块	测评内容与技术路线
基础呼吸生理	涵盖肺顺应性、气道阻力、肺容积与通气功能、通气/血流(V/Q)比值及弥散功能等核心概念,重点考察学生对各项指标的定义及其临床意义的理解。
疾病谱与危险因素识别	聚焦常见呼吸系统疾病的病因谱系及高危因素,包括吸烟、环境暴露(如空气污染)和职业性有害物质接触等。重点评估学生能否结合病史信息与暴露线索,快速识别并关联潜在的呼吸系统疾病。
基本检查理解	考查学生对肺功能检查和动脉血气分析结果的解读能力,以及对不同呼吸系统疾病典型胸部影像学特征的掌握程度。

表 3 基于分组的普遍逐步提高策略和方法

组别	普遍培养逐步提高的策略和方法
基础补课组	在关键概念上存在明显知识缺口,需在课前预习或课堂教学中加强基础知识的讲解、梳理与巩固,夯实理论根基。
常规组	达到预期水平,可直接进入病例讨论和临床推理训练。
进阶探索组	基础扎实,具备较强的学习主动性,有更高发展潜力,可承担文献汇报、微讲解和引导同伴学习等拓展性任务,及小型科研项目。

上回答开放性问题;(2)智能诊断:GPT 自动对文本进行语义分析,标记出概念混淆、逻辑跳跃和关键技术语误用等问题;(3)个性化反馈:系统生成每位学生的“最薄弱 3 点”和个性化复习建议;(4)教学决策支持:教师在课前查看全班的“知识热力图”,直观掌握共性难点与个体差异,据此动态调整课堂时间分配、案例选择与教学策略。

通过这一机制,课前环节不再局限于“布置任务—简单检查”的线性流程,而是形成“预习—诊断—反馈—再预习”的闭环小循环,有效提升预习质量,为高质量课堂教学奠定坚实基础。

3 AI+赋能呼吸病学课中教学

课中教学是构建“AI+呼吸病学新质生产力中心”的核心环节。在此阶段,AI 不仅增强传统讲授的表现力,更深度支撑高阶临床思维训练、互动推理与跨模态信息整合,推动教学从知识传递向能力生成转型。

3.1 智能讲授与多模态可视化 智能讲授与多模态可视化可让复杂病理学机制“可视化、可互动、可推演”。基于物联网呼吸病管理项目经验与相关综述,课堂中可引入来自真实世界或模拟的纵向病例,通过多模态可视化技术实现病理机制的动态呈现。

(1)动态展示峰流速、电子吸入器使用频率、脉搏血氧、睡眠质量及活动量等指标,直观反映疾病演变过程;(2)通过数字孪生肺或 3D/VR 模型,展示哮喘气道可逆收缩、COPD 终末细支气管塌陷与气

体陷闭、急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome,ARDS)肺泡塌陷—复张循环以及通气/灌注比改变等关键过程;(3)借助多模态可视化技术,将肺结节的影像学特征、体积倍增时间及其组织病理演变进行动态关联式呈现,使学生理解结节的良恶性演化规律,进而掌握基于风险分层的个体化随访策略及其循证依据。

这些可视化工具不仅是教学“亮点”,更是重构教学结构的抓手。教师可围绕一条“时间轴病例”,灵活切换临床、影像、功能与物联监测等多维视图,引导学生从碎片信息中整合出完整的疾病图景。

3.2 AI 生成病例拓展为“标准化诊疗” 在呼吸病学教学中,生成式 AI 特别适合用于构建临床情境对话、引导反思与提供即时反馈,但前提是教师要明确界定其适用情境与边界。在呼吸病学教学中,可以设计一系列“人工智能支持的实践(artificial intelligence-supported practice, AI-SP)病例”。(1)让 GPT 扮演 COPD 急性加重、重症肺炎、难治性哮喘或 OSA 患者,由学生分角色完成病史采集、体格检查及病情解释等任务;(2)教师基于预设评分量表,对学生的结构化病史采集、共情沟通、安全意识和临床推理进行即时反馈^[9,11];(3)在每次 AI-SP 结束后,引导学生围绕“AI 回答中有哪些错误或偏倚”“自己是否过度依赖 AI”“真实临床中哪些环节必须由人来作为最后把关者”等问题开展反思^[11,15]。

AI-SP 可被定位为“可犯错的练习对手与反思触发器”,在安全、可控的环境中提升学生的临床胜任力。

3.3 基于 GPT 病例锻炼“数字健康胜任力” 基于 GPT 的病例学习为面向临床推理的互动式模拟病例。在 AI-SP 框架基础上,可进一步构建 GPT 驱动的互动式模拟病例,让学生在一个完整、可反复操作的虚拟环境中扮演值班医生。(1)学生根据主诉和初步资料提出问诊问题,GPT 生成多轮对话补充病史与体征;(2)学生依次选择必要的辅助检查如肺功能、血气分析和影像学检查,系统返回结构化结果;(3)学生提出初步诊断和鉴别诊断,GPT 根据循证证据给予反馈,指出遗漏的诊断可能与思维盲点;(4)学生拟定治疗与处置方案,GPT 结合指南与文献进行评分与解释。

此类互动式病例尤其适用于:哮喘急性发作、ACOPD、重症肺炎、肺栓塞与肺炎的鉴别、ARDS 早期识别与分层、OSA 筛查与随访策略设计等情境。通过反复练习,学生能够形成从“症状—病理生理机制—关键检查选择—精准诊断—个体化治疗与随访”的完整临床思维链条。

3.4 AI+翻转课堂提高“数字健康胜任力” AI+翻转课堂指学生从被动听众转变为“知识讲述者”,GPT 可以成为学生备课的“助理教研员”。具体做法如下。(1)学生选择一个微主题(如“高碳酸血症的机制”“V/Q 失调与低氧血症”“COPD 与哮喘肺功能差异”),在 GPT 帮助下准备 3 分钟“微讲解”;(2)GPT 提供初稿结构、关键词语与示意图建议,学生对内容进行筛选与本地化加工;(3)教师借助 AI 自动评分工具,从逻辑性、条理性、图示运用、循证依据等维度对学生讲解进行初步量化评估,再结合人工观察给予针对性反馈^[16]。

这样,课堂可形成“学生讲—AI 点评—教师提炼”三段式流程,既训练学生的表达与结构化思维,

又在实际操作中让学生体验“如何让 AI 为自己工作,而不是被它牵着走”,从而培养理性、主动、有判断力的数字时代临床学习者。

3.5 AI+临床技能训练夯实临床基础 AI+临床技能训练可达到肺功能与影像判读的低成本“前置模拟”。肺功能和胸部影像判读是呼吸病学教学中的难点与重点。借助 AI,可构建丰富的虚拟图谱与切片库。(1)自动生成不同严重程度、不同类型的肺功能报告单和容积—流速曲线,供学生训练识别阻塞型、限制型和混合型通气障碍;(2)制作包含不同表现的肺气肿、各类病原体的肺炎、ARDS 轻中重度的虚拟 CT 图像集;(3)在适当时机引入影像学基本概念,展示 AI 如何自动测量肺气肿评分、气道壁厚度、肺结节体积与密度等定量指标,并讨论其意义与当前局限。

这种“前置模拟+高频演练”模式,大幅降低了对真实病历与影像资源的依赖,让更多学生在进入临床见习前就具备初步判读能力,从而提升后续实习与轮转效率,实现“早临床、强基础、重能力”的教学目标。

3.6 VR/元宇宙模拟加深元医惠众理念 呼吸治疗与危重医学是最适合使用模拟和 VR 的领域之一,VR/元宇宙模拟是提升机械通气、氧疗与危重场景医疗水平的最好方法。多项研究显示,VR 与高仿真模拟能够显著提升相关技能、应急处置信心与临床决策能力^[17-21]。

在《呼吸病学》中,可设计至少 2~3 个核心 VR/元宇宙情境(表 4)。

借助这些情境,学生得以在安全、可重复的场景中接触高风险操作和复杂决策,为未来进入真实 ICU 与 RICU 奠定经验基础。

表 4 核心 VR/元宇宙情境及教学方法

情境	教学方法
机械通气基础操作与报警处理	参考 VR 机械通气教学研究构建 ICU 机械通气训练房”,让学生在虚拟环境中完成模式选择(VC、PC、PS 等)、参数设置、波形解读与常见报警处理 ^[19-20] ; 设置 AI 驱动的“智能导师”,根据学生操作轨迹实时给出提示与总结反馈,帮助其形成标准化操作路径 ^[20] 。
高流量氧疗与无创通气场景	在虚拟急诊或 RICU 中模拟急性低氧性呼吸衰竭、急性心源性肺水肿、AECOPD 等情境,让学生在无风险环境中反复练习氧流量选择、接口适配、并发症识别与无创通气失败警示信号的捕捉 ^[17-18] 。
元宇宙“呼吸病虚拟病房”与多病种综合管理	综合元宇宙医学的构想,将 COPD、ILD、肺癌术后与 OSA 患者安置在同一虚拟病房,由学生分组扮演住院总、住院医和专科护士,利用数字孪生和 IoT 数据看板完成查房与交班 ^[21] 。

4 AI+赋能呼吸病课后教学

课后将学习分析、科研启蒙与 AI+临床转化的完整闭环。如果课后环节仍沿用传统的“布置作业—由教师手工批改”的模式,那么 AI 的优势就很难充分发挥。通过构建“学习分析+智能反馈+教学科研融合”的课后闭环, AI 才能真正成为教学质量持续改进的引擎。

4.1 智能作业与“错题本”让知识漏洞可视化 借助 GPT, 可自动生成不同难度层次的病例型作业题, 涵盖呼吸系统常见病和各种呼吸危重症场景。教师在发布前进行审核与必要修改, 确保所有题目与课程目标和指南推荐一致。作业提交后, 由 AI 对学生作答进行语义分析与分类, 自动识别典型认知偏差或误区, 例如: (1) 混淆 COPD 与哮喘的临床特征; (2) 对血气指标 $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 、 A-aDO_2 等指标理解不当的情况; (3) 呼吸性与代谢性酸碱紊乱鉴别中的常见错误; (4) 在影像与临床信息整合时的逻辑断裂。

系统按知识点和能力维度生成班级层面的“知识热力图”与每个学生的“个人错题本”, 教师据此调整后续教学重点, 针对性安排补课或辅导, 学生则可以长期追踪自己的薄弱环节, 实现个性化学习闭环。

4.2 个性化学习路径改善学习进度和效率 在生成个人错题本的基础上, AI 可以进一步为每位学生生成个性化学习路径: (1) 自动总结“最薄弱 3 点”, 并智能推荐对应的微视频、图解材料和题库; (2) 针对高频误区(如肺不张与实变的影像鉴别、良恶性肺部病变的影像学表现差异)推送强化训练; (3) 定期生成学习曲线、章节掌握热力图以及与班级平均水平的比较报告, 帮助学生自我监控学习进度与成效。

这种“学习分析+个性化推荐”的机制, 把以往完全依赖教师经验的个性化教学, 部分交给数据驱动的系统来完成, 从而在有限师资条件下实现“类小班化”的学习支持。

4.3 课堂数据“反哺”培养临床研究兴趣 课堂数据“反哺”研究是指 AI+呼吸病学教育小课题孵化。当课堂中积累了一定规模的 VR/模拟训练数据、AI-SP 对话记录与学习分析结果后, 可以在严格去标识化与伦理审批的前提下, 与真实临床数据进行结合, 探索学生决策模式与真实医生决策模式之间的差异。在此基础上, 可鼓励学生参与“AI+呼吸病学教育”小课题研究。(1) 比较不同教学模式(传统讲授、AI 支撑翻转课堂、VR 模拟训练)对掌握吸入器

使用、机械通气报警处理、氧疗方案选择等能力的影响; (2) 分析不同学习画像类型的学生在 AI 辅助下的进步曲线与知识迁移能力; (3) 探讨如何根据人工智能框架与欧洲医学教育协会(AMEE)指南优化教学中使用的 AI 工具的可信度与可部署性。

这样的教-学-研一体化设计, 一方面为学生提供早期接触科研的机会, 培养循证教育思维; 另一方面也为学院持续改进 AI+教学模式提供高质量数据与证据。

5 评价与保障

再先进的工具, 如果缺乏严格的评价与治理框架, 都可能带来新的风险。因而, 在推动 AI+教学创新的同时, 必须同步构建考试改革、伦理规范与质量控制的整体方案。评价与保障可采用 AI 时代的考试体系、伦理规范与质量控制。

5.1 AI 支撑但不“替考”的多元评价设计 在课程考核与期末客观结构化临床考试(objective structured clinical examination, OSCE)中, 可以适度引入 AI 自动评分工具, 以提高效率和客观性^[7, 17-18, 21]。例如: (1) 使用 AI 辅助分析呼吸音听诊录音, 对学生是否正确识别干湿啰音、哮鸣音、胸膜摩擦音等进行初步评分; (2) 利用影像 AI 模块对学生的胸片或 CT 判读结果进行比对, 评估其与“专家标注”之间的一致性; (3) 在病历书写时, 由自然语言处理系统自动检查结构化程度、关键要素是否缺失以及用语是否规范。

然而, 在上述技术使用的同时必须坚持一条底线: 关键能力(临床推理、沟通能力、人文关怀等)仍需由培训教师进行人工评估。这样既能保证 AI 提升效率、降低工作量, 又不至于让“分数”完全被黑箱模型所左右。

在考试管理方面, 应在课程说明和考核大纲中清晰列出: (1) 哪些场景下允许使用 AI(如课前预习、课后练习与自评); (2) 哪些环节必须完全禁止使用 AI(如正式考试、规定的 OSCE); (3) 哪些任务可以在教师监督下“限定使用 AI”(如在研讨课中允许学生用 GPT 查询文献但需要标注来源)。

通过这种“AI 支撑但不替考”的制度设计, 可以有效避免学术不端与能力虚高, 使学生真正理解: AI 的作用是放大真实能力, 而不是伪造能力。

5.2 伦理与质量框架系统融入课程 在 AI 大规模进入教学与医疗系统的背景下, 伦理与可信性不再是附属话题, 而是医学教育中必须显性教授的“核心内容”。结合 FUTURE-AI 指南与 AMEE AI 伦理

指南,可在课程中专设一节“AI+呼吸病学的伦理与治理”小课,重点围绕:(1)AI 工具的训练数据来源与采集方式,可能存在的种族、性别、地区与社会经济偏倚;(2)黑箱模型在高风险场景中的可解释性要求,以及可解释AI在临床与教学中的意义;(3)医生在使用AI支撑决策时的法律责任、职业责任与“最后把关”角色的边界。

通过分析 1~2 个真实或近真实案例(如误用AI 影像评分导致对肺结节病情判断偏差、错误建议适应证等),引导学生理解:(1)AI 输出必须经过人类专业判断过滤与整合;(2)对 AI 的态度应为“批判性信任”,既不过度怀疑而拒绝使用,也不能盲目追随。同时,可以利用课堂讨论的方式,让学生尝试站在患者、医院管理者、技术开发者和监管机构的不同视角,思考如何在推动创新与守住安全底线之间取得平衡,从而在知识层面之外进一步强化其职业价值观和伦理敏感性。

6 建设“AI+呼吸病学教学创新中心”

建设“AI+呼吸病学教学创新中心”的实践路径

是要让上述理念真正落地,并持续产生扩散效应,需要在学院与附属医院层面建立一个“AI+呼吸病学教学创新中心”,将零散的技术应用与单点教学改革,转化为可复制、可扩展的系统工程。

6.1 设立跨学科的 AI+呼吸病学教学创新中心 可以借鉴“AI+工作室”和“BAIMGPT”建设经验为蓝本,组建由呼吸与危重症医学专家、医学教育专家、计算机科学家、工程师以及教育技术团队共同参与的跨学科协作平台。该中心的主要职责包括:(1)统筹规划《呼吸病学》课程的 AI+ 教学整体方案与迭代路线图;(2)牵头开发和维护 GPT 提示词库、病例库、VR 场景与数字孪生模块;(3)协调“教-学-研”一体化项目与数据治理,确保所有教学数据的合规使用与持续评估。

6.2 搭建可复用的数字基础设施 为避免“为一门课建一个孤岛”,数字基础设施应从学校与医院整体信息化战略出发,构建全院共享、多学科兼容的通用平台(表5)。在这一过程中,《呼吸病学》课程既是最早尝试 AI+教学闭环的“先行者”,也是推动全院医学教育数字化转型的“样板工程”。

表 5 搭建数字基础设施的策略和技术路线

策略	技术路线
病例模拟平台	统一建设病例模拟平台和 AI-SP 管理系统,各学科可共享使用,只需替换病种与情境脚本;
VR 空间/数字孪生引擎	搭建 VR/元宇宙教学空间与数字孪生引擎,使呼吸病学、心内科、重症医学、急诊科等可以在同一技术底座上开发不同的虚拟场景;
GPT 接口标准化和管理	为专科 GPT 工具建立标准化调用接口与权限管理机制,既方便课堂灵活使用,又能确保数据安全与可追溯模型行为;
统一学习分析平台	部署统一的学习分析平台,对多门课程的学习数据进行整合与可视化,为学校层面教学质量保障提供决策支持。

6.3 将 AI+呼吸病学教学纳入高层次总体规划 为了避免 AI+ 教学改革停留在某一两位教师或某一门课程的“个人热情”层面,需要将其纳入学校整体 AI 教育战略^[12-13,15]。策略如下:(1)将 DECODE 数字健康胜任力框架嵌入人才培养方案,明确《呼吸病学》作为核心载体课程;(2)在专业培养方案中明确列出“能够与 AI 工具协作完成呼吸系统疾病的评估与管理”作为毕业能力之一;(3)以《呼吸病学》为示范课程,逐步在心血管内科、内分泌、肿瘤学和重症医学等课程中推广类似的 AI+教学设计。

6.4 提供教师快速上手的“10 分钟启动流程” 在实践中,许多教师对 AI+教学持谨慎态度,往往是因为缺乏易于上手的操作路径。为此,可以在创新中心提供一种“10 分钟上手”的简明流程,降低心理和技

术门槛。(1)选择一个适合的章节或主题(如哮喘或 COPD);(2)使用预设好的 GPT 提示词模板,生成 1 套模拟病例及若干讨论问题;(3)将该病例直接导入课堂,让学生分组进行临床推理与诊断讨论;(4)借助数字孪生或 3D 模型演示关键病理生理机制;(5)由 AI 生成个性化课后复习包和进阶学习建议。

这样,即使尚未构建完备的 VR 场景与大型平台,教师也可以先从小规模、低成本的 AI 支撑开始,在实际教学中逐步累积经验与信心。

6.5 走向“可视化+互动+推理驱动”的新模式总结 综合以上设计与实践路径,AI 赋能的《呼吸病学》教学改革,实质上是在推动一场从“知识灌输”向“可视化+互动+推理驱动”的范式转型。(1)教师角色转型:教师从“内容搬运工”转变为“学习设计

者”、临床思维教练与创新引导者；(2)学生角色升级：学生从“被动听众”转变为“主动探索者”、“教学合作者”，乃至“未来 AI 赋能教学系统的设计参与者”；(3)课堂边界拓展：课堂从相对封闭的讲授空间扩展为连接临床、科研和社会的 AI+呼吸病学新质生产力中心雏形。

在此过程中，元宇宙医学、数字孪生肺、物联网慢病管理和医学 GPT 不再只是前沿概念，而是转化为具体可感知、可操作、可评价的教学实践，这不仅为智慧呼吸中心与元宇宙医疗的临床落地储备了首批具备“AI+呼吸学新质生产力”的青年人才，更切实推动“名医治未病，元医惠众生”这一愿景从理念走向现实。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 白莉、杨达伟、余情：撰写、修改论文，检索参考文献，定稿。白春学：选题、撰写、修改、定稿论文，使用 AI 技术生成图片。

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] 白春学. 元宇宙医学之我见[J]. 中国医药导刊, 2023, 25(1): 1-6.
- [3] 白春学. 医学新质生产力之我见[J]. 元宇宙医学, 2024(3): 3-10.
- [4] 白春学. 医学 GPT 研发应用之吾见. 元宇宙医学. 2025, 2(1): 6-14.
- [5] 白春学. 肺结节专家——BAIMGPT 白皮书[J]. 2025(2): 55-64.
- [6] YANG D W, LI K C, MINGWEI CHUA D, et al. Application of Internet of Things in chronic respiratory disease prevention, diagnosis, treatment and management[J]. Clin eHealth, 2022, 5: 10-16.
- [7] 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.
- [8] SHAW K, HENNING M A, WEBSTER C S. Artificial intelligence in medical education: a scoping review of the evidence for efficacy and future directions[J]. Med Sci Educ, 2025, 35(3): 1803-1816.
- [9] SIMONI J, URTUBIA-FERNANDEZ J, MENGUAL E, et al. Artificial intelligence in undergraduate medical education: an updated scoping review[J]. BMC Med Educ, 2025, 25(1): 1609.
- [10] PREIKSAITIS C, ROSE C. Opportunities, challenges, and future directions of generative artificial intelligence in medical education: scoping review[J]. JMIR Med Educ, 2023, 9: e48785.
- [11] MASTERS K. Ethical use of artificial intelligence in health professions education: AMEE guide No. 158[J]. Med Teach, 2023, 45(6): 574-584.
- [12] CAR J, ONG Q C, ERLIKH FOX T, et al. The digital health competencies in medical education framework: an international consensus statement based on a Delphi study[J]. JAMA Netw Open, 2025, 8(1): e2453131.
- [13] KHURANA M P, RAASCHOU-PEDERSEN D E, KURTZHALS J, et al. Digital health competencies in medical school education: a scoping review and Delphi method study[J]. BMC Med Educ, 2022, 22(1): 129.
- [14] LEKADIR K, FERAGEN A, FOFANAH A J, et al. FUTURE-AI: International consensus guideline for trustworthy and deployable artificial intelligence in healthcare[EB/OL]. 2023: arXiv: 2309.12325. <https://arxiv.org/abs/2309.12325>
- [15] XU Y Y, JIANG Z H, TING D S W, et al. Medical education and physician training in the era of artificial intelligence[J]. Singap Med J, 2024, 65(3): 159-166.
- [16] JOWSEY T, STOKES-PARISH J, SINGLETON R, et al. Medical education empowered by generative artificial intelligence large language models[J]. Trends Mol Med, 2023, 29(12): 971-973.
- [17] SREEDHARAN J K, GOPALAKRISHNAN G K, JOSE A M, et al. Simulation-based teaching and learning in respiratory care education: a narrative review[J]. Adv Med Educ Pract, 2024, 15: 473-486.
- [18] SCOTT J B. Advancing respiratory care: the role of simulation in clinical education[J]. EMJ Respir, 2024: 119-122.
- [19] LEE H N, HAN J W. Development and evaluation of a virtual reality mechanical ventilation education program for nursing students[J]. BMC Med Educ, 2022, 22(1): 775.
- [20] REE K, YOO J. The effectiveness of 360-degree virtual reality-based mechanical ventilation nursing education for ICU nurses[J]. Healthcare, 2025, 13(14): 1639.
- [21] KING J, BEANLANDS S, FISET V, et al. Using interprofessional simulation to improve collaborative competences for nursing, physiotherapy, and respiratory therapy students[J]. J Interprof Care, 2016, 30(5): 599-605.

引用本文

白莉, 杨达伟, 余情, 等. AI+赋能呼吸病学教学: 构建面向新质生产力的数字健康胜任力培养体系[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(4): 30-38.

BAI L, YANG D W, YU Q, et al. AI+ empowering respiratory medicine education: building a digital health competence training system oriented towards new quality productivity[J]. Metaverse Med, 2025, 2(4): 30-38.

DOI: 10.61189/369590xvqobm

· 产学研融合 ·

元宇宙医学场景下医疗支付体系的结构性挑战与演化路径



高承实*

安徽栈谷科技有限公司, 池州 247100

[摘要] 随着医疗服务加速向虚实融合、持续交互与平台化形态演进,以元宇宙医学为代表的新型医疗范式,正对根植于传统线下诊疗逻辑的支付体系提出根本性质疑与结构性挑战。不同于早期数字医疗对支付渠道的简单线上化迁移,元宇宙医学通过重塑服务过程、价值创造与责任网络,暴露了现有支付体系在过程计量、实时协调与多主体分配上的深层局限。传统上将支付视为“中性结算基础设施”的理论预设,已难以解释和支撑元宇宙医学的发展需求。本文突破“工具中性”视角,将支付体系重新定位为医疗治理的内生性制度安排。通过制度分析与比较制度分析,系统审视了现有支付工具(如 CBDC、稳定币)在应对虚实融合、过程化服务时的适配边界,并构建了以“制度合规性—技术灵活性—治理嵌入深度”为核心的三维分析框架。研究发现,元宇宙医学驱动支付体系发生三重根本性转变:功能上从事后结算工具转向过程协调机制;设计逻辑上从统一规则转向动态可编程协议;制度角色上从配套支撑转向核心治理基础设施。基于此,本文提出面向元宇宙医学的支付体系重构是一个跨层级的系统工程,需要在制度层确立其治理属性,在机制层发展按过程与效果付费的动态模型,在技术层审慎利用可编程与协议化能力作为支撑。研究结论表明,支付问题的解决是元宇宙医学可持续发展的先决条件,其演化路径并非单一技术替代,而是技术可能性、医疗价值理性与制度约束协同互构的复杂过程。这为理解数字时代医疗服务的组织变革与制度创新提供了新的理论视角。

[关键词] 元宇宙医学;医疗支付体系;可编程支付;支付协议;制度重构

[中图分类号] F 830.4 **[文献标志码]** A

Structural challenges and evolution paths of the medical payment system in the metaverse medical scenario

GAO Chengshi*

Anhui Stack Alley Technology Co., Ltd, Chizhou 247100, Anhui, China

[Abstract] The rapid evolution of healthcare services toward virtual - physical integration, continuous interaction, and platform-based organization is fundamentally challenging the premises of traditional healthcare payment systems, which are grounded in episodic, in-person care. Unlike the mere digitization of payment channels in early digital health, metaverse medicine reconstitutes service delivery, value creation, and accountability networks, thereby exposing deep-seated structural inadequacies of existing payment systems in process measurement, real-time coordination, and multi-actor value distribution. The conventional theoretical presumption of payments as a “neutral settlement infrastructure” has become insufficient to explain and support the development of metaverse medicine. Moving beyond the “tool-neutrality” perspective, this paper repositions the payment system as an endogenous institutional arrangement within healthcare governance. Employing institutional analysis and comparative institutional analysis, it systematically examines the applicability limits of current payment instruments (e.g., CBDCs, stablecoins) in virtual - physical, process-oriented service contexts. It constructs a three-dimensional analytical framework centered on “institutional compliance - technical flexibility - depth of governance embeddedness.” The study reveals that metaverse medicine drives three fundamental shifts in the payment system: in function, from an ex-post settlement tool to a process coordination mechanism; in design logic, from uniform rules to dynamic, programmable protocols; and institutionally, from a supporting ancillary to a core governance infrastructure. Consequently, this paper argues that restructuring the payment system for metaverse medicine constitutes a cross-layer, systemic endeavor. It requires, at the institutional level, affirming its governance role; at the mechanism level, developing dynamic models for payment based on process and outcomes; and at the technical level, prudently leveraging programmable and protocol-based capabilities as enablers. The conclusion underscores that resolving payment issues is a prerequisite for the sustainable development of metaverse medicine. Its evolution is not a matter of simple technological substitution but a complex process of co-construction among technological

[收稿日期] 2025-12-05

[接受日期] 2025-12-22

[作者简介] 高承实,博士,副教授.

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: 13838001036@163.com

possibilities, medical value rationality, and institutional constraints. This analysis provides a novel theoretical lens for understanding healthcare's organizational and institutional transformations in the digital age.

[Key Words] metaverse medicine; healthcare payment systems; programmable payments; payment protocols; institutional restructuring

随着医疗服务不断向数字化、网络化与平台化方向演进,支付体系作为医疗运行的基础性支撑,其适配性问题正逐步显现。长期以来,无论是在传统线下医疗,还是在以互联网医院、远程诊疗为代表的数字医学阶段,支付工具都被视为一种相对中性的结算手段,其主要功能在于完成医疗服务后的资金清算,而较少被纳入医疗制度与服务结构本身的分析框架之中。这种“支付中性”的隐性前提,在医疗服务形态相对稳定、组织边界清晰的环境下尚能维持运转,但在医疗服务高度数字化、过程化与多主体协同的场景中,其局限性正在被不断放大^[1-3]。

近年来,随着虚实融合医疗、连续性健康管理以及平台化医疗服务的兴起,学界逐渐意识到,支付方式不仅影响医疗成本与效率分配,更深刻塑造着医疗服务的组织方式、价值衡量标准以及责任边界^[4-5]。在这一背景下,元宇宙医学作为一种高度数字化、持续交互且以虚拟空间为重要载体的医疗形态,对现有医疗支付体系提出了超出“工具升级”层面的结构性挑战。支付体系是否具备对复杂医疗过程进行计量、分配与协调的能力,将直接影响元宇宙医学能否实现规模化落地及其公共属性的边界划定。

基于此,本文不对元宇宙医学的概念与应用场景作一般性综述,而是以支付体系为切入点,系统分析现有医疗支付工具在新型医疗场景中的结构性局限,并进一步探讨支付机制在元宇宙医学语境下面临的演化方向与制度重构路径。

尽管近年来关于数字医疗、医疗支付改革以及金融基础设施演化的研究不断增多,但现有文献大多仍隐含一个前提假设,即医疗支付体系作为一种中性基础设施,其核心任务在于对既定医疗行为进行成本结算与资金清算,而非参与医疗价值的生成与治理过程。这一“支付中性”假设在以离散诊疗事件为核心的传统医疗体系中具有一定合理性,但在医疗服务高度过程化、交互化与多主体协同的元宇宙医学场景中,其理论充分性尚未得到系统检验。

因此,本文试图回应的并非单一的技术或政策问题,而是一个更为基础的理论缺口,即当医疗服

务形态从“事件型”转向“过程型”时,现有医疗支付理论是否仍具解释力?支付体系是否需要从结算工具转变为一种嵌入式制度协调机制?通过这一问题,本文旨在对医疗支付理论中长期被忽视的基础设施假设进行反思,并探索“过程型医疗支付”作为一种潜在理论范式的制度含义。

在研究方法上,本文并不采用经验检验或案例研究路径,而是一篇以规范性制度分析为主的概念性研究。具体而言,本文结合制度经济学与医疗治理研究的相关文献,采用制度分析与概念框架构建的方法,对医疗支付体系在元宇宙医学场景下面临的结构性张力进行理论推演。同时,本文通过比较制度分析(comparative institutional analysis),对不同支付载体与支付机制在治理角色、风险结构与制度后果上的差异进行系统比较。本文的研究目的并非对具体方案的绩效作出经验评估,而是在理论层面澄清支付体系在新型医疗服务形态中的制度定位与演化逻辑。

1 现有医疗支付体系的结构性局限

尽管医疗技术与服务模式不断更新,医疗支付体系在相当长时间内却保持着高度的路径依赖。要理解其在元宇宙医学场景中的适配性问题,首先需要回到医疗支付制度本身,审视其长期被默然接受的基本假设及由此形成的结构性约束。

1.1 医疗支付作为“基础设施”的隐性假设 在现代医疗体系中,支付工具通常被视为一种“看不见的基础设施”。无论是政府主导的医疗保障体系,还是市场化程度较高的商业医疗服务,其支付安排往往被嵌入既定的医疗组织结构之中,承担的是资源配置结果的确认与结算功能,而非医疗价值生成过程的一部分^[2, 6]。这种定位使支付体系在制度设计上更关注合规性、稳定性与可控性,而较少关注其对医疗行为本身的塑造作用。

从历史演进看,传统医疗支付体系形成于以线下诊疗为核心的医疗模式之中,其基本范式可以概括为“线下发生—集中结算—事后支付”。医疗服务在特定时间和地点完成,价值评估主要依赖于服务项目、时长或结果,支付行为发生在服务结束之后,并以医疗机构为主要收款主体^[1, 7]。在这一框

架下,支付工具与医疗服务之间保持着相对清晰的边界。

进入数字医学阶段后,虽然支付环节逐步实现了线上化与电子化,但其核心逻辑并未发生根本改变。线上支付更多是对原有结算流程的技术性迁移,而非对支付范式本身的重构。支付工具仍然服务于既定的医疗组织形式,其功能边界并未随医疗服务形态的变化而同步调整^[8,9]。

1.2 现有数字支付工具在医疗场景中的共性局限在医疗服务日益数字化的背景下,现有数字支付工具的结构局限性逐渐显现。首先,在价值计量层面,传统支付体系更适合对离散、标准化的医疗项目进行计价,而难以对连续交互、动态调整的医疗过程进行细粒度计量。这使得按疗效、过程质量或持续服务价值计费在制度与技术上均面临障碍^[4,10]。

其次,现有支付体系普遍具有明显的结算滞后性。无论是医保支付还是商业支付,其核心逻辑仍以事后清算为主,难以支持基于条件触发或实时反馈的支付安排。这一特征在虚实融合、实时交互的医疗场景中尤为突出,限制了支付机制对医疗行为的即时激励与约束功能^[11-12]。

再次,在支付主体结构上,现有支付工具通常以医疗机构作为唯一或主要支付对象,而忽视了数字医疗环境中多主体协同创造价值的现实。算法服务、数据服务、平台运营以及患者自身参与等新型价值主体,难以在现有支付结构中获得直接、清晰的价值回报路径^[13-14]。

最后,支付规则往往外置于医疗服务逻辑之外,其计价方式、结算条件与责任界定由制度或合同预先设定,而非嵌入医疗服务过程本身。这种规则外置特征在医疗服务复杂度提升后,容易加剧支付逻辑与医疗目标之间的脱节^[5,15]。

1.3 CBDC、稳定币等“新工具”的边界 近年来,随着数字货币与区块链技术的发展,CBDC 与稳定币被视为可能改善支付效率的新型工具。然而,在医疗场景中,这类工具更多解决的是“如何支付得更快、更便宜”的问题,而非“支付应如何参与医疗价值的形成与分配”这一根本命题^[16-17]。

CBDC 以其高度合规性与国家信用背书,在医疗支付中具备显著的制度优势,但其可编程能力与场景灵活性仍受到审慎监管框架的限制,难以承担复杂医疗过程中的动态协调功能^[16,18]。稳定币虽然在跨境支付与效率方面具备优势,但在医疗领域,其合规性、责任归属与风险控制问题尤为突出,难

以直接嵌入现有医疗制度体系^[19-20]。

从本质上看,这些新型支付工具仍然沿袭了“支付作为结算工具”的基本定位,其创新主要体现在技术载体层面,而非支付范式本身。因此,仅依靠工具升级,难以回应元宇宙医学对支付体系提出的结构性要求^[21-22]。

2 元宇宙医学支付场景的独特性

与传统医疗或早期数字医疗不同,元宇宙医学并非简单地将医疗服务迁移至虚拟空间,而是通过持续交互、虚实融合与平台化组织方式,重构医疗服务的发生方式与价值生成逻辑。这种结构性变化,使支付体系不再只是医疗行为完成后的结算工具,而逐步成为协调多方主体、引导医疗行为的重要机制。

2.1 元宇宙医学中典型支付场景的差异化结构 “元宇宙医学”是一个涵盖广泛的概念集合,其内部不同的服务形态在技术集成度、交互模式和临床目标上存在显著差异。这种差异性直接导致了支付需求的多元化和复杂性,而非单一的“数字化”支付解决方案所能应对。根据服务连续性与价值创造逻辑的不同,可辨识出三类具有代表性的支付场景,它们与现有支付体系摩擦的焦点也各有侧重。

(1)虚拟诊疗:线下支付逻辑的线上化延伸。虚拟诊疗,作为数字医疗最先普及的形态,其核心是诊疗服务在空间上的迁移而非临床范式的根本重构^[23-24]。大量实践表明,在此类场景中,医生的专业判断与法律责任主体地位并未改变,技术主要扮演通道与辅助角色^[24]。因此,其对支付体系提出的挑战,首要在于支付范围的合理拓界,即将传统的单次诊间费用,延伸至覆盖远程异步沟通、诊前评估、诊后随访与管理等衍生环节^[6]。这种需求本质上是要求支付体系对既有的“服务项目包”进行扩容与重新定义,可归结为“支付边界扩展型”挑战。其并未颠覆按服务项目(Fee-for-Service)或按人次付费的基本逻辑,但要求该逻辑能适应服务发生的虚拟离散化特征。

(2)数字孪生治疗:长周期、多环节的复合服务包支付。数字孪生技术在医疗中的应用,通过构建动态更新的个体化生理模型以模拟、预测和优化治疗,代表了更高阶的集成与交互^[25]。该场景的治疗价值产生于一个包含模型构建、数据持续注入、算法迭代仿真、临床决策支持等多个阶段的长周期、复合型过程^[26-27]。这与当前主流的、针对单一明确临床事件(如一次手术、一次住院)设计的支付单元

(如按病种付费 DRG) 产生了直接的结构性冲突。支付体系面临的挑战不再是项目增减, 而是需要创造出能够刻画和衡量连续性过程价值的新计价单元与结算周期。这构成了“支付结构重构型”挑战的典型。

(3) 长期健康管理: 多主体参与下的绩效支付。以慢性病管理与健康促进为代表的长期健康管理, 其核心价值在于通过持续干预降低远期健康风险与医疗成本, 效果体现于跨周期的人群健康结果改善^[28-29]。世界卫生组织等机构多次指出, 按项目付费的模式在此领域存在根本性激励扭曲, 因其奖励“治疗”而非“健康”^[30]。此类服务通常涉及患者、社区健康工作者、专科医生、健康管理师乃至智能设备与平台等多方角色的持续协作。因此, 其支付机制的关键在于, 如何设计一种能够跨越时间、整合多主体贡献、并与最终健康结果挂钩的绩效支付方案。这要求支付体系从对“服务提供”的补偿, 转向对“健康结果”的购买, 从而演变为一个引导资源分配、协调各方行为的治理工具^[31]。

2.2 医疗服务形态从“事件”向“过程”转变 在传统医疗体系中, 诊疗行为通常以明确的时间节点发生, 支付对象、服务内容与责任边界相对清晰。支付体系因此能够围绕一次就诊、一项检查或一次手术等离散事件进行设计。然而, 在元宇宙医学场景中, 医疗服务逐渐演化成为一种持续存在的过程, 涵盖远程监测、虚拟交互、数字孪生模拟以及长期健康管理等多种形态^[8-9]。

这一转变使医疗价值不再集中于单一节点, 而分布于整个服务周期之中。现有以项目或次数为核心的计价方式, 难以准确反映服务过程中的边际贡献与实际效果, 进而削弱支付机制对医疗行为的引导作用^[4, 10]。在此背景下, 支付体系若仍停留在事件导向的设计逻辑中, 将难以适应过程化医疗的价值特征。

2.3 多主体协同下的价值创造与分配复杂化 元宇宙医学的另一显著特征在于价值创造主体的高度多元化。除传统医疗机构与医务人员外, 算法提供方、数据服务商、平台运营者以及患者自身, 均可能在医疗服务过程中持续创造价值^[13-14]。这种多主体协同模式, 使医疗服务不再是单一机构内部完成的封闭过程, 而是一个跨组织、跨角色的网络化系统。

在这一结构下, 支付体系需要承担价值分配与激励协调的功能。然而, 现有医疗支付体系通常仅支持向单一主体进行支付, 难以将价值回报精细化地分配给不同参与者。这不仅影响新型医疗服务

主体的参与积极性, 也在制度层面制约了元宇宙医学服务模式创新空间^[5, 15]。

2.4 虚实融合环境中的责任与风险重构 在元宇宙医学场景中, 医疗行为往往同时发生于虚拟与现实空间之中, 诊疗决策可能基于数字模型、算法推荐与远程交互完成。这种虚实融合特征, 使医疗责任的界定与风险分担更加复杂^[14, 32]。例如, 诊疗结果究竟应归因于医生判断、算法模型还是系统设计, 本身就构成新的制度性问题。

支付体系作为医疗制度的重要组成部分, 不可避免地参与到责任与风险的分配之中。然而, 现有支付工具通常假定责任主体清晰、风险结构稳定, 其结算规则难以反映虚实融合环境下的复杂责任关系。这种不匹配进一步放大了支付体系在元宇宙医学场景中的制度张力^[5]。

2.5 支付从“结算工具”向“协调机制”的角色转变 综合来看, 元宇宙医学并非单纯提出新的支付需求, 而是通过重构医疗服务形态、价值创造方式与责任结构, 迫使支付体系承担新的制度角色。支付不再只是医疗服务完成后的资金流转工具, 而逐步演化成为一种嵌入医疗过程之中的协调机制, 用以引导行为、分配价值并界定责任^[4, 33]。

这一角色转变意味着, 支付体系的设计需要与医疗服务逻辑深度耦合, 其规则应能够根据服务过程、交互结果与条件触发进行动态调整。否则, 即便医疗技术不断进步, 支付体系仍可能成为制约元宇宙医学发展的关键瓶颈。

3 支付载体与机制的演化路径比较

在元宇宙医学场景中, 支付体系面临的挑战超越了载体效率层面, 深层次关联于支付机制能否嵌入并协调复杂的医疗服务过程。因此, 必须区分“支付载体的技术升级”与“支付机制的制度演化”。当前, 中央银行数字货币(CBDC)、稳定币与协议化支付代表了三条主要的演化路径。它们并非简单的替代关系, 而是在“制度合规性—技术灵活性—治理嵌入深度”构成的三维矩阵中, 适配于不同医疗场景与制度环境的差异化工具, 如见表 1 所示。本章将以此框架系统比较各路径的能力边界与制度逻辑。

3.1 制度约束下不同路径的能力边界剖析 基于上述框架, 三条路径在医疗场景中的适配性与局限得以清晰显现。

(1) CBDC 在高合规性路径下的有限可编程空间。CBDC 是法币的数字化形式, 其核心优势在于

表 1 元宇宙医学支付演化路径的三维比较矩阵

比较维度	CBDC (央行数字货币)	稳定币	协议化支付 (如 x402 理念)
核心制度定位	主权信用的数字延伸, 高合规性 结算基础设施。	效率导向的私营数字支付工具, 侧重跨境与跨平台流通。	“支付即协议”, 将支付规则深度嵌入 服务访问与交互逻辑。
制度合规性	极高。天然适配医保、公立医疗 等强监管体系, 法律地位明确 ^[16] 。	低至中等。面临显著的监管不确定 性、责任界定与金融稳定性 质疑 ^[19,34] 。	极低(目前)。缺乏成熟的监管接口与 法律属性认定, 处于概念验证期 ^[5] 。
技术灵活性	低。可编程能力受审慎监管严格 限制, 主要服务于支付效率与资 金可控性 ^[17-18] 。	高。基于智能合约, 易于实现复 杂、跨境的自动化支付逻辑 ^[21] 。	极高。在协议层实现支付与服务的原 生耦合, 支持微支付、实时结 算等 ^[20,35] 。
治理嵌入深度	低。作为中性结算工具, 难以直 接参与医疗服务过程的激励与 协调。	中等。可通过合约设计约束行 为, 但治理权归于私营协议, 与公 共医疗目标存在张力 ^[36] 。	理论潜力高。支付可成为服务过程的 内生变量, 自动响应临床节点或健康 结果, 实现深度协同 ^[37] 。
公共属性维护	强。由国家信用背书, 隐私与金 融风险在既有框架内管理。	弱。存在支付金融化、数据商业 化及监管套利风险, 可能冲击医 疗公共性 ^[38] 。	不确定。取决于规则透明性与治理权 配置, 既可能强化公平访问, 也可能导 致碎片化。
典型适配场景	公立元宇宙医院内的核心费用结 算、医保基金支付。	跨境联合诊疗、私营医疗平台内 的多主体价值分配实验。	数字孪生治疗中的按模型迭代付费、 健康管理中的按效果持续激励。

无条件的法偿性与国家信用背书, 这使其在医疗支付这一高度敏感的公共领域具备天然的制度适配性^[16]。它能够无缝对接现有医疗保障和财政支付体系, 保障资金安全与监管透明。

然而, 这种高度的合规性是以牺牲技术灵活性与治理嵌入深度为代价的。主要经济体的 CBDC 设计均对“可编程性”持高度审慎态度, 其功能聚焦于提升支付效率与可控性, 而非支持复杂的过程激励^[17-18]。因此, CBDC 在元宇宙医学中更可能扮演可靠、高效的底层结算“管道”, 难以承担对诊疗过程进行动态计量与协调的“治理”角色。

(2) 稳定币维持效率导向与监管张力的平衡。稳定币依托区块链与智能合约技术, 在技术灵活性上优势显著, 能够便捷地实现跨域、多主体间的自动清算与条件支付^[21]。这为元宇宙医学中跨机构协作、即时价值分配提供了潜在工具。

但其根本困境在于制度合规性的薄弱。金融稳定委员会(FSB)等国际机构多次警告, 稳定币在公共服务领域应用的核心风险在于运营者责任模糊、治理框架私有化以及与主流金融监管的冲突^[19,34]。在责任界定严格的医疗场景, 一旦发生纠纷或技术故障, 稳定的“去中心化”特性反而成为厘清法律责任、确保患者权益的制度障碍。因此, 其应用可能长期局限于监管包容性较强的私营或实验性医疗场景。

(3) 协议化支付面临高治理嵌入潜力与制度空

白的矛盾。协议化支付(如基于 HTTP 402 状态码或类似 1402 协议的理念)代表了一种更为激进的演化方向, 其核心是将支付能力深度嵌入网络协议层, 使支付成为获取服务或触发特定交互的默认前提^[35,37]。这为实现“按使用付费”、“按结果付费”等高度过程化的医疗支付模式提供了终极技术蓝图。

然而, 这条路径目前面临最大的制度空白。它缺乏像 CBDC 那样的主权信用背书, 也不像稳定币已有初步的金融监管讨论。其法律属性、数据隐私保护、纠纷解决机制均处于未定义状态^[5]。因此, 协议化支付尽管在“治理嵌入深度”上想象空间最大, 但在短期内更像一个启发性的制度实验, 其成熟依赖于技术标准、法律框架与医疗伦理规范的同步构建。

3.2 从工具理性到制度理性协同重构的演进逻辑。 综合比较表明, 支付体系在元宇宙医学中的演化, 是一个在三维约束下寻求突破的复杂过程, 而非单一路径的线性替代。

一是工具升级的局限。CBDC 与稳定币的竞争, 本质是“合规”与“灵活”的传统权衡。二者主要实现了支付载体的数字化升级, 但无论效率多高, 都未从根本上改变支付外在于服务流程、作为事后结算工具的范式。它们优化了“支付”本身, 但未解决支付如何与“医疗过程”深度融合的问题。

二是机制变革的核心。协议化支付路径指向了支付机制的范式变革, 即支付从“结算结果”转变

为“协调规则”。它触及了元宇宙医学支付困境的实质,即需要一种内生的、能实时响应医疗逻辑的协调机制。

三是协同重构的必然。从制度经济学视角看,这一演进并非技术选择问题,而是治理结构与激励机制的重组问题。未来的可行路径,很可能不是某一路径的完胜,而是分层适配与协同重构。例如,利用 CBDC 进行最终合规结算,在其上层通过可编程的协议层(可能受监管的稳定币或特定合约)来执行复杂的、过程性的支付规则,从而兼顾制度合规性与治理灵活性。这要求设计者超越单纯的工具理性,进行支付技术、医疗规则与制度设计的协同创新,使支付体系真正演进为支撑元宇宙医学发展的治理基础设施^[33]。

通过以上结构化比较与演进分析可以明确,选择何种支付路径,取决于特定医疗服务场景对“合规、灵活、治理”三个维度的具体权重分配。元宇宙医学支付的最终解决方案,必将是一个融合技术可行性与制度理性的、多层次、可适配的复合体系。

4 面向元宇宙医学的支付体系重构框架

前文分析表明,元宇宙医学并非简单提出新的支付工具需求,而是通过重塑医疗服务形态与价值创造结构,对支付体系提出了制度层面的重构要求。因此,有必要跳出单一工具或技术视角,从体系设计的角度,构建面向元宇宙医学的支付重构框架。

4.1 支付作为医疗治理结构的制度层组成部分 在传统医疗体系中,支付制度主要承担资源分配与成本控制功能,其设计逻辑与医疗治理结构保持相对松散的关联。然而,在元宇宙医学场景中,支付机制不可避免地参与到医疗服务的组织、激励与责任分配之中,成为医疗治理结构的内生组成部分^[5,15]。

这意味着,支付体系的制度设计需要与医疗服务的组织模式同步演进。例如,在多主体协同的医疗环境中,支付规则需要明确不同参与方的权利、义务与责任边界,而不能仅作为事后结算安排存在。否则,支付体系将难以支撑新型医疗服务形态的制度稳定性^[33,39]。

4.2 从统一结算到动态协调的机制层重构 在机制层面,面向元宇宙医学的支付体系应当从“统一结算机制”向“动态协调机制”转变。传统支付体系强调标准化与可控性,适合于结构稳定、服务边界清晰的医疗模式;而元宇宙医学所需的,是能够根据服务过程、交互结果与条件变化进行动态调整的支

付机制^[4,10]。

具体而言,支付机制需要具备按过程、按效果与按参与度进行计量与分配的能力,从而在制度层面支持连续性医疗与精细化健康管理。这种机制转变并非意味着完全放弃集中管理,而是在可控前提下引入更高程度的灵活性与可编程性^[16,22]。

4.3 可编程支付与协议化能力的技术层支撑作用 在技术层面,可编程支付与协议化支付为支付机制的重构提供了重要工具基础。通过将支付规则嵌入代码与协议之中,技术手段可以在一定程度上降低复杂支付安排的执行成本,提高制度设计的可操作性^[21-22]。

然而,需要强调的是,技术层的创新本身并不能替代制度设计。可编程能力应当服务于明确的制度目标,其应用边界需与医疗监管、责任界定与风险控制要求保持一致。否则,技术创新反而可能引入新的制度不确定性^[5,16]。

4.4 技术创新、制度设计与医疗治理的协同耦合 综合制度层、机制层与技术层的分析可以发现,面向元宇宙医学的支付体系重构,本质上是一项跨层级的系统工程。其成功依赖于技术创新、制度设计与医疗治理之间的协同,而非任何单一层面的突破^[33,39]。

这一协同耦合过程并非在真空中进行,而必须嵌入特定的国家卫生体系发展与改革语境之中。例如,中国《“健康中国 2030”规划纲要》强调要“创新医疗服务模式”,推动健康管理关口前移^[40]。这一定位在价值目标上与元宇宙医学所倡导的连续性、预防性服务高度契合。因此,支付体系的重构,在顶层设计上就需要与国家既定的卫生发展战略对齐,确保制度演进服务于提升全民健康水平的根本目标。

具体到中国语境,支付体系的重构可以在“制度—机制—技术”框架下与现行改革形成协同。在制度层,支付作为治理工具的定位,应与国家医疗保障局主导的“支付方式改革”方向一致,共同致力于建立“管用高效”的医保支付机制^[41]。在机制层,元宇宙医学所要求的“动态协调”与“按效果付费”,正是对当前按病种付费(DRG/DIP)等改革向更精细化、过程化方向演进的积极探索。在技术层,可编程与协议化支付等创新,则可以为上述复杂支付机制的落地提供高效、可信的技术执行方案。最终,一个成功的支付重构框架,必然是技术工具、医疗价值规律、国家监管要求与公共福利目标深度融合的产物。

在这一过程中,支付体系既不应被简化为中性的结算工具,也不应被过度技术化为自动执行系统。相反,其应被视为一种制度性基础设施,在确保医疗公共属性与安全底线的前提下,为医疗服务模式创新提供可持续的制度支撑。

5 支付体系重构与医疗制度演化的结论与展望

前文围绕医疗支付体系的结构局限、元宇宙医学场景的独特性以及支付机制的演化路径展开分析,表明支付问题并非元宇宙医学中的技术附属议题,而是关乎医疗制度运行逻辑的重要基础性问题。在此基础上,有必要对全文的核心结论进行归纳,并对未来可能的演化方向作出审慎展望。

5.1 元宇宙医学中的支付问题是一项制度性命题 本文的核心结论在于,元宇宙医学语境下的医疗支付问题,本质上是一项制度性命题,而非单纯的技术或工具选择问题。随着医疗服务从离散事件向连续过程转变,支付体系不可避免地参与到医疗价值的生成、分配与治理之中,其制度设计将直接影响医疗服务模式的可持续性^[5,15]。

在这一背景下,若仍将支付体系视为中性的结算工具,仅通过技术升级提升效率,难以回应元宇宙医学对支付机制提出的结构性要求。相反,支付体系需要被重新定位为医疗治理结构的重要组成部分,在制度层面承担协调多主体、引导医疗行为与界定责任边界的功能^[33,39]。

5.2 支付体系重构的现实路径与约束 从演化路径看,面向元宇宙医学的支付体系重构不太可能通过一次性制度变革实现,而更可能呈现出渐进式调整的特征。在可预见的阶段内,现有医疗支付体系仍将发挥基础性作用,新型支付机制则以补充和试点形式逐步嵌入特定场景^[16-17]。

同时,支付体系的演化将受到医疗监管、公共财政约束以及社会风险偏好的多重制约。尤其是在涉及患者安全与公共利益的领域,支付机制的创新需要在效率提升与风险控制之间保持审慎平衡^[6,19]。这意味着,支付体系的制度创新不应以技术可行性作为唯一判断标准。

5.3 从支付创新到医疗制度演化 从更长远的视角看,元宇宙医学中的支付体系重构,其意义将超越支付本身。它可能成为一个关键的制度杠杆,撬动并推动医疗制度整体的演化进程。通过支付机制的调整,医疗服务的组织方式、激励结构与价值衡量标准均可能发生连锁变化,从而影响医疗体系的运行逻辑^[4-5]。

对未来研究而言,有必要进一步结合具体医疗场景,对不同支付机制的制度效果进行实证分析,并在比较不同国家与制度环境的基础上,探索支付体系与医疗治理协同演化的可行路径。唯有在制度、技术与医疗实践之间形成良性互动,元宇宙医学才能在保持公共属性的前提下实现可持续发展。

从理论层面看,本文的分析对医疗支付理论、数字治理研究以及金融基础设施研究均具有一定启示意义。首先,本文通过元宇宙医学这一极端但具有前瞻性的场景,揭示了传统医疗支付理论中“基础设施中性假设”的适用边界,提示支付体系在高度过程化服务中可能具有内生的治理功能。其次,本文将医疗支付问题与数字治理和制度经济学中的协调机制问题相联系,拓展了支付体系研究的分析视角。

需要指出的是,本文仍存在若干未解决的问题,有待未来研究进一步展开。例如,不同医疗制度环境下,支付机制重构的可行路径是否存在显著差异?可编程与协议化支付在实际运行中如何平衡自动执行与专业判断?支付机制嵌入医疗过程后,其对医患关系与专业伦理的长期影响仍有待经验研究加以检验。这些问题构成了元宇宙医学支付研究未来的重要议程。

5.4 从医疗支付到制度性支付基础设施 承接上文对支付推动医疗制度演化的长远判断,需要进一步厘清的是,这种演化的根本方向为何不能是金融支付逻辑的简单复制。在既有研究中,支付问题往往被统一置于金融支付或货币体系的分析框架之下,但医疗支付在制度属性上与一般金融支付存在根本差异。金融支付的核心功能在于价值交换与风险定价,其制度目标主要围绕效率、流动性与市场稳定展开;而医疗支付则天然嵌入公共治理体系之中,不仅涉及价值转移,更直接关联医疗行为激励、责任分配与公共资源配置。因此,医疗支付本质上是一种制度性支付,其目标并非最大化交易效率,而是在效率、公平与公共风险控制之间维持动态平衡^[2]。这一差异决定了医疗支付无法完全遵循“中性工具”的假设。支付方式的设计会反向塑造医疗服务供给结构、医患行为选择以及技术应用方向。因此,医疗支付本质上是一种制度性支付,其目标并非最大化交易效率,而是在效率、公平与公共风险控制之间维持动态平衡。

去中心化金融(DeFi)通常被视为可编程支付与协议化结算的典型应用场景,但其前提是交易主体之间风险自担、责任清晰且可通过市场机制出清。

相比之下,元宇宙医学的制度环境截然不同。

首先,医疗服务具有不可完全市场化的公共属性,其风险后果往往外溢至社会整体。其次,医疗行为中的信息不对称、专业壁垒与不可逆后果,使得“代码即规则”的治理逻辑难以直接适用。再次,医疗支付不仅要结算服务,更要对行为进行约束、引导与问责。

因此,元宇宙医学并不适合简单移植 DeFi 的支付逻辑。相反,其更需要一种嵌入医疗治理逻辑的制度化支付体系,使支付规则与医疗规范、监管责任及公共价值目标形成内在一致。这也意味着,可编程性在医疗支付中必须服从于制度边界,而非替代制度本身。

从演化路径看,未来 5~10 年医疗支付体系的变革更可能呈现出阶段性推进与多路径并存的特征,而非一次性范式跃迁。

在短期(1~3 年)内,支付变革主要体现为载体升级与局部可编程尝试,如 CBDC 在医保结算、公共医疗场景中的试点,以及有限条件触发的支付功能引入。

在中期(3~5 年),随着数字孪生治疗和长期健康管理模式的发展,支付体系将面临更明显的制度压力,推动支付机制向过程嵌入与规则内生化方向演进。这一阶段可能出现多种制度实验,但仍以监管主导为特征。

在长期(5~10 年),随着元宇宙医学服务形态的稳定,支付体系有望完成其根本性的角色蜕变,从附属的结算工具,演进为一种深度嵌入医疗过程、兼具金融属性与核心治理功能的基础设施。

伦理声明 本文是在 AI 的帮助下完成的,内容真实性由作者负责,特此声明。

利益冲突 作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 高承实:选题、撰写、修改论文。

参考文献

- [1] ARROW K J. Uncertainty and the welfare economics of medical care [M]//Uncertainty in Economics. Amsterdam: Elsevier, 1978: 345-375.
- [2] CUTLER D M, ZECKHAUSER R J. Chapter 11 The anatomy of health insurance [M]//Handbook of Health Economics. Amsterdam: Elsevier, 2000: 563-643.
- [3] 姚 涵, 刘远立. 医疗元宇宙在卫生健康体系中的技术变革与社会挑战[J]. 医学与社会, 2024, 37(2): 7-11.
- [4] PORTER M E. What is value in health care? [J]. N Engl J Med, 2010, 363(26): 2477-2481.
- [5] NORTH D C. Institutions, Institutional Change and Economic Performance [M]. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1990.
- [6] OECD. Health at a Glance 2023: OECD Indicators[M]. OECD Publishing, 2023.
- [7] PAULY M V. The economics of moral hazard: comment [J]. Am Econ Rev, 1968, 58(3): 531-537.
- [8] TOPOL E. The Creative Destruction of Medicine: How the Digital Revolution Will Create Better Health Care [M]. New York: Basic Books, 2012.
- [9] DORSEY E R, TOPOL E J. State of telehealth [J]. N Engl J Med, 2016, 375(2): 154-161.
- [10] KAPLAN R S, PORTER M E. How to solve the cost crisis in health care [J]. Harv Bus Rev, 2011, 89(9): 46-52, 54, 56-61.
- [11] PORTER M E, Teisberg E O. Redefining Health Care: Creating Value-Based Competition on Results [M]. Boston: Harvard Business Review Press, 2006.
- [12] CENTERS FOR MEDICARE & MEDICAID SERVICES. Value-Based Programs [EB/OL]. (2023-07-01) [2024-12-15]. <https://www.cms.gov/medicare/quality/value-based-programs>
- [13] WORLD ECONOMIC FORUM. Blockchain in healthcare: trust, transparency and traceability [R]. Geneva: World Economic Forum, 2018. Insight Report, 2018.
- [14] KUO T T, KIM H E, OHNO-MACHADO L. Blockchain distributed ledger technologies for biomedical and health care applications[J]. J Am Med Inform Assoc, 2017, 24(6): 1211-1220.
- [15] WILLIAMSON O E. Transaction cost economics [J]. J Econ Behav Organ, 1987, 8(4): 617-625.
- [16] GROUP OF CENTRAL BANKS. Central Bank Digital Currencies: Foundational Principles and Core Features [R]. Basel: Bank for International Settlements, 2020; Report No. 1, 2020. ISBN: 978-92-9259-427-5.
- [17] BANK FOR INTERNATIONAL SETTLEMENTS. CBDCs and the Future of Payments[R]. Basel: BIS, 2023; BIS Paper No. 136, 2023.
- [18] EUROPEAN CENTRAL BANK. Digital euro: policy considerations and perspectives for the design of a CBDC for the euro area [R]. Frankfurt: ECB, 2023; ECB Occasional Paper Series No 297, 2023.
- [19] FINANCIAL STABILITY BOARD. High-level recommendations for the regulation, supervision and oversight of global stablecoin arrangements; final report [R]. Basel: FSB, 2023.
- [20] BANK FOR INTERNATIONAL SETTLEMENTS INNOVATION HUB. The future of programmable money [R]. Basel: BIS, 2023.
- [21] SZABO N. Smart contracts: building blocks for digital markets]. Entropy, 1996, 16: 1-8.
- [22] CONG L W, HE Z G. Blockchain disruption and smart contracts [J]. Rev Financ Stud, 2019, 32(5): 1754-1797.
- [23] WOOTTON R. Telemedicine: a cautious welcome [J]. BMJ,

- 1996, 313(7069): 1375–1377.
- [24] GREENHALGH T, WHERTON J, SHAW S, et al. Video consultations for covid-19[J]. *BMJ*, 2020, 368: m998.
- [25] RUDSARI H K, BARLOW J, et al. Digital twins in healthcare: a comprehensive review and perspectives [J]. *Frontiers in Digital Health*, 2023, 5: 1253050.
- [26] VALLÉE A. Digital twin for healthcare systems[J]. *Front Digit Health*, 2023, 5: 1253050.
- [27] KURIAKOSE S M, JOSEPH J, RAJIMOL A, et al. The rise of digital twins in healthcare: a mapping of the research landscape [J]. *Cureus*, 2024, 16(7): e65358.
- [28] WAGNER E H, AUSTIN B T, VON KORFF M. Organizing care for patients with chronic illness[J]. *Milbank Q*, 1996, 74(4): 511–544.
- [29] BODENHEIMER T, WAGNER E H, GRUMBACH K. Improving primary care for patients with chronic illness [J]. *JAMA*, 2002, 288(14): 1775–1779.
- [30] WHO. Integrated care models: an overview [R]. Geneva: WHO, 2016.
- [31] AMELUNG V, CHEAH J. Is there an ideal payment model that enables integrated care: searching for the impossible?[J]. *Int J Integr Care*, 2024, 24(4): 10.
- [32] AZARIA A, EKBLAW A, VIEIRA T, et al. MedRec: using blockchain for medical data access and permission management [C]//2016 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD). August 22–24, 2016, Vienna, Austria. IEEE, 2016: 25–30.
- [33] SHILLER R J. *Finance and the Good Society* [M]. Princeton, N. J. Princeton University Press, 2012.
- [34] IMF. Global stablecoins: risks and regulation[R]. IMF, 2020.
- [35] NARAYANAN A, BONNEAU J, et al. *Bitcoin and cryptocurrency technologies* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2016.
- [36] FINANCIAL STABILITY BOARD. High-level recommendations for the regulation, supervision and oversight of crypto-asset activities and markets: final report [R/OL]. Basel: FSB, 2023–07–17.
- [37] FIELDING R, RESCHKE J. Hypertext transfer protocol (HTTP/1.1): Semantics and Content[R]. RFC 7231, IETF, 2014.
- [38] ADRIAN T, MANCINI-GRIFFOLI T. The rise of digital money [J]. *Annu Rev Financ Econ*, 2021, 13: 57–77.
- [39] ACEMOGLU D, ROBINSON J A. *Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty* [M]. New York: Crown Publishers, 2012.
- [40] 中共中央国务院. 《“健康中国 2030”规划纲要》[Z]. 北京: 人民出版社, 2016.
- [41] 国家医疗保障局. 关于推进医疗保障支付方式改革的指导意见[Z]. 医保发[2021]48号, 2021.

引用本文

高承实. 元宇宙医学场景下医疗支付体系的结构挑战与演化路径[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(4): 39–47.

GAO C S. Structural challenges and evolution paths of the medical payment system in the metaverse medical scenario [J]. *Metaverse Med*, 2025, 2(4): 39–47.

DOI: 10.61189/831252cpvyzj

· 产学研融合 ·

基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术：系统设计、协同流程与展望

林栩之¹, 王 源², 杨达伟^{2,3*}

1. 复旦大学上海医学院公共卫生学院, 上海 200032

2. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032

3. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海市呼吸病研究所, AI+肺癌防治中心, 上海 200032

[摘要] 医疗机器人的出现已经改变了手术的发展, 相对于传统手术, 使用手术机器人在提升精准度、减少工作强度等方面有着巨大的帮助。然而由于资源的短缺, 全自动全流程的手术机器人将成为元宇宙医学的发展趋势。目前的膝关节手术机器人多为半主动模式, 即作为助手身份协助医生操作, 少数“全自动”机器人也只能满足术中操作的全自动性。本文提出一种基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术, 采取人预演监督、机器规划、操刀的模式, 从“半主动”走向“半自动”(全流程), 可作为向全流程全自动模式发展的一个过渡, 在保障安全、易于让医患接受的前提下实现手术的高质量完成, 更符合现有技术基础和现实要求, 也为元宇宙医学中手术定量评估等方面的发展提供了可能。

[关键词] 膝关节置换; 数字孪生; 元宇宙医学; 手术机器人**[中图分类号]** R 687.4 **[文献标志码]** A

Intelligent knee arthroplasty based on digital twin and mixed reality: system design, collaborative process and prospects

LIN Xuzhi¹, WANG Yuan², YANG Dawei^{2,3*}

1. School of Public Health, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200032, China

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

3. Shanghai Engineer & Technology Research Center of Internet of Things for Respiratory Medicine, Shanghai Respiratory Research Institution, AI+ Lung Cancer Prevention and Treatment Center, Shanghai 200032, China

[Abstract] The advent of medical robots has transformed the landscape of surgery. Compared to traditional surgical methods, the use of surgical robots provides significant advantages in enhancing precision and reducing the workload for surgeons. However, due to resource constraints, fully automated, end-to-end surgical robots are poised to become a key trend in the development of metaverse medicine. Existing knee surgery robots predominantly operate in a semi-active mode, serving as assistants to surgeons, while a limited number of "fully automated" robots can only achieve full automation during the intraoperative phase. This paper proposes an intelligent knee replacement surgery approach based on digital twin and mixed reality technologies, adopting a model of human pre-operative rehearsal and supervision, machine planning, and robotic execution. This shifts the paradigm from "semi-active" to "semi-automated" (covering the full process), serving as a transitional step toward fully automated end-to-end surgery. By ensuring safety and gaining acceptance from both medical professionals and patients, this approach enables high-quality surgical outcomes. It aligns better with current technological foundations and practical requirements while also offering potential for advancements in quantitative surgical assessment within the realm of metaverse medicine.

[Key Words] knee arthroplasty; digital twin; metaverse medicine; surgical robot

传统外科手术往往在医生状态、操作的不可控性上存在失误的可能, 而在相对不发达地区, 由于设备成本的局限、医疗资源的短缺, 往往面临更大的挑战。医疗机器人的出现改变了多个领域的复

[收稿日期] 2025-12-19**[接受日期]** 2025-12-29

[基金项目] 四大慢病重大专项 (2024ZD0529300), 上海市科学技术委员会项目基金 (20DZ2254400), 上海高校市级重点课程 (FDSHZD202409). Supported by Noncommunicable Chronic Diseases National Science and Technology Major Project (2024ZD0529300), Science and Technology Commission of Shanghai Municipality Project Fund (20DZ2254400), Municipal Key Courses in Shanghai Universities Project Fund (FDSHZD202409).

[作者简介] 林栩之. E-mail: 25301020067@m.fudan.edu.cn

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: yang.dawei@zs-hospital.sh.cn

杂手术的发展,机器人手术比传统手术具有明显优势:提高手术的精确性和安全^[1-3];降低医生的工作强度,减少医生和患者的辐射;可实现远程操作;减少传染性疾病传播等等。

目前手术机器人多采用主从关系,即没有人类操作员的情况下不能自主行动,参考最广泛使用的达芬奇手术机器人,达芬奇手术系统拓展了在妇科、泌尿外科、肝胆科等方向的手术能力;胸外科有 Ion^[4]、5G 支气管镜远程机器人系统^[3]和 Monarch 平台^[5];膝关节和髋关节置换手术也有 MAKO 机器人等系统^[6],可以进行辅助术前方案制定和术中实时指导。尽管与传统手术相比取得了很大的突破,但现有的手术机器人往往作为手术工具辅助手术,而资源的短缺使得手术机器人需向全自主全流程的方向发展。目前,已经有智能组织自助机器人^[7]用于腹腔镜手术;5G 支气管镜远程机器人系统^[3],机

器人自主完成大部分操作,医生保留了覆盖 AI 代理的权力,在必要时介入。这些手术机器人已经可以实现术中全自动操作,包含感知、决策、规划、控制。但是与支气管和腹腔镜不同,膝关节的结构更加复杂,难以用算法建模,操作中切割和安放对于失误容忍度极低,难以直接依赖手术机器人全自动决策和操作。在膝关节置换术上的全自动全流程(包括术前规划、术中决策操作、术后反馈)系统尚且需要一个过渡阶段。

1 当前膝关节置换手术机器人

当前关节手术机器人主要有 Mako、ROSA、Navio、CORI、Cuvis、MISSO 等等^[8],对目前用于全膝关节置换的主要机器人系统进行比较分析^[6,8-10](表 1)。

表 1 主要机器人系统对比

名称	控制类型	成像需求	现状	优点	缺点
Mako	半主动	基于 CT 的术前规划	广泛使用	限制骨切除在预定边界内;精准度高;可实时检测患者关节的运动	学习曲线长;系统封闭;术前规划耗时
Navio	半主动	无图像	广泛使用	无需影像,减少术前等待时间	大部分截骨仍需手动完成,耗时且容易引入人为误差
CORI	半主动	无图像	取代 NAVIO	NAVIO 的升级版,术中可实时调整计划	无图像引导;实质为手术工具
Velys	半主动	无图像	新兴产品	与 ATTUNE 深度集成,手术一体化	系统封闭
ROSA	半主动	基于 X 射线(2D/3D)	有限部署	协作机器人,支持图像以及无图流程;直观反馈任何改变对缝隙平衡的影响;提供了更精准的骨切除能力	系统庞大、维护成本较高、需要专门培训;效果仍取决于医生在有效利用技术上的技能和经验
Cuvis	全自动	基于 3D CT 的规划	使用	自动切割,减少人工操作误差;三维建模缩短手术时间	全自动切割中如何保证安全还有待考证;缺乏植入物的效果和寿命数据
MISSO	全主动	基于术前 CT/3D 规划	新兴	高性价比	全主动控制

膝关节手术机器人的工作流程通常包括:系统设置、术前规划、系统注册、术中操作和反馈等。目前技术已实现:预定切割^[10]、实时位置追踪、实时预演反馈^[10]、术中机械臂精准定位、3D 建模^[9],精准反馈截骨操作、假体空间定位及下肢对线情况等。然而现阶段手术机器人普遍存在成本昂贵不易移动、技术难度大、操作复杂度高、学习训练时间较长等缺点^[8];以及一些亟待提升的方面,例如手术机器人缺乏触觉反馈(力反馈)^[1,3];建模停留于术前规划阶段,与术中执行断层;目前多为半主动式结构,人们对于全自动式排斥性较高等问题。

当前大多数膝关节手术机器人主要采用主从模式^[11],机器协助人进行术前规划、术中操刀的半主动模式,已经出现了术中操作全自动的系统(Cuvis)。然而,在元宇宙医学的语境之下,未来的趋势是全自动(自动化水平五级^[11])全流程的智能膝关节手术机器人,目前术前规划和术中安全保证还有待发展。然而膝关节置换手术对错误极为敏感,哪怕一次失败也可能导致严重后果,因此完全自主机器人在手术室中可能还需要很长时间的验证才能足够安全和可靠^[12]。所以目前很长一段时间内,我们还是需要医生掌握核心技术并有操刀手

术的能力,并且需要通过医生和机器人协作的手术来逐步让患者从心理上接受全自主的机器人手术。在此基础上,结合元宇宙医学,我设想基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术系统,采取人预演、监督、机器人规划、操刀的模式,初步实现机器人决策、规划、操作,从“半主动”走向“半自动”,自动化水平从3级到4级^[11],向全自主系统(5级)过渡。

2 核心技术:数字孪生和手术机器人

2.1 数字孪生膝关节 数字孪生五维模型(物理实体、虚拟实体、服务、数据、连接)^[13],为膝关节“复制”提供了理论支持。以目前个性化假体的制作^[14]和3D膝模型的构建^[9]为基础,将病变关节转化为3D模型,根据膝关节有限元研究^[15]总结出的不同年龄阶段膝关节有限元计算模型的材料特性^[16],用特定材料打印患者膝关节物理实体并加装柔性传感器(参考UDCAP VR手套的柔性传感器);同时构建数字孪生系统——融合患者解剖结构、生物力学属性与生理特性的动态虚拟实体,最大程度上还原患者真实情况和术中情况,从而制定个体化截骨策略。

2.2 关节手术机器人 术前规划时,手术机器人可以根据模型数据库提出多种治疗方案并进行模拟筛选。手术模拟时,医生通过MR眼睛直接看到模型上预规划的截骨线和安全边界。机器接收实体模型和操作工具上传来的相关数据,包括触觉感知数据^[17-19]、运动路径、受力情况、手势识别^[20]等,将医生操作的相关数据转化为数字路径指令再转化为机器运动指令,进行手术的再现。

手术中,关节手术机器人可通过语音交互、手势交互^[21]与医生进行自然的人机交互;软组织传感器^[6]记录手术关键数据,如骨骼结构测量、植入物一致性、旋转度等,使得手术具有可重复性这些数据可以作为术后更精确、个体化的治疗方案参考^[22]。

3 系统设计:新型智能膝关节置换

本系统的核心创新在于设计一个“虚拟规划-预演操作-协同执行”的闭环流程(图1)。它将数字孪生模型、手术路径规划、实时导航信息融入术前、术中、术后整个体系。医生通过系统可以以自然的方式,进行评估方案、实操预演与术中调整,以监督引导的视角辅助机器人自主手术,实现精准化个性化的治疗。

3.1 智能生成与筛选最优方案 系统基于患者的膝

关节数字孪生体,集成生物力学仿真与AI算法,自动生成多种兼顾机械对线、软组织平衡及关节活动度的假体安放方案。系统通过操纵不同方案在虚拟关节中的表现初步筛选出“最优方案”。医生可在MR界面通过比对,结合临床经验进行确认。系统应存在智能和手动两种决策方式,减少内部学习和训练所需时间:初期可选择由医生主导决定治疗方案,在实际工作的同时利用工作中的数据进行模型训练^[22]。

此筛选方案采用半自主控制,突破了现有大多数机器人辅助医生的定位,同时保留人的决定作用,做到了从遥操作、经典自动化,到学习型自主性^[23]的过渡。

3.2 手术规划和演示 医生佩戴MR设备,在高仿真膝关节物理实体上进行手术演示。在此过程中:MR系统提供虚拟的截骨导引、假体轮廓等信息叠加。医生使用装配高精度运动传感器和力传感器的器械进行实际手术操作。系统实时捕获并记录医生操作器械的完整空间运动路径、速度、力度等信息,并与实体的柔性传感器收集的信息整合,形成“数字手术路径”。最后通过回顾纠正修复医生失误的操作、优化方案。

通过医生实际操作进行手术预演,解决了技术难度大、使用门槛高的问题。医生不需要了解如何使用手柄、脚踏板和图像传输系统,经验不足的医生可以选择使用传统手术方式实操,再对复刻手术进行系统微调,最后由机器人利用超高稳定性复刻执行。医生在积累经验的同时保证了手术可靠性,并解决了机器人手术普遍缺乏触觉反馈的问题。

通过手术预演保证医生对于核心技能的掌握、强化医生对于三维解剖和手术步骤的理解,医生督导整个流程,这在元宇宙医学还未普及的不远的未来,是对安全问题和紧急情况的必要保障。

除此之外,结合5G技术,专家可远程进行预演操刀,生成“专家路径”加密传输至远端,由本地机器人协同当地医生完成手术,为优质医疗资源下沉开辟新路径,这在5G支气管镜远程机器人系统中已经得到验证^[3]。

3.3 手术执行 真实手术中,系统进入协同模式。

3.3.1 机器人复刻与引导 手术机器人以“数字手术路径”为基准轨迹进行手术,由医生进行步骤确认、引导和监督。

3.3.2 医生实时监控与决策微调 医生实时观察机器人执行状态,可通过术中工具跟踪(达芬奇手术系统)^[20]生成三维AI图像^[11]结合患者实际解剖的匹

配情况。若发系统自动检测发现因个体组织差异导致路径需要调整(比如韧带张力与预演不同),即刻反馈并生成新方案,或由医生直接通过手势、语音或从控制接口,发出修正指令。

3.3.3 闭环决策 在非紧急的情况下,系统接收指令或生成新方案后,将调整后的新数据反馈回数字孪生模型,进行快速仿真,预测调整后的效果。此过程形成“医生感知-决策微调-机器人执行-仿真反馈-最终决策”的人机协同闭环。

3.3.4 最终执行 在关键步骤上,由医生确认最终方案。在医生监督下,机器人利用其超高的稳定性和精度,完成对“微调后路径”的最终复刻执行。

数字手术路径不仅可以构建外科智能教学库,作为珍贵的教学资源,用于规范化培训与技能分析,还可以构建手术操作的量化评价体系,用于医师实操标准的考核以及机器人系统的检测。

全流程采取双重操作和两次检查,规避了纯算法规划的故障缺陷和纯医生操作的失误可能。此外,通过远程医疗和系统的半自主化,可以进一步缩小医疗资源的差距。

3.4 术后反馈 通过手术过程中记录的安放精准程度、对线情况等数据进行术后反馈,对患者康复提供个性化方案。

4 小 结

本文基于现有关节置换手术机器人与元宇宙医学的未来趋势,提出了一种基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术系统及其协同工作流程。该系统通过创建数字孪生体作为数据基础,利用混合现实实现自然直观的人机交互,并设计了“医生预演操刀路径学习”与“术中动态人机协同决策”的机制,在提升手术精准度与可预测性的同时,捍卫了医生的决策权威、保证了医生的核心技能掌握。其优化在于,手术机器人从协作工具、命令执行者变为决策者和自主优化者,医生从主导者变为督导者。术前和术中利用数字孪生模型和实时反馈实现自主,但在手术整体操作上仍以医生数字路径为基础,为该系统在保留自主性的情况下进行人机协同,保证了手术质量,为后续全过程自主奠定了基础。

尽管一些方面尚面临挑战。成本上,该系统高度复杂,需整合数字孪生、MR影像、AI大脑、机械臂与传感器等多部分,成本较高,探索低成本方案急需解决;安全保障上,半自动化的系统是否会造成医生的怠慢和不作为导致最终效果问题;技术实

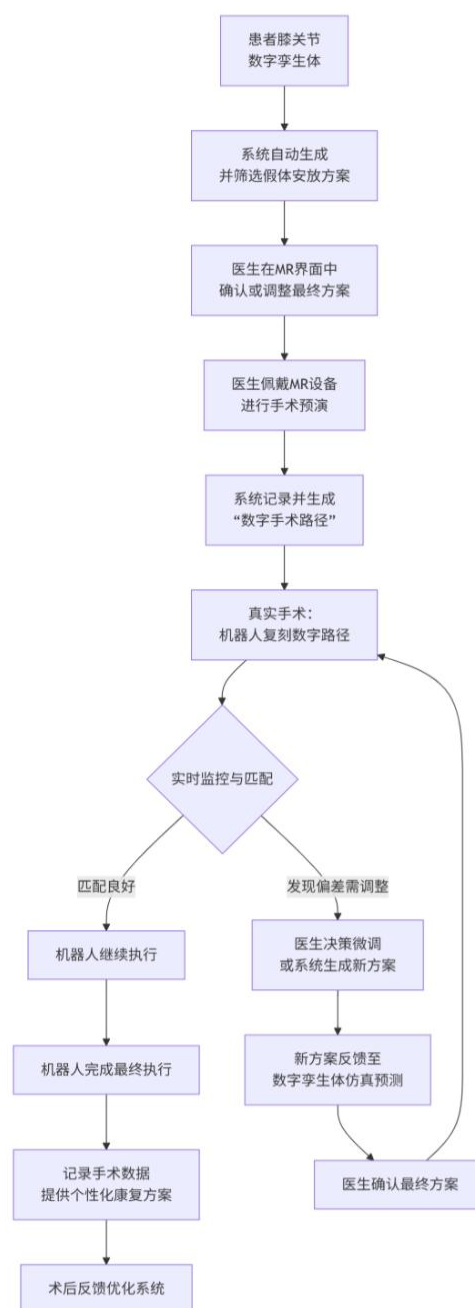


图1 手术决策闭环流程设计

现上,训练数据可能存在的内在偏见如何去除,数据隐私如何保障,存在模型透明度和医患信任之间的关系^[11];技术检验上,尽管网络延迟的容忍度目前尚在人反应时间之内^[3],但是多模块整合后的实时性还有待验证,且路径捕捉精度等各方面都需要大量临床前试验和数据;权责界定上,需要建立标准的人机协同手术认证体系,携手法学、伦理学家共同制定清晰的权责界定规则。

未来的研究将集中于:将庞大的系统拆分小型模块以进行临床前分区试验、临床时灵活运用;优化3D膝关节构建流程^[9],建立数字孪生模型;寻找

更合适的仿真材料,开发 3D 打印高仿真实体的路径,结合体外培养技术构建预演物理实体;在医生引导下的自主系统可以拓展至其他方向,以作为元宇宙医学背景之下,尚未达到技术硬件要求时的半自主过渡。

一定程度上,该系统顺应了元宇宙医学和下一代智能外科的发展趋势——具备力反馈的全自动外科手术机器人^[3,11],从“工具辅助”走向“智能协同”,为实现更个性化、更精准、更可及的骨科手术提供了切实可行的技术蓝图。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 林栩之:撰写文稿;王源:修改文稿;杨达伟:指导文稿撰写和修改。

参考文献

- [1] 杨丽晓,侯正松,唐伟,等. 近年手术机器人的发展[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47(1): 1-12.
- [2] 衡春宁,李科鑫,罗瀚文,等. 国产关节手术机器人辅助人工全膝关节置换术的早期临床研究[J]. 中国疗养医学, 2025, 34(12): 90-96.
- [3] LIU L L, ZHANG J Y, WANG F, et al. AI search, physician removal: Bronchoscopy robot bridges collaboration in foreign body aspiration[J]. *Sci Robot*, 2025, 10(104): eadt5338.
- [4] REISENAUER J, SIMOFF M J, PRITCHETT M A, et al. Ion: technology and techniques for shape-sensing robotic-assisted bronchoscopy[J]. *Ann Thorac Surg*, 2022, 113(1): 308-315.
- [5] IWAMOTO S K, TSAI W S. Novel approaches utilizing robotic navigational bronchoscopy: a single institution experience[J]. *J Robot Surg*, 2023, 17(3): 1001-1006.
- [6] ROCHE M. The MAKO robotic-arm knee arthroplasty system[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12): 2043-2047.
- [7] SAEIDI H, OPFERMANN J D, KAM M, et al. Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis[J]. *Sci Robot*, 2022, 7(62): eabj2908.
- [8] RUDRARAJU R T, LONDHE S B, ANEJA K, et al. The role of next-generation robotic systems in transforming knee arthroplasty: precision and beyond[J]. *J Robot Surg*, 2025, 19(1): 393.
- [9] ZAMBIANCHI F, DAFFARA V, CATANI F. Mako robotic arm-assisted unicompartmental knee arthroplasty [M]//*Surgical Management of Knee Arthritis*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 37-50.
- [10] ROSSI S M P, BENAZZO F. Individualized alignment and ligament balancing technique with the ROSA® robotic system for total knee arthroplasty [J]. *Int Orthop*, 2023, 47(3): 755-762.
- [11] KNUDSEN J E, GHAFAR U, MA R Z, et al. Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery [J]. *J Robot Surg*, 2024, 18(1): 102.
- [12] GOLDBERG K, GUTHART G. Augmented dexterity: How robots can enhance human surgical skills[J]. *Sci Robot*, 2024, 9(95): eadr5247.
- [13] 陶飞,刘蔚然,张萌,等. 数字孪生三维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- [14] 单森,石青鹏. 个性化膝关节假体与传统假体的临床应用现状与进展[J]. 中国医药导报, 2024, 21(23): 70-75.
- [15] 梁成,尹一然,张亚丽,等. 全膝关节置换构造内翻的有限元仿真研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2025, 42(06): 1242-1250.
- [16] 陈静,张楠,孟庆华,等. 不同年龄阶段膝关节有限元计算模型的材料特性分析[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(34): 7369-7375.
- [17] 胡俊,李仲萱,齐佳明,等. 机器人操纵的触觉感知技术综述[J]. 自动化与信息工程, 2025, 46(5): 1-15.
- [18] NGUYEN D H, SCHNEIDER T, DURET G, et al. Tac Ex: Gel Sight tactile simulation in Isaac sim—combining soft-body and visuotactile simulators[J]. *ar Xiv preprint ar Xiv: 2411.04776*, 2024.
- [19] LONG Y H, LIN A R, KWOK D H C, et al. Surgical embodied intelligence for generalized task autonomy in laparoscopic robot-assisted surgery[J]. *Sci Robot*, 2025, 10(104): eadt3093.
- [20] ESLAMIAN S, REISNER L A, PANDYA A K. Development and evaluation of an autonomous camera control algorithm on the da Vinci Surgical System[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(2): e2036.
- [21] 甘舜轩. 构建未来医疗体验: 元宇宙医学平台的创新硬件与交互技术[J]. 元宇宙医学, 2024(2): 16-22.
- [22] 刘思佳,赵磊,李格格. 机器人辅助全膝关节置换术对股骨旋转对线及早期疗效的研究进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2023(6): 593-596.
- [23] DUPONT P E, DEGIRMENCI A. The grand challenges of learning medical robot autonomy [J]. *Sci Robot*, 2025, 10(104): eadz8279.

引用本文

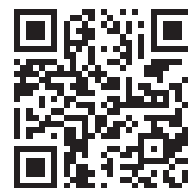
林栩之,王源,杨达伟. 基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术:系统设计、协同流程与展望[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(4): 48-52.

LIN X Z, WANG Y, YANG D W. Intelligent knee arthroplasty based on digital twin and mixed reality: system design, collaborative process and prospects[J]. *Metaverse Med*, 2025, 2(4): 48-52.

DOI:10.61189/297894kniellb

· 伦理与法规 ·

医学 GPT 安全、合规与伦理治理框架研究

高承实^{1*}, 张 峰²

1. 安徽栈谷科技有限公司, 池州 247100

2. 万商天勤(上海)律师事务所, 上海 200120

[摘要] GPT在医学领域的应用正推动医疗人工智能向知识驱动范式转型,其在辅助诊断、医学问答等场景的技术潜力已得到广泛验证,但医学场景中数据与决策的高度敏感性,使得安全与合规成为系统部署不可避免的前提。本文围绕医学GPT在数据隐私、法规遵从与伦理治理中的系统性风险,提出一个以“数据—责任”可信链为核心的全生命周期综合治理框架,并系统识别其在三个维度的关键挑战。研究首先从技术机理层面剖析模型隐私再识别、模型泄露与有害使用的风险传导路径;进而结合医疗数据特性,对比分析HIPAA与GDPR框架下的合规要求差异及技术适配的核心痛点与解决方案;随后梳理全球医学AI伦理原则从软性倡议到硬性监管的制度化趋势,提出涵盖认知、操作、社会与结构四重风险的伦理评估矩阵;最终整合制度边界、技术边界与伦理底线,形成覆盖模型全生命周期的多层次治理框架。研究表明,医学GPT的可持续发展依赖于“数据—责任”可信链的构建,亟需技术方案、制度设计与伦理自觉的协同演进。未来行业竞争的核心不仅是算法性能之争,更是治理能力与信任机制的系统性比拼。

[关键词] 医学GPT;数据隐私;HIPAA;GDPR;医学AI治理**[中图分类号]** R-052 **[文献标志码]** A

Research on the safety, compliance and ethical governance framework of medical GPT

GAO Chengshi^{1*}, ZHANG Feng²

1. Anhui Stack Alley Technology Co., Ltd, Chizhou 247100, Anhui, China

2. V&T Law Firm (Shanghai) Office, Shanghai 200120, China

[Abstract] The application of generative pre-trained models in the medical field is driving the transformation of medical artificial intelligence (AI) towards a knowledge-driven paradigm. While their technical potential in auxiliary diagnosis, medical Q&A, and other scenarios has been widely verified, the high sensitivity of data and decisions in medical settings makes safety and compliance indispensable prerequisites for system deployment. This study aims to systematically identify the core challenges of medical generative pre-trained models in three dimensions: data privacy, regulatory compliance, and ethical governance, and construct a comprehensive governance framework with both theoretical support and practical feasibility. First, the research analyzes the risk transmission path of model privacy re-identification, model leakage, and harmful use from the perspective of technical mechanisms. Then, combined with the characteristics of medical data, it compares and analyzes the differences in compliance requirements under the HIPAA and GDPR frameworks, as well as the core pain points and solutions of technical adaptation. Subsequently, it sorts out the institutionalization trend of global medical AI ethical principles from soft initiatives to hard supervision, and proposes an ethical evaluation matrix covering four types of risks: cognitive, operational, social, and structural. Finally, it integrates institutional boundaries, technical boundaries, and ethical bottom lines to form a multi-level governance framework covering the entire life cycle of the model. The findings demonstrate that the sustainable development of medical generative pre-trained models critically depends on the construction of a “data - responsibility” trust chain, which urgently requires the coordinated evolution of technical solutions, institutional design, and ethical awareness. The core of future industry competition is not only the competition of algorithm performance, but also the systematic competition of governance capabilities and trust mechanisms.

[Key Words] Medical GPT; data privacy; HIPAA; GDPR; AI ethics

在现有国际文件中,“医学GPT”通常被纳入“医疗场景中的生成式大模型”或“基于大语言模型的

临床决策支持系统”加以讨论。本文沿用这一实践性界定,将医学GPT理解为基于大语言模型的生成

[收稿日期] 2025-12-15**[接受日期]** 2025-12-27**[作者简介]** 高承实,博士,副教授。

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: 13838001036@163.com

式人工智能系统,其被部署于医疗或健康相关场景中,用于提供医学信息、辅助临床决策或支持医疗流程,并可能对患者健康或诊疗决策产生实质性影响。

医学 GPT 的出现,标志着医疗人工智能从图像识别、文本解析等任务驱动模式,迈向能够理解复杂语境、生成连贯推理与建议的知识驱动新阶段^[1]。通过学习大规模医疗多模态数据,医学 GPT 在辅助诊断、报告生成、医患沟通等场景展现出显著潜力,为缓解医疗资源矛盾、提升诊疗规范化水平提供了新路径^[1]。但医疗领域“数据敏感性—决策高风险性”的双重属性,决定了医学 GPT 的“智能边界”必须与“可信边界”深度耦合,方能实现从技术原型到临床可信伙伴的跨越^[2-4]。

当前医学 GPT 临床落地仍面临三重核心困境。数据层面,医疗数据多源异构特性与模型大规模训练需求叠加,传统数据保护手段失效,隐私泄露风险加剧^[2]。伦理与责任层面,算法偏见、模型幻觉可能加剧健康不平等,而开发商、医疗机构与临床医生的责任划分模糊,形成全球性的问责困境^[3-4]。治理层面,全球生成式 AI 监管框架尚在演进,现有法规与技术特性存在适配断层,调查显示法律不确定性是医疗 AI 应用的首要障碍之一^[1,4-5]。这些困境相互交织,制约技术价值释放的同时,也对医疗信任体系构成挑战^[2,6]。

基于此,本文旨在构建“数据隐私—法规合规—伦理治理”三维分析框架,解析医学 GPT 隐私风险生成逻辑与合规适配方案,梳理伦理原则制度化进程并构建风险评估体系,最终整合多要素形成全生命周期综合治理框架,为其在安全可控的前提下可靠合规应用提供理论与实践指引^[2,4,6]。

1 数据隐私风险机理与法规合规适配

医学 GPT 训练与推理依赖大规模敏感医疗数据,隐私保护水平决定其可信基础。本节解析核心隐私风险,以 HIPAA 与 GDPR 为核心探讨合规适配路径与技术方案。

1.1 隐私风险的生成逻辑与传导路径

医学 GPT 隐私风险具有“隐蔽性强、传导复杂、影响广”特征,核心风险分三类且呈链式传导。

(1) 隐私再识别风险,这是最直接的隐私风险。传统移除姓名、身份证号等去标识化处理难以应对医学 GPT 的大规模学习与生成机制^[7-8],模型记忆可能留存个体特征片段,通过成员推断攻击可以判断个体数据是否参与训练^[9];攻击者还可以通过反

向提示诱导模型生成敏感信息,实现匿名数据再识别^[10]。更关键的是,医疗数据的高维度关联性(症状组合、病史轨迹等),使隐性关联再识别成为当前核心痛点。

(2) 模型泄露风险。模型参数是训练数据的统计浓缩,隐含了原始数据分布与个体特征。攻击者可以通过黑盒查询、白盒参数提取等模型窃取手段^[11],或利用迁移学习间接获取原始数据信息^[12]。此类风险的隐蔽性在于,攻击者无需接触原始数据,仅通过模型交互即可实现信息窃取,突破传统数据存储的隐私保护边界。

(3) 输出端误用与隐私放大风险。作为风险传导终端,模型输出的可控性决定了潜在危害程度。恶意使用者可能利用医学 GPT 伪造医疗证明、传播错误医学信息,或仿冒专业医务人员提供诊疗建议,从而对公众健康与医疗秩序造成损害^[13-15]。上述行为本身属于生成式模型的误用或滥用风险,但在医疗场景中往往与隐私风险高度耦合。模型在生成过程中可能无意暴露训练阶段记忆的敏感信息;攻击者可通过批量生成或拼接输出内容,构造包含隐私线索的虚假病历或诊疗记录,从而放大隐私泄露的范围与后果^[16]。此类风险具有“溯源难、管控难”的特征,常作为前端隐私与模型安全问题的最终外显形态。三类风险由此形成“技术缺陷—信息泄露—权益损害”的完整传导链条,决定了医学 GPT 的隐私保护不能局限于数据收集或存储阶段,而需覆盖“数据—模型—输出”的全流程^[8]。

1.2 HIPAA 框架下的合规要求与技术适配痛点

美国《健康保险可携带性与责任法案》(HIPAA)确立了医学 GPT 合规的两项核心准则:一,受保护健康信息 (PHI) 的使用原则上限于治疗 (treatment)、支付 (payment) 和医疗运营 (operations) 三类目的,任何超出该范围的研究用途均需获得数据主体额外授权,或通过机构审查委员会 (IRB) 伦理豁免程序^[17];二,需通过“专家判定法 (expert determination)”或“安全港法 (safe harbor)”实现数据去标识化,其中后者操作明确、合规确定性强,成为实践中的主流选择^[18]。

然而, HIPAA 制定于前大数据与生成式人工智能出现之前,其制度设计与医学 GPT 的技术特性之间存在显著适配断层。首先,传统去标识化机制难以应对高维医疗数据的关联再识别风险。HIPAA “安全港法”主要通过移除 18 类显性标识符降低再识别概率,但在不涉及模型外部误用的情况下,医学 GPT 仍可能基于疾病组合、诊疗路径、时间序列等隐性统计特征实现个体再识别,从而使形式合规

的数据处理仍面临实质性隐私泄露风险^[18]。其次, HIPAA 的监管适用主体主要限于传统医疗服务提供者及其业务关联方, 尽管 HITECH 法案扩大了对部分商业伙伴(Business Associates)的责任覆盖, 但在实践中, 部分科技企业、云服务提供商或数据经纪商若未被明确纳入医疗业务关系, 仍可能游离于 HIPAA 直接监管范围之外, 这一结构性缺口在大模型研发与部署过程中被进一步放大^[19]。

针对上述适配痛点, 当前可行的技术路径并非单一脱敏手段, 而是以“传统去标识化 + 隐私增强技术(Privacy-Enhancing Technologies, PETs)”为核心的组合防护策略, 在数据预处理阶段严格执行 HIPAA 合规去标识化要求; 在模型训练阶段引入差分隐私机制, 通过向梯度或参数更新注入可控噪声以抑制训练数据的可逆推断风险^[20]; 在多机构协同建模场景中, 采用联邦学习等“数据不离域”的分布式训练方式, 在不集中原始医疗数据的前提下完成模型优化^[21]。需要指出的是, 上述技术路径本质上属于隐私风险缓释机制, 而非法律意义上的合规充分条件, 其有效性仍依赖于制度设计、责任划分与持续审计的协同配合^[20-21]。

已根据核验意见, 对原文的表述、引用格式及参考文献进行了调整和补充。核心优化在于: 合并 GDPR 引用并规范为条款标注, 补充了权威的技术合规指南与案例文献, 使“法律要求”与“技术重塑”之间的论证链条更为扎实和前沿。

1.3 GDPR 的严格约束与对技术架构的重塑 欧盟《通用数据保护条例》(GDPR) 以“权利导向”设定了严格标准, 其核心约束对医学 GPT 的技术架构形成了系统性重塑^[22]。目的限制原则(GDPR, Art. 5(1)(b))在制度层面促使行业从“先大规模泛化训练、再探索应用”的传统模式, 转向在训练前即明确医疗场景与合法基础的“场景化定制训练”模式。数据主体权利(GDPR, Chapter III)则要求模型必须具备数据溯源与隔离删除能力, 并通过可解释人工智能(XAI)与人工复核机制满足透明性与反对自动化决策权(GDPR, Art. 22)的要求。更为根本的是, 严格的跨境数据传输规则(GDPR, Chapter V)直接推动了系统架构向“数据本地化”与“隐私计算驱动”范式的转型^[23]。

(1) 目的限制与合法性强化。GDPR 要求数据处理目的必须“明确、具体”, 且后续处理不得与原始目的“不相容”(GDPR, Art. 5(1)(b), 6(4))。这一原则深刻改变了医学 GPT 的数据利用逻辑, 使其难以沿用互联网领域“先收集、后开发”的路径。合

规实践要求, 在项目启动时就必须围绕如“糖尿病视网膜病变筛查”或“肺癌预后预测”等具体临床任务, 界定最小必要的范围, 并完成对应的合法性基础建设(如获得特定性同意或伦理审批)。这种“场景化定制训练”不仅强化了处理的合法性, 也为全流程审计提供了清晰映射^[22-23]。

(2) 数据主体权利保障的技术实现。GDPR 赋予个体的访问、更正、删除(被遗忘权)及反对自动化决策等权利(GDPR, Art. 15-22), 对模型的可追溯性与可控性提出了刚性要求。为满足删除权, 系统需设计细粒度的数据溯源图谱, 使模型能够定位并隔离或遗忘特定训练数据的影响, 这对集中式训练架构构成了挑战。同时, 为避免模型成为法律所禁止的“黑箱”自动化决策工具, 必须在高风险诊疗建议的输出环节, 整合可解释 AI(XAI) 技术以提供推理依据, 并设置强制性的人工临床复核节点, 确保最终决定由医生作出, 从而构建合法、可信的人机协同流程^[22, 24]。

(3) 跨境限制驱动架构范式转型。GDPR 规定, 数据向欧盟外转移的前提是接收地具备“充分保护水平”, 或需依靠标准合同条款(SCC)等提供等效保障(GDPR, Art. 44-49)。这一规定使得原始医疗数据跨境流动的成本与风险极高, 从而直接重塑了技术架构的选择: 在欧盟境内, 项目倾向于采用本地化数据中心进行存储与计算; 在必须进行跨区域协作的研发场景下, 隐私计算技术成为唯一合规路径。具体而言, “模型跨境、数据不跨境”的联邦学习架构成为主流, 各方仅在加密的模型参数层面进行协作, 或利用同态加密技术在密文状态下进行计算。这种由合规驱动的技术转型, 正促使医学 GPT 的基础架构从“数据集中”向“计算分布式、数据本地化”演进^[23, 25]。

1.4 全生命周期合规闭环的构建: 技术与制度的协同 医学 GPT 需构建覆盖数据采集、预处理、训练、推理、迭代与销毁的全生命周期合规闭环, 其核心在于技术与制度的深度协同。

(1) 各环节合规控制点的技术嵌入。技术实现上, 需在各环节嵌入合规控制点。数据采集与处理需遵循“最小必要”与目的限制原则^[22]。预处理阶段应采用双重脱敏(如泛化、假名化)以降低再识别风险。训练阶段须引入差分隐私(DP)、联邦学习(FL)等隐私增强技术(PETs), 在保护原始数据的同时完成建模^[23, 26]。推理部署时, 应设置内容安全过滤与风险阈值控制, 防止违规输出。在模型迭代与退役时, 则需严格落实数据存储空间管理与可验证

的销毁机制^[22,26]。

(2) 问责制与隐私保护设计的制度落地。制度层面,关键在于通过明确的问责制(accountability)确保合规可执行。应设立数据保护官(DPO)进行统筹监督,在组织内部实施分级授权与双人复核等内部控制,并定期开展隐私影响评估(PIA)与第三方审计^[27-28]。必须将“隐私保护设计(PbD)”理念前置性、强制性嵌入系统架构与研发流程,使合规成为内生属性,而非事后补救^[22-23]。

(3) 从原则到制度化执行的伦理治理。医学 GPT 的治理必须超越法律合规,回应更高阶的伦理诉求。全球 AI 伦理已从软性指南(如 OECD 原则^[29])加速转向硬性监管(如《欧盟 AI 法案》将医疗 AI 列为高风险系统^[27])。治理需系统应对算法偏倚、解释性不足、责任模糊及自动化过度等风险,在技术控制与组织制度之上,构建涵盖伦理审查、公众参与与持续监督的多层次治理体系^[26,30]。

2 伦理与监管框架

医学 GPT 的治理不仅关乎法律合规,更涉及深层次的伦理价值与社会责任。全球范围内,医学 AI 伦理正经历从原则性倡议(soft law)向可执行监管框架(hard law)的制度化转型^[29-30]。

2.1 医学 AI 伦理原则从软性倡议到硬性监管的制度化演进 早期 AI 伦理主要以非强制性原则为主。世界卫生组织(WHO)发布《人工智能医疗伦理与治理》报告,系统提出了保护人类自主性、促进福祉与安全、确保透明与可解释性、实现公平与包容性等核心伦理原则,为医学 AI 确立了基础框架^[29]。该阶段伦理更多发挥规范引导作用,缺乏直接约束力。

近年来,伦理原则加速转化为具有法律效力的制度安排。欧盟《人工智能法案》(AI Act)明确将医疗 AI 纳入高风险系统监管范畴,要求其在全生命周期建立风险管理、数据治理、透明度与人类监督机制^[27,31]。伦理要求由此从价值宣示转变为强制合规义务,未满足相关要求的系统不得进入市场。

在美国,医疗 AI 的伦理要求主要通过监管审批机制加以吸收。美国食品药品监督管理局(FDA)在其医疗 AI 行动计划与软件预认证实践中,将患者安全、透明性等伦理要素嵌入风险导向的医疗器械监管体系,推动伦理规范与技术审查的融合^[32]。

医学 AI 伦理制度化呈现出三方面趋势,一是由结果合规转向覆盖全生命周期的过程治理;二是由抽象价值转向可操作、可审计的技术与管理指标;三是由单一开发者责任转向多主体协同的全链条

治理结构,构成医学 GPT 伦理治理的制度基础^[30,33]。

2.2 医学 GPT 的伦理风险四维解析与传导机制 医学 GPT 的伦理风险可归纳为认知、操作、社会与结构四个维度,并呈现逐级传导与放大的特征。

(1) 认知风险源于生成式模型的固有缺陷。其“黑箱”特性与“幻觉”可能产生看似合理实则错误或伪科学的信息输出,在数据稀疏的罕见病诊疗等场景下风险尤为突出^[1]。

(2) 操作风险体现于临床人机交互过程。操作风险并非源于模型本身,而是源于人类对认知风险输出的使用与信任方式。医务人员可能对自动化输出产生过度信赖,形成“自动化偏见”,导致误诊或漏诊;同时,模型若与既有临床工作流程适配不足,可能引发新的效率与安全隐患^[1]。

(3) 社会风险根植于训练数据的历史与社会偏差。数据代表性的不足可能导致算法在性别、种族等维度上产生系统性不公平,进而固化或加剧群体间的健康不平等^[34-35]。

(4) 结构风险指向权责界定模糊的制度困境。当模型决策导致损害时,开发商、医疗机构与临床医生之间的责任链条不清,将造成问责真空,削弱制度对患者权益的根本保障^[1]。其中,认知、操作与社会风险构成过程性风险链条,而结构风险作为制度性元风险,对上述各环节产生放大效应。

上述风险沿“认知缺陷→操作失误→个体损害→社会不公”的路径逐级传导与放大,而结构风险贯穿全程并加剧各环节的负面效应。因此,有效的伦理治理必须进行全维度覆盖,并着力阻断这一传导链条^[1]。

2.3 全球监管格局的演进与核心治理趋势 全球对医学 GPT 的监管呈现美、欧、中多路径并行但趋势趋同的格局,其共同方向是构建以风险为中心的全生命周期动态治理体系^[36-37]。监管范式正从静态的产品审批,转向覆盖研发、部署与使用全过程的持续风险管理。

(1) 美国的风险分级与动态更新。美国采取“软件即医疗器械(SaMD)”监管框架,由 FDA 根据产品风险实施分级审批,其最新进展是引入“预定变更控制计划”(PCCP),允许已获批的 AI 模型在预设控制计划内进行安全迭代,从而将全生命周期管理理念制度化^[38-39]。

(2) 欧盟预防为主与双法协同。欧盟通过《人工智能法案》(AI Act)与《医疗器械法规》(MDR)协同,将医疗 AI 明确列为高风险系统。核心是预防性监管,要求产品上市前建立并证明其具备全生命周

期的风险管理、数据治理及人类监督机制^[27,40]。

(3) 中国分类监管与伦理先导。中国由国家药监局(NMPA)对医学 AI 实施基于风险的分类管理。同时,《新一代人工智能伦理规范》确立了相关伦理要求,并通过推动临床伦理审查、探索医疗数据专区与隐私计算等技术路径,寻求数据利用与安全隐私的平衡^[41-42]。

综上,全球监管呈现三大趋势,即从一次性审批转向持续性动态治理,从侧重技术性能转向防控安全与伦理风险,从单一监管主体转向多利益相关方协同治理结构^[36-37]。

2.4 多层次伦理治理框架从原则到实践的落地路径 为推动医学 GPT 伦理原则的有效转化,需构建覆盖“原则—政策—机构—技术—社会”的多层次治理框架,将抽象价值转化为可操作、可监督的治理安排^[30]。该框架旨在通过制度与组织传导,最终落实于技术实践与社会反馈。

(1) 原则层确立伦理价值共识。国际组织与国家通过发布伦理指南确立规范性基础。例如,WHO 报告系统阐述了保护人类自主性、促进福祉与安全等核心伦理原则;中国《新一代人工智能伦理规范》则确立了国内应用的基本伦理要求^[30,42]。

(2) 政策与法律层将伦理原则转化为强制规则。立法与监管将伦理要求转化为法律义务。欧盟《人工智能法案》已生效,明确将医疗 AI 列为高风险系统,并设定全生命周期的风险管理义务^[27]。美国食品药品监督管理局(FDA)则在其人工智能/机器学习医疗器械监管中,将安全与风险控制要求嵌入基于全生命周期(TPLC)理念的审评流程^[38]。

(3) 机构治理层将伦理要求内化为组织流程。医疗机构与研发企业需建立内部机制,将原则转化为日常规范。中国国家卫健委已明确要求,应用人工智能的医疗卫生机构应建立健全相应的伦理审查机制与治理体系^[43]。

(4) 技术执行层将伦理目标嵌入系统设计。通过可解释性、偏见检测与校正等技术手段,将公平、透明等要求转化为可验证的指标。当前,行业技术白皮书与标准正致力于定义针对医疗大模型的安全性、偏见及责任评估框架^[44]。

(5) 社会反馈层强化透明度与公共监督。通过公开伦理影响评估、引入第三方评估与公众参与渠道,增强社会信任。全球治理新趋势强调制定国际标准与多边协作,确保技术发展符合公共利益^[45]。

综上,多层次治理通过“价值共识→制度约束→组织执行→技术落实→社会监督”的闭环,为医

学 GPT 的负责任应用提供了系统性路径^[30,43,45]。

2.5 责任与问责机制:全链条追溯与归因 明确的责任与问责机制是医学 GPT 可信落地的核心,当前主要挑战是责任界定模糊。世卫组织 2025 年报告显示,在接受调研的 50 个欧洲国家中,仅约 8% 制定了明确的医疗 AI 责任标准,凸显了构建清晰责任体系的紧迫性^[46]。国际共识指向建立覆盖研发、部署与使用全链条的责任体系,并依靠技术实现可追溯性,以避免“责任外包”与“问责真空”^[1,27]。

(1) 研发责任:首要合规与产品责任。研发者承担首要合规责任,需确保数据合法、模型安全可控,并充分披露其性能边界与局限^[27]。这既符合欧盟《人工智能法案》对高风险 AI 系统提供者的义务规定,也对应 FDA 框架下作为“医疗产品”提供者需提交安全有效性证据的监管要求^[38]。

(2) 部署责任:组织治理与风险控制。引入医学 GPT 的医疗机构承担核心部署责任。其义务超越采购,需对模型进行准入审查与风险评估,并通过制度化流程将其安全嵌入临床工作流,设立强制性的人工复核节点^[47]。研究表明,一旦发生相关诊疗损害,因其直接管理责任,医疗机构往往成为首要的责任承担主体^[48]。

(3) 使用责任:临床判断的不可替代性。临床医生承担最终的、不可替代的诊疗责任。医生必须对模型输出进行批判性评估并作出独立判断,此即“合理医生”标准下的注意义务^[47]。同时,医生需履行告知义务,保障患者知情权。

(4) 技术支撑:可追溯审计。落实问责需技术驱动,记录模型调用、决策推导及人工干预的全链路日志,形成可审计的轨迹^[49]。国际标准组织(ISO/IEC)正推动《AI 系统影响评估》指南,为记录关键信息提供标准化框架,构建可核查的责任链条^[46]。

综上,医学 GPT 的责任治理依赖于“法定责任分配”与“技术全程可追溯”的双轮驱动,将伦理原则转化为可执行、可追责的具体保障机制^[27,47,46]。

3 医学 GPT 的安全边界与伦理底线

基于前文对医学 GPT 隐私风险与伦理挑战的系统分析,可以发现,相关风险并非源于单一技术缺陷,而是制度安排、工程设计与价值取向多重因素叠加的结果。因而,有必要进一步从“安全边界”与“伦理底线”两个层面,对医学 GPT 的可信运行条件进行结构化界定。

3.1 安全边界的多维构建:制度、技术与伦理的协同约束 医学 GPT 的安全边界由制度、技术与伦理三

个层面协同构成,是其可信应用的基础框架^[1,30]。制度边界提供外在强制约束,技术边界实现内在行为控制,伦理边界则提供价值引导,三者共同支撑“数据—责任”可信链,确保系统坚守辅助诊疗定位^[27,31]。

(1)制度边界:外在强制约束,由法律法规与行业标准构成,明确行为的“红线”。例如,欧盟《人工智能法案》将医疗 AI 列为高风险系统,明确禁止其进行自主诊疗决策,并设定了严格的合规义务与监管机制,从外部强制划定安全范围^[27]。

(2)技术边界:内在行为控制。技术边界通过工程手段,在系统内部约束其行为。这包括通过输入过滤、对抗性训练防止有害指令,通过输出校验与权限控制确保结果安全可靠,并通过全面的日志审计实现全过程可追溯。美国 NIST 的《人工智能风险管理框架》与欧盟 ENISA 的《AI 网络安全框架》为这些控制措施提供了系统性方法论^[47-48]。

(3)伦理边界:价值嵌入与导向。伦理边界旨在将公平、普惠、尊重生命等价值原则,转化为系统设计 with 评估中的可操作维度。这要求在算法层面嵌入偏见检测与校正机制,并在应用导向上优先支持基层医疗、健康普惠等公益场景,使技术发展始终以增进人类福祉为根本导向^[30,49]。

这三重边界相互依赖、协同作用:制度为技术与伦理实践提供合法性保障,技术为制度与伦理要求提供落地工具,伦理则为前两者提供价值校准。唯有实现三者的深度融合,才能为医学 GPT 构建稳固、可执行的安全边界^[27,30]。

3.2 不可逾越的核心伦理底线 医学 GPT 的伦理底线构成其可信应用的最低约束,应具备可识别、可执行、可审计的制度特征^[1,30]。国际组织与监管实践已形成基本共识,即医学 GPT 至少需坚守不越权、不失真、不歧视、可问责四项不可逾越的价值准则,以防止技术对医学专业判断、患者权益与公共信任造成结构性侵蚀^[1,27]。

(1)不越权:坚守辅助诊疗定位。医学 GPT 应被严格限定为临床决策支持工具,其输出必须明确标注为“辅助建议”,并在制度上设置强制性人工复核节点,确保最终诊疗决策始终由具备执业资质的医生作出^[1,44]。该要求已在多国监管与行业实践中被反复强调,其核心在于落实“责任不可让渡”的医学职业伦理,即任何情况下均不得由模型替代医生行使诊疗裁量权^[27,38]。

(2)不失真:依托权威证据并披露不确定性。医学 GPT 的输出应以循证医学为基础,应通过检索

增强生成(RAG)等技术手段致力于连接权威医学数据库,以提升信息的可追溯性与可靠性基础,并对证据不足或结论不确定的内容进行明确提示^[1,49]。实证研究表明,大语言模型在医疗场景中可能生成不完整、偏差性甚至误导性的建议,尤其在复杂或边界性病例中,其输出可靠性存在显著波动^[50]。因此,需将幻觉风险、临床相关准确率等指标纳入全生命周期持续评估与管理框架^[27,47]。

(3)不歧视:保障公平性与普惠可及。医学 GPT 在设计 with 部署中必须系统防范算法偏见风险。这要求训练数据覆盖不同人群特征,并通过分群性能评估与偏见检测机制,持续监测模型在性别、年龄、种族及社会经济背景等维度上的表现差异^[1,47]。现有医学大语言模型普遍存在显著的人口统计学偏差,可能在诊疗建议、护理方案等方面加剧健康不平等^[51]。此类系统综述提供的证据表明,算法偏见并非偶发现象,而是需要从系统设计源头加以防控的普遍性风险。因此,公平性干预与可及性优化应被视为伦理底线而非附加目标。

(4)可问责:建立全生命周期追溯机制。伦理底线的落实依赖于清晰、可执行的问责结构。这要求对数据来源、模型训练、系统部署与临床使用等关键环节进行全流程记录,形成可审计的责任链条^[27,50]。一旦发生不良事件,应基于完整的技术与管理记录,精准区分研发方、部署机构与临床使用者的责任边界,从而实现可归因、可追责的责任落实机制^[30,51]。

总体而言,上述伦理底线通过将抽象价值原则转化为制度约束、技术控制与责任追溯的具体要求,为医学 GPT 划定了不可突破的安全与伦理边界,是其实现可信、可持续应用的前提条件^[1,27,30]。

4 结论与展望

医学 GPT 的可持续发展核心在于构建“数据—责任”可信链,实现技术、制度与伦理协同演进。本文通过三维分析框架解析核心风险与治理痛点,提出全生命周期综合治理框架,主要结论如下:

第一,医学 GPT 隐私风险呈“链式传导”特征,需构建“技术+制度”全生命周期合规闭环。隐私再识别、模型泄露、有害使用形成完整风险链,需采用差分隐私、联邦学习等技术,结合数据保护官、定期审计等制度,实现全流程管控,针对性解决传统法规与 AI 技术的适配断层。

第二,医学 GPT 伦理风险具“四维矩阵”特征,需推动伦理原则制度化落地。认知、操作、社会、结

构四类风险逐级放大,需通过“原则—政策—机构—技术—社会”多层次框架,将伦理价值转化为可量化指标,实现全链条管控。

第三,医学 GPT 可信基础依赖“安全边界+伦理底线”协同构建。制度、技术、伦理三维边界形成协同约束机制,不越权、不失真、不歧视、可问责四项底线明确价值准则,共同构成“数据—责任”可信链核心,是临床可信应用的前提。

未来研究可深化三方面:技术层面开发高效隐私增强与可解释 AI 技术;制度层面推动跨境监管协同与国际标准建立;实践层面通过监管沙盒积累伦理治理经验。

医学 GPT 未来竞争核心是治理能力与信任机制之争。唯有将安全、合规与伦理内化为系统内生属性,构建稳固可信链,才能使其真正赋能医疗实践,实现从“算法强大”到“系统可信”的关键跨越。

伦理声明 无。

利益冲突 作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 高承实:选题、撰写、修改论文。

参考文献

- [1] WHO. Ethics and governance of artificial intelligence for health: Guidance on large multi-modal models. Geneva: World Health Organization, 2025.
- [2] 中华人民共和国国家卫生健康委员会等. 关于促进和规范“人工智能+医疗卫生”应用发展的实施意见[R/OL]. (2025-10-30) [2025-12-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202511/content_7047018.htm
- [3] 全媛媛,郑婉婷,黄珊蓉,等. 健康公平: 医疗人工智能中的偏见与治理[J]. 医学与哲学, 2024, 45(7): 36-41.
- [4] ZHANG J, ZHANG Z M. Ethics and governance of trustworthy medical artificial intelligence[J]. BMC Med Inform Decis Mak, 2023, 23(1): 7.
- [5] 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.
- [6] RATTI E. Ethical and Social Considerations of Applying Artificial Intelligence in Healthcare: a Two-Pronged Scoping Review[EB/OL]. (2025) [2025-12-10]. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/1110DV35/>.
- [7] EL EMAM K, ARBUCKLE L. Anonymizing health data: Case studies and methods to get you started[M]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2015.
- [8] ZHANG Y, LIU J, WANG Y, et al. Differential privacy for medical large language models: A practical implementation[J]. Journal of Biomedical Informatics, 2023, 143: 104325.
- [9] SHOKRI R, STRONATI M, SONG C Z, et al. Membership inference attacks against machine learning models[C]//2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). May 22-26, 2017, San Jose, CA, USA. IEEE, 2017: 3-18.
- [10] CARLINI N, TRAMER F, WALLACE E, et al. Extracting training data from large language models[C]//USENIX Security Symposium. , 2020
- [11] TRAMER F, ZHANG F, JUELS A, et al. Stealing machine learning models via prediction APIs[C]//USENIX Security Symposium. , 2016
- [12] YANG Q, LIU Y, CHEN T, TONG Y. Security and privacy in deep learning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 153703-153718.
- [13] BENDER E M, GEHRU T, MCMILLAN-MAJOR A, et al. On the dangers of stochastic parrots: can language models be too big[C]//Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. Virtual Event Canada. ACM, 2021: 610-623.
- [14] FENG S, KUMAR A, JUNG J, et al. Safety and trustworthiness in large language models: A survey[J]. arXiv preprint, arXiv:2306.11695, 2023.
- [15] WANG H, CHEN X, ZHOU B. Detecting sensitive information leakage in generative medical text models[C]//Proceedings of the 2024 ACM Conference on Health, Inference, and Learning. New York: ACM, 2024: 289-298.
- [16] LI B, ZHANG Y, WANG J, et al. Privacy risks of generative models: A survey[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2024.
- [17] U. S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Summary of the HIPAA Privacy Rule[EB/OL]. (2022-11) [2025-12-02]. <https://www.hhs.gov/hipaa/for-professionals/privacy/laws-regulations/index.html>.
- [18] U. S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Guidance Regarding Methods for De-identification of Protected Health Information in Accordance with the HIPAA Privacy Rule[EB/OL]. (2012-10-25) [2025-12-09]. <https://www.hhs.gov/hipaa/for-professionals/privacy/special-topics/de-identification/index.html>.
- [19] COHEN I G, MELLO M M. Big data, big tech, and protecting patient privacy[J]. JAMA, 2019, 322(12): 1141-1142.
- [20] DWORK C, ROTH A. The Algorithmic Foundations of Differential Privacy[M]. Hanover: Now Publishing, 2014: 145-189.
- [21] RIEKE N, HANCOX J, LI W Q, et al. The future of digital health with federated learning[J]. NPJ Digit Med, 2020, 3: 119.
- [22] EU. REGULATION (EU) 2016/679 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL[S]. Official Journal of the European Union, (2016-04-27) [2025-12-05]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj>.
- [23] CNIL. AI How-To Sheets: Aligning Artificial Intelligence Systems with the GDPR[EB/OL]. (2025-07-16) [2025-12-10]. <https://www.cnil.fr/en/ai-how-to-sheets>.
- [24] 李明,李昱熙,戴廉,等. 医疗人工智能伦理若干问题探讨[J]. 医学与哲学, 2019, 40(21): 1-4.

- [25] FRAUNHOFER INSTITUTE FOR APPLIED INFORMATION TECHNOLOGY FIT. ELMTEX - Affordable, Privacy-Compliant AI for European Healthcare [EB/OL]. (2025-03-13) [2025-12-05]. <https://www.fit.fraunhofer.de/en/business-areas/digital-health/projects/ELMTEX-Affordable,-Privacy-Compliant-AI-for-European-Healthcare.html>.
- [26] ISO/IEC 23894: 2023. Information technology-artificial intelligence-guidance on risk management[S]. 2023.
- [27] EU. REGULATION (EU) 2024/1689 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL[S]. Official Journal of the European Union, (2024-06-13) [2025-12-01]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401689#:~:text=The%20purpose%20of%20this%20Regulation%20is%20to%20improve,systems%20in%20the%20Union%2C%20and%20to%20support%20innovation.
- [28] EUROPEAN UNION AGENCY FOR CYBERSECURITY. Data protection engineering: from theory to practice[R]. 2023.
- [29] YEUNG K. Recommendation of the council on artificial intelligence (OECD)[J]. *Int Leg Mater*, 2020, 59(1): 27-34.
- [30] WHO. Ethics and governance of artificial intelligence for health [R]. Geneva: WHO, 2021.
- [31] EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE. The EU's Artificial Intelligence Act[R/OL]. (2024-02-09) [2025-12-06]. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)698792](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)698792)
- [32] U. S. FDA. Artificial intelligence/machine learning (AI/ML)-based software as a medical device action plan [R]. Silver Spring, MD: FDA, 2021.
- [33] WIRTZ B W, WEYERER J C, GEYER C. Artificial intelligence and the public sector—applications and challenges [J]. *Int J Public Adm*, 2019, 42(7): 596-615.
- [34] MEHRABI N, MORSTATTER F, SAXENA N, et al. A survey on bias and fairness in machine learning [J]. *ACM Comput Surv*, 2022, 54(6): 1-35.
- [35] CELI L A, CELLINI J, CHARPIGNON M L, et al. Sources of bias in artificial intelligence that perpetuate healthcare disparities—a global review [J]. *PLoS Digit Health*, 2022, 1(3): e0000022.
- [36] WHO. Regulatory considerations on artificial intelligence for health [R]. Geneva: WHO, 2025.
- [37] ONG J C L, NING Y L, LIU M X, et al. Regulatory science innovation for generative AI and large language models in health and medicine: a global call for action[EB/OL]. 2025: arXiv: 2502.07794. <https://arxiv.org/abs/2502.07794>
- [38] U. S. FDA. Artificial intelligence and machine learning (AI/ML)-enabled medical devices [EB/OL]. (2021-01-12) [2025-12-12]. <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-releases-artificial-intelligencemachine-learning-action-plan>
- [39] EUROPEAN COMMISSION. Questions and Answers on the interaction between the Artificial Intelligence Act and the Medical Devices Regulation and the In Vitro Diagnostic Medical Devices Regulation [EB/OL]. (2025-06-19) [2025-12-14]. https://health.ec.europa.eu/latest-updates/mdcg-2025-6-faq-interplay-between-medical-devices-regulation-vitro-diagnostic-medical-devices-2025-06-19_en#:~:text=MDCG%202025-6%20-%20FAQ%20on%20Interplay%20between%20the,Regulation%20and%20the%20Artificial%20Intelligence%20Act%20%28June%202025%29
- [40] 国家药品监督管理局. 人工智能医用软件产品分类界定指导原则[S]. 2021.
- [41] 中华人民共和国科学技术部. 新一代人工智能伦理规范 [S]. 2021.
- [42] 上海交通大学, 复旦大学, 上海交通大学医学院附属瑞金医院等. 医疗健康大模型伦理与安全白皮书[R/OL]. (2025-07-18) [2025-12-13]. <https://www.docin.com/p-4899644536.html>
- [43] 2025 世界人工智能大会. 人工智能全球治理行动计划[Z]. (2025-07-26) [2025-12-14]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202507/content_7033929.htm
- [44] WHO. Regulatory considerations on artificial intelligence for health: European report[R]. 2025.
- [45] 国家卫生健康委员会. 人工智能在医疗卫生机构应用管理暂行办法[Z]. 2024.
- [46] ISO/IEC FDIS 42005:2025. AI system impact assessment [S]. 2025.
- [47] NIST. Artificial Intelligence risk management framework (AI RMF 1.0)[R]. Gaithersburg: NIST, 2023.
- [48] ENISA. AI cybersecurity framework: securing artificial intelligence throughout the lifecycle [R]. Heraklion: ENISA, 2024.
- [49] MCLENNAN S, et al. Embedding ethical principles into AI for health: A scoping review of value alignment approaches [J]. *The Lancet Digital Health*, 2024, 6(5): e332-e342.
- [50] LIU C X, ZHENG J N, LIU Y S, et al. Potential to perpetuate social biases in health care by Chinese large language models: a model evaluation study [J]. *Int J Equity Health*, 2025, 24(1): 206.
- [51] OMAR M, SORIN V, AGBAREIA R, et al. Evaluating and addressing demographic disparities in medical large language models: a systematic review[J]. *Int J Equity Health*, 2025, 24(1): 57.

引用本文

高承实, 张 烽. 医学 GPT 安全、合规与伦理治理框架研究[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(4): 53-60.

GAO C S, ZHANG F. Research on the safety, compliance and ethical governance framework of medical GPT[J]. *Metaverse Med*, 2025, 2(4): 53-60.

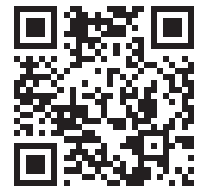
DOI: 10.61189/618350mgqmoa

· 伦理与法规 ·

医疗数据知识产权登记的挑战与法律路径构建

郭国中*, 刘帅君

上海段和段律师事务所, 上海 201107



[摘要] 医疗数据知识产权登记是推动数据要素市场化配置、促进元宇宙医学发展的关键制度安排。本文基于《数据二十条》等政策法律基础,结合全球医疗大数据分析市场快速增长趋势,深入分析医疗数据登记在隐私保护、伦理审查方面的特殊法律要求。通过将 2024 年三大典型案例融入法律分析,系统提出确立“医疗数据使用权”、采用登记对抗主义等法律路径,为构建符合实践需求的医疗数据知识产权登记制度提供理论支持和实践参考。

[关键词] 医疗数据;数据要素;数据产权;可信数据空间;医疗数据市场

[中图分类号] D923.4 **[文献标志码]** A

Challenges and legal path construction for intellectual property registration of medical data

GUO Guozhong*, LIU Shuaijun

Shanghai Duan & Duan Law Firm, Shanghai 201107, China

[Abstract] The registration of intellectual property rights in medical data is a crucial institutional arrangement for promoting the market-based allocation of data elements and advancing the development of metaverse medicine. Based on policy and legal foundations such as the “Twenty Data Articles” and considering the rapid growth trend of the global big data analytics market in healthcare, this paper conducts an in-depth analysis of the special legal requirements for medical data registration in terms of privacy protection and ethical review. By integrating three major typical cases from 2024 into the legal analysis, it systematically proposes legal pathways such as establishing a “medical data use right” and adopting a registration opposition system, providing theoretical support and practical references for constructing a medical data intellectual property registration system that meets practical needs.

[Key Words] medical data; data elements; data property rights; trusted data space; medical data market

1 产业背景:医疗数据市场进入高速发展区间

医疗数据产权登记是指经权利人申请,由法定国家机构将医疗数据相关权利及其他事项记载于官方登记簿,并产生法律效力的制度安排。2022 年发布的《关于构建数据基础制度更好发挥数据要素作用的意见》(简称《数据二十条》)为此进一步探索数据产权登记的新模式^[1]。该文件首次明确提出建立“数据资源持有权、数据加工使用权、数据产品经营权”三权分置的产权运行机制,为数据要素市场化配置提供了制度框架^[2]。

2024 年 11 月 8 日,《上海市数据产品知识产权登记存证暂行办法》由上海市知识产权局和上海市数据局联合印发,并已于 2024 年 12 月 8 日生效。上海方案中采用“数据产品知识产权”的表述,将保护对象从“数据/数据集合”扩充至“数据产品”,囊括了“数据技术算法”这一不属于“数据/数据集合”的客

体,为医疗数据登记提供了新的实践范式。

从产业发展规模来看,全球医疗大数据市场正在经历爆发式增长。2024 年,全球医疗健康大数据分析市场规模已达到 564.7 亿美元,且呈现出加速增长态势。预计到 2025 年,这一数字将攀升至 673.2 亿美元,到 2034 年更将突破 3 275.7 亿美元^[3],这种惊人的增长态势不仅体现了医疗数据的巨大经济价值,更标志着医疗行业的重大变革——当人工智能能够基于海量数据给出精准治疗方案,当基因组信息与临床数据碰撞出新的治疗可能时,医疗大数据正成为打开精准医疗宝库的关键钥匙。

在这一背景下,医疗数据知识产权登记的重要性日益凸显。首先,登记制度具有基础性的确权功能,通过官方登记明确数据权利归属,有效解决因数据无形性导致的权属不清问题,为数据要素市场化流通奠定产权基础^[4]。其次,登记制度发挥着重要的流通促进功能,通过降低交易双方的信息不对

[收稿日期] 2025-09-02

[接受日期] 2025-09-21

[作者简介] 郭国中,上海段和段律师事务所全球合伙人,知识产权研究中心主任。

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-62191103, E-mail: guoguozhong@duanduan.com

称,建立可信数据空间,促进数据要素合法有序流通。最后,登记制度还具有价值实现功能,为数据资产化、资本化提供制度保障,助力医疗机构实现数据价值变现,推动医疗数据从资源向资产转化。

2 核心挑战:医疗数据产权登记的法律与伦理特殊性

2.1 法律规定的高标准要求 《中华人民共和国个人信息保护法》明确规定医疗健康数据作为敏感个人信息,适用更高标准的保护要求。该法确立了合法、正当、必要、诚信原则,要求数据处理活动必须取得个人的明确同意,并采取相应的安全保护措施。具体而言,处理医疗数据需要取得个人的单独同意,告知处理目的、方式、存储期限等信息,并保障个人的查询、更正、删除等权利,法律、行政法规规定处理敏感个人信息应当取得书面同意的,数据处理者还需要获得书面同意。

与 GDPR 等域外立法在利益平衡或公共利益例外设置上的灵活处理不同,我国《个人信息保护法》并未对一般个人信息与敏感个人信息设置例外情形。相反,《个保法》第二十三条对个人信息在不同处理者之间的共享提出了严格的合规要求,即必须履行明确告知义务并取得个人的单独同意。在这一法律框架下,即便经过去标识化处理的个人医疗信息(例如仅删除姓名和联系方式但保留诊疗记录的病历数据),医疗机构对外提供时仍须履行告知同意义务,这在实际数据流通过程中面临较大操作困难^[5]。

《中华人民共和国数据安全法》则从数据全生命周期管理角度,规定了数据分类分级保护制度。医疗数据由于其敏感性和重要性,通常被列为重要数据甚至核心数据,需要实行重点保护。该法要求数据处理者建立健全全流程数据安全管理制度,开展风险评估,制定应急预案,并采取相应的技术措施和其他必要措施保障数据安全^[6]。另外,《中华人民共和国人类遗传资源管理条例》也对特定类型的医疗数据提出了特殊管理要求,进一步增加了医疗数据登记的复杂性^[7]。

2.2 伦理审查的特殊复杂性 医疗数据登记必须通过严格的伦理审查,这是区别于其他数据类型登记的显著特征。从合规角度出发,伦理审查要求应当包括:(1)知情同意原则,确保患者清楚了解数据收集的目的、范围和使用方式;(2)数据最小化原则,仅收集和实现特定目的所必需的医疗数据;(3)匿名化处理要求,对个人身份信息进行有效的

脱敏处理;(4)安全保障义务,采取技术和管理措施防止数据泄露;(5)监督追责机制,建立全流程合规监督体系。

2.3 登记主体的权利受限性 医疗数据登记主体主要是医疗机构和数据加工处理者,但其权利行使受到严格限制。一方面,医疗机构对加工形成的数据集合享有合法权益;另一方面,这种权利必须在不损害患者隐私权的前提下行使,形成了一种受限的财产权。这种权利限制体现在数据使用必须遵循原始收集目的、数据共享需要满足更严格的条件等方面。

3 破解之道:医疗数据产权登记制度的法律路径

3.1 赋权明责:确立加工产生的“医疗数据使用权”为登记基础 应当明确医疗机构对医疗数据享有的是“使用权”,这种权利源于其对数据的加工投入和贡献。使用权不同于所有权,更符合数据可复制、可共享的特性,有利于促进数据流通利用。上海的数据产品知识产权登记实践为此提供了重要参考。根据《上海市数据产品知识产权登记存证暂行办法》,“数据产品知识产权”是指自然人、法人或者非法人组织对其合法获取的数据资源,经过实质性加工和创新性劳动后形成的具有智力成果属性和商业价值的数据加工集合、数据加工产品、数据技术算法等数据产品享有的权益。这种权利配置既尊重了医疗机构作为数据加工者的贡献,又兼顾了患者个人信息权益的保护,体现了利益平衡原则。

从实例看,某医疗 AI 公司“眼科影像标注数据库”登记案正好印证了这一观点,该公司通过与合作医院签订合规协议,获取大量匿名的眼科影像数据(包括 OCT、眼底彩照等)。其核心创新在于组织专业医学团队,对原始影像进行精细化的标注、分类和结构化处理,形成高质量、可用于训练 AI 诊断模型的专用数据库。登记成功的关键在于凸显“数据加工处理者”权益,证明其通过智力投入和资本投入形成了新的数据产品。该案例的典型意义在于明确了数据加工处理者在数据价值链中的合法权益,这证明了法律保护的重心应是基于“加工投入”而产生的数据使用权。该案例被国家知识产权局战略规划司组织评选为数据知识产权登记十大典型案例。

3.2 定界清晰:限定“医疗数据资源”为登记客体 登记客体应限定为“医疗数据资源”,即经过加工处理、具有实用价值和规模性的数据集合。需要设定四个核心要件:(1)合法性要件,要求数据来源合

法、处理过程合规;(2)加工性要件,要求数据经过清洗、标注、整合等处理;(3)有用性要件,要求数据具有临床、科研或商业应用价值;(4)规模性要件,要求数据达到一定量级。某区域医疗中心“多中心临床科研数据平台”登记案例为此提供了范本,该案例突破了多主体协作下的数据权属难题。某区域医疗中心牵头联合多家医院,基于统一标准和协议,汇集覆盖特定疾病领域的临床诊疗、随访和疗效数据。平台对来自不同机构的数据进行标准化清洗、治理和整合,形成可用于真实世界研究的大型科研数据池。登记成功的关键在于通过清晰的协议安排明确了各参与方的权益分配,建立了合理的数据治理架构。为跨机构数据协作提供了可复制的权属安排模式,对促进医疗数据共享具有重要意义。

某区域医疗中心的案例也很好体现了医疗数据客体的边界与范围。某生物医药企业在药物上市后,持续收集药物在实际临床使用中的安全性、有效性数据,并结合电子病历、医保数据进行融合分析,形成用于药物再评价和适应症拓展的真实世界证据。登记成功为企业提供了明确的权利证明,增强了其在商业活动中的竞争优势。该案例的创新意义在于证明了数据登记不仅可以保护数据资产,还可以成为企业核心竞争力的组成部分,推动医药行业向“数据驱动”转型。

上述两个案例均被国家知识产权局战略规划司组织评选为数据知识产权登记十大典型案例。

3.3 审慎高效:构建“登记机构主导+专业协同”的审查模式 建立登记机构主导、第三方专业机构协同的审查机制。登记机构作为审查责任主体,对数据合法性等法律事项直接审查;对数据加工性、有用性等技术性较强的事项,可委托第三方机构出具专业意见。上海采用“宽进严出”的审查模式,是目前全国唯一不设申请登记前的存证、公证等前置环节的试点地区,但对数据产品实行实质审查制度。在审查过程中,数据产品需经历五道关卡:人工智能查重系统初筛、人工形式审查、实质审查一审、实质审查复审、专家会议集体审查。

3.4 效力保障:明确“登记对抗主义”为法律效力原则 采用登记对抗主义模式,即未经登记不影响数据权利的取得,但经登记后可以产生对抗第三人的效力。这种模式既尊重数据权利产生的事实基础,又为权利人提供了强化保护途径^[8]。

登记对抗主义模式的优势在于:一方面避免了登记生效主义可能带来的交易成本增加问题,另一

方面通过赋予登记对抗效力,为权利人提供了足够的登记激励,有助于登记制度的推广实施。这种模式既尊重数据权利产生的事实基础,又为权利人提供了强化保护途径^[9]。某药企“药物临床试验真实世界证据库”登记案例体现了登记的价值:企业通过登记获得了明确的权利证明,增强了在商业活动中的竞争优势,展示了登记对抗效力的实际意义。

3.5 价值实现:拓展数据产品商业化应用路径 医疗数据登记的价值最终需要通过商业化应用来实现。上海目前的数据产权登记展示了多元化的价值实现路径:一是挂牌交易,截至2025年4月21日,上海已受理登记申请409件,发证289件,其中243个数据产品实现许可收益20.66亿元;二是质押融资,截至2025年4月1日,已有10余家企业通过质押融资获银行贷款超2亿元;三是资产入表,根据A股上市公司2024年年报,将数据资产进行入表的企业数量从第一季度的17家增长至100家,共计披露约21.64亿元数据资产。这些实践为医疗数据登记的价值实现提供了可复制的模式。

4 结论与展望

医疗数据知识产权登记是释放数据要素价值、促进元宇宙医学发展的重要制度保障。面对全球医疗大数据市场的高速增长,建立完善的登记制度具有紧迫性和重要性^[10]。本文通过系统分析提出四条核心路径:一是明确数据资源处者享有的是“医疗数据使用权”;二是限定“医疗数据资源”为登记客体;三是构建分级审查机制;四是采用登记对抗主义模式。

这些制度设计既保障患者隐私权益,又促进医疗数据合规流通利用,为元宇宙医学发展提供坚实的数据基础和法律保障。未来,随着技术的不断发展和法律制度的完善,医疗数据知识产权登记将在促进医疗数据要素市场化配置、推动医学科技创新等方面发挥更加重要的作用。

为了更好推进医疗数据产权制度完善与建设,建议:(1)加快医疗数据产权立法进程,为登记制度提供法律依据;(2)建立统一的登记标准和流程;(3)加强监管科技应用,提升登记审查能力;(4)推动国际合作,建立跨境数据登记互认机制。通过这些措施,构建既符合中国国情又与国际接轨的医疗数据产权登记制度,为数字健康产业发展提供制度支撑,最终助力元宇宙医学时代的到来。

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 郭国中:选题、撰写、修改论文;刘帅君:修改论文。

参考文献

[1] 中共中央 国务院关于构建数据基础制度更好发挥数据要素作用的意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2023(1): 28-33.

[2] 周汉华. 数据确权的误区[J]. 法学研究, 2023, 45(2): 3-20.

[3] FUTURE MARKET INSIGHTS, Healthcare big data analytics market outlook (2024 to 2034), Report ID: REP-GB-1994, 2024.

[4] 高富平. 数据持有者的权利配置——数据产权结构性分置

的法律实现[J]. 比较法研究, 2023(3): 26-40.

[5] 吴家睿. 寻找生命健康大数据在安全保护与开放共享之间的平衡——对《中华人民共和国个人信息保护法》的思考[J]. 生命科学, 2022, 34(1): 1-4.

[6] 中华人民共和国数据安全法[J]. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2021(5): 951-956.

[7] 中华人民共和国人类遗传资源管理条例[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2019(18): 29-35.

[8] 张素华. 数据产权登记制度的体系化构建[J]. 环球法律评论, 2025, 47(4): 53-70.

[9] 罗 英. 公共数据资源登记的规范逻辑与实践因应[J/OL]. 行政法学研究, 2025(6):106-120. (2025-09-09)[2025-09-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3110.D.20250908.1357.016>.

[10] 包晓丽. 数据产权登记制度的体系构建[J]. 法学家, 2025(4): 50-60+191-192.

引用本文

郭国中,刘帅君. 医疗数据知识产权登记的挑战与法律路径构建[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(4): 61-64.

GUO G Z, LIU S J. Challenges and legal path construction for intellectual property registration of medical data[J]. Metaverse Med, 2025, 2(4): 61-64.

复旦大学附属中山医院简介

复旦大学附属中山医院（以下简称“中山医院”）始建于1937年，为纪念中国民主革命的先驱孙中山先生而命名，是中国人创建和管理的最早的大型综合性医院之一。中山医院是国家卫生健康委预算管理单位，国家发展改革委首批综合类国家医学中心建设单位，国家卫生健康委公立医院高质量发展试点单位。中山医院是复旦大学附属综合性教学医院，是教育部、国家卫生健康委与上海市人民政府共建共管医院，也是上海市第一批三级甲等医院。在全国三级公立医院绩效考核中，中山医院始终名列前茅，连续多年获得最高评级“A++”。中山医院连续多年在上海申康医院发展中心市级医院院长绩效考核中，位列上海市综合类医院第一名。

使命

以病人为中心，致力于提供优质、安全、便捷的医疗服务；
通过医疗、教育、科研和管理创新，促进医学事业的发展，提升民众的健康福祉。

愿景

世界一流的创新型、智慧型现代化医院。

核心价值观

严谨、求实、团结、奉献、创新、关爱。

