

人工智能赋能医学免疫学：从前沿研究到教育创新

马兴铭 

西华大学大健康管理学院，四川 成都

收稿日期：2025年9月22日；录用日期：2026年1月1日；发布日期：2026年1月12日

摘要

人工智能技术已成为科技与产业变革的关键驱动力，正在迅速赋能医疗健康服务和医学教育。本文总结了人工智能在医学免疫学从前沿研究到教育创新的赋能作用。人工智能已经革命性地改变了多个免疫生物医学领域，在疾病标志物鉴别与诊断、个性化治疗策略制定、药物筛选与研发、候选疫苗开发等免疫学领域取得显著进展，并将研究成果的内容转化为医学免疫学教学资源。人工智能通过构建沉浸式虚拟学习环境、提供个性化自适应学习路径、实施智能评估与实时反馈等方式，改变了传统医学免疫学的教学模式，显著提升了学生的学习兴趣和参与度，更拓展了其学术视野，培养了创新思维和学术研究能力。然而，人工智能赋能医学免疫学教育教学面临学科与人工智能融合不足、技术难题待解、实施成本高昂、数据安全与隐私保护、算法偏见、AI幻觉等诸多挑战，未来通过突破关键技术、完善数据治理体系等措施，推动人工智能赋能医学免疫学的研究与教育创新。

关键词

人工智能，医学免疫学，医学教育，教育创新，科学研究

Artificial Intelligence Empowering Medical Immunology: From Cutting-Edge Research to Educational Innovation

Xingming Ma

School of Health Management, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: September 22, 2025; accepted: January 1, 2026; published: January 12, 2026

Abstract

Artificial intelligence (AI) technology is a key driver of technological and industrial transformation, rapidly empowering healthcare services and medical education. This article summarized the empowering role of AI in medical immunology, which spanned from cutting-edge research to educational innovation. AI had revolutionized multiple areas of immune-biomedicine, which achieved a significant progress in immunology areas such as disease biomarker identification and diagnosis, personalized treatment strategy development, drug screening and development, and candidate vaccine development. Research findings were being transformed into educational resources for medical immunology. AI has changed traditional teaching models of medical immunology by constructing immersive virtual learning environments, providing personalized adaptive learning paths, and implementing intelligent assessment with real-time feedback. This has significantly enhanced students' interest and participation in learning immunology, broadened their academic horizons, and cultivated innovative thinking and academic abilities in immunology. However, the AI-powered education in medical immunology faced many challenges, which included insufficient integration of immunology and AI, unresolved technical difficulties, high implementation costs, issues concerning data security and privacy protection, algorithmic bias, and AI hallucinations. In the future, measures such as breaking through key technologies and improving data governance systems will be taken to promote the research and educational innovation of AI in medical immunology.

Keywords

Artificial Intelligence, Medical Immunology, Medical Education, Education Innovation, Scientific Research

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人工智能(Artificial Intelligence, AI)是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学[1]，已成为科技与产业变革的关键驱动力，正在迅速赋能医疗健康服务和医学教育。在医学免疫学领域，AI技术正用于高通量处理和分析复杂的免疫学数据特征，挖掘其深层规律，以揭示免疫应答机制、识别免疫疾病高危人群、预测疾病活动、优化个性化免疫治疗、辅助疾病诊断和预防策略[2]。与此同时，在医学免疫学教育领域，AI亦通过个性化学习路径设计、教学过程优化、教学资源生成、虚拟仿真模拟、学习支持与评价等方式，重塑着传统的教学模式，提升教育公平性和教学效能[3]。其中以机器学习、自然语言处理、神经网络和大型语言模型等为代表的AI技术，在赋能医学免疫学领域研究和教学模式创新方面展现出巨大潜力，对培养和提高医学生信息处理和临床实践能力有重要作用，有助于提高课程教学的质量。本文旨在总结人工智能技术赋能医学免疫学研究及教育教学应用现状，进而分析其对教育创新的深刻影响，对提高医学免疫学教育质量具有重要意义。

2. 人工智能在医学及免疫学领域的发展

AI 在医学领域(包括医学免疫学)的发展也经历了多次起伏，其发展历程大致经历以下重要时期，如图1所示。

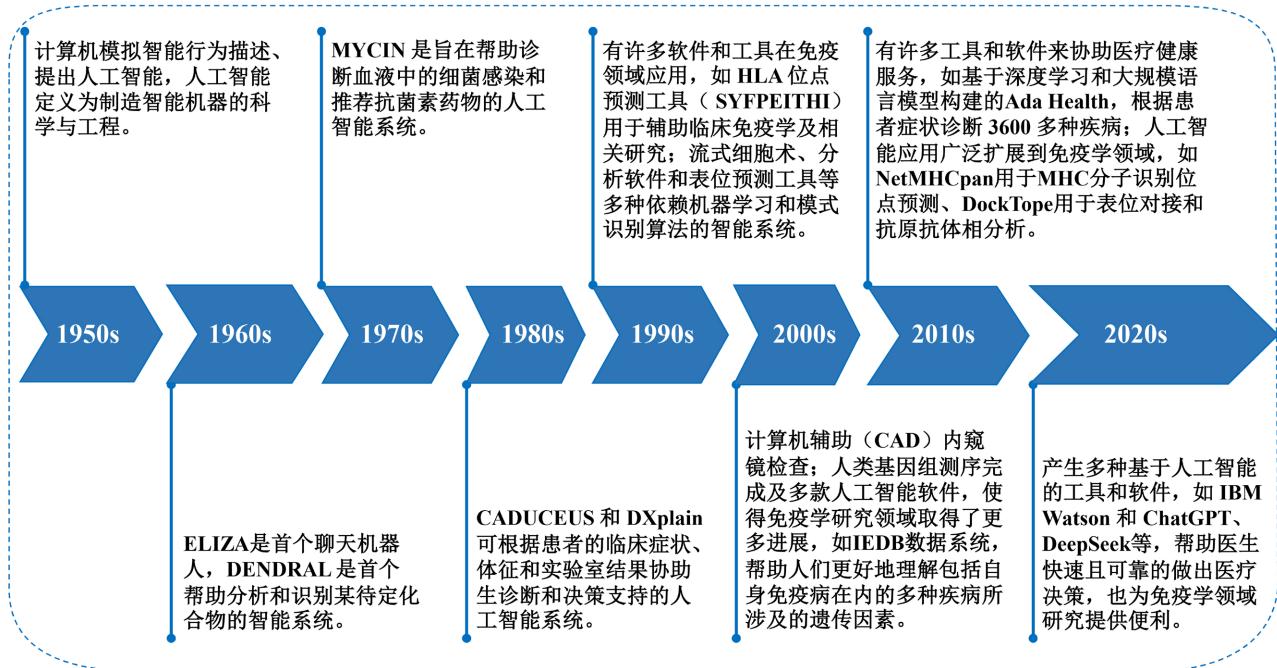


Figure 1. The artificial intelligence development of medical immunology and medical field.

图 1. 医学免疫学及医学领域人工智能的发展

2.1. 人工智能的初步探索时期

此期(1950 年~1970 年)主要集中在开发能够进行推理或决策的机器, 有关人工智能概念是于 1956 年达特茅斯会议上正式提出, 早期研究集中于符号主义 AI, 即基于规则和逻辑推理的专家系统。在医学领域尝试如 MYCIN 专家系统, 由于 AI 在医学的应用较为缓慢, 且早期模型中计算能力和数据匮乏, 限制并阻碍了 AI 在医学方面的广泛接受和应用, 但为医学数据的数字化应用与发展奠定了基础[4]。

2.2. 人工智能发展的瓶颈时期

此期(1970 年~2000 年)暴露出 AI 的局限性, 如计算能力的限制和理论模型的困境, 开发和维护专家系统的成本过高, 知识获取瓶颈和计算资源受限制。将 AI 应用于医学可行性的原型之一是使用 CASNET 模型开发青光眼咨询计划, 以及发布决策支持系统来生成 2400 多种疾病的鉴别诊断, 激发医学界对机器学习的兴趣, 机器学习技术的发展为医学领域 AI 应用奠定了基础[4]。在免疫学中, 虽有学者尝试用计算模型模拟免疫网络学说, 但多停留在理论层面。

2.3. 人工智能的开创性进步时期

此期(2000 年~2020s)是人工智能在医学领域取得重大突破和广泛应用的时期, 随着计算能力的指数级提升以及机器学习算法的革命性突破, AI 进入了快速发展的时期, 如人工神经网络、计算机辅助诊断、卷积神经网络、机器学习、深度学习的发展, 推动 AI 在疾病预测、图像处理、音频处理、检测病变、鉴别诊断、治疗方案等领域取得了显著进展与应用[4]。

尤其自 2010 年以来, 已开发出多种基于人工智能的应用程序、软件工具[5], 将其用于免疫性疾病的诊断、肿瘤个性化免疫治疗、识别和预测潜在过敏原、分析复杂的免疫学数据, 如处理蛋白质互作的相关数据(如 InterPro、AlphaFold)、免疫信息学分析、检测基因表达(如 GeneSpring)解析基因组数据、预测

免疫应答, 以及针对新型致病因子的有效药物和疫苗开发, 推动了医学免疫学的发展。

3. 人工智能赋能医学免疫学的创新研究

免疫系统的主要组成包括免疫器官(如骨髓、胸腺和脾脏)与组织(如淋巴结、黏膜相关淋巴组织)、免疫细胞(如淋巴细胞、粒细胞、树突状细胞、巨噬细胞、自然杀伤细胞、红细胞)以及免疫分子(如细胞因子、补体蛋白和抗体), 以保护身体免受侵入病原体的侵害、消除病原体和修复受损的宿主组织[6]。免疫系统由多种细胞亚群和免疫分子相互交织构成, 免疫系统的复杂性以及免疫学研究过程中会产生庞大的、难以用常规工具分析的各种生物数据集, 传统的分析技术已难以处理这些数据, AI 由此成为大通量数据处理、图像分析、抗原识别、药物与疫苗开发、标志物检测、免疫系统建模解析免疫系统规律、辅助疾病诊断和个性化免疫治疗、预测疾病结局的强大手段[5] [7]。人工智能赋能医学免疫学研究的应用见图 2。已有多种基于人工智能的工具和平台在临床与实验免疫学中得到广泛应用, 这些工具的应用简化了免疫性疾病的诊断、分析和治疗, 也极大推动了医学免疫学发展进步。

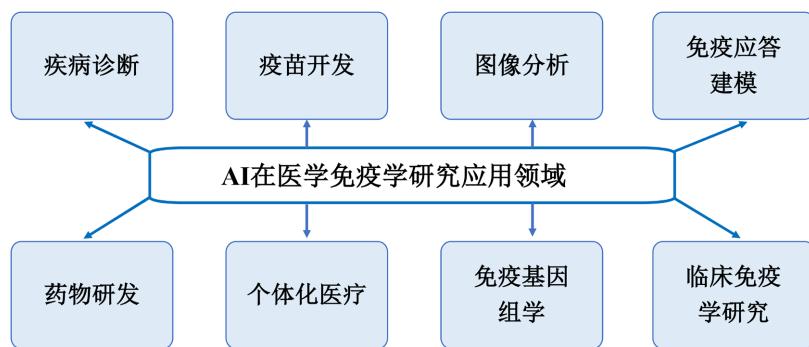


Figure 2. Research applications of artificial intelligence in the field of medical immunology
图 2. 人工智能在医学免疫学领域研究的应用

3.1. 标志物鉴别与疾病诊断

AI 算法能够从海量的临床数据、影像学资料和组学数据中捕获出常规难以发现的微量分子, 从而实现疾病早期诊断和新型生物标志物的发现。如利用深度学习模型分析流式细胞术数据, 可以更精准地对淋巴细胞亚群进行分型, 辅助白血病和淋巴瘤的诊断分型[8]。PathAI 作为人工智能病理学工具, 可分析患者组织学样本图像, HALO AI 利用深度学习, 根据细胞表型和组织结构识别细胞和组织, 辅助疾病诊断与肿瘤严重程度评估[5]。用 DeepMind Health's AI diagnostic、Arterys Lung AI 和 PredictHealth AI tools 等工具积累了大量数据和先进的云计算能力, 用于病变组织图像识别、健康监测和免疫标志物鉴别, 辅助辨别病变程度及免疫性疾病诊断[5]。用 ImmuneML、ImmuneDB 和 ImmuCellAI 等免疫浸润计算工具能够从基因表达数据集中预测几十种免疫细胞亚群丰度, 以及分析和比较 B 细胞受体和 T 细胞受体的结构特点, 辅助预测适应性免疫应答程度[5] [9]。CytoReason、BenevolentAI 和 Ardigent ARDesign 等工具依托机器学习技术分析大规模生物数据集, 识别基于 T 细胞受体的新型治疗靶点和生物标志物, 并预测疾病进展与治疗免疫反应[5]。

3.2. 个性化治疗与药物研发

AI 模型通过分析患者的遗传背景、免疫状态和疾病特征, 可以预测患者对特定药物(如免疫抑制剂、化疗药)的治疗反应和不良反应风险, 指导临床制定治疗方案。TensorFlow 和 IBM Watson for Health 作为

人工智能平台，可用于识别显微镜图像、分析基因组数据和患者临床数据，实时决策支持，指导并优化个性化治疗方案[5] [10]。在药物研发中，AI 极大地缩短了靶点发现和化合物筛选的周期，如 Atomwise 和 DeepVariant 利用深度学习技术，通过预测新药化合物并筛选特定遗传变异位点，进行药物筛选与研发[5]。用 AlphaFold 和 DeepTCR 等工具能有效预测蛋白质空间结构，并从免疫基因组数据中提取 T 细胞受体 CDR3 序列及 V、D、J 基因序列上有意义的信息，预测 T 细胞受体蛋白质结构[5]，辅助设计具有特定免疫调节功能的新型分子。

3.3. 免疫治疗与疫苗开发

在肿瘤免疫治疗领域，AI 被用于预测免疫检查点抑制剂的疗效。用 ImmuneML、ImmuneDB 和 ImmuCellAI 等免疫浸润计算工具分析 T 细胞受体的结构特征，寻找预测疗效的生物标志物[5]。用 INeo-Epp 工具可预测与多种肿瘤相关的新抗原和免疫原性抗原标志物[5]，用 TCRGP、DeepTCR 和 TCReX 等工具通过识别常见与罕见 T 细胞受体肽段，推动肿瘤患者个性化免疫治疗研究[11]。在疫苗研发中，AI 平台能够预测病原体的抗原表位，加速疫苗抗原的设计。用 VaxiJen、XGBoost 和 GutBug 等工具预测候选疫苗和分析肠道微生物互作相关的细菌酶蛋白[12] [13]。用 VaxiJen 和 XGBoost 等工具是基于梯度提升(Gradient Boosting)框架的高效、可扩展的机器学习算法库，用于疫苗抗原及亚单位蛋白质筛选，GutBug 工具用于预测所有可能的细菌代谢酶，则揭示肠道微生物组与食物分子的相互作用机制[12]。Vaxign 工具可用于预测非洲猪瘟病毒、幽门螺杆菌等病原体的候选疫苗，iVAX 工具则在疫苗设计中预测人呼吸道合胞病毒的 T 细胞表位[5]。

4. 从前沿研究到教学实践的路径与范例

AI 在医学免疫学领域的广泛应用，为医学免疫学教育教学创新提供了丰富的素材与实践路径。在讲授抗原激发免疫应答的基本过程时，以 SARS-CoV-2 病毒刺突蛋白的受体结合结构域(S1-RBD)为例，介绍从病毒基因组、S1-RBD 序列获取、三维结构预测，到候选疫苗设计、免疫原性模拟评估等的免疫应答的教学过程。在讲授抗原提呈时，学生完成 S1-RBD 氨基酸序列获取；在讲授 T/B 细胞应答时，学生完成抗原表位预测与疫苗设计；在讲授免疫应答规律时，学生完成候选疫苗的免疫原性模拟评估。

4.1. S1-RBD 氨基酸序列获取

通过 GenBank 数据库(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore>)检索 SARS-CoV-2 病毒，获取基因组记录及 S1-RBD 基因序列和氨基酸序列；或从蛋白质数据库 UniProtKB (<https://www.uniprot.org/uniprotkb/>)，检索词“Spike glycoprotein SARS-CoV-2”或输入 P0DTC2，定位到 SARS-CoV-2 的刺突蛋白序列，根据蛋白质结构域注释，界定 S1-RBD 区域(通常为氨基酸残基 319-541)约 223 个氨基酸，并将氨基酸序列提交至 SWISS-MODEL 预测蛋白质三维结构(<https://swissmodel.expasy.org>)。培养学生生物数据检索与序列分析的基本能力，理解蛋白质空间结构在疫苗设计中的重要作用。

4.2. 抗原表位预测与疫苗设计

VaxiJen 是一个基于物理化学属性、无需序列比对即可直接预测蛋白质抗原性的工具，将获得 S1-RBD 氨基酸序列提交至疫苗预测平台 VaxiJen v2.0 (<http://www.ddg-pharmfac.net/vaxijen/VaxiJen/VaxiJen.html>)，在参数设置中，选择“病毒”作为病原体类型后进行提交。系统会返回一个抗原性分数(通常默认阈值 0.4)，从整体上验证其作为疫苗靶点的潜力。随后使用 IEDB 中的表位预测工具(<http://tools.iedb.org/>)，预测 S1-RBD 序列中可能结合 MHC 分子、被 T/B 细胞识别的潜在肽段，初步构建出候选疫苗序列，理解适应性免疫应答的基本过程。

4.3. 候选疫苗的免疫原性模拟评估

传统实验验证疫苗有效性的周期长、成本高，难以在课堂开展。在教学过程中，引入基于 AI 的免疫应答预测工具进行免疫应答效果的模拟评估。如 C-ImmSim 模拟平台是一个基于计算机模型的免疫系统模拟器(<https://kraken.iac.rn.cnr.it/C-IMMSIM/>)，能够模拟抗原注入后，机体内部发生的免疫反应动态变化。将初步构建出候选疫苗序列提交给 C-ImmSim 平台，设置模拟参数，系统会生成包括抗体滴度、T 细胞反应强度等免疫指标的变化曲线，理解抗体产生的一般规律及其医学应用。因此，AI 科研案例应用到教学中，既学习了抗原结构与激发免疫应答的关系，又培养了学生批判性思维、科研能力和解决复杂问题的能力，从而实现了将前沿研究工具和成果转化成赋能创新性人才培养的优质教学资源。

5. 人工智能赋能医学免疫学教育的优势

生成式人工智能(Generative Artificial Intelligence, GAI)是基于大型语言模型的人工智能技术的重要分支，能够生成文本、图像、音频、计算机代码和视频等多样化内容，在医学教育领域应用最广泛的技术之一[14]。随着深度学习算法和大型语言模型迅速发展，GAI 进入了快速发展时代，尤其是 2022 年美国科学家推出的 ChatGPT [15]和 2024 年中国科学家推出开源的 DeepSeek-R1 [16]，DeepSeek 和 ChatGPT 都建立在 TRANSFORMER 的架构之上，在医疗健康服务和医学教育方面均展示出卓越的能力。ChatGPT 凭借预训练的深度语义理解与 Chain-of-Thought 技术，实现复杂问题的多维度拆解与连贯推理、知识迁移能力，而 DeepSeek 凭借架构加上多阶段强化学习流水线，在复杂推理需求的任务上表现得更出色[15] [16]。

人工智能融入医学免疫学教育，改变了学生的学习方式和教育者的教学方式，Ranjan 等学者以免疫学与微生物学的 200 个问题的准确性来评估 ChatGPT 和 Gemini 人工智能平台性能，ChatGPT 和 Gemini 平台的准确性相当，能够获得较好的学习体验，适合用于免疫学与微生物学教育教学创新[17]。曲蕴慧[18] 等人将人工智能应用于医学免疫学教学实践表明，多数学生对 AI 辅助医学免疫学教学持积极态度。AI 技术能够以各种方式或路径为学生和教育者提供支持[19]，人工智能在医学免疫学教育应用的优势与挑战见图 3。

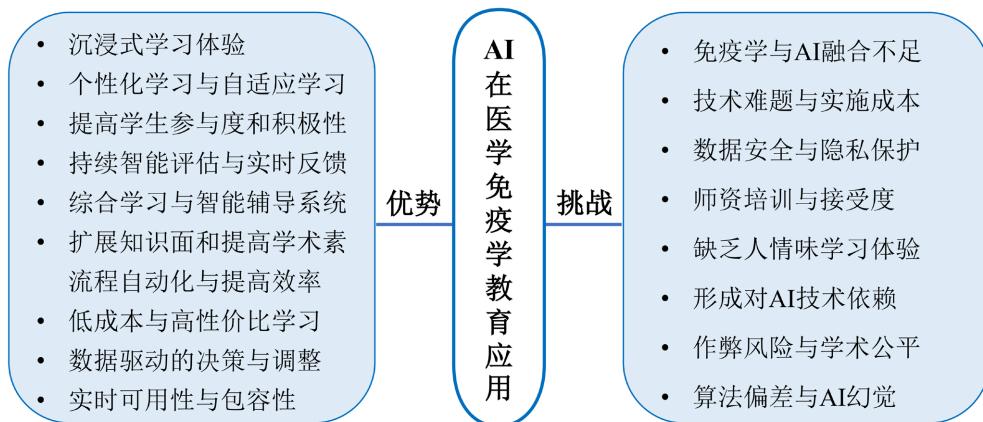


Figure 3. Advantages and challenges of artificial intelligence in medical immunology education.

图 3. 人工智能在医学免疫学教育应用的优势与挑战

5.1. 沉浸式学习

由人工智能驱动的虚拟现实(Virtual reality, VR)、增强现实(Augmented reality, AR)和 AI 模拟技术创

造了沉浸式的学习环境，使学生代入免疫细胞或免疫分子视角了解人体防御病原体入侵过程，学习更具有互动性、激发学习兴趣。如以“三维虚拟人体”为导向的模拟实验，可增强学生免疫诊断推理、操作技能和沟通能力[20]，尤其对罕见的先天免疫缺陷病的学习，学习期间极少遇到，由聊天机器人或VR驱动的“三维虚拟人体”提供免疫诊断、模拟健康管理过程的学习[21]。这种沉浸式体验将抽象的免疫过程变得具体可感，深刻理解了免疫应答的空间动态过程。

5.2. 个性化学习体验

基于AI的自适应学习平台，能够分析每个学生的知识状态、能力水平和学习活动和学习风格，可构建知识结构模型、提供个性化学习内容和路径[18]。系统通过分析学生的答题记录和互动行为，智能推送个性化的学习材料、练习题和微课程，提供优化的学习计划和资源，学生以自己的进度和方式学习，实现了“因材施教”，满足了不同层次学生的学习需求。

5.3. 提升学生参与度与积极性

AI教育工具引入了游戏化元素和交互式模拟，通过与AI平台或虚拟学习助手的互动，提供即时学习反馈与支持，帮助学生保持动力及专注目标，维持学生兴趣并鼓励其积极参与，以提高学生学习的参与度与学习积极性[18]。问卷调查分析表明[22][23]，有54%~90%学生认为AI工具的使用增强了课堂参与度、提升了学习兴趣，使教学过程更具吸引力。与传统教学模式相比，AI辅助的智慧教学模式显著提高学生的课堂注意力($P < 0.01$)、学习免疫学兴趣($P < 0.01$)[24]，有助于培养自主学习习惯和提高积极性。

5.4. 持续智能评估与实时反馈

AI通过记录、跟踪学生的学习轨迹，识别学习趋势，自动分析学生在复杂案例学习中的路径，并进行过程性评价，实时展现学生的学习进展报告。问卷调查分析表明[22]-[24]，91%学生认为AI工具能够提供即时的、形成性的反馈，帮助学生进行阶段性自我反思和目标调整，教师也可利用这些信息优化教学策略、制定个性化干预措施，及时调整教学策略并确保学习目标得以实现。

5.5. 扩展知识面和提高学术素养

利用AI技术通过检索最新的前沿进展，拓展学生的学术视野。借助ChatGPT、DeepSeek、Kimi、豆包等大型语言模型的交互、自动回复、翻译、写作等功能，高效检索、追踪免疫学最新研究进展，提供更加全面的免疫学内容，满足学生不断探索新知识新技术的需求[18]。问卷调查分析表明[22][23]，91%学生通过课程学习能够运用AI工具查阅资料及文献阅读和分析，84%学生认为通过AI工具辅助阅读前沿文献有助于拓宽学术视野[23]。与传统教学模式相比，AI辅助的智慧教学模式显著提高学生的信息处理和分析能力($P < 0.01$)[24]。此外，AI技术已被用来辅助科学家进行医学免疫学未知探索的重要工具，如在个性化免疫治疗、疫苗开发、免疫实验诊断等领域的应用，拓宽知识面及提高学生科研素养与探索能力。

6. 人工智能赋能医学免疫学教育的挑战

虽然人工智能在提高学习效率、改变学生学习体验方面具有巨大潜力，但也存在一些需要逐步完善和解决的挑战(见图3)。

6.1. 医学免疫学与AI融合不足

尽管AI技术发展迅速，在医学领域广泛应用，但仍然无法有效支撑AI技术在医学免疫学领域的全面应用。工程师开发的AI研究工具都有其局限性，分析或预测的准确程度有所不同，且这些AI工具处

理数据高度依赖研究者提交数据质量。与此同时, AI 技术与医学免疫学教育的深度融合不足, 使开发课程教学系统往往与实际教学过程需求不一致, 如何实现医学免疫学理论与深度学习算法的有机结合, 以及如何将 AI 技术有效地整合到现有的教学流程、课程设计、个性化学习指导等教学体系中, 仍然面临诸多挑战。

6.2. 技术难题与实施成本高

先进的 AI 模型(尤其是大型深度学习模型)需要巨大的计算机算力支持, 也需要提供高性能硬件、开发出符合实际需求的专业软件的支持。AI 技术的开发者和用户之间可能存在学科间的差距, 导致开发出的 AI 技术, 难以满足医学免疫学科研与教育的实际需求。同时, 构建高质量的 VR/AR 教学场景和自适应学习平台需要高昂的资金投入和专业技术团队进行维护, 均需投入高昂的大量人力和物力资源成本。

6.3. 数据安全与隐私保护

医学免疫学研究中涉及大量高度敏感的生物样本数据信息、监测数据和影像资料等, 在使用这些数据训练 AI 模型或进行案例教学时, 面临如何确保数据脱敏、防止隐私泄露等生物安全隐患。人工智能教学系统涉及大量学生的数据, 如学生个人信息、学习行为、成绩和偏好等大量学生数据, 也存在着个人信息和数据隐私泄露的潜在风险, 如何确保数据的安全性和隐私保护成为亟待解决的挑战之一。

6.4. 算法偏见与 AI 幻觉

在人工智能赋能医学免疫学的教育教学中, 算法偏见是一个不容忽视的潜在风险。免疫系统具有高度复杂性, 免疫应答程度可能因免疫原结构与性质、HLA 遗传背景等差异而有所不同。如在免疫原性预测模型中, 训练数据主要依赖欧洲人群, 这可能导致算法在亚洲人群中的应用效能下降。HLA 基因型在人群分布具有显著的差异性, 若 AI 模型未涵盖足够的多样性数据, 在疾病风险预测、个性化治疗推荐中也可能存在算法偏差。构建具有人口多样性的免疫学数据集, 可降低 AI 模型算法的潜在偏见。此外, 在医学免疫学教学中, AI 生成内容可能因“幻觉”现象, 而产生事实性错误或误导性信息的挑战。应严格规范或限定 AI 系统的知识来源, 从源头上减少信息偏差; 在内容生成过程中, 实时检索权威证据以增强表述的准确性; 在教学过程中, 教师对 AI 生成的教案、试题及案例分析等教学资料应定期抽样审核、持续优化模型。因此, 采集多样性数据集、实施多层次核查流程, 以确保 AI 在医学免疫学教育教学中发挥创新潜能。

7. 结语

人工智能技术正在深刻变革医学免疫学的前沿研究与教育模式创新。在免疫学领域研究方面, 人工智能技术广泛用于免疫应答、免疫信息、疫苗研发、个性化治疗策略优化及免疫标志物挖掘等领域, 显著推动了医学免疫学技术的进步。在医学免疫学教育教学实践中, 人工智能价值主要体现在构建沉浸式虚拟实验环境、提供自适应学习路径、增强学生互动参与度、实现智能评估与实时反馈、扩展知识面和提高学术素养等领域, 从而有效提升医学免疫学教育质量与学生学术能力。然而, 人工智能与医学免疫学的深度融合仍面临多重挑战, 如技术整合复杂性、实施与维护成本、数据安全风险、隐私保护、算法偏差等。未来需要通过加强跨学科人才培养、推动技术资源共享、建立完善的数据安全体系, 充分发挥人工智能的潜力, 推动医学免疫学在科研与教育领域创新发展。

基金项目

四川省 2024~2026 高等教育人才培养质量和教学改革项目(编号 2024-0771); 四川大学生思想政治教

育研究中心项目(编号 CSZ24049)。

参考文献

- [1] Goktas, P. and Damadoglu, E. (2025) Future of Allergy and Immunology: Is Artificial Intelligence the Key in the Digital Era? *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, **134**, 396-407.e2. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2024.10.019>
- [2] Chen, Y.M., Hsiao, T.H., Lin, C.H. and Fann, Y.C. (2025) Unlocking Precision Medicine: Clinical Applications of Integrating Health Records, Genetics, and Immunology through Artificial Intelligence. *Journal of Biomedical Science*, **32**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1186/s12929-024-01110-w>
- [3] Ahsan, Z. (2025) Integrating Artificial Intelligence into Medical Education: A Narrative Systematic Review of Current Applications, Challenges, and Future Directions. *BMC Medical Education*, **25**, Article No. 1187. <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07744-0>
- [4] Kaul, V., Enslin, S. and Gross, S.A. (2020) History of Artificial Intelligence in Medicine. *Gastrointestinal Endoscopy*, **92**, 807-812. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2020.06.040>
- [5] Alanazi, H.H. (2025) Role of Artificial Intelligence in Advancing Immunology. *Immunologic Research*, **73**, Article No. 76. <https://doi.org/10.1007/s12026-025-09632-7>
- [6] 马兴铭, 张李峰, 雒艳萍, 王竟秋, 于红娟, 曹明强, 吴玉凤, 谭继英, 梁亚玲. 本科生医学免疫学实验教学体系的构建[J]. 中华医学教育探索杂志, 2016, 15(4): 394-396.
- [7] Durmuş, M.A., Kömeç, S. and Gülmez, A. (2024) Artificial Intelligence Applications for Immunology Laboratory: Image Analysis and Classification Study of IIF Photos. *Immunologic Research*, **72**, 1277-1287. <https://doi.org/10.1007/s12026-024-09527-z>
- [8] Autissier, P., Soulas, C., Burdo, T.H. and Williams, K.C. (2010) Evaluation of a 12-Color Flow Cytometry Panel to Study Lymphocyte, Monocyte, and Dendritic Cell Subsets in Humans. *Cytometry Part A*, **77**, 410-419. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20859>
- [9] Pavlović, M., Scheffer, L., Motwani, K., Kanduri, C., Kompova, R., Vazov, N., et al. (2021) The ImmuneML Ecosystem for Machine Learning Analysis of Adaptive Immune Receptor Repertoires. *Nature Machine Intelligence*, **3**, 936-944. <https://doi.org/10.1038/s42256-021-00413-z>
- [10] Subasi, A. (2024) AI Techniques for Healthcare and Biomedicine. In: *Applications of Artificial Intelligence in Healthcare and Biomedicine*, Elsevier, 1-35. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-22308-2.00013-5>
- [11] Wang, M., Fan, W., Wu, T. and Li, M. (2024) TPePRet: A Deep Learning Model for Characterizing T-Cell Receptors-Antigen Binding Patterns. *Bioinformatics*, **41**, btaf022. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaf022>
- [12] Lv, H., Shi, L., Berkenpas, J.W., Dao, F., Zulfiqar, H., Ding, H., et al. (2021) Application of Artificial Intelligence and Machine Learning for COVID-19 Drug Discovery and Vaccine Design. *Briefings in Bioinformatics*, **22**, bbab320. <https://doi.org/10.1093/bib/bbab320>
- [13] Malwe, A.S., Srivastava, G.N. and Sharma, V.K. (2023) GutBug: A Tool for Prediction of Human Gut Bacteria Mediated Biotransformation of Biotic and Xenobiotic Molecules Using Machine Learning. *Journal of Molecular Biology*, **435**, Article 168056. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2023.168056>
- [14] Preiksaitis, C. and Rose, C. (2023) Opportunities, Challenges, and Future Directions of Generative Artificial Intelligence in Medical Education: Scoping Review. *JMIR Medical Education*, **9**, e48785. <https://doi.org/10.2196/48785>
- [15] Li, J., Yin, K., Wang, Y., Jiang, X. and Chen, D. (2025) Effectiveness of Generative Artificial Intelligence-Based Teaching versus Traditional Teaching Methods in Medical Education: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *BMC Medical Education*, **25**, Article No. 1175. <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07750-2>
- [16] Jin, I., Tangsrivimol, J.A., Darzi, E., Hassan Virk, H.U., Wang, Z., Egger, J., et al. (2025) DeepSeek vs. ChatGPT: Prospects and Challenges. *Frontiers in Artificial Intelligence*, **8**, Article 1576992. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1576992>
- [17] Ranjan, J., Ahmad, A., Subudhi, M. and Kumar, A. (2024) Assessment of Artificial Intelligence Platforms with Regard to Medical Microbiology Knowledge: An Analysis of ChatGPT and Gemini. *Cureus*, **16**, e60675. <https://doi.org/10.7759/cureus.60675>
- [18] 曲蕴慧, 高歌, 夏坤锟, 万军虎, 张琳. 人工智能在医学免疫学教学中的应用与展望[J]. 信息与电脑, 2025, 37(8): 49-51.
- [19] Clugston, B. (2025) Advantages and Disadvantages of AI in Education. University Canada West. <https://www.ucanwest.ca/blog/education-careers-tips/advantages-and-disadvantages-of-ai-in-education>
- [20] Yamamoto, A., Koda, M., Ogawa, H., Miyoshi, T., Maeda, Y., Otsuka, F., et al. (2024) Enhancing Medical Interview

- Skills through AI-Simulated Patient Interactions: Nonrandomized Controlled Trial. *JMIR Medical Education*, **10**, e58753. <https://doi.org/10.2196/58753>
- [21] Suárez, A., Adanero, A., Díaz-Flores García, V., Freire, Y. and Algar, J. (2022) Using a Virtual Patient via an Artificial Intelligence Chatbot to Develop Dental Students' Diagnostic Skills. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 8735. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148735>
- [22] 关庆, 陆萍, 韩旭, 李婷婷. 生成式人工智能赋能医学免疫学教学实践研究[J]. 中国免疫学杂志, 2025, 41(6): 1306-1309.
- [23] 刘彩红, 李思琦, 陈英利, 朱江. 人工智能在医学免疫学教学创新中的应用与实践[J]. 中国免疫学杂志, 2025, 41(6): 1324-1327.
- [24] 吴凤娇, 方芳, 韩雪, 夏晓影, 钱中清. 人工智能赋能医学免疫学智慧教学模式的探索与实践[J]. 蚌埠医科大学学报, 2025, 50(7): 996-998+1003.