袁晓龙,邵嘉豪,王添添,等. 人工智能在实验动物科学教学中的实践 [J]. 中国比较医学杂志, 2025, 35(12): 103-109.
Yuan XL, Shao JH, Wang TT, et al. Teaching practice of artificial intelligence in laboratory animal science [J]. Chin J Comp Med, 2025, 35(12): 103-109.
doi: 10.3969/j.issn.1671-7856.2025.12.010

人工智能在实验动物科学教学中的实践

袁晓龙[1],邵嘉豪[1],王添添[1],蔡兆伟[2],卓振建[3],杜小燕[4*]

(1.华南农业大学动物科学学院,广州 510642;2.浙江中医药大学中医药科学院动物实验研究中心,杭州 325008;
3.北京大学深圳研究生院实验动物中心,广东 深圳 518055;4.首都医科大学基础医学院,北京 100069)

【摘要】 人工智能(AI)技术在实验动物科学教学中已得到了广泛应用。本文分析了基于 AI 的虚拟仿真技术在国内外实验动物科学教学中的实践现状和 AI 在实验动物科学教学互动中的实践现状、AI 在实验动物模型教学中的实践现状、AI 在实验动物科学教学中的利弊等,列举了常用的 AI 工具。可以预期,AI 技术将在未来实验动物科学教学中发挥重要作用。

【关键词】 人工智能;实验动物科学教学;虚拟仿真;实验动物模型
【中图分类号】R-332;Q95-33;TP18 【文献标识码】A 【文章编号】1671-7856 (2025) 12-0103-07

Teaching practice of artificial intelligence in laboratory animal science

YUAN Xiaolong[1], SHAO Jiahao[1], WANG Tiantian[1], CAI Zhaowei[2], ZHUO Zhenjian[3], DU Xiaoyan[4*]

(1. College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China.
2. Animal Experiment Research Center, Academy of Chinese Medicine, Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 325008. 3. Laboratory Animal Center, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055.
4. School of Basic Medical Sciences, Capital Medical University, Beijing 100069)

【Abstract】 Artificial intelligence (AI) has also been widely applied in laboratory animal science teaching. This paper analyzes the application status of AI-based virtual simulation technology in the teaching of laboratory animal science at home and abroad, the application status of AI in the interaction of laboratory animal science teaching, the application status of AI in the teaching of laboratory animal models, the advantages and disadvantages of AI in the teaching of laboratory animal science, and lists the commonly used AI tools. It can be expected that AI technology will play an important role in the future teaching of laboratory animal science.

【Keywords】 artificial intelligence; laboratory animal science teaching; virtual simulation; laboratory animal model

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

实验动物是指经人工饲育,控制其携带的微生物和寄生虫,遗传背景明确或来源清楚,用于科学研究、教学、生产和检定的动物[1],是研究动物生物学特性和构建人类疾病动物模型等的重

[作者简介]袁晓龙(1989—),男,博士,副教授,研究方向:小型猪实验资源与雌性生殖发育研究。E-mail:yxl@scau.edu.cn
[通信作者]杜小燕(1971—),女,博士,教授,博士生导师,研究方向:实验动物资源和疾病模型培育及其分子机制研究。
E-mail:duduyan@ccmu.edu.cn

要素材。但实验动物科学教学成本高昂,受限于动物福利伦理,且结果重复性不高[2]。因此,在实验动物科学教学过程中,如何利用现代化手段少用甚至不用实验动物,是我们面临的一个重要问题。

人工智能(artificial intelligence,AI)是指通过计算机系统模拟或实现人类智能的技术,能够模拟动物的感知、推理、学习、问题解决、语言理解、模式识别等行为和任务。利用 AI 不仅能高效、精准地模拟实验动物模型,提供 3D、动态的建模过程,使学生更直观地理解动物模型[3],还可以根据学生的学习进度和反馈,提供个性化的教学内容,提高教学效率和质量。传统实验动物科学教学需要一定数量的动物标本和实验室设备,成本高昂,而 AI 则可以通过虚拟仿真技术,“生产”实验动物模型、生成精细解剖图片或视频,减少对动物标本和实验设备的依赖,降低教学成本[4]。此外,AI 通过图像识别、声音分析等技术,自动检测和记录动物的行为,节省教师和学生双方的时间和精力。最后,AI 能快速处理大量的数据,并进行模式识别、数据挖掘和系统迭代,揭示隐藏在数据背后的规律和趋势,有助于更好地理解、解释和预测实验动物的行为[5]。AI 为解决实验动物科学教学瓶颈问题提供了新策略。

1 基于 AI 的虚拟仿真技术在国内实验动物科学教学中的实践现状

国内高校主要利用 ilab-x(https://www.ilab-x.com)平台建立了多个实验动物虚拟仿真平台(表 1)。例如,2018 年,华中师范大学通过利用虚拟现实、3D 数字还原等技术,把金丝猴标本的形态、头骨特征,结合其种群生态行为习性,以及图片、视频等资料,将金丝猴的形态结构、行为习性、饲养与管理等进行虚拟仿真,方便学生学习金丝猴的保护、管理、饲养、繁育、救护等专业知识。2019 年,云南大学利用 3D 虚拟仿真技术和 3D 模型拼接技术,运用虚实结合的教学手法,观摩家兔与家猫多器官系统形态结构,既增强了学生对复杂哺乳动物的结构及其生理机能的认识,还让学生在实践前对解剖操作流程、各器官系统在体内空间位置关系有立体认知。2023 年,江西农业大学上线猪的虚拟仿真剖腹产手术,其主要运用 3D 虚拟仿真技术,结合现代 3D 图像,可有效培养学生的专业实践能力。

2 基于 AI 的虚拟仿真技术在国外实验动物科学教学中的实践现状

国外也建立了内容丰富的虚拟仿真平台和虚拟实验室(表2),如PhET Interactive Simulations、

表 1 中国部分高校实验动物虚拟平台

Table 1 Virtual platform for laboratory animals in Chinese universities

单位名称 Name of institution	上线年份 Year of launch	主题 Theme
华中师范大学 Central China Normal University	2018	金丝猴生物学习性观察研究虚拟仿真 Virtual simulation for observing and researching the biological habits of golden monkeys
华中农业大学 Huazhong Agricultural University	2018	猪遗传育种关键技能虚拟仿真 Virtual simulation of key skills in pig genetic breeding
南京农业大学 Nanjing Agricultural University	2018	鸡胚孵化及蛋鸡饲养虚拟仿真 Virtual simulation of chicken embryo hatching and layer chicken feeding
中国农业大学 China Agricultural University	2018	犬骨骼及关节虚拟解剖实验 Virtual dissection experiment of dog bones and joints
厦门大学 Xiamen University	2019	文昌鱼繁育的虚拟仿真 Virtual simulation of amphioxus breeding
暨南大学 Jinan University	2019	海洋哺乳动物生物学特征与行为习性观察虚拟仿真 Virtual simulation of observing the biological characteristics and behavioral habits of marine mammals
广西大学 Guangxi University	2019	牛的人工授精虚拟仿真 Virtual simulation of artificial insemination in cattle
太原师范学院 Taiyuan Normal University	2019	家兔大脑皮层诱发电位虚拟仿真 Virtual simulation of evoked potentials in the cerebral cortex of rabbits

续表1

单位名称 Name of institution	上线年份 Year of launch	主题 Theme
兰州大学 Lanzhou University	2019	虚拟仿真动物代谢率的测定及分析 Determination and analysis of animal metabolic rate by virtual simulation
山东大学 Shandong University	2019	3D 建模动物斑马鱼养殖 Three-dimensional modeling of zebrafish breeding
华中农业大学 Huazhong Agricultural University	2019	动物科学专业核心技能综合训练虚拟仿真 Virtual simulation for comprehensive training of core skills in Animal Science
华南农业大学 South China Agricultural University	2019	黄羽肉鸡饲养及性能测定虚拟仿真 Virtual simulation of feeding and performance determination of yellow-feathered broilers
湖南农业大学 Hunan Agricultural University	2019	全收粪法猪消化代谢虚拟仿真 Virtual simulation of pig digestive metabolism by total feces collection method
云南大学 Yunnan University	2019	家兔和家猫的虚拟仿真比较解剖 Virtual simulation comparative anatomy of rabbits and domestic cats
福建农林大学 Fujian Agriculture and Forestry University	2019	优质蜂毒的采收虚拟仿真 Virtual simulation of high-quality bee venom collection
江西农业大学 Jiangxi Agricultural University	2019	牛的肌肉及内脏虚拟仿真解剖实验 Virtual simulation dissection experiment of cattle muscles and internal organs
江西农业大学 Jiangxi Agricultural University	2022	猪的剖腹产手术虚拟仿真实验 Virtual simulation experiment of pig cesarean section surgery
中国农业大学 China Agricultural University	2023	家畜体外胚胎生产虚拟仿真 Virtual simulation of *in vitro* embryo production in livestock
西北农林科技大学 Northwest A&F University	2024	高品质牛肉生产综合仿真 Comprehensive simulation of high-quality beef production
武汉轻工大学 Wuhan Polytechnic University	2024	饲料工程生产实习虚拟仿真 Virtual simulation of feed engineering production practice
西北农林科技大学 Northwest A&F University	2024	智慧鸡舍建造虚拟仿真 Virtual simulation of smart chicken house construction
西南民族大学 Southwest Minzu University	2024	尼龙袋法测定饲料瘤胃降解率智能一体化仿真 Intelligent integrated simulation of determining feed rumen degradation rate by nylon bag method
西北农林科技大学 Northwest A&F University	2024	神经系统形态结构及其传导通路的虚拟仿真实验 Virtual simulation experiment of the morphological structure of the nervous system and its conduction pathways

表 2　国外实验动物科学教学虚拟平台

Table 2　Foreign virtual platform for laboratory animal teaching

实验平台名称 Name of experimental platform	网址 Website	主题 Theme
PhET Interactive Simulations	https://phet.colorado.edu/	国外关于动物自然选择和基因表达的虚拟仿真实验 Foreign virtual simulation experiments on animal natural selection and gene expression
Virtual Labs	https://www.vlab.co.in	国外部分高校有关生物化学、医学、分子生物学的虚拟实验室 Virtual laboratories related to biochemistry, medicine, and molecular biology in some foreign universities
Labster	https://www.labster.com	国外关于 AR 环境科学和解剖学、生理学虚拟实验室 Foreign virtual laboratories on AR environmental science, anatomy, and physiology
PraxiLabs	https://praxilabs.com	国外虚拟生物实验室 Foreign virtual biology laboratory

Labster 和 PraxiLabs,这些平台包含生物化学、医学、分子生物学、环境科学等多个专业领域,其中 Labster 平台利用 3D、虚拟现实、增强现实(augmented reality,AR)等技术进行虚拟实验,研究人和哺乳动物身体系统,与解剖学和生理学课程紧密联系,让学生更深刻地理解生物的复杂性,学习原子结构、细胞膜、细胞器和细胞结构,机体防御病原体机制,同时学习呼吸系统、心血管系统和免疫系统如何协同工作,深入了解身体如何维持和促进生命过程。学生亦可自主通过该平台构建个性化虚拟仿真小鼠模型,例如,学生通过构建小鼠肠道模型,研究内侧(黏膜)和外侧(浆膜)之间的葡萄糖转运,更深入地了解葡萄糖如何在哺乳动物小肠中运输。同时,该模型可更好地展示葡萄糖和钠的黏膜浓度对葡萄糖肠道转运的影响,帮助学生基于此分析相关生理数据,并将其应用于生物疾病的诊断。另外,这些平台利用虚拟仿真技术进行线上虚拟实验,展示样品采集、DNA 提取、候选基因鉴定等实验过程,并模拟突变调控基因表达的机制,进而培育出双肌肉牛的全过程,让学生更直观、深刻地理解牛双重肌肉的孟德尔遗传规律。这些工作充分体现虚拟平台的优势,把耗时耗力的实验动物科学教学变成生动有趣的动画视频,降低教学成本,提升学习效率,增加学习趣味性。

3 AI 在实验动物科学教学互动中的实践现状

实验动物科学教学正经历一场智能化转型,国内外学者致力于将机器学习、逻辑推理、自然语言理解等 AI 技术,嵌入各类教学、学习、决策的工具、系统和平台中,形成虚拟的“AI 老师”和“AI 助教”,具备主动出题与答题功能,与学生实时互动,以支持构建体验式学习情境、规范学习行为、评估学业水平、制订个性化学习路径和内容等[6]。例如,利用 AI 大语言模型,把实验动物科学的课件和讲义导入大语言模型,快速生成“AI 老师”的授课视频,根据学生的兴趣和需求,制订个性化的学习提升方案,可高质量服务学生个性化学习。

这些工作能为开发 AI 教学产品、理解学习的本质、探索教学规律提供新方法和新策略,为学生提供更深刻的个性化学习服务。例如,利用 AI 技术开发智能辅导系统即“AI 助教”,在实验动物科学教学中,分析每个学生的学习投入度和目标达成度,根据学生的学习进度和反馈动态调整教学内容和难度,实现自适应学习结合先进的虚拟现实和 AR 技术,创造沉浸式的学习环境,实现个性化和精准化教学,将抽象的实验动物知识具象化,让学生身临其境地学习和体验[7],提升教学效果。“AI 助教”不仅有助于学生更直观地理解和掌握知识,还能激发他们的创造力,为实验动物教育创新提供源源不断的动力[8]。

4 AI 在实验动物模型教学中的实践现状

利用 AI 合成实验动物模型图片和视频是近年来科学研究中的一个重要方向,尤其是在生物医学、药物开发和疾病研究领域[9]。AI 能明显提高图像分析、处理和生成的效率与精度,在实验动物模型的构建和图像数据的分析中具有显著的应用潜力,已被广泛应用于生成实验动物模型的图像数据[10]。通过训练深度神经网络,AI 能生成特定疾病或病理条件下的动物模型图像,本文使用 AI 大语言模型模拟了多个实验动物模型,包括小鼠心肌梗死模型、猪心肌梗死模型、大鼠肝硬化模型、鸡传染性法氏囊病模型、牛传染性胸膜肺炎模型(见图 1)。这些动物模型图片可用于虚拟实验设计、图像数据增强等,不仅能使教学内容具体化和形象化,还能增强学生对个性化动物模型的理解,提高构建动物模型的准确性。

2023 年,上海交通大学医学院附属仁济医院利用虚拟现实模拟器对猪模型进行了腹腔镜手术训练学习,发现使用虚拟现实模拟器进行猪腔镜技能的学习效果明显优于传统学习效果,认为虚拟现实模拟器可以替代活体动物进行腹腔镜技能的基本训练[11]。为了将虚拟仿真技术更好地与动物模型教学相结合起来,2010 年,伦敦皇家兽医学院开发了一种虚拟现实模拟器 Haptic Cow,其主要用于向兽医专业的学生教授牛直肠触诊,可改善教学效果[12]。2022 年,法国波尔多大学利用 AI 技术辅助分析小鼠的行为模式,以探究特定基因变异对其行为的影响,该研究通过视频追踪系统记录小鼠的活动轨迹,结合机器学习

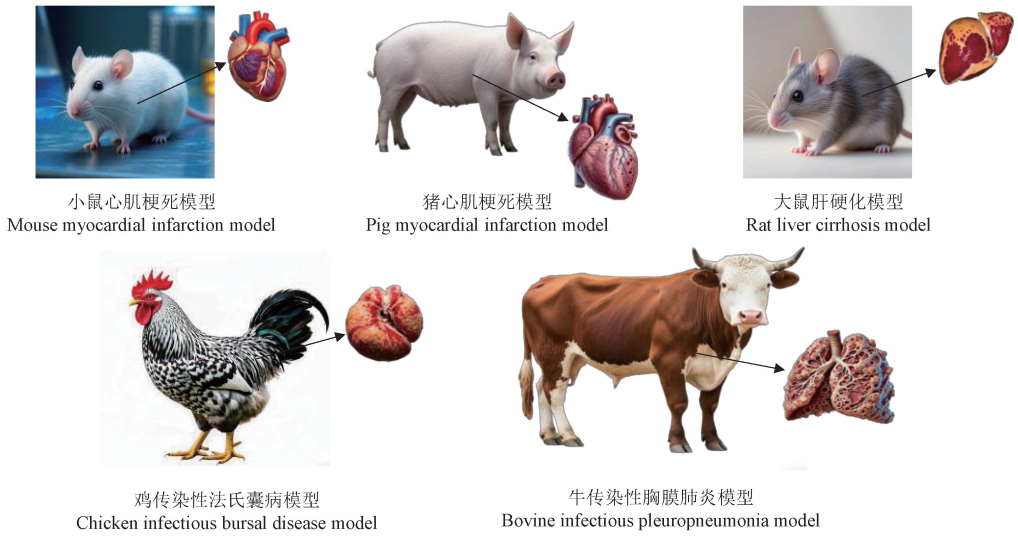

图 1　利用 AI 大语言模型构建实验动物疾病模型

Figure 1　Using artificial intelligence big language model to build laboratory animal disease models

算法分析其运动速度、路径复杂度等行为特征，同时，对比不同基因型小鼠的行为差异，以揭示基因与行为的关联性，结果显示，特定基因敲除的小鼠在探索新环境时表现出更高的活动度和更低的焦虑水平[13]。

5　AI 在实验动物科学教学中的利弊

AI 不仅可以通过对大量动物模型图像的训练，自动化生成和分析图像数据，减少人工标注和分析的时间与劳动强度，还能生成各种不同实验条件下的图像数据，增强实验数据的多样性，这对需要大量数据进行训练的机器学习模型至关重要。在某些情况下，通过生成模拟图像，AI 可以避免动物实验中伦理和法律限制，降低动物使用量[14,15]。2023 年，有研究利用 AI 算法精确分析和识别斑马鱼的图像，与基因组学研究相结合，阐明了基因进化与生物学之间的关系[16]。在药物研发中，AI 模拟药物靶作用，加速药物筛选，并且能够在早期预测药物的疗效与安全性。

但 AI 能否生成精准的结果主要依赖于大量高质量的数据集，如果实验动物模型数据不够丰富或存在标签偏差，AI 生成的结果可能存在误差，甚至不准确[17]。为了解决 AI 在实验动物科学教学存在的问题，我们提出以下策略：(1) 建立严格的数据采集和筛选标准。确保用于训练 AI 的数据来源可靠、准确、完整且具有代表性，减少数据偏差对图像生成的影响[18]。同时，邀请领域专家参与图像生成的过程和评估，对 AI 生成的图像进行生物学合理性的审核和修正，融合物理模拟、生物力学模型等，提高图像的真实感和准确性[19]。(2) 制定相关的伦理和法律准则。明确 AI 在实验动物模型图片生成中的使用范围和规范，确保数据和图像的使用符合法律法规，采用加密技术、权限控制等手段，防止数据和图像被滥用[20]。

6　常用的 AI 工具

目前 AI 问答工具包括腾讯元宝、Kimi、讯飞星火等；深度搜索与推理模型包括 DeepSeek、秘塔 AI、纳米 AI 助手、天工、腾讯元宝、知乎直答、阶跃 AI、百小应等；聚合工具包括 SeekAll；浏览器的插件包括 Kimi、秘塔 AI、豆包、Monica、Docky. AI。教学图片的制作工具包括即梦、可灵、海螺 AI、通义、文心一言、讯飞星火等；3D 模型制作工具包括腾讯混元 3D。这些 AI 工具不仅有助于解决传统教学中遇到的瓶颈问题，还能推动教育学、医学、动物科学等多学科的跨学科研究，改变教学实践模式，从而达到提升教学质量的目的[21]。

7　展望

可以预期，AI 在实验动物科学教学中的广泛

应用,不仅是工具层面的选择,更是教学模式改革的必然趋势。随着“以学生为中心”的教育理念深入,传统以讲授为主的教学模式已无法满足实验动物学中复杂操作技能训练与个性化学习需求[22]。AI 驱动的虚拟仿真与智能评估可以提供高频次、低成本、无伦理负担的训练环境,从而突破传统教学中动物资源有限、伦理约束严格以及师资分配不均的瓶颈。从技术发展趋势来看,AI 在图像识别、自然语言处理和虚拟现实等领域的突破,为实验动物科学教学提供了实时监测、个性化反馈和沉浸式学习的新可能[23]。随着大模型和多模态技术的发展,AI 有望实现实验操作的自动评估与学习过程的精准追踪,进一步推动智慧教育体系的形成[24,25]。将 AI 深度融入实验动物科学教学不仅是顺应技术发展的自然选择,也是推动教育公平、伦理合规和教学改革的现实需求。

8 结论

AI 在实验动物科学教学中的应用不仅能提升教学效率、降低资源消耗,还能够显著改善学生的学习体验和提高教学质量。AI 通过智能化的学习系统、动物模型图片生成和虚拟仿真技术,解决了传统实验动物科学教学中的许多瓶颈问题,包括实验时间的限制、实验动物资源的短缺等。同时,AI 还通过个性化、实时反馈、数据驱动等手段促进了学生技能的提升和对知识的深入理解。可以预期,AI 技术将在未来实验动物科学教学中发挥重要作用。

参考文献:

[1] 杨帆, 徐姗姗, 韩雪, 等. 实验动物的应用 [J]. 畜牧兽医科技信息, 2024, 41(11): 32-34.
YANG F, XU S S, HAN X, et al. Application of laboratory animals [J]. Chin J Anim Husb Vet Med, 2024, 41(11): 32-34.

[2] 郇长超, 胡娇, 高崧. 实验动物福利相关问题及改善措施 [J]. 动物医学进展, 2024, 45(12): 113-116.
HUAN C C, HU J, GAO S. Laboratory animal welfare related issues and improvement measures [J]. Prog Vet Med, 2024, 45(12): 113-116.

[3] 屈亮, 姜元, 孙哲普, 等. 牛心脏模型的三维数字化重建 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018, 68(6): 78-79, 239.
QU L, JIANG Y, SUN Z P, et al. Three-dimensional digital reconstruction of bovine heart model [J]. Heilongjiang Anim Sci Vet Med, 2018, 68(6): 78-79, 239.

[4] VICKRAM A S, INFANT S S, PRIYANKA, et al. AI-powered techniques in anatomical imaging: impacts on veterinary diagnostics and surgery [J]. Ann Anat, 2025, 258: 152355.

[5] GUO C, CHEN Y, MA C, et al. A survey on AI-driven mouse behavior analysis applications and solutions [J]. Bioengineering, 2024, 11(11): 1121.

[6] BOWER M, TORRINGTON J, LAI J W M, et al. How should we change teaching and assessment in response to increasingly powerful generative artificial intelligence outcomes of the ChatGPT teacher survey [J]. Educ Inf Technol, 2024, 29(12): 15403-15439.

[7] 冯旭飞, 刘爵. 浅析 VR 技术在实验动物解剖教学中的应用前景 [J]. 高教学刊, 2021, 7(9): 88-91.
FENG X F, LIU J. Analysis of the application prospects of VR technology in laboratory animal anatomy teaching [J]. J High Educ, 2021, 7(9): 88-91.

[8] 王星, 赵静怡, 张钰, 等. 人工智能在动物实验中应用的研究进展 [J]. 中国比较医学杂志, 2022, 32(11): 135-141.
WANG X, ZHAO J Y, ZHANG Y, et al. Research progress in application of artificial intelligence in animal experimental data [J]. Chin J Comp Med, 2022, 32(11): 135-141.

[9] SUMATHI S, SUGANYA K, SWATHI K, et al. A review on deep learning-driven drug discovery: strategies, tools and applications [J]. Curr Pharm Des, 2023, 29(13): 1013-1025.

[10] MI J, WANG L, LIU Y, et al. KDE-GAN: a multimodal medical image-fusion model based on knowledge distillation and explainable AI modules [J]. Comput Biol Med, 2022, 151: 106273.

[11] BIAN Z, ZHANG Y, YE G, et al. Laparoscopic training on virtual-reality simulators or live pigs-a randomized controlled trial [J]. Ann Med Surg, 2023, 85(7): 3491-3496.

[12] BAILLIE S, CROSSAN A, BREWSTER S A, et al. Evaluating an automated haptic simulator designed for veterinary students to learn bovine rectal palpation [J]. Simul Healthc, 2010, 5(5): 261-266.

[13] CARREÑO-MUÑOZ M I, MEDRANO M C, FERREIRA GOMES DA SILVA A, et al. Detecting fine and elaborate movements with piezo sensors provides non-invasive access to

overlooked behavioral components [J]. Neuropsychopharmacology, 2022, 47(4): 933-943.

[14] FAN Y L, HSU F R, WANG Y, et al. Unlocking the potential of zebrafish research with artificial intelligence: advancements in tracking, processing, and visualization [J]. Med Biol Eng Comput, 2023, 61(11): 2797-2814.

[15] BURTI S, BANZATO T, COGHLAN S, et al. Artificial intelligence in veterinary diagnostic imaging: perspectives and limitations [J]. Res Vet Sci, 2024, 175: 105317.

[16] RANSON J M, BUCHOLC M, LYALL D, et al. Harnessing the potential of machine learning and artificial intelligence for dementia research [J]. Brain Inform, 2023, 10(1): 6.

[17] FOGO A B, KRONBICHLER A, BAJEMA I M. AI's threat to the medical profession [J]. Jama, 2024, 331(6): 471.

[18] 李培林, 张成爽, 于龙. 人工智能在教育领域应用浅析 [J]. 山东工业技术, 2023, (4): 74-78.
LIN P L, ZHANG C S, YU L. Brief analysis of artificial intelligence application [J]. J Shandong Ind Technol, 2023, (4): 74-78.

[19] 张哲尧, 徐凯. 深度学习在医学影像学中的国内研究新趋势: 基于 CiteSpace 的科学计量分析 [J]. 放射学实践, 2024, 39(9): 1233-1237.
ZHANG Z Y, XU K. Domestic emerging trends on deep learning in medical imaging: a scientometric analysis *via* CiteSpace [J]. Radiol Pract, 2024, 39(9): 1233-1237.

[20] 崔雍浩, 商聪, 陈锶奇, 等. 人工智能综述: AI 的发展 [J]. 无线电通信技术, 2019, 45(3): 225-231.
CUI Y H, SHANG C, CHEN S Q, et al. Overview of AI: developments of AI techniques [J]. Radio Commun Technol, 2019, 45(3): 225-231.

[21] DE SILVA D, KAYNAK O, EL-AYOUBI M, et al. Opportunities and challenges of generative artificial intelligence: research, education, industry engagement, and social impact [J]. IEEE Ind Electron Mag, 2025, 19(1): 30-45.

[22] CAI C, ZHU G, MA M. A systemic review of AI for interdisciplinary learning: application contexts, roles, and influences [J]. Educ Inf Technol, 2025, 30(7): 9641-9687.

[23] ALASADI E A, BAIZ C R. Generative AI in education and research: opportunities, concerns, and solutions [J]. J Chem Educ, 2023, 100(8): 2965-2971.

[24] CHEN, X, ZOU D, XIE H. et al. Two decades of artificial intelligence in education: contributors, collaborations, research topics, challenges, and future directions [J]. Educ Technol Soc, 2023, 25(1): 28-47.

[25] CHEN L, CHEN P, LIN Z. Artificial intelligence in education: a review [J]. IEEE Access, 2020, 8: 75264-75278.

〔收稿日期〕2025-07-24