

· 教育与争鸣 ·

虚拟仿真在医学实验动物学教学中的应用与挑战

胡 恒¹, 包 容², 高 卫³

1. 武汉大学中南医院医学科学研究中心 (武汉 430071)

2. 武汉大学动物实验中心 (武汉 430071)

3. 武汉大学中南医院科研处 (武汉 430071)

【摘要】虚拟仿真 (VS) 是高等教育领域的热点问题, 目前已开始应用于大学的实验课教学。为促进实验动物学 VS 教学的进展, 本文总结现有 VS 软件课程的特点、缺陷与不足; 介绍多种医学实验动物学 VS 课程模拟的对象, 包括课程的受众群体与岗位角色、模式动物与疾病模型、实验设施设备与仪器参数的模拟; 探讨 VS 用于教学课程设置的具体内容, 如动物繁育与饲养、感染与非感染性动物实验、设施设备检修与维护、动物实验安全与入室培训等, 并对 VS 课程的更新与优化给予了专业的建议。

【关键词】虚拟仿真; 虚拟现实; 医学实验动物学; 动物实验

【中图分类号】 G 64 **【文献标识码】** A

Application and challenges of virtual simulation in the teaching of medical experimental animal science

HU Heng¹, BAO Rong², GAO Wei³1. *Medical Science Research Center, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China*2. *The Center for Animal Experiment, Wuhan University, Wuhan 430071, China*3. *The Office of Academic Affairs, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China*

Corresponding author: GAO Wei, Email: Znyycg@126.com

【Abstract】Virtual simulation (VS) is a hot issue in the field of higher education. At present, VS has been applied to experimental teaching in universities. In order to promote the progress of VS teaching of experimental animal science, this paper summarizes the characteristics, defects and deficiencies of existing software courses in the market, and introduces a variety of simulation objects of VS courses of medical experimental animal science. It includes the audience of the course and job roles, model animals and disease models, and laboratory facilities and equipment and instrument parameters. At the same time, this paper also discusses the specific content of VS used for teaching curriculum, such as animal breeding and feeding, infected and non-infected animal experiments, facility and equipment overhaul and maintenance, animal experiment safety and admission training, etc., and gives professional advice on updating and optimizing the VS curriculum.

【Keywords】Virtual simulation; Virtual reality; Medical experimental zoology; Animal experiment

DOI: 10.12173/j.issn.1004-5511.202505110

基金项目: 湖北省高等学校实验室研究项目 (HBSY2023-002); 湖北省教育厅教学改革研究项目 (鄂教高函〔2024〕2号—034); 武汉大学中南医院基金项目 (CXPY2023097); 国家重点研发计划“基础科研条件与重大科学仪器设备研发”重点专项 (2021YFF0702002)
通信作者: 高卫, 副主任技师, Email: Znyycg@126.com

实验动物学作为生命科学和医学研究的重要基石,其教学是培养相关专业人才的关键环节。近年来,随着实验动物福利与伦理问题日益受到重视,活体动物的使用逐渐受到严格限制^[1]。早在 2010 年,欧盟便颁布了实验动物保护规定,要求实验人员在操作前接受充分的教育与培训^[2];自 2016 年起,美国所有医学院校停止使用活体动物进行实验教学^[3],并于 2022 年底通过法案,允许新药在无动物实验的情况下获得美国食品药品监督管理局(FDA)的批准^[1]。传统动物模型正逐步被新的研究方法所取代^[4]。在此背景下,医学实验动物学教学呈现出新的发展趋势。研究人员开始探索非活体模型、虚拟仿真(virtual simulation, VS)、虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)及三维工具等多种替代教学手段^[5]。例如,德国积极推动基于大小鼠模拟器的培训方式^[6-7],尽管当前模拟器功能有限,尚不能完全满足教学需求。因此,生物医学教育中逐渐引入了虚拟技术^[2, 8]。法国已研发出动物实验的虚拟环境与教学平台,不仅可以有效替代活体动物的使用,还能为教师提供学生学习情况评估的工具^[9]。与此同时,医学实验动物学的 VS 课程也正逐步向 VR 方向拓展。例如,Tang 等开发了一款适用于生物医学高等教育的动物实验虚拟软件,可通过手柄实现对虚拟动物的注射操作^[10-11]。目前,VS 技术已开始应用于生物医学实验与教学中,并逐渐受到各大高校的关注。目前,该类教学仍处于起步阶段,但对于依赖动手实践的课程来说,VS 有望显著变革传统授课模式。据此,本文聚焦 VS 技术在医学实验动物学教学中的应用现状与面临的挑战,探讨其未来的发展方向。

1 实验动物学VS课程存在的问题

1.1 缺乏系统性课程

尽管欧美市场已有多种针对实验动物的 VS 软件,但这些软件主要集中在兽医或临床专业领域。例如,法国 3D Systems 公司开发的 SimuLab^[12] 软件专注于啮齿类实验技术;德国的 VetSim 软件则侧重于大型动物的临床培训,服务于兽医专业;以色列的 LAP Mentor 软件用于微创技术训练,如实验猪的腹腔镜手术模拟。此外^[2, 12],英国公司正在开发的“牛津医学仿真”课

程,旨在让实习生提前体验临床操作^[13]。部分软件作为活体动物的替代模型进行开发,用于评价药物毒性,如瑞典的 Virtual Rat 和欧盟的 ALTER 项目,然而这些功能并非实验动物学实验与教学所必需。另外,一些 VS 课程致力于实验动物综合管理与伦理培训,如英国的 LAS Laboratory Animals Suite 和德国的 ANIMAL 软件^[2]。这些软件属于虚拟动物设施管理工具,涵盖了饲料管理、实验动物福利与伦理审查,并包括操作规范培训等内容。

受 VS 科技政策的指导,我国生物医学 VS 软件课程发展迅速,尤其是临床医学、基础医学及护理等领域的 VS 课程内容较为丰富^[13-14]。然而,专门针对医学实验动物学的 VS 课程相对较少^[15-16]。当前,实验动物相关内容常分散于生理学、药理学及病理生理学等实验课程中^[17],且课程内容不够完整,仅包含短片段视频和个别大鼠麻醉的 VS 课程^[14, 18],缺乏从动物抓取、称重、注射、麻醉、采样、安乐死、解剖取材、脏器称重、标本冻存到废弃物处理等系统性的全流程实验课程。

从实验动物种类来看,目前市面上的 VS 课程多以农业经济动物为主^[19-20],相关专业主要包括畜牧兽医、动物医学及生物学^[21],课程内容主要涉及大体解剖,如牛、马、羊^[22]或其他实验用动物^[20]。然而,这些实验动物及其课程内容并非医学实验动物学关注的重点。医学实验动物学更关注非人灵长类动物的相关实验内容,如防护服与护目镜的穿戴、动物绑定、静脉采血、猴笼清洁、体表消毒、给药、手术、组织固定、图像采集及尸体冻存等,而这些关键内容在国内现有的 VS 课程中尚显不足,难以满足当前医学实验动物教学的需求。

1.2 课程内容专业性有待提高

通过对实验动物的虚拟课程视频、动物实验操作以及相关文献报道的分析^[23],发现当前部分 VS 课程在内容上存在诸多不符合操作规范的问题。具体表现为以下几个方面:

(1) 动物抓取与处理。部分 VS 课程展示了不规范的操作方法,例如在大鼠腹腔注射过程中,出现两人协同操作的情景:注射者位于左侧,抓取者位于右侧,而规范的操作应为持针者位于右侧或采用单人操作。此外,在 VS 课程中还出现了通过脱颈椎方式进行大鼠安乐死的现象,然而

根据标准操作规程, 体重超过 200 g 的大鼠应使用二氧化碳、麻醉后放血或过量麻醉药物进行安乐死。这些示范显然不符合现有的操作规范。

(2) 麻醉剂的使用。一些 VS 课程在麻醉剂的选择和使用上也存在问题。例如, 某些课程推荐使用乌拉坦作为麻醉剂, 但实际上该药物并非常用选择; 更有甚者, 使用已被淘汰的水合氯醛, 这种麻醉方式不符合动物福利与伦理要求。因此, VS 课程应当选用更为广泛使用且效果更好的麻醉剂进行示范, 如异氟烷气体麻醉或赛拉嗪与氯胺酮的复合麻醉。

(3) 锐器的使用与处理。在部分 VS 课程中, 锐器的使用与处理也不符合规范。例如, 使用注射器时未放置锐器盒, 或者注射器带有针头但无针套, 这些都是明显的安全隐患。正确的做法是, 使用过的注射器应在锐器盒盖上卸下针头, 而未使用的注射器不应裸露针头。所有针头等锐器应用专门的锐器盒装载, 不能使用标记为“废弃物回收”的无盖小容器代替。

(4) 废弃物的处理。某些 VS 课程在废弃物处理方面同样存在问题。例如, 黄色废弃物容器上粘贴有“生活垃圾”的标签, 甚至看到黄色废弃物容器被套上了黑色塑料袋。根据生物安全标准, 生活垃圾应使用黑色塑料袋, 而生物(医疗)废弃物应使用黄色塑料袋, 并在显眼位置设置专用的生物医疗废弃物容器。

(5) 实验室功能区称谓。部分 VS 课程中实验室功能区的称谓并未及时更新。例如, 在涉及高致病性病原微生物检测的 VS 课程中, 仍使用

了 20 年前已停止使用的动物生物安全三级实验室(ABSL-3)功能区名称。原先的“三区(清洁区、污染区、半污染区)两缓”称谓已被“保护区”和“辅助工作区”替代, 其中“核心工作区”归为“保护区”的一部分。

综上所述, 为了提高课程的专业性和规范性,亟需对这些问题进行修正和标准化处理。这不仅有助于提升教学质量, 还能确保学生在实际操作中遵循科学、伦理及安全的标准。

1.3 课程效果与体验方式有待改进

目前, 实验动物学 VS 课程普遍存在以下问题: 虚拟场景画面运行不够流畅, 场景切换时常出现卡顿现象; 场景渐变过程中画面不稳定, 晃动感明显; 虚拟环境真实感不足, 细节表现较为粗糙。此外, 部分教学场景缺乏动态效果。如在模拟兔耳缘静脉注射时, 实际操作中血管的红色会短暂消失, 而仿真画面中却未能体现这一生理变化。与国外基于头戴式 VR 系统、通过手柄在三维空间中进行交互操作的方式不同, 我国目前多数 VS 课程仍采用桌面电脑显示系统进行训练, 学习者通过鼠标在二维平面上引导手术器械的移动来完成操作。这种方式具有成本低、操作简便等优点, 但交互性和沉浸感较弱, 缺乏高层次的视觉体验与科技感, 与国际先进的实验动物学 VR 教学系统相比仍存在一定差距。

2 VS 课程应该模拟的对象与参数

VS 课程模拟对象包括受众的身份、模式动物与动物模型以及实验室环境参数, 如图 1 所示。

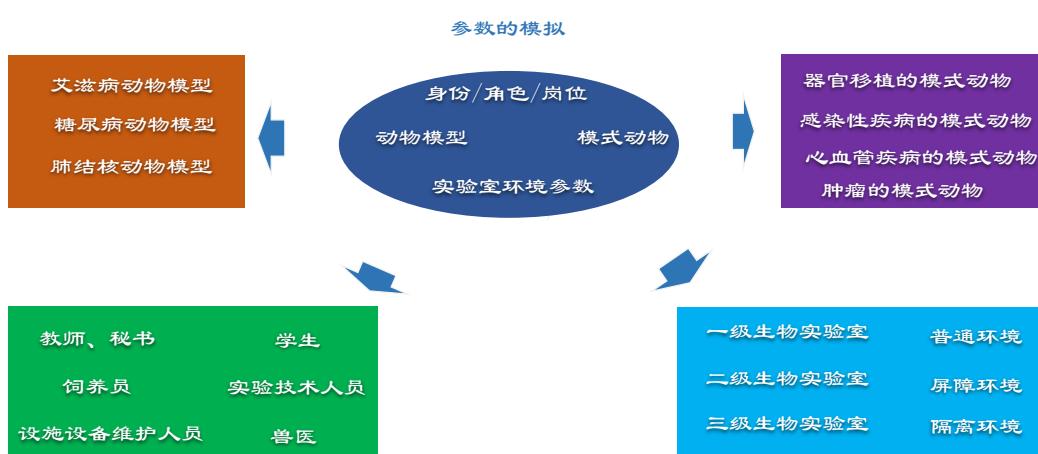


图 1 实验动物学 VS 课程模拟的受众对象与实验参数

Figure 1. Audience and experimental parameters in VS course of laboratory Animal science

注: 由 Microsoft Paint 软件绘制。

2.1 不同身份/角色人员岗位模拟

《实验动物学》不仅是医学专业开设课程,也是农学^[19]、生物学^[21]等专业的重要教学内容;另外,大学、科研院所、教学医院等均建有一定规模的动物实验中心。实验动物繁育机构较多,受众群体也较大,这要求 VS 课程应针对不同的受众群体设置内容。

VS 课程受众群体除了学生外^[24],还应包括新入职的兽医^[19]、教师、实验技术人员、秘书、设施设备维修人员、饲养员等。医学生是 VS 课程的主要受众群体,尤其是研究生,其模拟的工作包括各种动物实验、基因鉴定以及动物的转移、停留与过夜等。实验技术人员负责各种动物实验,包括动物病原检测、动物繁育等。兽医负责动物观察、疾病诊断与治疗等。教师和教学秘书需查阅学生成绩,并对实验过程的数据进行统计分析。其他人员包括教学秘书等,需了解动物品系、笼位数量、动物配送、实验费用的计算以及饲养人员的安排与调配、动物伦理的审批等。饲养员的工作包括饲料的添加与更换、饮用水的准备(包括饮水瓶的清洗、灭菌、转运与更换)、笼具的转运、更换与清洗、物品传入与传出、清洁与消毒等。水电维修人员负责实验动物设施设备的维护与保养以及在紧急情况下的处置,特别是停电、通风故障等。

2.2 不同模式动物与疾病模型模拟

模式动物种类较多,如猪、羊、猴作为器官移植的模式动物,松鼠、睡鼠、猴作为猴痘的模式动物,土拨鼠作为乙型肝炎的模式动物,兔、大鼠、小型猪作为动脉粥样硬化的模式动物,裸鼠、NSG、SCID 小鼠作为肿瘤研究的模式动物。动物实验的 VS 课程也应包括多种疾病的动物模型,如艾滋病的恒河猴模型、糖尿病动物模型、肺结核的豚鼠模型等。

2.3 动物实验与动物繁育环境参数的模拟

环境参数包括实验设施、设备与仪器的参数。VS 动物的设施环境,包括不同安全等级的实验环境(如普通实验室、生物安全二级/三级实验室)以及动物繁育环境(如普通环境、屏障环境、隔离环境),设施设备检修人员、研究人员和饲养员均需了解这些动物实验与繁育环境。普通环境饲养的实验动物不多,如兔、豚鼠。屏障环境、隔离环境是动物繁育与饲养员学习的重点。其中

屏障环境应包含走廊、缓冲间、笼具回收间、笼具准备间、饲养间、解剖间(包括安乐死与尸体冻存)等;而普通实验室应包含动物麻醉与手术室等多个功能区;动物生物安全二级实验室应包括饲养间、实验室、缓冲间、清洗间等。除建筑外,其他 VS 设施还应包括室内的独立通风笼具系统等。

VS 设施维持的重要参数包括气压、温度、湿度、光照等。饲养间内要维持一定的照度,且明暗交替。动物实验的屏障环境、动物繁育的隔离环境设施应为正压(以免实验动物受外界环境影响),而生物安全实验室室内应为负压(以免感染性因子外溢),普通实验室可配备抽风装置,维持负压。

设备的参数也有必要进行模拟,如生物安全柜和超净工作台的关闭、开启、照明、紫外照射、风速/压力调节,以及高压灭菌器的设置与使用等。

3 实验动物学VS教学的内容板块

VS 课程的内容与课堂授课的内容设置应有所差异,活体动物实验、操作规范以及实验室出入流程等可以作为虚拟课程的内容,如图 2 所示。

3.1 动物繁育与饲养

目前实验动物饲养与繁育的 VS 课程以大动物,如猪、奶牛等为主^[25-27],缺乏小鼠等常用实验动物的 VS 内容。实验动物中心可从事特殊品系的繁育,如雌雄动物的合笼、新生动物的计数与标记、幼崽的断乳与分笼、特定基因型动物的合笼、动物性别的筛选、非目的基因型动物与多余动物的安乐死等,因专业性强,一般由研究生或实验技术人员承担。在屏障环境中,实验动物的日常饲养工作包括动物观察、生物安全柜的使用、笼具的更换(包括表面消毒、笼具的开启、笼盖的放置、食物与饮水的更换、原笼具撤离、新笼具放置等),主要由饲养员承担。实验动物繁育一般在隔离环境中,步骤包括物品的进入、传入物品的消毒、隔离包物品与动物的转出、消毒液的配制、动物的传出、样本的采集、标签的张贴等,主要由饲养员、实验技术人员、研究生完成。上述均为动物实验常规工作,VS 教学应涉及相关内容。

3.2 感染性与非感染性动物实验

动物实验是 VS 课程的重点内容,可分为感



图2 实验动物学VS课程的教学内容板块

Figure 2. The content section of teaching in the VS course of experimental animal science

注：由 Microsoft Paint 软件绘制。

染性与非感染性两大板块。非感染性实验没有特别防护，其操作技能的内容应包括结扎、缝合、超声显像、X光拍片、滴鼻、灌胃、灌洗、灌注、穿刺、采血、插管^[28]等。感染性动物实验的 VS 课程应设置生物安全实验室的情景。实验人员的进入有专门防护，因此需增加实验室出入程序、操作规范等情景^[15]。VS 课程还应安排动物病原检测的内容，及时监测实验动物的感染情况。

3.3 设施、设备检修与维护

VS 课程内容应设置实验与检修人员可能遭遇的特殊情况，如停电、停水、火灾、飓风、暴雨等；也应设置实验动物设施设备的 VS 模型，如模拟变配电系统、实验仪器设备、通风系统、温控系统和监视系统等；还应设置设施设备故障的保养等情景，如空气滤芯的检查和更换、空调设备定期检查和维修、洁净空气的输送与分配设施的管理等。

3.4 入室培训与实验室安全

实验室安全也是实验动物 VS 课程的内容之一。实验室安全包括常见的动物抓/咬伤的处置、锐器（注射器、刀片等）刺伤、管制药物（麻醉剂、镇静剂等）使用与保存、CO₂气罐（安乐死用）/液氮罐（组织冻存用）/氧气罐（术后吸氧用）的使用、实验室废弃物（包括动物尸体）的分类、有毒物品的防护与处理、高压灭菌器的使用、洗眼器的检查、病毒液的注射、防护面罩的佩戴等。此外，某些实验动物可能携带致命病毒，因此应教授相关防护意识。

进入实验室前还应设置人员培训相关环节，

包括动物实验申请与审批、动物转运、动物进入、动物转出、动物在实验室停留过夜、人员出入程序、消毒程序等。

4 VS 仿真教学在实验动物学教学的应用实践

本教学团队前期尝试进行了实验动物 VS 教学的实践，对选修《医学实验动物》课程的学生分别进行常规教学和 VS 教学。常规教学组采用传统教学方式，包括课堂讲授、实操演示等；VS 组除课堂讲授外，还通过 VS 系统模拟动物实验操作。初步结果显示，VS 组理论考试成绩（91.4 ± 3.6 vs. 83.8 ± 8.1）和实验操作合格率（98.2% vs. 90.1%）均高于常规教学组（ $P < 0.05$ ）。进一步对 VS 组进行调查发现，56.2% 的学生评价 VS 对课程学习比较有帮助，37.5% 认为 VS 对课程学习非常有帮助；86.6% 认为 VS 在一定程度上可增加对实验动物课程的学习兴趣；81.3% 认为实验动物 VS 课程的互动性和可操作性比较好，还有 4.5% 认为实验动物 VS 课程的互动性和可操作性非常好。总体上，96.4% 的参与者表示实验动物课程后愿意继续使用 VS 系统。上述实践结果表明，VS 教学在实验动物学课程中相较于传统教学模式具有明显优势，与国外研究结果基本一致^[15, 28]。对实验动物课程而言，VR 技术的交互体验感可能更优越，但目前 VS 技术的实用性更好。总体来看，VS 教学有助于提高学生的学业成绩和兴趣，具有广阔的应用前景。

5 VS教学在实验动物学教学应用中的建议

融合 AR 与混合现实 (mixed reality, MR) 技术。将 AR、MR 技术与 VS 课程结合, 引入著名大学实验室或动物繁育机构实验室的场景, 构建完整的实验虚拟环境, 如实验室、走廊、饲养间等, 应用于实验动物学的教学。AR 是一种将虚拟信息和真实世界叠加的人机交互技术, 能提供更加丰富、真切的体验。最近已有 VR 用于实验动物研究的报道, 并且用户也获得了良好的体验^[2]; 也有 Meta 分析显示, VR 技术可提高学生的学习成绩^[29]。另外, 还可引入 MR 技术^[30], 通过智能眼镜或头戴设备, 将虚拟元素与现实世界完美融合, 并进行互动和操作。

增强多终端支持。加强对多终端的支持, 特别是个人电脑或手机终端, 实现无需进入教室即可练习的目标; 另外, 还可使用 VS 结合可穿戴设备和手柄进行教学与练习^[10]。课程的多终端获取可以实现教学资源的开放共享, 承担社会服务的角色。

共建 VS 网课平台。可由医学院校牵头, 通过与软件开发公司或高校相关专业共同研发, 共建医学实验动物的 VS 在线课程, 如公开课、精品课程或核心通识课程等。国外研究也发现《实验动物学》的在线课程与培训能实现培训的灵活性, 可在较短时间内达到高要求课程的质量标准^[24]。

拓展 VS 课程内容。建立更多与动物实验密切相关的 VS 课程, 如动物组织器官的核酸提取、组织蛋白的提取、器官的分离、体液等生物标本的采集与称重等。

综上所述, 随着计算机技术的飞速发展, 传统的教学模式正逐渐向电子化、智能化的方向转变。VS 实验教学平台作为这一转变的重要载体, 以其独特的优势为医学实验动物学的实验教学平台建设与共享提供了强有力的支持, 正逐渐成为高等教育和职业教育的重要组成部分。

伦理声明: 不适用

作者贡献: 论文构思、撰写: 胡恒; 论文修改、校对: 包容; 论文审定、经费支持: 高卫

数据获取: 不适用

利益冲突声明: 无

致谢: 不适用

参考文献

- 1 Muchmore AI. Marketing authorization at the FDA: paradigms and alternatives[J]. Admin L Rev, 2022, 74(3): 539–594. <https://pure.psu.edu/en/publications/marketing-authorization-at-the-fda-paradigms-and-alternatives>
- 2 Lemos M, Bell L, Deutsch S, et al. Virtual reality in biomedical education in the sense of the 3Rs[J]. Lab Anim, 2023, 57(2): 160–169. DOI: [10.1177/00236772221128127](https://doi.org/10.1177/00236772221128127).
- 3 包容, 蔡鸿宁, 高建峰, 等. 美国实验动物的管理与现状——以美国路易斯安娜州立大学为例[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(11): 315–318. [Bao R, Cai HN, Gao JF, et al. Management and current situation of experimental animals in USA: taking Louisiana State University as example[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(11): 315–318.] DOI: [10.16791/j.cnki.sjg.2021.11.062](https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2021.11.062).
- 4 Reddy N, Lynch B, Gujral J, et al. Regulatory landscape of alternatives to animal testing in food safety evaluations with a focus on the Western world[J]. Regul Toxicol Pharmregul, 2023, 143: 105470. DOI: [10.1016/j.yrtph.2023.105470](https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2023.105470).
- 5 Gasteratos K, Paladino JR, Akelina Y, et al. Superiority of living animal models in microsurgical training: beyond technical expertise[J]. Eur J Plast Surg, 2021, 44(2): 167–176. DOI: [10.1007/s00238-021-01798-1](https://doi.org/10.1007/s00238-021-01798-1).
- 6 Humpenöder M, Corte GM, Pfützner M, et al. Alternatives in education—evaluation of rat simulators in laboratory animal training courses from participants' perspective[J]. Animals (Basel), 2021, 11(12): 3462. DOI: [10.3390/ani11123462](https://doi.org/10.3390/ani11123462).
- 7 Humpenöder M, Corte GM, Pfützner M, et al. Alternatives in education—rat and mouse simulators evaluated from course trainers' and supervisors' perspective[J]. Animals (Basel), 2021, 11(7): 1848. DOI: [10.3390/ani11071848](https://doi.org/10.3390/ani11071848).
- 8 Corte GM, Humpenöder M, Pfützner M, et al. Anatomical evaluation of rat and mouse simulators for laboratory animal science courses[J]. Animals (Basel), 2021, 11(12): 3432. DOI: [10.3390/ani11123432](https://doi.org/10.3390/ani11123432).
- 9 Abrache MA, Oubahssi L. Virtual3R: A virtual collaborative platform for animal experimentation[C]. CSEDU, 2024, 1: 54–65. DOI: [10.5220/0012605500003693](https://doi.org/10.5220/0012605500003693).
- 10 Tang FMK, Lee RMF, Szeto RHL, et al. Experiential learning with virtual reality: animal handling training[J]. Innov Educ, 2020, 2(1): 1–9. DOI: [10.1186/s42862-020-00007-3](https://doi.org/10.1186/s42862-020-00007-3).
- 11 Tang FMK, Lee RMF, Szeto RHL, et al. A simulation design of immersive virtual reality for animal handling training to biomedical sciences undergraduates[C]. Front in Edu, 2021, 6: 710354. DOI: [10.3389/feduc.2021.710354](https://doi.org/10.3389/feduc.2021.710354).
- 12 Sankaranarayanan G, Odlozil CA, Hasan SS, et al. Training on a virtual reality cricothyroidotomy simulator improves skills and transfers to a simulated procedure[J]. TSACO, 2022, 7(1): e000826. DOI: [10.1136/tsaco-2021-000826](https://doi.org/10.1136/tsaco-2021-000826).

- 13 Macnamara AF, Bird K, Rigby A, et al. High-fidelity simulation and virtual reality: an evaluation of medical students' experiences[J]. *BMJ Simul Technol En*, 2021, 7(6): 528. DOI: [10.1136/bmjsitel-2020-000625](https://doi.org/10.1136/bmjsitel-2020-000625).
- 14 顾鸣敏, 王亚云, 张伟鹏. 基础医学虚拟仿真实验教学中心建设的中国专家共识 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(6): 113–117. [Gu MM, Wang YY, Zhang WP. Consensus of Chinese experts on the construction of a virtual simulation experimental teaching center for basic medicine[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2024, 43(6): 113–117.] DOI: [10.19927/j.cnki.syrt.2024.06.023](https://doi.org/10.19927/j.cnki.syrt.2024.06.023).
- 15 栗源, 可燕, 蒋嘉烨, 等. 医药高等院校虚拟实验开展分析 [J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(5): 151–158. [Li Y, Ke Y, Jiang JY, et al. Analysis of the implementations of virtual experiment on medical universities[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2022, 41(5): 151–158.] DOI: [10.19927/j.cnki.syrt.2022.05.032](https://doi.org/10.19927/j.cnki.syrt.2022.05.032).
- 16 康继宏, 韩丽丽, 庞炜, 等. 虚拟仿真实验在生理实验教学中的应用 [J]. 基础医学与临床, 2021, 41(3): 456–458. [Kang JH, Han LL, Pang W, et al. Application of virtual simulation experiments in physiological experimental teaching[J]. *Basic & Clinical Medicine*, 2021, 41(3): 456–458.] DOI: [10.3969/j.issn.1001-6325.2021.03.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-6325.2021.03.027).
- 17 施菊花, 顾鸣敏, 蒋益, 等. 医学虚拟仿真实验教学课程的建设与思考 [J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(1): 96–99. [Shi JH, Gu MM, Jiang Y, et al. Construction and reflection of medical virtual simulation experimental teaching courses[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2025, 44(1): 96–99.] DOI: [10.19927/j.cnki.syrt.2025.01.019](https://doi.org/10.19927/j.cnki.syrt.2025.01.019).
- 18 李蓓, 王步钰, 王园, 等. 虚拟仿真技术在动物繁殖技术教学中的应用——以绵羊胚胎移植教学为例 [J]. 高教学刊, 2023, 9(20): 103–107, 112. [Li B, Wang BY, Wang Y, et al. Application of virtual simulation technology in animal reproduction technology teaching: taking sheep embryo transplantation teaching as an example[J]. *Higher Education Journal*, 2023, 9(20): 103–107, 112.] DOI: [10.19980/j.CN23-1593/G4.2023.20.025](https://doi.org/10.19980/j.CN23-1593/G4.2023.20.025).
- 19 杨萍萍, 姜世金, 商营利, 等. 动物科学与动物医学虚拟仿真实验教学平台的建设与实践 [J]. 中国现代教育装备, 2024, (1): 52–55. [Yang PP, Jiang SJ, Shang YL, et al. Construction and practice of virtual simulation experimental teaching platform for animal science and veterinary medicine[J]. *Modern Educational Equipment in China*, 2024, (1): 52–55.] DOI: [10.13492/j.cnki.emee.2024.01.049](https://doi.org/10.13492/j.cnki.emee.2024.01.049).
- 20 胡嘉森, 叶倩文, 赖丹宁, 等. 虚拟仿真实验教学系统联合问卷星在"食品毒理学"动物实验教学中的应用 [J]. 农产品加工, 2022, (1): 76–80. [Hu JM, Ye QW, Lai DN, et al. Application of virtual simulation experiment teaching system combined with questionnaire in the teaching of food toxicology animal experiment[J]. *Farm Products Processing*, 2022, (1): 76–80.] DOI: [10.16693/j.cnki.1671-9646\(X\).2022.01.017](https://doi.org/10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2022.01.017).
- 21 Aghapour M, Bockstahler B. State of the art and future prospects of virtual and augmented reality in veterinary medicine: a systematic review[J]. *Animals*, 2022, 12(24): 3517. DOI: [10.3390/ani12243517](https://doi.org/10.3390/ani12243517).
- 22 DeBose K. Virtual Anatomy: expanding veterinary student learning[J]. *J Med Libr Assoc*, 2020, 108(4): 647–648. DOI: [10.5195/jmla.2020.1057](https://doi.org/10.5195/jmla.2020.1057).
- 23 Costa A, Costa A, Olsson IAS. Students' acceptance of e-learning approaches in laboratory animal science training[J]. *Lab anim*, 2020, 54(5): 487–497. DOI: [10.1177/0023677219879170](https://doi.org/10.1177/0023677219879170).
- 24 Schütz A, Kurz K, Busch G. Virtual farm tours—virtual reality glasses and tablets are suitable tools to provide insights into pig husbandry[J]. *PLoS one*, 2022, 17(1): e0261248. DOI: [10.1371/journal.pone.0261248](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261248).
- 25 Petrov P, Atanasova T. Digital twins with application of AR and VR in livestock instructions[J]. *Probl Eng Cybern Robot*, 2021, 77: 39–50. DOI: [10.7546/PECR.77.21.05](https://doi.org/10.7546/PECR.77.21.05).
- 26 Nguyen A, Francis M, Windfeld E, et al. Developing an immersive virtual farm simulation for engaging and effective public education about the dairy industry[J]. *Comput Graph*, 2024, 118: 173–183. DOI: [10.1016/j.cag.2023.12.011](https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.12.011).
- 27 Oubahssi L, Mahdi O, Bakki A, et al. Design and development of virtual learning environment for animal experimentation[J]. *Int J Virtual Real*, 2025, 25(1): 1–20. DOI: [10.20870/IJVR.2025.25.1.7520](https://doi.org/10.20870/IJVR.2025.25.1.7520).
- 28 Yap WH, Teoh ML, Tang YQ, et al. Exploring the use of virtual laboratory simulations before, during, and post COVID-19 recovery phase: an animal biotechnology case study[J]. *Biochem Mol Biol Edu*, 2021, 49(5): 685–691. DOI: [10.1002/bmb.21562](https://doi.org/10.1002/bmb.21562).
- 29 Dhanil M, Mufit F. How virtual reality impacts science learning? a Meta-analysis[J]. *IJIM*, 2024, 18(22): 77. DOI: [10.3991/ijim.v18i22.49989](https://doi.org/10.3991/ijim.v18i22.49989).
- 30 Naik H, Bastien R, Navab N, et al. Animals in virtual environments[J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2020, 26(5): 2073–2083. DOI: [10.1109/TVCG.2020.2973063](https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2973063).

收稿日期: 2025 年 05 月 20 日 修回日期: 2025 年 09 月 09 日

本文编辑: 李绪辉 曹 越

引用本文: 胡恒, 包容, 高卫. 虚拟仿真在医学实验动物学教学中的应用与挑战[J]. 医学新知, 2025, 35(10): 1235–1241. DOI: [10.12173/j.issn.1004-5511.202505110](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-5511.202505110).
 Hu H, Bao R, Gao W. Application and challenges of virtual simulation in the teaching of medical experimental animal science[J]. *Yixue Xinzhi Zazhi*, 2025, 35(10): 1235–1241. DOI: [10.12173/j.issn.1004-5511.202505110](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-5511.202505110).