·教学改革·

增强现实技术在医学本科药理学教学中的应用效果研究

杜亚琴[1]　崔素颖[1]　赵心亮[1]　范晓琪[2]　李慧[1]　铁璐[1]
[1]北京大学基础医学院医学药理学系和遗传学系，北京 100191；[2]北京大学医学部学生工作部，北京 100191
通信作者：铁璐，Email：tielu@bjmu.edu.cn

【摘要】 目的 探讨增强现实（augmented reality，AR）技术在医学生本科药理学教学中的应用效果。**方法** 以北京大学基础医学院临床医学专业的学生为研究对象，采用试验对照方法，将学生随机分为试验组（92 人）和对照组（96 人）。试验组使用自主开发的 AR 药理教学软件——“AR Drug 1.0”辅助教学，对照组则采用传统教学方式。通过随堂考核和教学满意度问卷调研来评估 AR 教学软件在药理学教学中的实际应用效果。采用 SPSS 23.0 进行独立样本 t 检验。**结果** 对照组学生的随堂考核成绩为（71.67 ± 2.67）分，试验组学生的随堂考核成绩为（84.35 ± 2.93）分，差异具有统计学意义（t=3.21，P<0.001）。试验组教学满意度评分均高于对照组，差异具有统计学意义（P<0.05）。**结论** 本研究表明，AR 技术有助于提升学生的学习效果和满意度。

【关键词】 药理学；　药理学教学；　增强现实技术；　虚拟现实技术
【中图分类号】 R-96
基金项目：中华医学会医学教育分会和全国医学教育发展中心 2023 年度医学教育研究课题项目（2023B022）；北京大学“教学新思路 2.0”项目（2024AL18）；教育部产学合作协同育人项目（241105695282456）；北京大学本科教学改革项目
DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20250721-02188

A study on the application of augmented reality (AR) technology in pharmacology teaching among medical undergraduate students

Du Yaqin[1], Cui Suying[1], Zhao Xinliang[1], Fan Xiaoqi[2], Li Hui[1], Tie Lu[1]
[1]Department of Pharmacology and Medical Genetics, School of Basic Medical Sciences, Peking University, Beijing 100191, China; [2]Student Affairs Department, Peking University Health Science Center, Beijing 100191, China
Corresponding author: Tie Lu, Email: tielu@bjmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To explore the application of augmented reality (AR) technology in pharmacology teaching among medical undergraduate students. **Methods** Students majoring in clinical medicine at the School of Basic Medical Sciences, Peking University Health Science Center were selected as the research subjects and were randomized into experimental group (n=92) and control group (n=96). The experimental group received teaching with the self-developed AR pharmacology teaching software "AR Drug 1.0," and the control group received traditional teaching. The actual effect of applying AR teaching software in pharmacology teaching was evaluated through in-class assessments and teaching satisfaction surveys. Independent sample t-tests were used for statistical analysis with SPSS 23.0. **Results** The in-class assessment scores were 71.67 ± 2.67 in the control group and 84.35 ± 2.93 in the experimental group, showing a significant difference between the two groups (t=3.21, P<0.001). The experimental group also showed significantly higher scores in teaching satisfaction compared to the control group (P<0.05). **Conclusions** This study suggests that AR technology helps enhance students' learning outcomes and satisfaction with teaching.

【Key words】 Pharmacology; Pharmacology teaching; Augmented reality technology; Virtual reality technology

Fund program: Medical Education Research Project of Medical Education Branch of Chinese Medical Association and National Center for Health Professions Education Development in 2023 (2023B022); "New Teaching Ideas" Project of Peking University (2024AL18); University-Industry Collaborative Education Program of Ministry of Education of the People's Republic of China (241105695282456); Peking University Undergraduate Teaching Reform Research Project

DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20250721-02188

增强现实（augmented reality，AR）技术通过将虚拟信息实时叠加于真实场景，为学习者提供可视化、可交互的三维体验，近年来已被证实在医学教育中具有显著优势。Mendez-Lopez 等[1]将 AR 引入神经解剖教学后发现，学生的空间认知和课程满意度均优于采用传统幻灯片教学的学生；García-Robles 等[2]对 2018 至 2023 年间 27 项随机对照研究进行系统综述与荟萃分析，结果表明在解剖教学中 AR/VR 组的学习成效显著优于对照组。国内研究亦呈现一致趋势：吴立权等[3]在神经解剖课程中应用 AR 软件，学生测验成绩提高 20.40%，认知负荷降低 45.00%；田也和陈金龙[4]在口腔颌面部解剖教学中证实，AR 组学生的空间理解能力显著提升。上述研究共同表明，AR 技术能够有效提升知识获取效率、空间理解深度与学习动机。

然而，现有文献多聚焦于解剖学或外科学[1-8]，针对药理学，尤其是“药物—靶点相互作用”这一高度抽象、微观且动态的核心内容，AR 教学研究尚属空白。结构生物学的发展为揭示药物作用机制提供了原子级精度信息，却因软件操作复杂、三维数据不易普及而难以在本科教学中落地。传统药理学课堂依赖二维示意图和文字描述，学生难以建立“分子—细胞—功能”的立体关联，往往陷入机械记忆。因此，开发兼具科学准确性、易用性与交互性的 AR 药理学教学工具，并验证其实际教学效果，已成为亟待解决的关键课题。

本研究依托自主研发的、以结构生物学数据为核心的 AR 药理学教学软件“AR Drug 1.0”，首次将药物—靶点复合物的高分辨率三维结构转化为可缩放、可旋转、可注释的交互式混合现实模型，并通过随机对照试验评估其教学成效。研究结果不仅填补了 AR 技术在药理学教育中的空白，也为“科教融合”背景下的医学基础课程教学改革提供了循证依据和可推广的实践模式。

1 对象与方法

1.1 研究对象

2023 年 9 月至 2025 年 4 月，选择 2022 级和 2023 级临床医学专业 188 名学生为研究对象，所有学生对本研究内容均已知情同意。纳入标准：①全日制临床医学专业学生；②拥有手机、平板等电子设备；③完成调查问卷；④知情并自愿参与本研究。排除标准：①因各种原因中途退出研究者；②中途加入未全程参与研究者；③未完成调查问卷者。

1.2 研究方法

采用试验对照方法，采用抽签法将学生分为试验组和对照组，试验组 92 名学生，对照组 96 名学生。2 组学生受试时前期基础课程和专业课程学习内容无差别。试验组 92 名学生应用最新设计的“AR Drug 1.0”软件进行教学，对照组 96 名学生采用传统方式教学。

1.3 教学实施

课程开始前，全教学团队 19 位教师应用“AR Drug 1.0”进行试讲，充分体验“AR Drug 1.0”带给教学的新变化，同时设立问卷以调研教师团队对新教学方法的接受度和改进性意见。对新教学方法针对性完善后，正式开始教学。

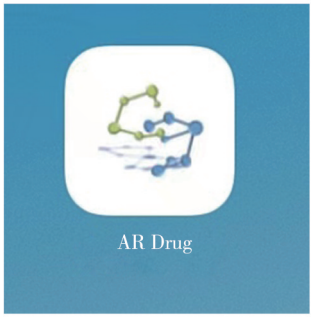
2 组教学时间均为 3 h，授课教师均为同一名教师，均讲述相同药物的作用机制。授课前会对学生进行知识测试，检测其基础知识掌握水平。授课结束后进行随堂考核，检测其课堂讲述知识的掌握程度，并设问卷对教学满意度进行评价。为保证教学公平性，随堂考核和问卷调研结束后，带教教师也会向对照组学生演示 AR Drug 软件使用，让对照组同学充分体验。

此外，所有体验过 AR Drug 软件的学生通过问卷形式对软件使用进行评价和意见反馈，从而帮助教学团队及时了解学生感受与需求以做进一步优化。

1.3.1 试验组教学

应用 AR Drug 软件讲述药物作用机制。

第一，AR Drug 教学软件开发，包括药物与靶点一级数据库建立、二级数据库建立和 AR Drug 教学软件设计，其具有识别、混合现实交互、模式切换、注释、中英文切换以及链接文献等功能（图 1）。



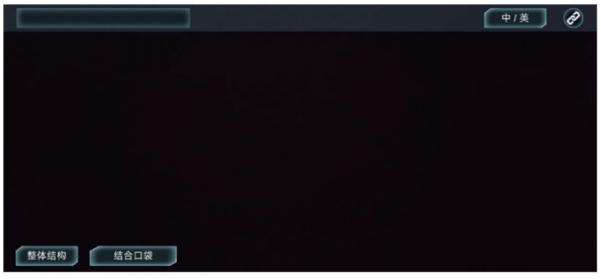


图 1　软件图标及界面

第二，打印 AR 教学软件识别图册，用于 AR Drug 扫描。打开软件后，学生将手机摄像头对准图册，即可识别图片，呈现虚拟立体的结构（图 2）。同时学生可以采用不同手势对虚拟立体模型进行操控，做到真正现实与虚拟地交互，如双指同时触屏并向外可对虚拟模型实现放大效果，双指同时触屏并向内可对虚拟模型实现缩小效果，单个手指触屏可随意旋转拨动立体虚拟模型的角度等，除了手势操作外，也可现实中通过控制手机与图册距离实现放大缩小，通过学生走位实现对虚拟模型进行全方位各角度观察。

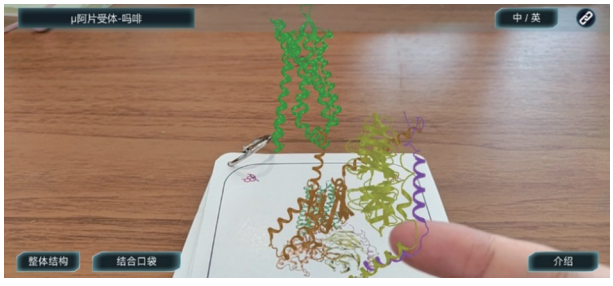
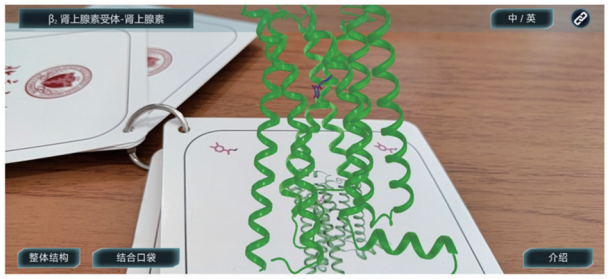
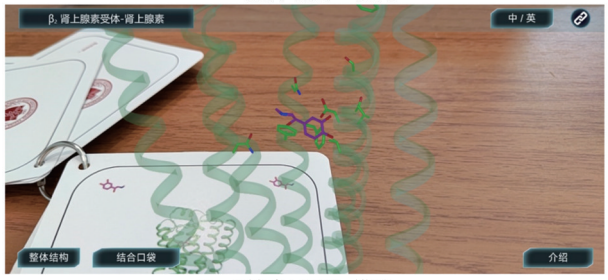


图 2　打印 AR 教学软件识别图册

第三，AR Drug 教学软件应用。为促进学生对药物与靶点作用模式的深入理解，学生可通过“整体结构”和“结合口袋”模块分别进行学习。“整体结构”模块下可观察到绿色靶点与红色药物基本位置，药物位于靶点 α 螺旋所形成的结合口袋中（图 3A）。当需要对其具体作用方式进行观察时，可切换至“结合口袋”模块，此时可看到整体的绿色药物靶点呈现透明化，而与药物进行相互作用的氨基酸进行了突出显示（图 3B）。



A. “整体结构”模块



B. “结合口袋”模块

图 3　AR Drug 教学软件应用情况

任何模块下均可通过右下角“介绍”按钮打开注释功能。点击药物或者作用氨基酸，学生可随时掌握所看到分子的临床应用与理化性质等详细信息。🔗为“原文链接”按钮，可直接链接至相关的文献原文，让学生了解其药物作用机制发现的始终。“中/英”按钮可随时进行语言切换，让学生处于双语学习环境，掌握不同药物与其靶点的中英文名称。整个教学过程中，理论授课与 AR Drug 应用实时结合。

1.3.2　对照组教学

应用传统方式讲述药物作用机制，以教师讲授多媒体课件为主，结合思维导图和二维图片等进行细致教学，教学内容与试验组保持一致，均包括药物与靶点的相互作用方式、“结合口袋”的具体氨基酸、药物发挥药理作用的过程与机制等。

1.4　教学效果评价

1.4.1　考核测试

授课前对 2 组学生进行药理学知识测试，授课后对 2 组学生进行药物与靶点的相关内容考核，试卷内容包括单选题和多选题，成绩采用百分制。

1.4.2　教学满意度评价

教学结束后，进行教学满意度问卷调查，采用线上匿名方式。结合本研究目的设计相关问卷内容，包括“提高互动性”“加深药物作用机制理解”“提高趣味性”“提高主动性和探索欲”“提高学习效率”5 个方面的评价。选项为“完全不同意”“不同意”“一般”“同意”“非常同意”，分别赋值 1~5 分。问卷的 Cronbach’s α 系数为 0.934，因子分析 KMO 值为 0.804，累积方差贡献率 74.71%，问卷的信效度良好。

1.5　AR Drug使用评价

设立调查问卷，所有体验过AR Drug软件的学生分别从软件易用性、实用性、准确性、交互性、趣味性和接受度6个方面进行评价。每个方面分别设立4个问题，以易用性为例，包括安装简便、操作简便、页面布局合理、视觉效果清晰。每个问题下方设立选项为“完全不同意”“不同意”“一般”“同意”“非常同意”，统计不同选项学生比例以了解学生感受与需求。同时设有开放性问题，收集学生对该软件进一步改进的意见和建议。问卷的Cronbach's α系数为0.89，因子分析KMO值为0.74，累积方差贡献率70.92%，问卷的信效度良好。

1.6　统计学方法

采用SPSS 23.0软件对数据进行统计学处理，计量资料以均数 ± 标准差表示，计数材料以百分率表示，组间比较采用独立样本 t 检验。检验水准 α=0.05。

2　结果

2.1　2组学生一般资料比较

试验组92名学生中，男生50名、女生42名，其中43名学生为2022级、49名学生为2023级，年龄（20.26 ± 0.19）岁。对照组96名学生中，男生44名、女生52名，其中42名学生为2022级、54名学生为2023级，年龄（20.63 ± 0.19）岁。2组学生性别（χ^2=1.36，P=0.243）、年龄（t=1.36，P=0.182）、年级（χ^2=0.17，P=0.681）比较，其差异均无统计学意义，具有可比性。

2.2　2组学生考核成绩比较

2组学生教学前成绩差异无统计学意义，教学后成绩试验组学生优于对照组学生，其差异具有统计学意义（表1）。

表1　2组学生考核成绩比较（分，$\bar{x} \pm s$）

组别	教学前考核	教学后考核
试验组（n=92）	72.11 ± 3.98	84.35 ± 2.93
对照组（n=96）	70.71 ± 4.32	71.67 ± 2.67
t值	0.24	3.21
P值	0.810	<0.001

2.3　2组学生问卷调查结果

试验组学生在“提高互动性”“加深药物作用机制理解”“提高趣味性”“提高主动性和探索欲”“提高学习效率”5个方面的评价得分均高于对照组学生，差异具有统计学意义（表2）。

3　讨论

在基础医学教育领域，AR的应用目前集中于两大场景：一是解剖学教学——学生借助移动设备扫描教材图像，即可在现实空间中观察并操控三维模型，相关研究已在口腔颌面部解剖[4]和神经解剖[3]中得到验证；二是教学辅助——透视式AR系统已被用于医学影像与临床教学，显著提升了学生的空间理解与操作技能[8-14]。本研究率先将AR引入药理学教学，自主研发“AR Drug”软件，通过高分辨率药物—靶点三维模型与实时交互，首次验证了AR在揭示分子作用机制、降低认知负荷及提升教学满意度方面的独特价值，为微观层面的医学基础课程提供了可复制、可推广的“科教融合”新范式。

3.1　AR技术有助于提高学生的考核成绩

本研究结果显示，接受“AR Drug 1.0”教学的试验组学生随堂考核成绩高于传统教学对照组，该结果与近期国内外3项密切相关研究一致：国际上，García-Robles等[2]对27项RCT的荟萃分析指出，AR/VR组在医学基础课程中的合并效应量SMD=0.40（95%*CI*=0.22~0.60），本研究效应量显著高于其上限，提示“药物—靶点”这一高度抽象主题可能是AR增益更大的情境。在国内，吴立权等[3]在神经解剖教学中使用移动AR，测验成绩提高20.40%，而本研究提升幅度达18.00%，两者量级相近，但本研究额外证实AR对微观分子层面内容的有效性，实现了由“宏观解剖”向“分子药理”场景的外推。从不同学科横向比较可见，AR在“空间—结构”类知识（解剖、影像）已得到充分验证，而本研究首次将其应用于“抽象—动态”类知识（药物—靶点相互作用），并取得大效应量，提示AR具有跨学科迁移潜力，而非局限于三维形态学课程。研究者认为，AR通过以下机制提升考核成绩：首先以高分辨率结构

表2　2组学生对教学方式的满意度评价比较（分，$\bar{x} \pm s$）

组别	提高互动性	加深药物作用机制理解	提高趣味性	提高主动性和探索欲	提高学习效率
试验组（n=92）	4.30 ± 0.16	4.37 ± 0.14	4.57 ± 0.11	4.54 ± 0.14	4.37 ± 0.15
对照组（n=96）	3.50 ± 0.12	3.96 ± 0.21	4.38 ± 0.16	3.96 ± 0.19	4.29 ± 0.18
t值	3.83	4.62	3.50	2.53	2.58
P值	<0.001	<0.001	<0.001	0.015	0.017

生物学数据还原“药物—靶点”原子级细节，减少二维示意图造成的信息失真；其次可旋转、缩放、注释的互动模型，符合认知负荷理论中的“模态效应”。未来可通过延长随访周期（如4周、12周延迟测试）验证知识保持率，并进一步细化AR功能（动画、及时反馈等）。

3.2　AR技术有助于提高学生的教学满意度

研究结果显示，试验组学生对于“AR Drug 1.0”在“提高互动性”“加深理解”“提高趣味性”“提高主动性”“提高学习效率”5个维度得分均优于对照组。该发现与以下国内外研究的满意度维度高度吻合，但又呈现出新的特征：陈挺团队[9]在心电图AR教学中亦证实满意度提升，但其工具仅老师操作展示；Dhar等[15]的横断面研究指出，AR可显著提升“互动性”与“学习兴趣”，但未涉及“分子—功能”关联。本研究利用结构生物学加AR实现“纳米级”三维增强，突破宏观—微观壁垒，学生反馈“仿佛置身分子世界”，满意度增幅更大。值得注意的是，本研究首次将最新科研成果实时嵌入教学，学生可通过“原文链接”一键跳转至Nature/Science级文献，实现“科研—教学”无缝衔接。该设计不仅满足建构主义学习观中“真实情境”需求，也回应了教育部“科教融合”号召，为医学基础课程提供了可复制的范式。

尽管本研究展示了AR技术在药理学教育中的积极应用，但仍存在一些局限性。首先，本研究主要关注了短期内学生的学习成效，对于AR技术对学生长期学习成效的影响，包括知识保持和应用能力，尚缺乏深入的了解，需要在后续研究中予以关注和改进。其次，不同学生对AR技术的接受度和适应性可能存在差异，本研究未能充分考虑个体学习风格和偏好对教学效果的影响，如何将教学内容与AR技术更深层次融合的方法和策略，也仍是需要进一步探索的问题。解决这些局限性，可以进一步提升AR技术在药理学教育中的效果，为学生提供更加丰富和有效的学习体验。

综上所述，本研究以药理学这一传统“难点课程”为切入口，验证了AR技术在“微观—动态”知识场景中的有效性，AR技术将药物与靶点的三维交互作用可视化，使得学生能够直观理解复杂的药物作用过程，并通过与最新结构生物学科研成果相融合，实现了“科教融合、交叉创新”的教学改革，激发了学生的学习动力，拓宽了他们的思维，为国内、外同类课程提供了新的循证依据和实践范式。

利益冲突　所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明　杜亚琴、铁璐：研究实施、数据收集、论文撰写；崔素颖：教学课程安排；赵心亮、范晓琪、李慧：教学过程指导

参考文献

[1] Mendez-Lopez M, Juan MC, Molla R, et al. Evaluation of an augmented reality application for learning neuroanatomy in psychology [J]. Anat Sci Educ, 2022, 15(3): 535-551. DOI: 10.1002/ase.2089.

[2] García-Robles P, Cortés-Pérez I, Nieto-Escámez FA, et al. Immersive virtual reality and augmented reality in anatomy education: a systematic review and meta-analysis [J]. Anat Sci Educ, 2024, 17(3): 514-528. DOI: 10.1002/ase.2397.

[3] 吴立权，徐海涛，张文斐，等. 移动增强现实技术在神经解剖教学中的应用效果研究[J]. 中华医学教育探索杂志，2022，21(5)：521-524. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20200720-00841.

[4] 田也，陈金龙. 增强现实技术在口腔颌面部解剖教学中的应用[J]. 卫生职业教育，2021，39(4)：74-75.

[5] Liu S, Yang J, Jin H, et al. Exploration of the application of augmented reality technology for teaching spinal tumor's anatomy and surgical techniques [J]. Front Med, 2024(11): 1403423. DOI: 10.3389/fmed.2024.1403423.

[6] 陈丽琴，林央央，曹晓丹. 第五代信息通信/增强现实技术在会阴缝合教学中的应用[J]. 中国基层医药，2024，31(5)：785-788. DOI: 10.3760/cma.j.cn341190-20231223-00604.

[7] 贺治青，楚扬，吴宗贵，等. 增强现实技术提高医学生心脏解剖认知的作用研究[J]. 中西医结合心脑血管病杂志，2017，15(16)：2030-2031.

[8] 史路峰，郑素芬，张骞. 神经导航系统结合虚拟现实技术在脑肿瘤教学中的应用效果探究[J]. 全科医学临床与教育，2025，23(2)：157-159. DOI: 10.13558/j.cnki.issn1672-3686.2025.002.016.

[9] 陈挺，李明妍，贺治青. 增强现实(AR)在心电图教学中的应用[J]. 亚太教育，2021(12)：191-192. DOI: 10.12240/j.issn.2095-9214.2021.12.091.

[10] 肖群根，刘慧勇，刘俊峰，等. 基于四位一体翻转课堂的3D技术辅助教学在神经外科临床教学中的应用[J]. 中华医学教育探索杂志，2025，24(8)：1104-1109. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20241011-02071.

[11] 徐明，梁欣，陈渔，等. 增强现实结合翻转课堂在“针灸学”教学中的应用与探索[J]. 中国医学教育技术，2025，39(1)：132-135，143. DOI: 10.13566/j.cnki.cmet.cn61-1317/g4.202501023.

[12] 米博斌，杜龙宇，周武，等. 3D打印技术在骨科教学中的研究进展[J]. 中华医学教育探索杂志，2025，24(8)：1032-1038. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20240822-02090.

[13] 虞琦，刘梅，胡瑞霖，等. VR与AR技术在医学图像三维重建教学辅助系统中的应用效果分析[J]. 中国继续医学教育，2025，17(1)：139-143. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9308.2025.01.028.

[14] 张琪，冯欣，田冰. 增强现实技术联合小规模限制性在线课程教学模式在建立心血管内科实习生临床思维中的优势[J]. 四川解剖学杂志，2025，33(3)：219-221. DOI: 10.3969/j.issn.1005-1457.2025.03.070.

[15] Dhar P, Rocks T, Samarasinghe RM, et al. Augmented reality in medical education: students' experiences and learning outcomes [J]. Med Educ Online, 2021, 26(1): 1953953. DOI: 10.1080/10872981.2021.1953953.

（收稿日期：2025-07-21）

（本文编辑：唐宗顺）