

沉浸式虚拟现实技术在腹膜透析专科护士操作培训中的应用*

——周跃¹ 郑西希¹ 龙芷雨¹ 周紫娟¹ 夏鹏¹ 夏京华¹ 张岳²

【摘要】 目的 开发一套用于腹膜透析专科护士的沉浸式虚拟现实操作培训系统。方法 联合多学科团队,构建高度仿真的腹膜透析操作流程(10个阶段75个步骤),集成多模式交互(直接接触、射线指示、物品抓取)与实时评估反馈功能。通过对21名腹膜透析专科护士进行测试,评估系统可用性、使用满意度、操作规范性。结果 系统可用性得分为82分(满分100分,属于“良好”水平),90.5%的专科护士对系统的整体使用体验表示“满意”,操作规范率从培训前的65.4%提升至92.1%。结论 沉浸式虚拟现实操作培训系统通过沉浸式、模块化设计及闭环反馈机制,为腹膜透析专科护士操作培训提供了安全高效的新方法,能显著提升操作规范性。

【关键词】 虚拟现实技术;腹膜透析;专科护士;操作培训;护理教育

中图分类号:R47

文献标识码:B

Application of Immersive Virtual Reality Technology in Operational Training for Peritoneal Dialysis Specialist Nurses/ZHOU Yue, ZHENG Xixi, LONG Zhiyu, et al. //Chinese Health Quality Management, 2026, 33(4): 59-63

【Abstract】 Objective To develop an immersive virtual reality training system for peritoneal dialysis (PD) specialist nurses. Methods A multidisciplinary team collaborated to construct a highly simulated PD operational protocol comprising 10 phases and 75 steps, integrating multimodal interactions (direct touch, ray-based instructions, object grasping) with real-time assessment feedback functions. The system's usability, user satisfaction, and operational standardization were evaluated through testing with 21 PD specialist nurses. Results The system achieved a usability score of 82 (full score out of 100, classified as "good"), with 90.5% of specialist nurses reporting "satisfaction" with the overall user experience. The compliance rate with standardized procedures improved from 65.4% pre-training to 92.1% post-training. Conclusion The developed immersive virtual reality system, through its immersive design, modular architecture, and closed-loop feedback mechanism, provides a safe and efficient novel approach for PD specialist nurse training, significantly enhancing operational standardization.

【Key words】 Virtual Reality Technology; Peritoneal Dialysis; Specialist Nurse; Operational Training; Nursing Education

【First-author's address】 Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing, 100730, China

腹膜透析(peritoneal dialysis, PD)是终末期肾脏病的重要替代治疗方式之一。与血液透析相比,PD具有保护残肾功能、血流动力学稳定、居家治疗等优势,但其治疗效果高度依赖于专科护士操作的规范性^[1],操作过程中的任何环节失误

都可能直接导致腹膜感染。研究显示,操作不当引发的腹膜炎可达0.5~1.0次/患者年,是导致PD技术失败和患者退出治疗的主要原因之一^[1-2]。因此,建立并执行一套极为严格和规范的操作流程,是保障PD治疗安全与成功的关键。

为胜任PD治疗中技术操作者、教育指导者及并发症管理者等多重角色,护士需系统掌握涵盖环境评估、物品准备、无菌技术、导管护理、并发症识别与应急处理等在内的75个标准操作步骤^[1,3]。然而,当前主流的“理论授课+观摩演示+临床

DOI:10.13912/j.cnki.chqm.2026.33.4.13

* 基金项目:中央高水平医院临床科研专项(编号:2022-PUMCH-A-169);协和人才培养支持计划C类项目(编号:UBJ11228)

1 中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院 北京 100730 2 中国传媒大学信息与通信工程学院 北京 100024

实习”传统培训模式,在实践中暴露出诸多局限性。(1)学员在真实患者身上进行完整操作的机会有限,仅为3~5次^[4];(2)导师的反馈往往存在滞后性,无法即时纠正操作错误^[3];(3)培训场景单一,难以模拟各种复杂或突发的临床情境^[4]。这些局限共同阻碍了护士PD操作规范率的提升,从而构成了潜在的医疗安全风险。

虚拟现实(virtual reality, VR)技术通过计算机生成高度仿真的三维交互环境,为突破传统培训瓶颈提供了新的可能。VR能够创造一个安全、可重复、无耗材的沉浸式训练空间,允许学员在其中进行无限次的练习而无需承担任何临床风险^[5]。该技术已在医学教育的高风险领域应用,如手术模拟^[6]、急救训练^[7]及复杂导管操作^[8],被证实能显著提升学员的操作准确性、熟练度及临床决策能力。然而,文献回顾发现,现有的VR教学系统与研究多集中于外科、急诊及影像学等领域,针对流程复杂、无菌要求高、依赖肌肉记忆的连续性护理操作(如PD),尚无专用的沉浸式VR培训系统。基于此,本研究开发PD专科护士沉浸式VR操作培训系统,以期提高PD专科护士操作规范性。

1 研究设计

1.1 系统开发

1.1.1 平台工具

本研究组建了涵盖肾脏病学、护理教育学、计算机科学与人机交互等领域的多学科开发团队。系统硬件采用PICO 4 VR一体机(重量295 g),旨在利用其高分辨率显示与inside-out定位追踪能力。软件开发基于Unity 3D引擎(版本2021.3 LTS),结合其通用渲染管线

实现高保真度的视觉渲染,并集成光子引擎,用于未来可能的多人协作功能。为模拟真实的物理交互,系统引入了基于物理的渲染材质系统和刚体动力学组件。

1.1.2 内容开发

开发过程遵循系统化教学设计模型^[9],其核心步骤(分析、设计、开发、实施、评价)与广泛应用的肯普教学设计模型相契合,具体步骤如下:

第一,组建团队。成立由6名成员组成的核心小组,其中3名临床专家(PD专科护士、医师、护士长)负责确保内容的临床准确性与有效性,3名初级人员(初级医师、非PD专科护士、低年资PD护士)参与可用性测试。小组在软件开发过程中针对操作场景内容开发及技术流程进行了3轮集中评价,评价标准包括操作流程的临床准确性、教学逻辑的合理性、交互界面的友好性以及提示系统的清晰度。

第二,分析需求。为系统获取PD专科护士的真实培训需求,研发团队采用解释性质性研究方法开展深度需求调研^[10]。通过目的抽样法,并遵循最大差异策略,选取医院PD中心的21名专科护士作为访谈对象,确保样本能充分覆盖不同职称与工作年限的护士群体。研究者对PD专科护士进行半结构访谈(12个核心问题)后,使用NVivo 12.0软件对转录文本进行编码分析,最终凝练出4大主题:一是沉浸式学习体验,绝大多数(95.2%, 20/21)受访者强调需高度还原临床细节,特别是导管连接的触觉反馈;二是理论知识向临床路径的转化,通过模拟医疗环境,将抽象的理论知识变成具体的临床实践操作;三是批判性思维提升,允许参与培训者在模拟的情景中进行决策和操作;四是实时反馈机制,参与者期望系统具备实时纠错功能,能即时提示无

菌操作违规等错误。

第三,设计VR内容。VR内容设计以“任务导向、过程导引、分段反馈、分段训练”为核心理念。除了为每个步骤配备图文、语音和视频引导,系统还特别设置了8个关键教学节点,分别是环境准备、物品与患者准备、取出和检查腹透液、连接腹透液管路和患者外接短管、引流、注入液体、盖碘伏帽、整理并记录。在这些节点插入交互式问答,强制学员回顾并巩固此前步骤的关键知识点,促进操作技能的內化。交互式问答内容包括:(1)判断画面示例无菌操作的正确性;(2)根据画面提示项勾选正确的PD操作前准备工作内容;(3)检查腹透液袋的具体内容;(4)手持外接短管时,出口端朝向;(5)腹透液引流时长;(6)注入腹透液时完全打开开关的时机;(7)打开碘伏帽外包装的正确流程;(8)在提示页面中勾选PD操作的正确顺序。

第四,开发场景。系统设置了3种高度仿真的交互模式以适应不同操作场景:(1)直接触碰交互。通过虚拟手部碰撞体触发,用于“佩戴帽子和口罩”“皮肤消毒”这些基础且高频的动作,旨在提高操作效率。(2)射线指示交互。通过手柄发射射线与用户界面元素或远处物体交互,用于选择药品、确认操作步骤,旨在有效降低操作者在虚拟环境中的移动负荷。(3)物品抓取交互。通过手柄抓取键触发,模拟人手抓取、移动和旋转物体的精细动作,专门用于“旋开碘伏帽”“抓取腹透液袋”这些对操作精度和手感要求较高的环节。

第五,设计功能。采用严格的模块化设计,将完整的PD操作流程依据《PD护理操作技术规范》解构为10个连续的模块,包括个人准备、物品与器械准备、药品准备、打开腹透液、检查腹透液、连接导管、

引流、排气、注入、分离与记录,共75个关键步骤。利用3D Max、Blender工具进行高精度建模,创建详细流程图,确保每一步都与预期的学习成果相一致。为提升操作的真实性,在Unity引擎中开发了基于物理的交互系统,通过力反馈算法精确模拟各类器械的操作手感,误差控制在0.5 mm以内。为满足实时指导需求,系统构建了一个包含58个质量控制点的监测网络,利用计算机视觉技术持续追踪操作者手部空间位置,并结合状态机逻辑判断操作序列的正确性。一旦系统识别到关键错误(如手部触碰无菌区、操作顺序颠倒),会在0.5 s内触发多层次反馈,即手柄进行高频震动警示,操作界面弹出红色视觉警示框,并伴随语音提示指出具体错误,形成“操作—错误—即时纠正”的闭环教学。VR腹膜透析培训软件运行页面示意图见图1。模拟操作完成后,系统会提供一个可视化的操作检查表(图2),详细列出完成情况、错误点及用时,实现过程性评价。

1.2 有效性测试

邀请4名不同年资(分别为工作1年、3年、8年、15年)的非PD专科护士进行预测试,并采用系统可用性量表(system usability scale, SUS)和“出声思维法”进行访谈。所有测试者均在30 min内独立完成全部操作流程, SUS评分超过80分,同时团队根据测试者反馈优化了界面图标辨识度 and 语音提示清晰度。

2 效果验证

2.1 研究对象

采用目的抽样法,于2025年3月至5月选取该院PD中心的21

名在职专科护士作为研究对象,其中护士长3名、主管护师8名、护师10名。

2.2 评估工具

2.2.1 系统可用性量表(SUS)

SUS是衡量系统易用性的标准化工具^[11],共10题,采用Likert 5级评分法。奇数项为正,偶数项为反向陈述,总分=[(奇数项得分-1)+(5-偶数项得分)]×2.5。将

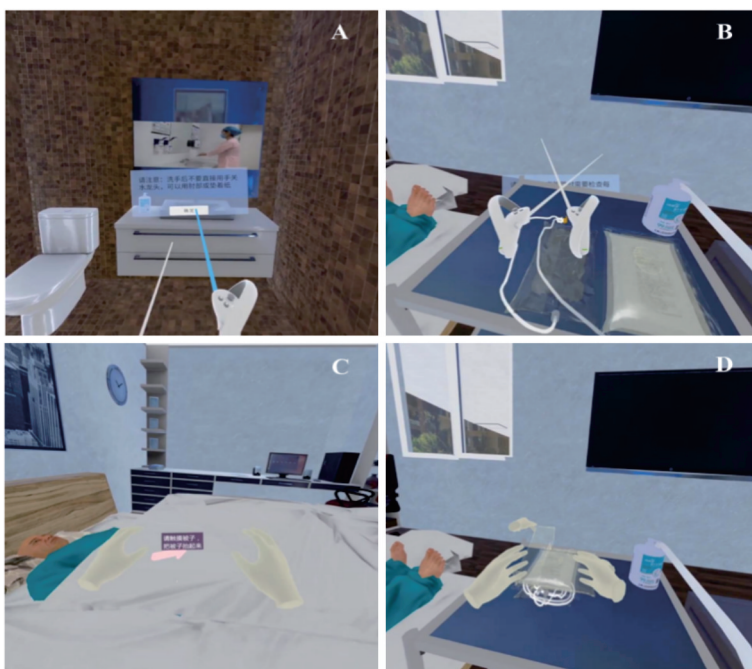
总分转换为百分制,得分>80分为“良好”,>90分为“优秀”。

2.2.2 使用满意度问卷

由研究团队自行设计,包含沉浸感、交互真实性、学习效果3个维度,设置非常满意、比较满意、一般、不满意、非常不满意5个选项,以“比较满意”和“非常满意”表示“满意”。

2.2.3 PD操作表现评分表

由未参与VR系统开发的2名



注:A-洗手;B-检查管路;C-盖被子;D-撕开腹透液袋。

图1 虚拟现实技术腹膜透析培训软件运行示意图

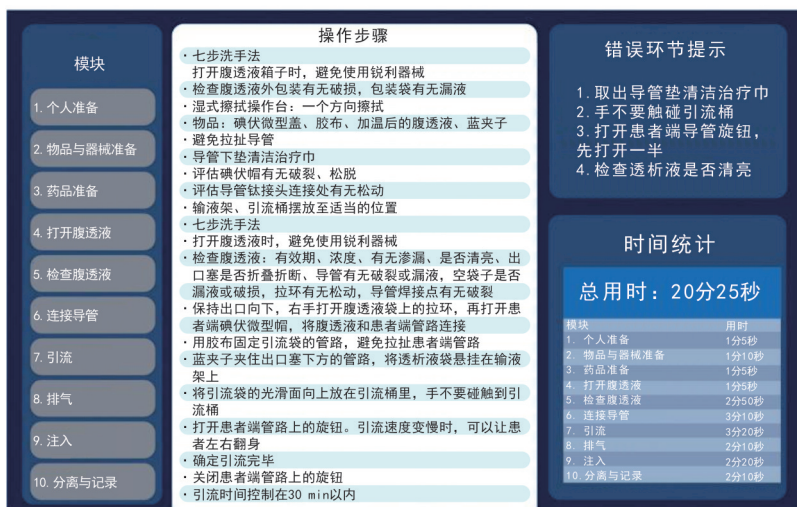


图2 虚拟现实技术腹膜透析培训操作检查表示意图

资深 PD 专家,依据统一的 75 项操作清单,对学员在传统方式培训后及 VR 培训后的操作录像进行双盲评分,计算操作规范率。

2.3 应用效果

2.3.1 系统可用性

SUS 评估结果显示,专科护士对 VR 培训系统可用性评价得分为 82 分,根据 Bangor A 等^[12]提出的评价标准,属于“良好”水平。

2.3.2 使用满意度

90.5% (19/21)的专科护士对系统的整体使用体验表示“满意”。在具体维度上,系统在沉浸感(95.2%, 20/21)和学习效果(90.5%, 19/21)方面获得了较高评价,85.7% (18/21)的专科护士对系统交互真实性表示满意。

2.3.3 PD 操作规范性

学员的平均操作规范率从系统使用前的 65.4% 提升至系统使用后的 92.1%,规范率提升最显著的是无菌技术相关步骤(提升了 38.5%)和复杂操作环节(提升了 41.2%)。

3 讨论

本研究开发的 PD 沉浸式 VR 操作培训系统解决了传统“师带徒”培训模式中的 3 大核心痛点,即实践机会稀缺、反馈滞后及培训质量不均。与传统模式下学员在真实患者身上平均仅有 3~5 次完整操作机会相比,本系统提供的“无限次、零风险、零耗材”的练习环境,从根本上打破了优质教学资源与实践机会的时空限制^[4]。更重要的是,系统内嵌的实时闭环反馈机制(错误识别与纠正延迟时间短于 0.5 s),实现了从“结果评价”到“过程纠偏”的教学范式转变。这对于 PD 这类无菌要求高、容错率低的操作而言,

具有重要的临床意义^[8]。系统提升专科护士操作规范性的深层机制可归结于“沉浸式情境构建”与“智能化即时反馈”的双轮驱动。首先,通过高保真度的视觉渲染与多模式交互,特别是模拟扭矩的力反馈,系统成功营造了高度逼近真实临床场景的心理沉浸感和操作临场感,有效促进了程序性知识(肌肉记忆)的快速形成与巩固^[13]。其次,基于 58 个质控点的实时评估网络所构建的闭环教学,将每一次操作失误都转化为一次精准的教学时机,这符合行为主义学习理论中的即时强化原则,能够高效培养专科护士正确的操作习惯^[14]。因此,建议在护理实践中采用“VR 模拟—导师指导—临床实践”的混合式培训路径,先通过虚拟训练夯实操作基础,再安全地过渡至真实患者,以巩固护士技能^[15-16]。

本研究 VR 操作培训的模块化、标准化的设计范式,能够为构建智能化护理技能培训生态提供可复用的技术框架。短期内,该系统可快速扩展至中心静脉导管维护、复杂伤口护理、呼吸机管理等其他高风险、高标准的护理操作领域^[6]。中长期来看,通过与 5G、云计算技术结合,可实现跨机构的远程 VR 协同培训与考核,为推动区域间护理同质化发展提供技术支撑^[17]。此外,系统运行所积累的海量、结构化操作行为数据,为构建护理技能量化评估标准、探索专家与新手认知差异提供了宝贵资源,能够为护理教育研究提供新的数据驱动范式^[5]。

尽管本研究取得了积极成果,但仍需持续优化。约 14.3% (3/21)的使用者报告在首次或长时间使用后会轻度眩晕或眼疲劳症状,这主要与 VR 设备本身的物理特性(如重量、刷新率)及操作者首次使用的生理适应性有关^[18]。对此,计

划采取硬件轻量化(目标 ≤ 250 g)、软件层面优化渲染管线的策略,并在初次使用时提供更详尽的操作指引。在教学内容方面,当前系统虽完整覆盖了标准流程,但在培养学员应对复杂临床情境的决策能力方面尚有欠缺。未来应开发并发症应急处理模块(如腹膜炎早期识别、导管堵塞处理),引入基于人工智能的自适应学习系统,根据学员表现,动态调整病例难度与提示强度,实现从技能培训向技能与决策并重的综合能力培养深化^[5]。此外,为避免学员对系统提示产生依赖,增设“专家模式”,关闭部分提示,将是下一步教学策略优化的重要方向^[8]。

作者贡献:周跃负责构思与设计、文献检索与筛选以及论文撰写与修改;郑西希和夏鹏负责文献检索与筛选;龙芷雨和周紫娟负责构思与设计、项目实施;夏京华和张岳负责构思与设计、文献分析、论文指导。

利益冲突:所有作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献

- [1] CULLIS B, AL-HWIESH A, KILONZO K, et al. ISPD guidelines for peritoneal dialysis in acute kidney injury: 2020 update (adults)[J]. *Perit Dial Int*, 2021, 41(1): 15-31.
- [2] BELLO AK, OKPECHI IG, OSMAN MA, et al. Epidemiology of peritoneal dialysis outcomes [J]. *Nat Rev Nephrol*, 2022, 18: 779-793.
- [3] 文迪,杨仕容,王秀萍. 专科护士培训体验质性研究的 Meta 整合[J]. *循证护理*, 2024, 10(24): 4397-4403.
- [4] SCHAEPE C, BERGJAN M. Educational interventions in peritoneal dialysis: a narrative review of the literature [J]. *Int J Nurs Stud*, 2015, 52(4): 882-898.
- [5] 刘国庆,韩婧怡,宋文静,等. 虚拟现实在护理领域应用研究关键词的可视化分析[J]. *护理学报*, 2022, 29(3): 29-34.

[6] 王茹,王海慧,孙世仁,等. 虚实共生:虚拟现实赋能医学教育智能化转型[J]. 中国医学教育技术, 2025, 39(5): 607-612.

[7] 奚兴,周寒寒,蒋文婕,等. 虚拟现实技术在公众急救教育中应用的研究进展[J]. 职业卫生与应急救援, 2024, 42(5): 685-689.

[8] 赵俊杰,张寅,赫洋,等. 虚拟现实技术在新护士静脉治疗培训中应用效果的混合研究[J]. 上海护理, 2025, 25(3): 36-40.

[9] MORRISON GR, ROSS SM, KALMAN HK, et al. Designing effective instruction [M]. 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019: 2-25.

[10] THORNE S. Interpretive description: qualitative research for applied practice [M]. 2nd ed. New York: Routledge, 2016: 25.

[11] 莫兰. 基于Benner理论的专

科护士等级评测管理系统的设计和可用性评价[J]. 中国护理管理, 2023, 23(11): 1453-1458.

[12] BANGOR A, KORTUM PT, MILLER JT. An empirical evaluation of the system usability scale[J]. Int J Hum Comput Interact, 2009, 24(6): 574-594.

[13] 翟雪松,孙玉琰,沈阳,等. “虚拟现实+触觉反馈”对学习效率的促进机制研究——基于2010-2021年的元分析[J]. 远程教育杂志, 2021, 39(5): 24-33.

[14] 盘英瑛. 斯金纳的操作性强化理论在护理实训教学中的运用[J]. 中国医药指南, 2011, 9(26): 173-174.

[15] 姜美娴,于睿. 虚拟仿真教学在中医护理临床实训教学课程中的应用研究[J]. 中国中医药现代远程教育, 2020, 18(6): 4-6.

[16] 马艳苗,周文静,樊凯芳,等. 虚拟仿真教学视域下中药学人才培养的继承与创新[J]. 中国中医药现代远程教育, 2021, 19

(17): 180-182.

[17] 工业和信息化部电子信息司.《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划(2022-2026年)》解读[J]. 中国信息化, 2022(12): 12-13.

[18] 石宇,吴雅林,闫林杨,等. 人工智能和虚拟现实技术在提升超声影像教学质量中的作用[J]. 中国卫生质量管理, 2024, 31(11): 20-24.

通信作者:

夏京华:中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院副主任护师

E-mail: jcxia2004@aliyun.com

张岳:中国传媒大学信息与通信工程学院副教授

E-mail: 491000345@qq.com

收稿日期: 2025-09-25

修回日期: 2025-12-07

本文编辑: 任红霞

(上接第44页)

病种质量管理评价指标体系依据重点为上海市各市级医院实际情况,且咨询专家均来自上海市市级医院,在实际应用与推广中具有一定地域局限性。同时,本研究建立的指标体系还未完全应用于医疗管理实践。后续研究将以指标体系为依据,开展上海市市级医院指标体系应用的实证研究,并积极纳入长三角地区及全国多中心重症医学科数据,动态收集多所医院临床数据,结合政策和指南要求进展持续优化指标内容和应用范围,提升指标体系的科学性、可操作性,为长三角地区乃至全国医院的重症医学质量评价提供参考。

作者贡献:李莉珊负责文章初稿撰写和修改;余松轩负责审阅文章的专业内容并修正;刘海江负责相关文献查阅与整理;沈婷负责提供相关数据;姜若负责数据的统计

分析及图表的可视化呈现;张静负责论文设计和文章整体组织架构的指导。

利益冲突:所有作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献

[1] 国家卫生健康委办公厅. 重症医学专业医疗质量控制指标(2024年版)[EB/OL]. (2024-09-12)[2025-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202409/content_6975963.htm.

[2] 徐天宇,余松轩,侯冷晨,等. 数智融合背景下重症医学科发展的机遇、挑战与对策[J]. 海军军医大学学报, 2025, 46(1): 118-122.

[3] VINCENT JL, SLUTSKY AS, GATTINONI L. Intensive care medicine in 2050: the future of ICU treatments[J]. Intensive Care Med, 2017, 43(9): 1401-1402.

[4] 廖子锐,李晓鹤,冯家琪,等. 基于德尔菲法的公立综合医院感染性疾病科综合能力建设评价体系构建研究[J]. 中国卫生质量管理, 2023, 30(5): 40-44, 50.

[5] 姚娟,袁俊强,马凌云,等. 基于德尔菲法构建ICU患者获得性肌无力风险评估指标体系[J]. 检验医学与临床, 2023, 20(14): 2041-2044.

[6] 谢峰,白玫,董硕,等. 基于德尔菲法的医疗设备集中管理模式评价体系研究[J]. 中国医疗设备, 2025, 40(7): 102-107.

[7] 侯冷晨,沈婷,何慧敏,等. 基于大数据和标杆分析法的市级医院病种质量评价指标构建及应用[J]. 中国卫生质量管理, 2023, 30(1): 4-7.

[8] 王瑾,王力男,徐嘉婕,等. 三级甲等公立医院经济运行综合评价指标体系实证研究[J]. 中国卫生资源, 2020, 23(5): 486-489.

通信作者:

张静:上海市胸科医院/上海交通大学医学院附属胸科医院医院感染管理办公室副研究员

E-mail: to_jingzhang@sina.com

收稿日期: 2025-08-29

修回日期: 2025-12-08

本文编辑: 吴小红