

综述

数字健康技术在儿科重症监护病房患儿护理中应用的研究进展

杨妍婷 王春立 贾秀云 李慧君 迟 巍

(国家儿童医学中心,首都医科大学附属北京儿童医院护理部,北京市 100045)

【摘要】 儿科重症监护病房(PICU)的患儿病情危重、复杂、进展快,且护理工作任务繁重。数字健康技术可改善危重患儿健康结局,是减轻护理工作负担的重要手段。近年来,机器学习、虚拟现实技术、移动医疗等数字健康技术被广泛应用于PICU患儿护理过程。本文就数字健康技术在PICU患儿护理中的应用现状进行综述,并分析该技术在PICU患儿护理中可能面临的机遇和挑战,以期为该技术在我国PICU患儿护理中的应用提供参考。

【关键词】 数字健康技术;人工智能;儿科;危重症护理;综述

【中图分类号】 R 720.597 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 0253-4304(2025)04-0602-06

DOI: 10.11675/j.issn.0253-4304.2025.04.18

数字健康是指开发和应用数字技术以提高全民的相关健康知识水平和健康管理能力^[1]。《“健康中国2030”规划纲要》中强调,要鼓励数字健康技术在医疗领域中的发展与应用^[2]。近年来,数字健康技术迅猛发展,新型监测设备、大数据计算、人工智能和虚拟现实技术在护理领域中的应用呈现良好态势,在实时监测,医疗决策、结局预测、出院随访等方面发挥积极的作用^[3-4]。儿科重症监护病房(Pediatric Intensive Care Unit, PICU)的患儿病情危重、复杂、进展快,且其预后难以预测,需要实时监测大量数据^[5],故护理工作繁重,急需数字健康技术协助护士处理大量数据并满足患儿及其家长在面临危及生命的重大疾病时对生理、心理、社会功能等方面的需求,以创新服务模式,提高服务效率,提供高质量护理。目前,数字健康技术在PICU患儿护理包括应用逐渐增多,本文就数字健康技术在PICU患儿护理中的生命体征监测、病情预测、症状管理、护理教育及连续护理中的应用现状进行综述,以期为进一步推动该技术在我国PICU患儿护理中的应用与发展提供参考。

1 数字健康技术在PICU患儿护理中应用的类型

1.1 机器学习 机器学习和深度学习算法是人工智能的重要组成部分。机器学习是指计算机借助于算

法构建数学模型,通过迭代训练逐步优化性能,其不采用预编程规则,而是根据接触的示例数据不断学习和改进,将大数据迅速转化为直观有效的信息和知识,已在医学领域的疾病预测、分类等方面展示出巨大应用潜力^[6]。在护理领域中,机器学习的算法主要有逻辑回归算法、人工神经网络算法、随机森林算法等。深度学习是在机器学习基础上进行优化,其核心在于采用深度神经网络,尤其以卷积神经网络和循环神经网络为典型代表进行数据处理。机器学习算法的应用在一定程度上可以缓解PICU患儿护理工作中需高效处理大量监测信息的技术资源压力,降低PICU护士工作强度,极大提高PICU患儿护理的精准度和服务质量^[7]。

1.2 虚拟现实技术 目前指南建议对所有PICU患儿采取强调非药物选择的治疗策略^[8],虚拟现实技术是通过替代视觉输入并遮挡潜在令人痛苦的视觉线索来转移用户注意力^[9]。Badke等^[10]对使用过虚拟现实技术的112例ICU危重患儿进行调查,结果显示所有患儿表示喜欢使用该技术,68%的患儿表示有兴趣长期使用,72%的患儿家长对其孩子使用虚拟现实技术的效果表现出积极态度。在虚拟环境中,沉浸式互动可以让患儿身心得到放松,根据交互抑制理论^[11],放松和紧张两种情绪状态不能并存,故在放松的虚拟环境中,患儿紧张、焦虑等不良情绪也得到有效缓解,从而提高患儿的治疗依从性和家长的满意度^[10,12]。

第一作者简介:杨妍婷,硕士,护士,研究方向为临床护理。

通信作者简介:迟巍,硕士,主任护师,研究方向为护理质量管理。

虚拟现实技术在PICU患儿护理中的应用方式主要包括视频观看、音频播放、游戏参与等。其中,视频观看主要通过向患儿提供令人平静的自然场景(海滩、山地等)、有趣的游戏(过山车等)、动物(小狗、兔子、蝴蝶等)及带有治疗设计元素的环境(Snow World等)^[13];音频播放的内容主要包括自然背景音频、儿童歌曲、个性化父母声音^[14]等;游戏包括主动游戏(拳击、有节奏的音乐运动和探索性冒险等)和非主动游戏(赛车和叙事冒险等)^[15]。在带有治疗设计元素的环境中,由康复治疗师、护士帮助患儿早期活动,每日完成规定任务^[16]。干预的次数从单次干预到持续2周的每日干预,干预时间为6~90 min/次,频次及虚拟环境背景的选择可根据患儿耐受水平、喜好、体验感或其家长的建议决定。

目前,PICU患儿主要应用的虚拟现实头戴式显示器品牌主要有Meta(以前称为Oculus)、HTC和NVIS^[17-20]。但由于方法论严谨性和个性化设计的需求,阻碍了最佳虚拟现实技术方案的确定。为了使虚拟现实技术更广泛地应用到PICU患儿护理中,必须严格设计硬件以规避皮肤损伤和交叉感染的风险。设备应易于安装,佩戴灵活,适合不同年龄范围患儿的使用,避免将尼龙搭扣纳入头带的设计中,设备制作使用易清洁的材料,最大限度地减少不必要的裂缝和缝隙,根据感控标准严格实施有效的清洁消毒方案。医护人员、患儿及其家长应共同参与虚拟现实技术的研发及改进,确保研究成果能够有效转化为临床实践。

1.3 移动医疗 随着互联网和移动设备的大规模普及,移动医疗的干预工具日益增多,在PICU患儿护理领域主要涉及视频、移动APP、网页等工具,以APP居多。近5年来,成功应用于PICU患儿护理的相关移动健康软件主要包括专业支持和照护技能的指导、信息决策支持、与专业人员的联系、同伴支持、心理支持5大方面^[21]。刘英等^[22]开发设计的ICU移动APP平台,患儿家长可通过该平台与责任护士及主治医生进行沟通,了解患儿病情及实时虚拟访视,从而缓解患儿家长的分离焦虑情绪,提高其对患儿护理的参与度。护理人员借助移动医疗平台突破了时间和空间的限制,为患儿及其家长提供从入院到出院的专业信息、心理支持及病情监测等服务^[23-24],促进了连续性护理在PICU患儿护理领域的发展。

2 数字健康技术在PICU患儿护理中的应用范畴

2.1 生命体征监测 ICU标准护理管理中多以有线的生命体征监测为主,而有线的生命体征监测存在对患儿造成医源性皮肤损伤的风险。Voss等^[25]基于深度学习算法的多模式神经网络自动分割早产儿身体部位技术,通过测量皮肤发射的红外辐射来获取早产儿温度,为早产儿提供一种非接触式温度监测替代方案。Rao等^[26]通过人工神经网络将可穿戴设备(Boppli™,PyrAmes Inc.,Cupertino,CA,USA)传感器衍生的数据进行分析,获得脉搏波形特征并推导出收缩压、舒张压、平均动脉压^[27]和其他血流动力学参数^[28]。该设备可以重复使用,降低了护理成本及对护士动脉穿刺技术的要求,提高护理效率的同时也使患儿免遭动脉穿刺的痛苦。此设备推断出的危重血压值符合美国食品药品监督管理局准确度要求。但无创动脉血压监测的准确性取决于动脉线放置位置的精准、平稳。危重患儿的脐带经常有动脉血流经过,这会严重影响记录信号的平稳性。因此未来仍需进一步扩大样本量,丰富研究对象群体以进一步改善设备的性能。此外,近年来有限热成像或摄像机^[29]、卷积神经网络^[30]、人工神经网络^[29]等无创生命体征监测模型被研发,通过捕捉可以反映微弱复杂的呼吸、异常心率等生理信号数据,提醒护士采取预防措施,在保障患儿安全的同时,减轻护士的工作压力和负担。

2.2 疾病预测 机器学习可以在短时间内对患儿生物特征数据和/或主观资料进行提取、生成和训练,使医护人员能及时发现患儿早期病情变化,减轻护士工作量,提高工作效率^[7]。例如,Barlow等^[31]使用傅立叶机器学习技术对新生儿口腔运动建模,预测新生儿喂养准备情况;Yalçın等^[32]基于逻辑回归算法改进了新生儿营养筛查工具;Letzkus等^[33]基于机器学习技术使用可视化和客观数据分析新生儿扭动姿态以快速预测早期脑瘫;Manigault等^[34]利用数据集关联各种哭声特征以预测早产儿可能出现的长期发育障碍和行为缺陷;由于新生儿无法进行言语交流,Yigit等^[35]借助深度学习中的卷积神经网络算法预测新生儿的舒适行为水平。研究表明,基于卷积神经网络^[36]或深度神经网络^[37],单个或联合使用新生儿

面部表情、身体运动、哭泣频率和生命体征等方面的数据^[38]对新生儿疼痛进行自动评估,可以最大限度地减少或避免术后疼痛和药物戒断对新生儿身体和心理造成的伤害。基于机器学习的脓毒症预测研究也取得较大进展^[39],研究表明,使用心率特征再联合其他生命体征可以提高脓毒症预测率^[40]。儿童处于成长发育脆弱期,大脑和神经发育易受到损害^[41], Gilholm等^[42]通过机器学习算法以确定最能预测不良认知的变量,从而对最有可能受益的儿童进行风险分层,制订出院后预防措施。这些模型和技术的应用,可以协助护士充分利用患儿身体细微且实时动态的生理数据,从而提高病情监测的敏感性,以及护理评估效率,减少人为错误,降低患儿安全风险。但目前计算机模型仅能作为护理决策的信息补充,尚不能完全替代决策,仍需结合临床经验和实际情况加以判断。

2.3 症状管理 减少疼痛和心理困扰是PICU患儿护理中的主要目标之一^[43]。Kucher等^[18]和Hoffman等^[13]的研究均表明虚拟现实技术在疼痛管理方面具有积极的效果。虚拟现实技术不仅可以减少睡眠不足对疼痛主观评分、疼痛阈值和体感皮层激活的不良影响,间接减少儿童的疼痛体验^[9],还能为患儿提供家长在场的视觉安抚,改善患儿不良情绪^[44]。此外,虚拟现实技术多样化场景的设计及多种元素的嵌入,在提高患儿早期主动活动方面也发挥积极作用^[16,45]。研究表明,虚拟现实技术在PICU患儿护理中的应用是安全有效的^[11],但相关禁忌证尚未达成共识。目前研究主要根据患儿的情绪反应或医护人员的临床判断来评估患儿的体验感,但对意识障碍或认知受损的患儿很难评估其体验感。有学者尝试通过测量客观指标以评估虚拟现实技术的干预效果,但结果显示只有在虚拟现实干预时测量值出现了短暂的变化,而这种变化在干预结束后并未得到延续^[45],表明虚拟现实技术改善PICU患儿生理指标的远期效果有待进一步研究。目前尚无有效的衡量指标来评估患儿体验期间经历的晕厥等不良反应的程度,而主要采用问卷作为评估手段。

2.4 护理教育 对于新入职PICU的护理人员,通过传统的教育方法在短期内获得足够的护理经验和熟练的护理技术是具有挑战的。在医学教育中,虚拟现实技术的应用为PICU护理人员提供了有效的学习

和练习技能的机会。虚拟现实技术模拟创造出的独特三维交互式体验,帮助护理人员体验处于真实的医疗保健环境中^[46]。基于虚拟现实技术的学习干预,PICU护士照顾机械通气患儿的技能得到提高^[47],控制感染的信心得到增强^[48]。此外,安全的虚拟环境允许护理人员在人体模型上反复练习,降低了试错成本,从而提高护理人员的实践信心和操作水平^[49-50]。虚拟现实技术具有便携、易于设置、节省空间、成本效益高等优势,易实现学习实践的可复制性和标准化,提供因可能导致患儿安全风险而无法实现的操作体验^[48],但对于患儿气道准备等教学,触觉反馈仍难以准确再现^[17]。

2.5 连续性护理 连续性护理是指通过设计一系列干预措施以确保患者在不同的健康照顾场所(从医院到家庭)及同一健康照顾场所(医院的不同科室)得到不同水平的协作性与连续性的照护^[51]。一般情况下,患儿病情稳定后,会从PICU转至普通病房继续观察治疗,待好转后出院,但由于疾病相关知识及相关技能等的缺乏,大多数家长会呈现高水平迁移应激状态^[52],加上医疗资源分配的不均匀,部分PICU患儿在出院后得不到随访及监测^[53]。近年来,针对PICU患儿父母开发的APP的功能得到进一步完善,使这一情况得到改善^[24]。移动健康程序为PICU出院患儿家长提供了个性化信息支持,帮助其辨别患儿病情严重程度,有利于其针对患儿病情与专业人员的沟通,增强家长照顾患儿的信心和应对能力^[24]。对于医疗机构而言,基于移动医疗的PICU出院患儿护理随访,可以减少对状况良好的患儿不必要的例行探视次数,增加需要额外探视和干预患儿的随访次数,从而更好地完成延续性护理^[23]。Phagdol等^[54]设计了一个基于可持续发展生态模型的移动医疗应用程序,可远程监测ICU出院早产儿的生长和发育,解决了资源匮乏地区对医疗资源的需求。目前,我国ICU患儿出院随访多以微信公众号、微信小程序为载体,相关的APP、网页较少且缺乏理论支撑,未来可在理论框架指导下根据我国ICU患儿及其家长需求研发“住院—出院”一体化的APP、网页等,提高程序的可用性及可推广性。政府层面可加强对数字健康技术推广的支持力度,提升数字卫生基础设施与数字健康需求的匹配度,促进不同地区数字健康技术的协同发展。

3 数字健康技术在PICU患儿护理应用中的局限及建议

我国有关数字健康技术在护理领域中的应用已经有了一定的发展,但在PICU患儿中的应用仍处于探索阶段^[55],面临诸多挑战,相关研究较少。(1)数字健康技术在算法、设备、程序等方面的异质性使其很难被比较和评估,缺乏在广泛人群中的验证,导致数字健康技术难以向临床实践转化。目前,有关数字健康技术在PICU患儿护理中应用的研究多为单中心小样本的研究,且以国外报告为主。未来可根据我国ICU患儿人群特点和需求,构建标准化数字健康干预框架,增加随机对照研究以评估、验证数字健康技术在PICU患儿护理中应用的有效性。(2)数字健康技术的易用性、可用性、成本及信息安全性等问题是临床推广过程中亟待解决的关键。数字健康技术在安全性和有效性方面存在不确定性,透明度和可解释性尚不理想,当前我国数字健康领域的法律建设有待完善。未来需紧密结合临床护理环节的具体需求、用户偏好及使用能力进行数字健康技术的研发,重视用户体验反馈,以提高技术载体的可用性及覆盖的广泛性。与成人患者相比,ICU患儿更为脆弱,为其提供医疗健康有关的工具和技术必须经过更为严格的检测。在数字健康技术完全融入PICU患儿护理实践之前,需坚持透明度、问责制和以人为本的价值观原则,努力解决伦理挑战和偏见。(3)在大多数研究中,数字健康技术可以直接或间接改善PICU患儿的健康结局,但其对患儿健康结局的远期影响尚不明确,结果评价方式多依赖于主观观察。未来可对PICU患儿的住院时间、再入院率、死亡率及家长照护负担等长期结局指标进行进一步评估,根据研究目的尝试探索建立客观评价标准。(4)数字健康技术应用的效果与真实情况之间可能发生偏倚。因此,PICU护士有必要参与数字化系统的研发和设计,全面地剖析其引起护理结果改变和误差的潜在机制,以提高数字健康技术的应用效果。这对PICU护士的信息能力提出了更高的要求。因此,护理管理者应重视对PICU护士护理信息学能力的培养,评估其护理信息学需求,设计、完善相关培训课程等,在信息学专家的指导下完成相应的干预培训,提供所需资源,以提高PICU护士的护理信息能力。

4 小结与展望

虽然目前数字健康技术在PICU患儿护理领域中的应用研究较为分散和局限,但积极成果显著,其不仅能助力病情监测、疾病预测,保障患者安全,还可实现连续性护理的可及性,满足患儿家长的照护需求,在PICU护理人才培养方面也大有裨益。目前,我国患儿及其家长对将数字健康技术应用于PICU患儿护理中的态度尚不明确,针对不同特征的患儿及其家长,数字健康技术对护理结局的影响有待探索,理论框架研究仍需完善。未来可针对不同年龄阶段、不同病情的患儿深入探讨数字健康技术具体作用机制,制订高效的干预方案。PICU护士应做好数字健康背景下的角色转变,提高自身信息胜任力与数字健康技术干预的适配度,成为PICU患儿护理领域数字健康技术的创造者和推动者。

参 考 文 献

- [1] World Health Organization. Draft global strategy on digital health 2020–2024[EB/OL].(2019-08)[2024-03-07]. <https://www.who.int/docs/default-source/documents/gsdh0c510c483a9a42b1834a8f4d276c6352>.
- [2] 中共中央 国务院. 中共中央 国务院印发《健康中国2030”规划纲要》[EB/OL].(2016-10-25)[2024-10-15].http://www.gov.cn/xinwen/2016-10/25/content_5124174.htm.
- [3] 张碧霞,沈南平,石松松,等. ICU患儿人工智能应用研究热点的可视化分析[J]. 中华急危重症护理杂志, 2023,4(10):898–903.
- [4] Sullivan BA, Beam K, Vesoulis ZA, et al. Transforming neonatal care with artificial intelligence: challenges, ethical consideration, and opportunities[J]. J Perinatol, 2024, 44(1): 1–11.
- [5] 张琳琪. 儿童危重症护理热点问题研究现状及展望[J]. 中国护理管理, 2020, 20(8): 1121–1126.
- [6] 王迪芬,刘 嶝. 人工智能促进医疗大数据助力人民健康保障——危重症实时预警是人工智能应用于临床医学的先锋[J]. 中华危重病急救医学, 2020, 32(10): 1155–1159.
- [7] 王 晶,李玲利,赵春林,等. 机器学习在构建护理风险预测模型中的研究进展[J]. 护士进修杂志, 2022, 37(23): 2167–2171.
- [8] Amigoni A, Conti G, Conio A, et al. Recommendations for analgesia and sedation in critically ill children admitted to intensive care unit[J]. J Anesth Analg Crit Care, 2022, 2(1): 9.

- [9] Goldsworthy A, Chawla J, Baumann O, et al. Extended reality use in paediatric intensive care: a scoping review[J]. *J Intensive Care Med*, 2023, 38(9): 856-877.
- [10] Badke CM, Krogh-Jespersen S, Flynn RM, et al. Virtual reality in the pediatric intensive care unit: patient emotional and physiologic responses[J]. *Front Digit Health*, 2022, 4: 867961.
- [11] Phillip L, Rice. 压力与健康[M]. 梁竹苑, 等译. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 5-14.
- [12] 赖丽珍, 谢梦婷, 杨小珍, 等. 虚拟现实技术缓解儿科重症监护室患儿分离性焦虑的效果研究[J]. *护理学杂志*, 2023, 38(14): 1-4.
- [13] Hoffman HG, Rodriguez RA, Gonzalez M, et al. Immersive virtual reality as an adjunctive non-opioid analgesic for pre-dominantly Latin American children with large severe burn wounds during burn wound cleaning in the intensive care unit: a pilot study[J]. *Front Hum Neurosci*, 2019, 13: 262.
- [14] Liang P, Xu H, Li SN, et al. Virtual reality-based sensory stimulation for pediatric disorders of consciousness: a pilot study[J]. *Frontiers in pediatrics*, 2022, 10: 879422.
- [15] Lai B, Powell M, Clement AG, et al. Examining the feasibility of early mobilization with virtual reality gaming using head-mounted display and adaptive software with adolescents in the pediatric intensive care unit: case report[J]. *JMIR Rehabil Assist Technol*, 2021, 8(2): e28210.
- [16] Abdulsatar F, Walker RG, Timmons BW, et al. Wii-Hab" in critically ill children: a pilot trial[J]. *J Pediatr Rehabil Med*, 2013, 6(4): 193-204.
- [17] Agasthya N, Penfil S, Slamon N. Virtual reality simulation for pediatric airway intubation readiness education[J]. *Cureus*, 2020, 12(12): e12059.
- [18] Kucher N, Larson JM, Fischer G, et al. 3-Dimensional nature-based therapeutics in pediatric patients with total pancreatectomy and islet auto-transplant[J]. *Complement Ther Med*, 2020, 48: 102249.
- [19] Yang SY, Oh YH. The effects of neonatal resuscitation gamification program using immersive virtual reality: a quasi-experimental study[J]. *Nurse Educ Today*, 2022, 117: 105464.
- [20] Farra S, Miller ET, Hodgson E, et al. Storyboard development for virtual reality simulation[J]. *Clin Simul Nurs*, 2016, 12(9): 392-399.
- [21] 姚玫贤, 吴桂丽, 卢晓霞, 等. NICU出院早产儿及照护者延续性护理网络平台应用的范围综述[J]. *中华现代护理杂志*, 2023, 29(1): 122-127.
- [22] 刘英, 陈霞, 向秋志玛, 等. ICU移动App的应用对先心病患儿母亲需求满足及分离焦虑的影响[J]. *护理学杂志*, 2019, 34(24): 8-10.
- [23] Miller K, Berentson G, Roberts H, et al. Examining early intervention referral patterns in neonatal intensive care unit follow up clinics using telemedicine during COVID-19[J]. *Early Hum Dev*, 2022, 172: 105631.
- [24] Sunshine IL, Kysh L, Lakshmanan A. Mobile applications to support parents in the transition from neonatal intensive care unit to home: a narrative review[J]. *mHealth*, 2023, 9: 27.
- [25] Voss F, Brechmann N, Lyra S, et al. Multi-modal body part segmentation of infants using deep learning[J]. *Biomed Eng Online*, 2023, 22(1): 28.
- [26] Rao A, Eskandar-Afshari F, Weiner Y, et al. Clinical study of continuous non-invasive blood pressure monitoring in neonates[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(7): 3690.
- [27] El Hajj C, Kyriacou PA. Recurrent neural network models for blood pressure monitoring using PPG morphological features[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2021, 2021: 1865-1868.
- [28] Almeida VG, Vieira J, Santos P, et al. Machine learning techniques for arterial pressure waveform analysis[J]. *J Pers Med*, 2013, 3(2): 82-101.
- [29] Chung HU, Rwei AY, Hourlier-Fargette A, et al. Skin-interfaced biosensors for advanced wireless physiological monitoring in neonatal and pediatric intensive-care units[J]. *Nat Med*, 2020, 26(3): 418-429.
- [30] Ervural S, Ceylan M. Convolutional neural networks-based approach to detect neonatal respiratory system anomalies with limited thermal image[J]. *Trait Signal*, 2021, 38(2): 437-442.
- [31] Barlow SM, Liao CX, Lee J, et al. Spectral features of non-nutritive suck dynamics in extremely preterm infants[J]. *Pediatr Med*, 2023, 6: 23.
- [32] Yalçın N, Kaşıkçı M, Çelik HT, et al. Development and validation of machine learning-based clinical decision support tool for identifying malnutrition in NICU patients[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 5227.
- [33] Letzkus L, Pulido JV, Adeyemo A, et al. Machine learning approaches to evaluate infants' general movements in the writhing stage-a pilot study[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 4522.
- [34] Manigault AW, Sheinkopf SJ, Carter BS, et al. Acoustic cry characteristics in preterm infants and developmental and behavioral outcomes at 2 years of age[J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6(2): e2254151.

- [35] Yigit D, Acikgoz A. Evaluation of comfort behavior levels of newborn by artificial intelligence techniques [J]. *J Perinat Neonatal Nurs*, 2024, 38(3): E38-E45.
- [36] Zamzmi G, Paul R, Salekin MS, et al. Convolutional neural networks for neonatal pain assessment [J]. *IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science*, 2019, 1(3): 192-200.
- [37] Buzuti L, Heideirich T, Barros M, et al. Neonatal pain assessment from facial expression using deep neural networks [C]// *Anais do XVI Workshop de Visão Computacional*. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020: 87-92.
- [38] Salekin MS, Mouton PR, Zamzmi G, et al. Future roles of artificial intelligence in early pain management of newborns [J]. *Paediatr Neonatal Pain*, 2021, 3(3): 134-145.
- [39] Fairchild KD, Schelonka RL, Kaufman DA, et al. Septicemia mortality reduction in neonates in a heart rate characteristics monitoring trial [J]. *Pediatr Res*, 2013, 74(5): 570-575.
- [40] Kausch SL, Brandberg JG, Qiu JX, et al. Cardiorespiratory signature of neonatal sepsis: development and validation of prediction models in 3 NICUs [J]. *Pediatr Res*, 2023, 93(7): 1913-1921.
- [41] Long D, Gibbons K, Le Brocque R, et al. Midazolam exposure in the paediatric intensive care unit predicts acute post-traumatic stress symptoms in children [J]. *Aust Crit Care*, 2022, 35(4): 408-414.
- [42] Gilholm P, Gibbons K, Brüningk S, et al. Machine learning to predict poor school performance in paediatric survivors of intensive care: a population-based cohort study [J]. *Intensive Care Med*, 2023, 49(7): 785-795.
- [43] Smith MB, Killien EY, Dervan LA, et al. The association of severe pain experienced in the pediatric intensive care unit and postdischarge health-related quality of life: a retrospective cohort study [J]. *Paediatr Anaesth*, 2022, 32(8): 899-906.
- [44] Knoetze R, Lachman A, Moxley K, et al. Caregiver anxiety and the association with acute postoperative pain in children undergoing elective ambulatory surgery in a lower-middle-income country setting [J]. *Paediatr Anaesth*, 2020, 30(9): 990-997.
- [45] Badke CM, Essner BS, O'Connell M, et al. An innovative virtual reality experience in the PICU: a pilot study [J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2019, 20(6): e283-e286.
- [46] Colt HG, Crawford SW, Galbraith O 3rd. Virtual reality bronchoscopy simulation: a revolution in procedural training [J]. *Chest*, 2001, 120(4): 1333-1339.
- [47] Nijland JWHM, Veling W, Lestestuiver BP, et al. Virtual reality relaxation for reducing perceived stress of intensive care nurses during the COVID-19 pandemic [J]. *Front Psychol*, 2021, 12: 706527.
- [48] Mi Y, Jon S Mann. Development of Virtual Reality Simulation Program for High-risk Neonatal Infection Control Education [J]. *Clin Simul Nurs*, 2021, 50: 19-26.
- [49] Gohman T, Nisar H, Gupta A, et al. Development and usability of a virtual reality umbilical venous catheter placement simulator [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2024, 19(5): 881-889.
- [50] Ryu J, Yu M. Virtual reality simulation for advanced infection control education in neonatal intensive care units: focusing on the prevention of central line-associated bloodstream infections and ventilator-associated infections [J]. *Healthcare (Basel, Switzerland)*, 2023, 11(16): 2296.
- [51] 赵岳, 张晓楠, 卢琦, 等. 连续护理及其相关术语的概念分析 [J]. *护理研究*, 2022, 36(2): 235-240.
- [52] 季润琳, 陆群峰, 杨利灵, 等. 危重症患儿 ICU 过渡期护理的研究现状 [J]. *护理学杂志*, 2022, 37(6): 21-24.
- [53] de Sonnaville ESV, Vermeule J, Oostra K, et al. Predicting long-term neurocognitive outcome after pediatric intensive care unit admission for bronchiolitis-preliminary exploration of the potential of machine learning [J]. *Eur J Pediatr*, 2024, 183(1): 471-482.
- [54] Phagdol T, Nayak BS, Lewis LE, et al. Designing a mobile health intervention for preterm home care: application of conceptual framework [J]. *Public Health Nurs (1931)*, 2022, 39(1): 296-302.
- [55] Adegboro CO, Choudhury A, Asan O, et al. Artificial intelligence to improve health outcomes in the NICU and PICU: a systematic review [J]. *Hosp Pediatr*, 2022, 12(1): 93-110.

(收稿日期: 2025-01-08 修回日期: 2025-03-11)