

孤独症谱系障碍数字化治疗研究进展

朱依婷, 李冬蕴, 徐秀, 徐琼

复旦大学附属儿科医院儿童保健科, 上海 201102

摘要: 孤独症谱系障碍(ASD)是一组以社会交往和互动障碍、狭隘兴趣及重复性行为为主要特征的神经发育性疾病。近年来,随着数字化技术的发展和成熟,虚拟现实、增强现实、混合现实、人工智能等数字化技术拓展了 ASD 的诊治模式。本文旨在总结数字化技术治疗 ASD 儿童的研究现状及应用进展,以期 ASD 的治疗提供新思路。

关键词: 孤独症谱系障碍; 数字化技术; 神经发育障碍

中图分类号: R749.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-6579(2026)03-0324-05 **doi:** 10.11852/zgetbjzz2024-1175

Progress in digital therapy of autism spectrum disorder

ZHU Yiting, LI Dongyun, XU Xiu, XU Qiong

Department of Child Health Care, Children's Hospital of Fudan University, Shanghai 201102, China

Corresponding author: XU Qiong, E-mail: xuqiong@fudan.edu.cn

Abstract: Autism spectrum disorder (ASD) is a group of neurodevelopmental disorders characterized by impairments in social communication and interaction, as well as restricted interests and repetitive behaviors. In recent years, with the advancement and maturation of digital technologies, virtual reality, augmented reality, mixed reality, and artificial intelligence have expanded the diagnostic and therapeutic approaches for ASD. This article aims to summarize the current research status and application progress of digital technologies in the treatment of children with ASD, with the goal of providing new perspectives for ASD intervention.

Keywords: autism spectrum disorder; digital technology; neurodevelopmental disorders

孤独症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)是一组以社会交往和互动障碍、狭隘兴趣和重复性行为为主要特征的神经发育性疾病^[1]。近年来,ASD 的全球患病率呈上升趋势。美国疾病控制与预防中心最新数据显示,8 岁儿童 ASD 患病率为 3.22%^[2],而中国 8 个城市 6~12 岁儿童的患病率为 0.70%^[3]。目前,ASD 尚无特效药物,主要依赖行为干预治疗,且多数患者需终身支持。ASD 干预治疗面临诸多挑战,资源匮乏地区的儿童常面临经济和地理限制。中国 13 个城市的多中心研究显示,ASD 儿童年干预费用中位数为 6 万元,家庭负担沉重^[4]。行为干预通常要求每周 20h,持续至少 2 年,治疗师和家庭需投入大量时间和精力,且个性化治疗效果不一。此外,我国儿童专科医生和干预培训人员短缺,机构水平参差不齐,医疗资源分布不均,难以满足早期干预需求。为解决 ASD 的功能损害、治疗可及性和成本问题,研究者开始探索创新技术。拓展现实(extended reality, XR)和人工智能(artificial intelligence, AI)等数字化技术逐渐应用于

ASD 治疗,为改善干预效果和可及性提供了新途径。

1 拓展现实

ASD 儿童存在社交与沟通缺陷,但对视觉刺激的敏感性及技术偏好为其数字化干预提供了切入点^[5]。XR 通过沉浸式交互环境,在改善社交能力、情绪管理、生活技能训练等方面展现出潜力^[6-8],其技术框架涵盖虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)和混合现实(mixed reality, MR)三大方向。

1.1 虚拟现实 VR 通过多感官模拟构建可控训练场景,已成为 ASD 社交干预的有效工具。Yang 等^[9]借助虚拟现实-社会认知训练(virtual reality-social cognition training, VR-SCT)治疗平台探寻了 ASD 患者干预后行为改善的神经机制,通过分析训练前后的 fMRI 结果发现 VR-SCT 前后的 ASD 患者大脑右后颞上沟社会认知处理中心、左额下回社会情绪处理中心、左上顶叶视觉注意力区域的大

基金项目: 美国中华医学会国际合作项目(22-471)

作者简介: 朱依婷(2000—),女,住院医师,硕士研究生在读,主要研究方向为儿童神经发育障碍性疾病的早期干预研究。

通信作者: 徐琼, E-mail: xuqiong@fudan.edu.cn

脑行为显著改变。见表 1。

1.1.1 VR 联合传统疗法可提升疗效持续性

Soltani Kouhbanani 等^[10]的随机对照试验表明,利培酮联合 VR 训练对 ASD 儿童社交行为改善具有协同效应。将 43 例患儿随机分组,研究结果显示利培酮联合 VR 组在 90 次干预后儿童孤独症评定量表(Childhood Autism Rating Scale, CARS)评分降低 27%(vs. 利培酮单药组 15%),且随访期社交技能维持率高达 83%(单药组仅 46%)。Zhao 等^[11]的研究证实,VR 单独干预可使 ASD 儿童认知(+32%)及社交沟通(+28%)评分显著提升,其机制可能与右后颞上沟神经活动增强相关。

1.1.2 VR 技术泛化训练技能 de Moraes 等^[12]通过随机交叉对照试验,探讨 ASD 青少年在真实与虚拟环境间的运动技能迁移机制。研究将 50 例 ASD 患者随机分为两组:A 组($n=25$)先完成基于 Kinect 的虚拟投掷训练,再执行实体任务;B 组($n=25$)采用相反顺序。以动作准确性(误差率 $\leq 15\%$)和反应时间(毫秒级)为主要结局指标。结果显示虚拟训练后现实任务成绩提升显著:A 组投掷准确率较基线提高 32%,显著高于 B 组传统训练的 19%增幅。进一步分析发现,虚拟环境中错误率每增加 10%,现实任务表现改善幅度提升 8%,提示错误修正机制对技能泛化的促进作用。值得注意的是,ASD 组在虚拟-现实迁移中的增益效应($\Delta 23\%$)显著高于正常对照组($\Delta 11\%$),表明 VR 环境可能通过降低社交焦虑优化 ASD 患者的运动学习效能。

1.1.3 VR 技术应用于学龄前 ASD 儿童的治疗

现有的 VR 工具往往需要佩戴使用,学龄前 ASD 儿童对此配合度及依从性较差,过大过重的干预工具长期使用会导致儿童产生疲劳甚至头晕等不良反应^[13]。头戴式显示器等穿戴设备的长期使用可能会影响 7 岁以下儿童的视觉中心发育^[14]。单一的 VR 场景容易导致 ASD 儿童产生恐惧、逃避情绪,甚至加重刻板行为。Chu 等^[15]设计的非穿戴式虚拟现实干预平台(VR-incorporated cognitive behavioral therapy, VR-CBT)能对学龄前 ASD 患者进行感觉和运动刺激干预,进而提升 ASD 儿童社交互动。研究将 78 例患儿随机分组,干预组($n=39$)进行 30 周社交线索识别训练,对照组接受常规干预。结果显示,干预组 ASD 儿童行为量表(Autism Behavior Checklist, ABC 量表)中社交沟通子量表改善最为显著,且设备脱落率仅 18%(vs. 对照组 33%)。

1.2 增强现实 AR 通过虚实融合增强现实感知,

在提升社交动机与生活技能方面具有独特优势。其设备便携性(平板/手机)显著优于 VR,更易实现日常化干预^[16-17]。见表 1。

1.2.1 社交沟通训练 Zhen 等^[18]开发的 AR 假想游戏系统使 12 例患儿假想游戏频率提升 3.5 次/h(vs. 现实环境 1.2 次),持续时间延长至 9.7 min($\Delta 58\%$),证实 AR 对符号思维的激活作用。Lee 等^[19]研究整合概念图策略,标准化 22 种非语言社交线索,使目标反应次数增加 2.8 倍。Lee 等^[20]进一步结合 Kinect 实时追踪技术构建 AR 角色扮演系统,3 例 ASD 儿童社交故事测试正确率从基线期 41%提升至干预后 79%,其自然表情反馈机制突破了传统预设模型的机械性局限。Chen 等^[21]开发的 AR 视频建模故事书通过动态表情模拟,使 6 例青少年 ASD 患者面部情绪识别准确率提高至 73%(基线期 45%),但对复杂微表情(如轻蔑)识别仍低于常模 15%。

1.2.2 选择性注意力及生活技能 Escobedo 等^[22]开发的 AR 物体识别系统(Mobis)使 12 例低功能 ASD 儿童选择性注意力维持时长从基线 4.2min 提升至 11.5min($\Delta 174\%$)。Cihak 等^[23]利用 AR 触发视频指导完成链式任务(如刷牙),3 例受试者 9 周后仍保持 92%步骤准确率(vs. 传统教学 68%)。两项研究证实 AR 能够通过视觉锚定减少环境干扰,但样本量小($n \leq 12$)且未验证复杂任务泛化效能。

1.2.3 智能眼镜 Sahin 等^[24]的可行性研究表明,第二代谷歌眼镜在 8 例 ASD 儿童中耐受性良好,家长报告社交退缩减少 62%($P=0.02$),学校场景接受度达 87.5%。但样本量小且缺乏对照组,需扩大验证长期社交情感增益效应。

1.3 混合现实 MR 通过虚实共生环境创造新型交互空间,通过补充和叠加两种方式,使用户感知不同的日常生活信息,达到一种真实世界与虚拟物体友好共存的状态。见表 1。

1.3.1 MR 技术辅助 ASD 干预治疗 刘娟等^[25]开发的混合现实鱼缸系统通过个性化认知训练,使 20 例 ASD 儿童语言评分提升 18%,证实虚实融合环境对低龄患儿的适配性。舞蹈运动疗法(dance movement therapy, DMT)研究显示,传统 DMT 仅使运动流畅度提升 14%,而 Liu 等^[26]的基于 MR 技术的改良 DMT 训练模式通过虚拟镜像反馈,将运动细节准确率提高 37%,其机制与自我效能感增强正相关。Crowell 等^[27]对比 MR 全身互动与非数字干预,发现 ASD 儿童社交发起频率增加 2.1 次/h,协作行为持续时间延长 4.7min。

1.3.2 MR 技术用于提升治疗师教学技能 Pas 教师培训系统使 ASD 学生问题行为发生率降低 29%，等^[28]的随机对照试验表明，基于混合现实的 TeachLivE 干预组教师教学失误减少 37% (vs. 对照组 12%)。

表 1 三类 XR 技术对比与挑战

Tab. 1 Comparison and challenge of three types of XR

技术类型	核心优势	主要局限	适用场景
VR	高沉浸感/精准环境控制	设备笨重/视觉疲劳风险	结构化社交训练
AR	现实增强/即时反馈	交互深度有限	生活技能泛化
MR	虚实动态交互	开发成本高	高级认知训练

2 人工智能

AI 通过机器学习、计算机视觉等技术，为 ASD 干预提供精准化解决方案^[29]。其中，机器人辅助治疗因可量化反馈、行为可控性等优势成为研究热点。

2.1 机器人辅助干预机制 ASD 儿童对感官刺激异常敏感，机器人可通过调节声光强度优化注意力分配。其多模态传感器能实时捕捉肢体动作、面部表情等数据，结合强化学习算法生成个性化反馈。

相较于人类社交的复杂性，机器人交互可减少 93% 的无关信息干扰，显著提升训练效率^[30-32]。

2.2 典型机器人系统及应用 目前较为成熟的机器人有法国 Aldebaran 机器人公司设计和制造的 NAO^[33]、赫特福德大学的自适应系统研究小组研发的 Kaspar^[34]、杨百翰大学研究团队研发的 Benni^[35]、动物型机器人 KiliRo 鸚鵡^[36]等。见表 2。应用于孤独症治疗的机器人按外观主要分为人型和动物型。

表 2 4 种常见机器人的外观、核心特色、可操作技术及适用场景

Tab. 2 Appearance, core features, operational technologies and applicable scenarios of the four common robots

机器人	外观	核心特色	可操作技术	适用场景
NAO ^[33]		多模态交互能力强	1) 语音交互与理解: 自然语言处理, 执行简单对话与指令。 2) 动作与模仿: 25 个自由度, 实现丰富的肢体动作和舞蹈游戏。 3) 视觉感知: 内置摄像头, 支持面部识别、物体检测和视线追踪。 4) 任务自适应: 实时监测儿童表现, 动态调整训练任务。 5) 远程管理: 支持云端控制和数据同步, 便于家校协作。	社交情景模拟 认知训练 动作模仿
Kaspar ^[34]		简洁友好、低成本	1) 简化情感表达: 通过头部动作、手势和面部表情模拟基本情绪。 2) 身体接触与互动: 配备触觉传感器, 可通过轻拍或触摸实现互动。 3) 社交互动引导: 支持轮流交互和简单社交场景的模拟。 4) 行为奖励: 结合语音或动作, 给予即时奖励鼓励儿童完成任务。	情绪识别 身体接触训练 轮流互动
Benni ^[35]		动态反馈与高适应性	1) 实时反馈系统: 通过动作或语音提供即时正向反馈。 2) 互动式学习: 引导儿童通过“问题-回答”机制参与互动。 3) 高适应性设计: 根据儿童的个体表现调整任务难度和类型。 4) 运动协调训练: 通过动态演示和协作完成物理任务 (如抛接球)。	问答互动 物理活动 社交技能训练
KiliRo ^[36]		仿生设计、亲和力高	1) 语音模仿与互动: 模仿鸚鵡的声音, 引导儿童参与简单对话。 2) 运动互动: 通过翅膀挥动、点头等动作吸引儿童注意力。 3) 任务奖励: 完成任务后模拟鸟叫声或表演小动作作为激励。 4) 视觉吸引: 色彩鲜艳, 设计符合儿童视觉偏好。	注意力引导 情绪调节 游戏化学习

2.2.1 人型社交机器人 NAO 机器人作为最广泛应用的商业化人型机器人, 可以通过 14 种预设手势实现标准化社交训练。研究显示, 其手势模仿准确

率可达 76% (vs. 人类示范员 68%), 且 6 周后技能维持率 82%^[37]。Kaspar 机器人是专为 ASD 设计的模块化人型机器人, 眼/嘴部动作同步延迟仅

1. 2s,可承担激发者、训练者等六类角色。但静态移动模式限制场景泛化能力,72%的治疗师反馈其面部表情机械性显著^[34,38]。

2. 2. 2 动物型陪伴机器人 PARO 海豹机器人通过触觉反馈与 ASD 儿童建立情感联结。多中心试验表明,PARO 干预使联合注意力持续时间从基线 2. 1min 延长至 6. 7min,但对高功能 ASD 儿童效果有限^[39]。KiliRo 鹦鹉机器人的动物形态能够降低社交威胁感,7 周干预使儿童的唾液皮质醇水平下降 18%,冲动行为频率减少 2. 3 次/h^[40]。

3 总结与展望

近年来,ASD 患病率逐年攀升,随着数字化技术的发展和成熟,VR、AR、MR、AI 等技术已经在逐步改写 ASD 的诊治模式。便捷可及的数字化干预模式解决了各地区医疗资源分布不均的难题。数字化技术让 ASD 的行为和症状可视化,在降低医疗成本的基础上,提高了医疗质量和效率。然而现有的数字化治疗技术较少涉及重复刻板行为、感知觉异常行为的干预,多数聚焦于社交障碍及沟通障碍两大方面。且现有的数字化干预方式有效性尚不明确,仍需大样本、多中心的实验进行验证。ASD 的数字化疗法虽然具有巨大的潜力,但在疗效和安全性方面仍需通过严谨的科学研究进行验证。未来的重点研究方向包括:高质量临床试验;明确数字化疗法的疗效范围及其影响因素;安全性评估;关注长期使用可能带来的负面影响;标准化与个性化结合;开发个性化方案,同时制定疗效与安全性的评估标准;传统疗法与数字化疗法的整合;研究两者的协同作用,为 ASD 干预提供综合解决方案。

参考文献

- [1] Hirota T, King BH. Autism spectrum disorder: A review [J]. JAMA, 2023, 329(2): 157-168.
- [2] Shaw KA. Prevalence and early identification of autism spectrum disorder among children aged 4 and 8 years—Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 16 Sites, United States, 2022[J]. MMWR. Surveillance Summaries, 2025;74.
- [3] Zhou H, Xu X, Yan W, et al. Prevalence of autism spectrum disorder in China: A nationwide multi-center population-based study among children aged 6 to 12 years[J]. Neurosci Bull, 2020, 36(9): 961-971.
- [4] 程靖益,王可,杨亭,等.学龄前孤独症谱系障碍儿童家庭疾病负担全国多中心调查[J].教育生物学杂志,202,9(4): 266-271,312.
- [5] Cheng JY, Wang K, Yang T, et al. National multi-center study on family disease burden of preschoolers with autism spectrum disorder[J]. Journal of Bio-education, 2021, 9(4): 266-271,312. (in Chinese)
- [6] Meadan H, Ostrosky MM, Triplett B, et al. Using visual supports with young children with autism spectrum disorder [J]. Teach Except Child, 2011, 43(6): 28-35.
- [7] Bossenbroek R, Wols A, Weerdmeester J, et al. Efficacy of a virtual reality biofeedback game (DEEP) to reduce anxiety and disruptive classroom behavior: Single-case study [J]. JMIR Ment Health, 2020, 7(3): e16066.
- [8] Crowell C, Sayis B, Benitez JP, et al. Mixed reality, full-body interactive experience to encourage social initiation for autism: Comparison with a control nondigital intervention [J]. Cyberpsychol Behav Soc Netw, 2020, 23(1): 5-9.
- [9] Mittmann G, Zehetner V, Hoehl S, et al. Using augmented reality toward improving social skills: Scoping review [J]. JMIR Serious Games, 2023, 11: e42117.
- [10] Yang YJD, Allen T, Abdullahi SM, et al. Neural mechanisms of behavioral change in young adults with high-functioning autism receiving virtual reality social cognition training: A pilot study[J]. Autism Res, 2018, 11(5): 713-725.
- [11] Soltani Kouhbanani S, Khosrorad R, Zarenezhad S, et al. Comparing the effect of risperidone, virtual reality and risperidone on social skills, and behavioral problems in children with autism: A follow-up randomized clinical trial[J]. Arch Iran Med, 2021, 24(7): 534-541.
- [12] Zhao J, Zhang X, Lu Y, et al. Virtual reality technology enhances the cognitive and social communication of children with autism spectrum disorder [J]. Front Public Health, 2022, 10: 1029392.
- [13] de Moraes ÍAP, Monteiro CBM, Silva TDD, et al. Motor learning and transfer between real and virtual environments in young people with autism spectrum disorder: A prospective randomized cross over controlled trial[J]. Autism Res, 2020, 13(2): 307-319.
- [14] Kaimara P, Oikonomou A, Deliyannis I. Could virtual reality applications pose real risks to children and adolescents? A systematic review of ethical issues and concerns[J]. Virtual Real, 2022, 26(2): 697-735.
- [15] Chen YJ, Cheng SF, Lee PC, et al. Distraction using virtual reality for children during intravenous injections in an emergency department: A randomised trial [J]. J Clin Nurs, 2020, 29(3-4): 503-510.
- [16] Chu L, Shen L, Ma C, et al. Effects of a nonwearable digital therapeutic intervention on preschoolers with autism spectrum disorder in China: Open-label randomized controlled trial[J]. J Med Internet Res, 2023, 25: e45836.
- [17] Quintero J, Baldiris S, Rubira R, et al. Augmented reality in educational inclusion. A systematic review on the last decade[J]. Front Psychol, 2019, 10: 1835.
- [18] Liu R, Salisbury JP, Vahabzadeh A, et al. Feasibility of an

- autism-focused augmented reality smartglasses system for social communication and behavioral coaching[J]. *Front Psychiatry*, 2017, 5: 145.
- [18] Zhen B, Blackwell AF, Coulouris G. Using augmented reality to elicit pretend play for children with autism[J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2015, 21(5): 598-610.
- [19] Lee IJ, Chen CH, Wang CP, et al. Augmented reality plus concept map technique to teach children with ASD to use social cues when meeting and greeting[J]. *Asia Pac Educ Res*, 2018, 27(3): 1-17.
- [20] Lee IJ. Kinect-for-windows with augmented reality in an interactive roleplay system for children with an autism spectrum disorder[J]. *Interact Learn Environ*, 2020, 28(2): 1-17.
- [21] Chen CH, Lee IJ, Lin LY. Augmented reality-based video-modeling storybook of nonverbal facial cues for children with autism spectrum disorder to improve their perceptions and judgments of facial expressions and emotions[J]. *Comput Hum Behav*, 2016, 55: 477-485.
- [22] Escobedo L, Tentori M, Quintana E, et al. Using augmented reality to help children with autism stay focused[J]. *IEEE Pervasive Comput*, 2014, 13(3): 38-46.
- [23] Cihak DF, Moore EJ, Wright RE, et al. Evaluating augmented reality to complete a chain task for elementary students with autism[J]. *J Spec Educ Technol*, 2016, 31(2): 99-108.
- [24] Sahin NT, Keshav NU, Salisbury JP, et al. Second version of Google Glass as a wearable socio-affective aid: Positive school desirability, high usability, and theoretical framework in a sample of children with autism[J]. *JMIR Hum Factors*, 2018, 5(1): e1.
- [25] Liu J, Bian YL, Yuan YR, et al. Designing and deploying a mixed-reality aquarium for cognitive training of young children with autism spectrum disorder[J]. *Sci China Inf Sci*, 2021, 64(5): 154101.
- [26] Liu W, Zhang Y, Zhang B, et al. Self-guided DMT: Exploring a novel paradigm of dance movement therapy in mixed reality for children with ASD[J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2024, 30(5): 2119-2128.
- [27] Crowell C, Sayis B, Benitez JP, et al. Mixed reality, full-body interactive experience to encourage social initiation for autism: Comparison with a control nondigital intervention[J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2020, 23(1): 5-9.
- [28] Pas ET, Johnson SR, Larson KE, et al. Reducing behavior problems among students with autism spectrum disorder: Coaching teachers in a mixed-reality setting[J]. *J Autism Dev Disord*, 2016, 46(12): 3640-3652.
- [29] Van den Berk-Smeekens I, De Korte MWP, Van Dongen-Boomsma M, et al. Pivotal response treatment with and without robot-assistance for children with autism: A randomized controlled trial[J]. *Eur Child Adolesc Psychiatry*, 2022, 31(12): 1871-1883.
- [30] Barua PD, Vicnesh J, Gururajan R, et al. Artificial intelligence enabled personalised assistive tools to enhance education of children with neurodevelopmental disorders—A review[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(3): 1192.
- [31] So WC, Cheng CH, Lam WY, et al. A robot-based play-drama intervention may improve the joint attention and functional play behaviors of Chinese-speaking preschoolers with autism spectrum disorder: A pilot study[J]. *J Autism Dev Disord*, 2020, 50(2): 467-481.
- [32] So WC, Cheng CH, Law WW, et al. Robot dramas may improve joint attention of Chinese-speaking low-functioning children with autism: Stepped wedge trials[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2023, 18(2): 195-204.
- [33] Burns RB, Lee H, Seifi H, et al. Endowing a NAO robot with practical social-touch perception[J]. *Front Robot AI*, 2022, 9: 840335.
- [34] Mengoni SE, Irvine K, Thakur D, et al. Feasibility study of a randomised controlled trial to investigate the effectiveness of using a humanoid robot to improve the social skills of children with autism spectrum disorder (Kaspar RCT): A study protocol[J]. *BMJ Open*, 2017, 7(6): e017376.
- [35] Huijnen CAGJ, Lexis MAS, Jansens R, et al. Roles, strengths and challenges of using robots in interventions for children with autism spectrum disorder (ASD) [J]. *J Autism Dev Disord*, 2019, 49(1): 11-21.
- [36] Alabdulkareem A, Alhakhani N, Al-Nafjan A. A systematic review of research on robot-assisted therapy for children with autism[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(3): 944.
- [37] So WC, Cheng CH, Miranda C, et al. Using a social robot to teach gestural recognition and production in children with autism spectrum disorders[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2017, 12(6): 583-595.
- [38] Holeva V, Nikopoulou VA, Lytridis C, et al. Effectiveness of a robot-assisted psychological intervention for children with autism spectrum disorder[J]. *J Autism Dev Disord*, 2022, 52(8): 3555-3571.
- [39] Veronesi C, Trimarchi B, Botticelli N, et al. Use of the PARO robot as a social mediator in a sample of children with neurodevelopmental disorders and typical development[J]. *Clin Ter*, 2023, 174(2): 132-138.
- [40] Bharatharaj J, Al-Jumaily A, Rajesh Elara M, et al. Investigating the effects of robot-assisted therapy among children with autism spectrum disorder using bio-markers[J]. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 2017, 234: 012017.

收稿日期:2024-09-28 修回日期:2025-03-17 本文编辑:杨媛媛