

脑卒中智能康复技术应用专家共识*

执笔:

钰 皓
张 青
谢 山
江 鑫
刘 鑫

顾问:

谢欲晓
何成奇
喻洪流
季林红

专家组成员(按姓氏拼音顺序):

白定群
窦维蓓
高 硕
何 竞
李 翀
李建华
吕泽平
孟巧玲
乔鸿飞
邵珠峰
宋海新
隋晓红
万春晓
王 波
王继先
王卫群
王佳星
魏 全
闫 铮
杨 斌
杨国法
杨梦璇
尹梓名
袁 华
翟晓雪
周 华

秘书组成员(按姓氏拼音顺序):

李 慧
倪学翊
谢瑞谋
郑 爽北京清华长庚医院 康复医学科
中国康复研究中心 康复医学科
上海交通大学医学院附属瑞金医院 康复医学科
中日友好医院 康复医学科
四川大学华西医院 康复医学中心中日友好医院 康复医学科
四川大学华西医院 康复医学中心
上海理工大学 智能康复工程研究院
清华大学 机械工程系重庆医科大学附属第一医院 康复医学科
清华大学 电子工程系
北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院
四川大学华西医院 康复医学中心
清华大学 医学院
浙江大学医学院附属邵逸夫医院 康复医学科
国家康复辅具研究中心附属康复医院 神经内科
上海理工大学 健康科学与工程学院
西安交通大学第二附属医院 康复医学科
清华大学 机械工程系
浙江大学医学院附属邵逸夫医院 康复医学科
上海交通大学 生物医学工程学院
天津医科大学总医院 康复医学科
四川大学华西医院 重症医学科
上海交通大学医学院附属瑞金医院 康复医学科
中国科学院自动化研究所 多模态人工智能系统全国重点实验室
中国科学院自动化研究所 多模态人工智能系统全国重点实验室
四川大学华西医院 康复医学中心
华侨大学 信息科学与工程学院
清华大学 精准医学研究院智慧健康中心
山西省晋城市人民医院 康复医学科
四川大学华西医院 康复医学中心
上海理工大学 健康科学与工程学院
空军军医大学西京医院 康复医学科
北京清华长庚医院 康复医学科
北京清华长庚医院 重症医学科中国康复研究中心 康复医学科
北京清华长庚医院 康复医学科
北京清华长庚医院 康复医学科
中日友好医院 康复医学科

摘要

目的:随着人工智能与信息技术的快速发展,智能康复技术在脑卒中康复中的应用逐渐受到关注。制定脑卒中智能康复技术应用专家共识,为脑卒中患者的智能康复技术应用提供指导意见。

方法:共识由科技部重点研发计划(2022YFC3601100)项目组牵头制定,联合多家临床机构与科研单位,组建包括康复医学、神经病学、人工智能等多学科专家组。基于循证医学原则,采用牛津大学循证医学中心新五级证据标准,通过德尔菲法两轮匿名问卷收集专家意见,并经顾问组审阅与修改,形成最终共识文本。

结果:最终共识纳入18项条目,包括智能康复评定技术4项、治疗技术14项,涵盖运动、认知、言语、感觉等功能障碍的康复评估与干预。主要技术包括康复机器人、虚拟现实、脑机接口、神经调控、可穿戴设备、人工智能预测模型及

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2025.09.001

*基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3601100,2022YFC3601105);国家重点专科建设项目(XKB2023A2001)

第一作者简介:潘钰,女,主任医师;收稿日期:2024-10-28

数字疗法等,并分别明确其循证等级与推荐强度。

结论:本共识为智能康复技术在脑卒中患者中的规范化应用提供循证依据和实践指导,有助于提升康复质量与效率,推动技术在临床中的广泛推广与发展。

关键词 脑卒中;智能康复技术;康复评定;康复治疗;专家共识

中图分类号:R493,R743.2 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2025)-09-1289-09

1 总则

脑卒中是一种全球范围内高发的疾病,患者数量逐年增加。脑卒中后的康复是一个复杂而长期的过程,需综合运用多种治疗手段和方法。近年来,随着信息技术和人工智能的迅猛发展,智能康复技术(intelligent rehabilitation technologies, IRTs)在脑卒中康复中的应用受到越来越多的关注。IRTs通常被定义为结合了人工智能、机器人技术和辅助技术等多种先进技术,用于支持和增强神经康复过程的设备或系统,其主要包括脑机接口技术、机器人辅助康复技术、虚拟现实技术、神经调控技术、可穿戴设备,以及人工智能与机器学习等关键技术^[1],这些技术旨在通过数据驱动的评估、个性化的治疗方案,以及实时反馈来优化患者的康复效果。尽管智能康复技术具有广阔的应用前景,但其实际应用仍面临诸多挑战,例如缺乏标准化的操作指南、不同技术之间的兼容性问题,以及医患对技术应用的认知不足等。因此,制定专家共识对于解决这些挑战、推动技术的规范化应用具有重要意义。将为智能康复技术在脑卒中患者中的应用提供指导,以提高治疗效果并降低医疗风险。

2 共识制订方法

2.1 专家组成

本共识主要由北京清华长庚医院牵头,中国康复研究中心、上海交通大学医学院附属瑞金医院、中日友好医院、四川大学华西医院等临床医疗机构及中国科学院自动化研究所、清华大学、北京航空航天大学、上海理工大学等高校研究单位参与,组织由康复医学、重症医学、神经病学、人工智能、康复工程等专业,以及方法学专家组成的多学科专家组完成。专家选择遵循专业性、权威性和多学科的原则,包括执笔专家、顾问专家组、共识组和秘书组等,其中,执笔专家及顾问专家均具有高级职称。

2.2 共识制订过程

2024年4月召开启动会,讨论《脑卒中智能康复技术应用专家共识》的目的、意义及内容。专家组成员参考国内外文献,结合国内临床实际情况,以循证医学为基础,于2024年8月形成初稿,包含18项条目,内容涉及脑卒中智能康复评定与治疗,其中智能康复评定技术4条,智能康复治疗技术14条。

证据等级由方法学专家根据牛津大学循证医学中心(Oxford Centre for Evidence Based Medicine,OCEBM)关于文献类型的“新五级”标准^[2]来评价(见表1)。推荐强度由专家组评估,推荐强度分为“强”“中等”“弱”三类。“强”通常指基于高级别证据的建议,临床行为与预期结果之间存在高度一致性;“弱”则通常指基于低级别证据,临床行为与预期结果之间存在较大不确定性;“中等”则介于两者之间,基于中等级别证据,临床行为与预期结果之间具有一定的关联性^[2]。

本共识采用德尔菲法以问卷形式匿名征集意见,进行整理、归纳、统计,以某项共识意见选择总票数超过75%视为达成共识^[3]。

第一轮德尔菲法向31位执笔与共识组专家发放问卷,由专家参考文献讨论共识中27项条目,问卷回收率100%。其中13项条目同意率达75%,并根据专家意见剔除1项条目,为智能康复评定技术中心理相关的脑卒中临床智能康复评定技术。第二轮德尔菲法面向31位执笔与共识组专家发放问卷,问卷内容为第一轮未达成共识的13项条目,第二轮问卷回收率为100%。第二轮问卷的13项条目,其中7项同意率达75%,根据专家意见剔除6项条目,最终20项共识意见纳入专家共识,包括智能康复评定技术5项,智能康复治疗技术15项。所有推荐意见经过论证后已达成共识,故未开展第三轮论证。

专家函询问卷,包括说明和正文两部分,通过电子邮件的

表1 牛津大学循证医学中心关于文献类型的“新五级”标准

证据等级	治疗/预防,病因学/危害
证据力强、设计严谨、偏差少	
1a	随机对照研究的系统评价
1b	随机对照研究
1c	全或无病案研究
并非所有临床问题都可找到最高等级文献,但应尽可能使用等级高的证据来源	
2a	队列研究的系统评价
2b	队列研究或较差随机对照研究
2c	“结果”研究:生态学研究
3a	病例对照研究的系统评价
3b	病例对照研究
证据力弱、设计薄弱、偏差多	
4	单个病例系列研究
5	未经明确讨论或基于生理学、实验室研究或“第一原则”的专家意见

方式开展。要求顾问组4位专家在2周内提供修改反馈。4位专家提出了7条建议,经过撰写组的分析和讨论,对《共识》内容进行修改、调试,分别对智能康复评定技术中的2条共识意见,以及智能康复治疗技术中的2条共识意见进行合并,确定了共识的最终版。

本共识已在国际实践指南注册与透明化平台注册,注册号为No.PREPARE-2024CN636。

3 共识意见

3.1 智能康复评定技术

3.1.1 运动功能评定技术

共识意见1

在临床试验的条件下,建议使用量表、问卷和标准化测试工具,结合基于运动参数、肌电、脑电、影像学等生物医学检测技术的运动功能测试设备和/或运动损伤评估系统,定期评估脑卒中患者运动功能。

证据等级:2a

推荐强度:中等推荐

【说明】量表、问卷和标准化测试工具经过几十年的发展和修订,已经成为脑卒中患者运动功能评定的常规方法。但其结果容易受到受试者和评定者主观因素的影响。随着生物技术和医疗器械的发展,基于可穿戴运动传感器^[4]、表面肌电图^[5]、脑电^[6-10]、功能磁共振^[11]、经颅磁刺激^[12]等生物医学检测技术,从更多的维度、更客观地从患者的身体或特定的身体部位获取生理信息,结合人工智能等计算机技术的算法,集成的运动功能测试设备和/或运动损伤评估系统,可提供更加精准的康复评估和治疗决策。

共识意见2

智能化步态分析设备为卒中后患者步态分析提供了多维度、可存储、精准量化的参数,准确性及可重复性高,推荐用于脑卒中后下肢运动功能的诊断及动态评估。

证据等级:1b

推荐强度:强推荐

【说明】脑卒中后运动功能障碍是常见的并发症之一,传统的“观察性步态分析”主要基于临床医生视觉观察步态,在很大程度上受观察者经验的影响,具有一定主观性。而智能化步态分析系统提供了准确、可靠的步态评估方法,基于集成多种传感器的不同可提供步态、时空、运动学、生物力学、足底压力、肌电等参数。目前包括足底压力系统^[13]、基于标记的运动捕捉系统^[14-15]、基于非标记的运动捕捉系统^[16]、可穿戴式步态分析系统^[17]。

3.1.2 认知功能评定技术

共识意见

推荐在使用标准化认知评估的基础上,应用多模态康复评定技术对卒中后认知障碍患者进行综合、全面、客观的多维评估。

证据等级:2a

推荐强度:弱推荐

【说明】卒中后认知障碍(post-stroke cognitive impairment, PSCI)是指在卒中后出现并持续到3—6个月时仍存在的以认知损害为特征的临床综合征^[18],具有复杂性和动态变化的特点。目前最常采用神经心理学测验对PSCI患者进行标准化筛查和评估,包含整体认知领域(如简易智能精神状态检查量表和蒙特利尔认知评估量表)及各个子认知领域(如记忆、注意、执行等)^[19-20]。但由于评定量表种类繁多、内容冗长、耗时久,可能降低PSCI诊断的有效率及准确率。近年来,神经影像学、体液生物标记物、智能康复评定技术等在内的多模态康复评定技术在PSCI患者中的应用日益广泛。神经影像学包括结构性和功能性磁共振成像、脑电、正电子发射型计算机断层显像等,能够精确量化评定认知功能并对PSCI进行高危识别、提供预测价值^[21-22]。脑卒中后炎症、神经轴突损伤及血管损伤等相关通路的激活引起脑脊液及外周血生物标志物变化,可作为PSCI临床和影像学评估的辅助工具^[23-24],但目前研究间差异较大,应用中需要谨慎考虑。

3.1.3 智能预测技术

共识意见

基于深度学习的预后预测方法可通过对患者神经影像学、电生理、功能行为等多模态数据学习,较为准确推断患者康复预后,有助于增进神经康复机制的理解、提升患者康复信心及训练积极性,并可作为辅助康复处方决策的潜在技术解决方案。

证据等级:2c

推荐强度:中等推荐

【说明】以深度学习技术为基础构建智能预测模型,促进患者运动功能增益表现,实现精准医疗。以深度学习为基础的构建智能预测模型主要展现出以下四个主要优势,包括特征提取能力优势^[25]、多特征类型适配优势^[25]、预测准确率提升优势^[26]以及特征可解释优势^[27-28]。

3.2 智能康复治疗技术

3.2.1 康复机器人训练技术

共识意见 1

在常规训练的基础上,可辅助使用上肢康复机器人改善脑卒中患者上肢功能障碍。

证据等级:1b

推荐强度:中等推荐

【说明】上肢康复机器人单侧训练设备能够有效帮助患者恢复肢体功能。研究表明,对卒中所致中度至重度偏瘫的成人进行康复机器人训练,有助于患者提高手臂的独立控制能力以及手臂力量^[29]。一项单盲、交叉、随机对照试验证明了家庭康复机器人对慢性卒中后轻中度上肢运动障碍患者的安全性及有效性,并显示出显著的治疗时间交互效应^[30]。

共识意见 2

在常规训练的基础上,针对下肢多关节功能障碍及步行功能障碍患者,建议使用可穿戴外骨骼式下肢康复机器人改善患者关节功能及步行能力;针对下肢末端关节功能障碍患者,建议使用末端执行器式下肢康复机器人改善患者关节功能及步行能力。

证据等级:1a

推荐强度:中等推荐

【说明】多项基于随机对照试验的荟萃分析表明,下肢康复机器人能够有效改善脑卒中患者下肢各关节功能、步行功能、步态质量以及平衡功能^[31-33]。可穿戴外骨骼式下肢康复机器人在改善下肢多关节运动功能、步行功能、平衡功能等方面疗效显著^[34-35];末端执行器式下肢康复机器人对于改善末端关节功能,如力量、关节活动范围、运动控制能力、步行功能和步态质量等具有疗效^[35-37]。

3.2.2 虚拟现实技术

3.2.2.1 改善运动功能的虚拟现实技术

共识意见

虚拟现实技术治疗可改善脑卒中后运动功能障碍,但其与传统治疗相比的有效性仍存在争议,待进一步研究。

证据等级:2b

推荐强度:弱推荐

【说明】虚拟现实(virtual reality, VR)是一组技术的总称,是由计算机硬件和软件合成人工环境,使沉浸其中的用户产生视、听、触等感觉,并在三维视觉空间中获得人机交互体验,使用户能够通过多个感觉通道模拟与现实世界物体和事件相似的模拟环境的交互^[38]。VR能够将运动认知训练、不同神经科学原理、激励游戏主题和赋权技术等关键要素融入康复计划中,并推进整个康复过程。与传统康复相比,在更大程度上改善了脑卒中患者上肢功能、下肢功能、步行能力、平衡、步行速度、步行频率和日常生活活动能力,更长的VR干预时间与更大的改善相关^[39]。同时,也有研究表明,VR干预并未比传统干预更有效,VR可作为增加治疗量的一种方式^[40]。需要更多具有良好方法学质量的研究、更大的样本量进一步证实VR干预的有效性。

3.2.2.2 改善认知功能虚拟现实技术

共识意见

虚拟现实技术可促进脑卒中后认知功能障碍患者的认知功能康复,但其与传统治疗相比是否存在显著性差异仍不明确,可作为传统认知干预的补充方法。

证据等级:2b

推荐强度:弱推荐

【说明】近期多项关于虚拟现实技术的随机对照试验支持使用VR改善认知结局^[41],可改善卒中后认知功能障碍患者的执行功能^[42-44]、记忆力^[42-46]、视觉空间能力^[47]。也有研究指出虚拟现实在改善认知方面与传统治疗并无显著差异。VR对认知康

复的非显著益处可能是由于认知功能训练不是当前VR干预的主要目的,缺乏针对认知功能训练的VR程序^[39]。在另外的研究中^[48],VR仅在MoCA指标下与常规处理存在差异,说明比较结果可能与评估工具有关。未来需要更好的评估工具和更多的随机对照研究以及系统评价来研究VR对脑卒中患者认知功能的影响。

3.2.3 脑机接口技术

3.2.3.1 面向运动功能康复的脑机接口技术

共识意见

推荐使用基于感觉运动节律的脑机接口(brain-computer interface,BCI)技术结合康复训练治疗脑卒中患者上肢运动功能障碍。

证据等级:1b

推荐强度:中等推荐

【说明】面向运动功能康复的BCI技术通过将人脑的运动意图转换成可执行的控制指令,控制外部康复训练设备(机器人、虚拟现实、触觉反馈单元等)来辅助使用者进行主动康复训练,从而促进瘫痪肢体的运动功能恢复。根据运动意图解码方式不同,非侵入式BCI康复训练技术主要分为基于感觉运动节律(sensorimotor rhythm, SMR)^[49-51]、基于运动相关皮层电位(movement-related cortical potential, MRCP)^[52]、基于稳态视觉诱发电位(Steady-state visually evoked potential, SSVEP)^[53]和基于功能性近红外成像的BCI康复训练技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)^[54]。

3.2.3.2 面向感觉功能康复的脑机接口技术

共识意见

在临床试验的条件下,推荐使用脑机接口技术结合外周神经电刺激的方式治疗慢性脑卒中患者感觉功能障碍。

证据等级:2b

推荐强度:中等推荐

【说明】BCI技术可以监测患者的大脑活动和康复进展,制定个性化的康复计划,以最大程度地促进感觉功能的恢复,BCI联合FES的康复治疗可促进卒中后患者的感觉运动功能恢复^[55-56]。脑功能改善主要体现在受影响半球感觉运动区域之间功能连接的增加,这种增加与功能改善相关^[55]。然而,如何将这种方法应用于临床康复,以达到最大的效果,仍值得进一步研究。

3.2.3.3 面向言语功能康复的脑机接口技术

共识意见

在临床试验的条件下,推荐使用脑机接口技术治疗脑卒中患者言语功能障碍。

证据等级:1b

推荐强度:弱推荐

【说明】脑卒中后遗留的言语障碍导致患者无法正常表达自己的意图,给患者的生活带来了巨大的困难。脑机接口技术为言语康复提供了一种全新的通信和控制方式,无需通过语言或肢体动作,而是根据言语相关的脑活动信号提供的反馈来表达患者想法或操纵设备,为脑卒中患者恢复与外界沟通交流的能力提供了新的康复途径。我国基于言语障碍的BCI系统的研究还处于发展阶段,现有的相关文献中大部分被试为健康被试,脑卒中病人作为被试构建和测试的BCI研究较少。BCI应用于言语康复技术还有进一步可提升的空间和可探究的方向。

3.2.3.4 面向认知功能康复的脑机接口技术

共识意见

在常规治疗的基础上,可使用基于神经反馈的脑机接口技术治疗卒中后患者的认知障碍。

证据等级:1b

推荐强度:弱推荐

【说明】基于脑机接口的认知康复训练能够直接调节大脑的生物电活动,从而调节与认知功能相关的皮层区域,加速卒中后大脑的功能重组^[57]。有研究认为基于BCI的神经反馈训练能够使患者调节自身特定的脑电频率,而这些频率的改变对广泛的认知障碍改善具有积极作用,在一定程度上揭示了潜在的神经可塑性机制^[58]。基于BCI的认知训练研究目前较为有限,未来应探索更多的脑机接口范式,如听觉、语言、情感等,扩大其应用范围。

3.2.4 神经调控技术

3.2.4.1 侵入性神经调控技术

共识意见

建议使用迷走神经刺激结合康复训练治疗慢性缺血性脑卒中患者上肢运动功能障碍。

证据等级:1b

推荐强度:中等推荐

【说明】侵入性刺激工具利用神经可塑性,促进大脑区域的功能重组,最终促进瘫痪肢体的临床改善。大量临床前和临床证据表明,VNS结合康复治疗可促进卒中后上肢运动功能的恢复^[59]。一项在英国和美国的19家卒中康复中心进行的随机、三盲、假对照试验,证明了VNS结合康复训练对慢性缺血性脑卒中后上肢运动功能障碍的患者的安全性及有效性^[60]。然而,如何将这种方法应用于临床康复,以达到最大的效果,以及是否可以用来改善更严重的上肢功能障碍等问题,仍值得进一步研究。

3.2.4.2 非侵入性神经调控技术

共识意见1

推荐使用重复经颅磁刺激配合常规康复训练,治疗亚急性、慢性缺血性脑卒中患者上、下肢运动功能障碍。

证据等级:1b

推荐强度:强推荐

【说明】无创神经调控技术是一类通过不同物理因子、刺激不同靶点,引起神经可塑性变化,促进大脑区域的功能重组,最终促进脑卒中功能障碍的改善。重复经颅磁刺激(repeated transcranial magnetic stimulation,rTMS)主要通过纠正半球间交互抑制失衡、引起脑卒中周围皮质可塑性改变等机制促进运动功能的恢复。多项Meta分析结果显示低频刺激健侧M1区、高频作用于患侧M1区,有促进亚急性、慢性脑卒中患者的上肢^[61]、下肢^[62-63]的运动功能恢复的作用,同时其安全性及耐受性较好。但重复经颅磁刺激是否适用于急性期、大面积脑卒中引起运动功能障碍,尚无一致结论。

共识意见2

建议使用重复经颅磁刺激治疗中枢性卒中后疼痛(central post-stroke pain,CPSP)。

证据等级:1b

推荐强度:中等推荐

【说明】CPSP是一种发生于脑卒中后的神经性疼痛综合征,属于慢性中枢性神经痛,由中枢神经系统病变或功能障碍所致。无创神经调控技术可能通过调节疼痛调节网络中关键节点的皮质兴奋性,产生抑制疼痛的作用。一项随机对照研究中,采用高频(10Hz)刺激患侧M1区,强度80%RMT,2000个脉冲,1次/d,共3周,结果显示有效缓解疼痛,镇痛效应维持了3周^[64]。

共识意见3

建议使用重复经颅磁刺激配合常规康复治疗脑卒中后非流利性失语。

证据等级:1b

推荐强度:中等推荐

【说明】半球间抑制的失衡被认为是脑卒中后失语症的重要发病机制之一,脑卒中后患侧半球对健侧半球的抑制减弱或消失,健侧半球对患侧半球的抑制增强,从而不利于患侧半球的恢复,不同频率的rTMS对大脑皮质产生兴奋或抑制作用,进而纠正脑失衡状态,促进言语功能的恢复。多篇同质性较好的RCT研究显示低频(1Hz)刺激亚急性期患者非患侧Broca区,多次刺激,可中等程度改善非流利性失语的言语功能^[65]。

共识意见4

建议在常规治疗的基础上,使用重复经颅磁刺激治疗脑卒中后认知功能障碍。

证据等级:2a

推荐强度:弱推荐

【说明】meta分析显示rTMS联合认知训练,对整体认知、工作记忆等部分有积极效应,但对记忆力、注意力可能没有效应^[66],因此其对认知功能的某些成分具有改善效应,但是还需要更多高质量临床研究来验证。

3.2.5 数字疗法技术

共识意见

在临床试验的条件下,可使用数字疗法(digital therapeutics,DTx)结合康复训练治疗脑卒中患者功能障碍,使用数字疗法进行全病程规范管理以及疾病预防。

证据等级:1b

推荐强度:中等推荐

【说明】依据国际数字疗法联盟定义,DTx是指由软件驱动,基于循证医学证据的干预方案,用于预防、治疗或管理疾病,改善疾病预后。DTx既可单独使用,也可与药物和其他非药物治疗等联合使用^[67]。DTx基于计算机软件,或联合使用摄像头、传感器、可穿戴设备、虚拟现实、电生理刺激等方法,为脑卒中患者提供基于循证医学证据的数字化诊疗措施,包括数字化评估、预防、治疗和管理等内容,同时实现监测数据的实时上传,实现院内院外一体化协同管理。DTx能够实现全病程数字化、网络化、智能化管理,可以有效降低医疗成本,节省诊治费用^[68],提高疾病诊疗效率、增加患者可及性,还可优化疾病治疗和管理方案^[69]、提升治疗效果、增强患者依从性^[70]。

参考文献

- [1] Huo CC, Zheng Y, Lu WW, et al. Prospects for intelligent rehabilitation techniques to treat motor dysfunction[J]. *Neural Regen Res*, 2021, 16(2):264—269.
- [2] Goldstein A, Venker E, Weng C. Evidence appraisal: a scoping review, conceptual framework, and research agenda[J]. *J Am Med Inform Assoc*, 2017, 24(6):1192—1203.
- [3] Niederberger M, Köberich S. Coming to consensus: the Delphi technique[J]. *Eur J Cardiovasc Nurs*, 2021, 20(7):692—695.
- [4] Mollà-Casanova S, Llorens R, Borrego A, et al. Validity, reliability, and sensitivity to motor impairment severity of a multi-touch app designed to assess hand mobility, coordination, and function after stroke[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2021, 18(1), DOI: 10.1186/s12984-021-00865-9.
- [5] Wang C, Peng L, Hou ZG, et al. Quantitative assessment of upper-limb motor function for post-stroke rehabilitation based on motor synergy analysis and multi-modality fusion[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2020, 28(4):943—952.
- [6] Zheng F, Sato S, Mamada K, et al. Changes of cortico-cortical neural connections associated with motor functional recovery after stroke[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2022, 31(9):106689.
- [7] Lin PJ, Zhai X, Li W, et al. A transferable deep learning prognosis model for predicting stroke patients' recovery in different rehabilitation trainings[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2022, 26(12):6003—6011.
- [8] Xu M, Qian L, Wang S, et al. Brain network analysis reveals convergent and divergent aberrations between mild stroke patients with cortical and subcortical infarcts during cognitive task performing[J]. *Front Aging Neurosci*, 2023, 15:1193292.
- [9] Riahi N, Vakorin VA, Menon C. Estimating Fugl-Meyer upper extremity motor score from functional-connectivity measures[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(4):860—868.
- [10] Xu F, Wang Y, Li H, et al. Time-varying effective connectivity for describing the dynamic brain networks of post-stroke rehabilitation[J]. *Front Aging Neurosci*, 2022, 14:911513.
- [11] Bernhardt J, Borschmann K, Boyd L, et al. Moving rehabilitation research forward: developing consensus statements for rehabilitation and recovery research[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2017, 31(8):694—698.
- [12] Kim B, Winstein C. Can neurological biomarkers of brain impairment be used to predict poststroke motor recovery? a systematic review[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2017, 31(1):3—24.
- [13] Muro-de-la-Herran A, Garcia-Zapirain B, Mendez-Zorrilla A. Gait analysis methods: an overview of wearable and non-wearable systems, highlighting clinical applications[J]. *Sensors (Basel)*, 2014, 14(2):3362—3394.
- [14] Rastegarpanah A, Scone T, Saadat M, et al. Targeting effect on gait parameters in healthy individuals and post-stroke hemiparetic individuals[J]. *J Rehabil Assist Technol Eng*, 2018, 5:2055668318766710.
- [15] 张晶晶, 李艳. 脑卒中偏瘫步态特点及康复策略[J]. *中国老年学杂志*, 2019, 39(5):1044—1047.
- [16] Latorre J, Colomer C, Alcañiz M, et al. Gait analysis with the Kinect v2: normative study with healthy individuals and comprehensive study of its sensitivity, validity, and reliability in individuals with stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1):97.
- [17] Li M, Tian S, Sun L, et al. Gait analysis for post-stroke hemiparetic patient by multi-features fusion method[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(7), DOI: 10.3390/s19071737.
- [18] Rost NS, Brodtmann A, Pase MP, et al. Post-stroke cognitive impairment and dementia[J]. *Circulation Research*, 2022, 130(8):1252—1271.
- [19] 汪凯, 董强, 郁金泰, 等. 卒中后认知障碍管理专家共识2021[J]. *中国卒中杂志*, 2021, 16(4):376—389.
- [20] Quinn TJ, Richard E, Teuschl Y, et al. European Stroke Organisation and European Academy of Neurology joint guidelines on post-stroke cognitive impairment[J]. *European Stroke Journal*, 2021, 6(3):I-XXXVIII.
- [21] Weave NA, Kuijf HJ, Aben HP, et al. Strategic infarct locations for post-stroke cognitive impairment: a pooled analysis of individual patient data from 12 acute ischaemic stroke cohorts[J]. *The Lancet Neurology*, 2021, 20(6):448—459.

- [22] Huang KL, Hsiao IT, Ho MY, et al. Investigation of reactive astrogliosis effect on post-stroke cognitive impairment[J]. Journal of Neuroinflammation, 2020, 17(1), DOI: 10.1186/s12974-020-01985-0.
- [23] Peng S, Shen Y, Wang M, et al. Serum and CSF metabolites in stroke-free patients are associated with vascular risk factors and cognitive performance[J]. Frontiers in Aging Neuroscience, 2020, 12, DOI: 10.3389/fnagi.2020.00193.
- [24] Liu F, Bao Y, Qiu B, et al. Identification of novel cerebrospinal fluid biomarkers for cognitive decline in aneurysmal subarachnoid hemorrhage: a proteomic approach[J]. Frontiers in Cellular Neuroscience, 2022, 16, DOI: 10.3389/fncel.2022.861425.
- [25] Shin H, Kim JK, Choo YJ, et al. Prediction of motor outcome of stroke patients using a deep learning algorithm with brain MRI as Input Data[J]. Eur Neurol, 2022, 85(6):460—466.
- [26] Lin PJ, Zhai X, Li W, et al. A Transferable deep learning prognosis model for predicting stroke patients' recovery in different rehabilitation trainings[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2022, 26(12):6003—6011.
- [27] Islam MS, Hussain I, Rahman MM, et al. Explainable artificial intelligence model for stroke prediction using EEG signal[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(24), DOI: 10.3390/s22249859.
- [28] Lin PJ, Li W, Zhai X, et al. Explainable deep-learning prediction for brain-computer interfaces supported lower extremity motor gains based on multistate fusion[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2024, 32:1546—1555.
- [29] Kim H, Miller LM, Fedulow I, et al. Kinematic data analysis for post-stroke patients following bilateral versus unilateral rehabilitation with an upper limb wearable robotic system[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2013, 21(2):153—64.
- [30] Kuo LC, Yang KC, Lin YC, et al. Internet of things (IoT) enables robot-assisted therapy as a home program for training upper limb functions in chronic stroke: a randomized control crossover study[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2023, 104(3):363—371.
- [31] Carpino G, Pezzola A, Urbano M, et al. Assessing effectiveness and costs in robot-mediated lower limbs rehabilitation: a meta-analysis and state of the art[J]. J Health Eng, 2018, 2018:7492024.
- [32] Nedergård H, Arumugam A, Sandlund M, et al. Effect of robotic-assisted gait training on objective biomechanical measures of gait in persons post-stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. J Neuroeng Rehabil, 2021, 18(1):64.
- [33] Calabrò RS, Sorrentino G, Cassio A, et al. Robotic-assisted gait rehabilitation following stroke: a systematic review of current guidelines and practical clinical recommendations[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2021, 57(3):460—471.
- [34] Rodríguez-Fernández A, Lobo-Prat J, Font-Llagunes JM. Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments[J]. J Neuroeng Rehabil, 2021, 18(1):22.
- [35] Slooy LH, Baker LM, Bae J, et al. Effects of a soft robotic exosuit on the quality and speed of overground walking depends on walking ability after stroke[J]. J Neuroeng Rehabil, 2023, 20(1):113.
- [36] Maranesi E, Riccardi GR, Di Donna V, et al. Effectiveness of intervention based on end-effector gait trainer in older patients with stroke: a systematic review[J]. J Am Med Dir Assoc, 2020, 21(8):1036—1044.
- [37] Zhai X, Wu Q, Li X, et al. Effects of robot-aided rehabilitation on the ankle joint properties and balance function in stroke survivors: a randomized controlled trial[J]. Front Neurol, 2021, 12:719305.
- [38] Dellazizzo L, Potvin S, Luigi M, et al. Evidence on virtual reality-based therapies for psychiatric disorders: meta-review of meta-analyses[J]. J Med Internet Res, 2020, 22(8):e20889.
- [39] Zhang B, Li D, Liu Y, et al. Virtual reality for limb motor function, balance, gait, cognition and daily function of stroke patients: A systematic review and meta-analysis[J]. J Adv Nurs, 2021, 77(8):3255—3273.
- [40] Laver KE, Lange B, George S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2017, 11(11):Cd008349.
- [41] Lin RC, Chiang SL, Heitkemper MM, et al. Effectiveness of early rehabilitation combined with virtual reality training on muscle strength, mood state, and functional status in patients with acute stroke: a randomized controlled trial[J]. Worldviews Evid Based Nurs, 2020, 17(2):158—167.
- [42] Kim DH, Kim KH, Lee SM. The effects of virtual reality training with upper limb sensory exercise stimulation on the AROM of upper limb joints, function, and concentration in chronic stroke patients[J]. Physikalische Medizin, Rehabilitationsmedizin, Kurortmedizin, 2020, 30(2):86—94.
- [43] Faria AL, Pinho MS, Bermúdez IBS. A comparison of two personalization and adaptive cognitive rehabilitation approaches: a randomized controlled trial with chronic stroke patients[J]. J Neuroeng Rehabil, 2020, 17(1):78.
- [44] Rogers JM, Duckworth J, Middleton S, et al. Elements virtual rehabilitation improves motor, cognitive, and functional outcomes in adult stroke: evidence from a randomized controlled pilot study[J]. J Neuroeng Rehabil, 2019, 16(1):56.
- [45] Cho DR, Lee SH. Effects of virtual reality immersive training with computerized cognitive training on cognitive function and activities of daily living performance in patients with acute stage stroke: A preliminary randomized controlled trial[J]. Medicine (Baltimore), 2019, 98(11):e14752.

- [46] Unibaso-Markaida I, Iraurgi I, Ortiz-Marqués N, et al. Effect of the Wii Sports Resort on the improvement in attention, processing speed and working memory in moderate stroke[J]. J Neuroeng Rehabil, 2019, 16(1):32.
- [47] Choi D, Choi W, Lee S. Influence of Nintendo Wii Fit balance game on visual perception, postural balance, and walking in stroke survivors: a pilot randomized clinical trial[J]. Games for Health Journal, 2018, 7(6):377—384.
- [48] Xiao Z, Wang Z, Ge S, et al. Rehabilitation efficacy comparison of virtual reality technology and computer-assisted cognitive rehabilitation in patients with post-stroke cognitive impairment: A network meta-analysis[J]. J Clin Neurosci, 2022, 103:85—91.
- [49] Nojima I, Sugata H, Takeuchi H, et al. Brain-computer interface training based on brain activity can induce motor recovery in patients with stroke: a meta-analysis[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2022, 36(2):83—96.
- [50] Bai Z, Fong KNK, Zhang JJ, et al. Immediate and long-term effects of BCI-based rehabilitation of the upper extremity after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. J Neuroeng Rehabil, 2020, 17(1):57.
- [51] Cervera MA, Soekadar SR, Ushiba J, et al. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis[J]. Ann Clin Transl Neurol, 2018, 5(5):651—663.
- [52] Mrachacz-Kersting N, Jiang N, Stevenson AJ, et al. Efficient neuroplasticity induction in chronic stroke patients by an associative brain-computer interface[J]. J Neurophysiol, 2016, 115(3):1410—21.
- [53] Guo N, Wang X, Duanmu D, et al. SSVEP-Based brain computer interface controlled soft robotic glove for post-stroke hand function rehabilitation[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2022, 30:1737—1744.
- [54] Mihara M, Hattori N, Hatakenaka M, et al. Near-infrared spectroscopy-mediated neurofeedback enhances efficacy of motor imagery-based training in poststroke victims: a pilot study[J]. Stroke, 2013, 44(4):1091—1098.
- [55] Biasucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke[J]. Nat Commun, 2018, 9(1):2421.
- [56] Lee SH, Kim SS, Lee BH. Action observation training and brain-computer interface controlled functional electrical stimulation enhance upper extremity performance and cortical activation in patients with stroke: a randomized controlled trial[J]. Physiother Theory Pract, 2022, 38(9):1126—1134.
- [57] Kober SE, Schweiger D, Witte M, et al. Specific effects of EEG based neurofeedback training on memory functions in post-stroke victims[J]. J Neuroeng Rehabil, 2015, 12:107.
- [58] Mane R, Chouhan T, Guan C. BCI for stroke rehabilitation: motor and beyond[J]. J Neural Eng, 2020, 17(4):041001.
- [59] Cheng K, Wang Z, Bai J, et al. Research advances in the application of vagus nerve electrical stimulation in ischemic stroke[J]. Frontiers in Neuroscience, 2022, 16, DOI: 10.3389/fnins.2022.1043446.
- [60] Dawson J, Liu CY, Francisco GE, et al. Vagus nerve stimulation paired with rehabilitation for upper limb motor function after ischaemic stroke (VNS-REHAB): a randomised, blinded, pivotal, device trial[J]. Lancet, 2021, 397(10284):1545—1553.
- [61] O'Brien AT, Bertolucci F, Torrealba-Acosta G, et al. Non-invasive brain stimulation for fine motor improvement after stroke: a meta-analysis[J]. Eur J Neurol, 2018, 25(8):1017—1026.
- [62] Veldema J, Gharabaghi A. Non-invasive brain stimulation for improving gait, balance, and lower limbs motor function in stroke[J]. J Neuroeng Rehabil, 2022, 19(1):84.
- [63] Tung YC, Lai CH, Liao CD, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation of lower limb motor function in patients with stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Clin Rehabil, 2019, 33(7):1102—1112.
- [64] Zhao CG, Sun W, Ju F, et al. Analgesic effects of navigated repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with acute central poststroke pain[J]. Pain Ther, 2021, 10(2):1085—1100.
- [65] Kielar A, Patterson D, Chou YH. Efficacy of repetitive transcranial magnetic stimulation in treating stroke aphasia: Systematic review and meta-analysis[J]. Clin Neurophysiol, 2022, 140:196—227.
- [66] Gao Y, Qiu Y, Yang Q, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation combined with cognitive training for cognitive function and activities of daily living in patients with post-stroke cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis[J]. Ageing Res Rev, 2023, 87:101919.
- [67] Abbadessa G, Brigo F, Clerico M, et al. Digital therapeutics in neurology[J]. J Neurol, 2022, 269(3):1209—1224.
- [68] Shan N, Velez FF, Colman S, et al. Real-world reductions in healthcare resource utilization over 6 months in patients with substance use disorders treated with a prescription digital therapeutic[J]. Adv Ther, 2022, 39(9):4146—4156.
- [69] Jakob R, Harperink S, Rudolf AM, et al. Factors influencing adherence to mHealth Apps for prevention or management of non-communicable diseases: Systematic review[J]. J Med Internet Res, 2022, 24(5):e35371.
- [70] Forma F, Pratiwadi R, El-Moustaid F, et al. Network meta-analysis comparing the effectiveness of a prescription digital therapeutic for chronic insomnia to medications and face-to-face cognitive behavioral therapy in adults[J]. Curr Med Res Opin, 2022, 38(10):1727—1738.