

呼吸控制联合外骨骼机器人步行训练对脊髓损伤患儿康复的影响

李金铭¹, 吴英英², 王向丽¹, 韩亮¹, 石彩晓²

摘要:目的 探讨呼吸控制联合外骨骼机器人步行训练对脊髓损伤患儿肺功能及运动功能的影响。方法 将 60 例脊髓损伤患儿按照入院时间分为呼吸组、机器人组及联合组各 20 例。三组患儿均接受常规康复治疗护理,呼吸组增加呼吸控制训练,机器人组增加外骨骼机器人步行训练,联合组实施呼吸控制训练联合外骨骼机器人步行训练。于干预前、干预 4 周、8 周比较患儿的肺功能、平衡功能、10 米步行测试及儿童功能独立性评定表评分。结果 干预 4 周与 8 周后,三组患儿的肺功能、平衡功能、10 米步行时间及儿童功能独立性评分较干预前均显著改善,联合组效果最佳(干预主效应、时间主效应及交互效应均 $P < 0.05$)。结论 呼吸控制联合外骨骼机器人步行训练可以有效改善脊髓损伤患儿的肺功能,增强其运动能力,进而提高日常生活活动能力。

关键词: 脊髓损伤; 儿童; 外骨骼机器人; 步行训练; 呼吸控制训练; 肺功能; 平衡功能; 康复护理

中图分类号: R473.72; R493 **DOI:** 10.3870/j.issn.1001-4152.2026.05.011

Effect of respiratory control combined with robotic exoskeleton-based gait training on rehabilitation in children with spinal cord injury

Li Jinming, Wu Yingying, Wang Xiangli, Han Liang, Shi Caixiao. Department of Rehabilitation Medicine, Zhengzhou Children's Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, China

Abstract: **Objective** To explore the effect of respiratory control combined with robotic exoskeleton-based gait training on pulmonary function and motor function in children with spinal cord injury (SCI). **Methods** Sixty children with SCI were divided into three groups based on their admission time: a respiratory control training group, a robotic exoskeleton-based gait training group, and a combination group, with 20 cases in each group. All children also received conventional rehabilitation therapy and nursing care. Pulmonary function, balance function, 10-meter walk test time, and the Functional Independence Measure for Children (WeeFIM) scores were compared before the intervention, and at 4 and 8 weeks after start of the intervention. **Results** At 4 and 8 weeks after start of the intervention, all three groups showed significant improvements in pulmonary function, balance function, 10-meter walk test time, and WeeFIM scores compared to pre-intervention levels, with the combination group demonstrating the most pronounced effects (group effect, time effect, and group by time interaction effect all $P < 0.05$). **Conclusion** Respiratory control training combined with robotic exoskeleton gait training can effectively improve pulmonary function and motor performance, and consequently enhance the activities of daily living in children with SCI.

Keywords: spinal cord injury; children; exoskeleton robot; gait training; respiratory control training; pulmonary function; balance function; rehabilitation nursing

脊髓损伤是由各种原因引起的脊髓结构、功能的损害,造成损伤水平以下运动、感觉、自主神经功能障碍,是一种严重的致残性疾病。WHO 数据显示,全球约有 1 500 万脊髓损伤患者,其中中国患病人口约 374 万^[1],儿童占 2%~5%^[2]。脊髓损伤导致患儿运动功能受到损害,影响其日常生活能力与家庭生活质量,甚至限制其社会参与^[3]。但儿童的脊髓在发育过程中具有较高的可塑性,相比于成人有更好的运动功能恢复潜力,且患儿年龄越小,恢复步行功能的可能

性越大^[4-5],早期的干预可以促进神经再生和功能恢复^[6]。外骨骼机器人主要用于患者的康复训练,可协助进行日常活动、步态的训练等,精确控制患儿的肢体运动,促进神经系统重塑,从而改善肢体运动功能,提升运动速度和稳定性^[7-8]。呼吸系统疾病是脊髓损伤患者最常见的并发症之一,最常见的是肺部感染,这也被认为是导致脊髓损伤早期死亡的主要原因^[9]。部分脊髓损伤患者存在呼吸肌力量严重衰竭、咳嗽咳痰能力显著下降等问题^[10]。肺部感染中混合感染的比例高达 20.79%^[11]。研究发现,呼吸控制训练不仅能增强呼吸肌肌力和心肺适应力,还能提升躯干活动的稳定性与姿势的协调性^[12]。然而相关研究认为,呼吸控制训练过程单一枯燥、恢复时间久、见效慢,患儿容易产生消极心理,训练的依从性较差^[13]。此外,呼吸控制训练虽能改善通气效率和咳嗽能力,但对下肢运动功能及平衡的直接促进作用较弱。为进一步

作者单位:郑州大学附属儿童医院/河南省儿童医院(郑州儿童医院)1. 康复医学科 2. 护理部(河南 郑州,450003)

通信作者:吴英英, wyy5111@126.com

李金铭:女,本科,护师, ljm19950000@163.com

科研项目:河南省医学科技攻关联合共建项目(LHGJ20220754);郑州市医学重点(培育)学科(2023ZZSPYXK05)

收稿:2025-10-13;修回:2025-12-22

提高脊髓损伤患儿的康复效果,本研究探讨呼吸控制联合外骨骼机器人步行训练对脊髓损伤患儿肺功能及运动功能的效果,以期为脊髓损伤患儿提供更有效的康复方案。

1 资料与方法

1.1 一般资料 采用类实验研究方法。选取 2023 年 6 月至 2025 年 7 月于我院治疗的脊髓损伤患儿 60 例作为研究对象。纳入标准:①年龄 5~14 岁;②符合脊髓损伤神经学分类国际标准^[10]中美国脊髓损伤学会残损分级中的 C、D 级;③脱离急性期,时间>2 个月^[14];④意识清楚,有一定的沟通及语言表达能力。⑤下肢肌力≥Ⅱ级(徒手肌力检查法)。排除标准:①合并严重心、肝、肾功能不全;②有癫痫病史或近期出现癫痫发作;③合并恶性肿瘤及其他肢体运动

功能障碍性疾病;④患有其他严重影响步行能力的神经、肌肉和骨关节疾病(如严重骨质疏松或不稳定骨折、足下垂伴关节挛缩畸形等);⑤皮肤有破损、感染等不适合接受训练。本研究采用 GPower 3.1 软件进行统计检验力分析,以用力肺活量为主要结局指标,设定检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧检验)、效应量 $f=0.25$ (中等效应量),计算出每组所需最小样本量为 19 例,最终每组计划纳入 20 例。将 2023 年 6 月至 2024 年 1 月住院的 20 例脊髓损伤患儿设为呼吸组,2024 年 2—10 月住院的 20 例脊髓损伤患儿设为机器人组,2024 年 11 月至 2025 年 7 月住院的 20 例脊髓损伤患儿设为联合组。三组患儿一般资料比较,见表 1。本研究已获得医院伦理委员会批准(2022-K-L025)。

表 1 三组患儿一般资料比较

组别	例数	性别(例)		年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	医保支付方式(例)		残损分级(例)		肌力(例)		
		男	女		自费	医保	C	D	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
呼吸组	20	12	8	8.69±2.78	4	16	12	8	4	9	7
机器人组	20	11	9	8.63±2.47	4	16	15	5	3	9	8
联合组	20	12	8	8.63±2.59	1	19	13	7	4	11	5
统计量		$\chi^2=0.137$		$F=0.003$			$\chi^2=1.050$		$Z=0.850$		
P		0.934		0.997	0.360*		0.592		0.654		

注:*为 Fisher 精确概率法。

1.2 训练方法

1.2.1 组建脊髓损伤康复小组 由重症康复病区科主任担任组长,负责整体规划与协调;科护士长担任副组长,负责护理工作的监督与管理。小组成员包括国家级心肺康复专科护士 1 名,负责指导患儿进行外骨骼机器人联合呼吸控制训练等心肺康复相关护理工作,督导患儿执行情况;国家级儿童康复专科护士 2 名,讨论制订患儿常规康复护理方案、评价指标与方法等、完成患儿常规康复护理;运动治疗师 1 名,负责患儿的运动治疗、呼吸治疗;责任医师 2 名,负责患儿的病情诊断与治疗方案制订。

1.2.2 干预方法

三组患儿均接受常规的康复治疗与护理。康复治疗包括关节松动治疗、作业疗法、推拿治疗、针灸、蜡疗、低频脉冲治疗、盆底磁刺激。常规康复护理包括入院健康教育、体位管理、气道管理、导管护理、神经源性膀胱和直肠的护理、营养护理、皮肤护理、出院随访。由儿童康复专科护士指导患儿完成间断侧卧位、逐级半卧位、端坐位的早期渐进式离床活动训练^[15],训练过程中护士与治疗师共同督促和指导患儿进行锻炼,训练时以个人体力不能耐受为界,分别记录每天锻炼完成情况,并与前 1 d 对比。

1.2.2.1 呼吸组 在常规康复措施的基础上实施呼吸控制训练,每次训练 20 min,每日 2 次,每周训练 5 d,共 8 周。遵循高强度低次数、低强度多次数的训练

原则^[16]。由心肺康复专科护士指导患儿放松肩、颈和两臂,一手放在胸骨柄上限制胸部运动,一手放在脐部以感觉腹部起伏^[15],经鼻吸气,吸气时胸部不动,腹部鼓起吸气后屏住呼吸 1~2 s,嘴呈“吹口哨”状缓慢呼气,腹部内陷,尽量将气呼尽,吸呼比为 1:2,逐渐将腹式呼吸熟练运用于日常生活中。

1.2.2.2 机器人组 在常规康复措施的基础上采取外骨骼机器人步行训练。采用 BFR-K-A300、BFR-K-A200 下肢步行外骨骼机器人设备。控制策略采用被动模式,步幅依据关节运动角度设定。①髋关节运动角度:向前 $[(0\sim120)\pm3]^\circ$,向后 $[(0\sim20)\pm2]^\circ$ 。②膝关节运动角度:向后 $[(0\sim120)\pm3]^\circ$ 。③踝关节运动角度:向后 $[(0\sim16)\pm2]^\circ$ 。根据关节角度调整速度,大、小腿调节速度为 $(6\pm1)^\circ/s$,最大行走速度 ≥ 3 m/min。动态减重参数: $(3.6\pm0.5)N/mm$ 。每次训练 20 min,每天 2 次,每周 5 d,共 8 周。第 1~2 周初期适应阶段被动步态模式:设定步行速度 1.0~2.0 m/min,体质量支持 50%~60%。第 3~5 周中期强化阶段:设定步行速度 1.5~2.0 m/min,体质量支持 40%~50%。第 6~8 周为后期整合阶段进行模拟日常生活场景(如持物行走)及变线或变速行走训练,步行速度 2.5~3.0 m/min,体质量支持 30%~40%。训练过程中根据患儿的耐受程度和恢复情况逐步调整速度及步幅等训练参数。

1.2.2.3 联合组 在常规康复措施的基础上,实施

呼吸控制联合外骨骼机器人步行训练。每次 20 min, 每天 1 次, 每周 5 次, 共 8 周。第 1~2 周初期适应阶段进行呼吸-步频同步化训练: 患儿佩戴外骨骼站立, 心肺康复专科护士通过语音提示(如“吸 1-2-3, 呼 1-2-3-4-5-6”)引导其调整呼吸的吸呼比为 1:2, 外骨骼启动被动步态模式, 设定步行速度 1.0~2.0 m/min, 体质量支持 50%~60%, 步频初始设置为患儿呼吸频率的 4 倍。第 3~5 周中期强化阶段进行适应性进阶训练: 设定步行速度 1.5~2.0 m/min, 体质量支持 40%~50%; 要求患儿在迈步(摆动相)时吸气, 支撑相时呼气, 通过心电监护仪显示呼吸曲线与外骨骼动作同步协调。第 6~8 周后期整合阶段进行动态任务导向训练: 模拟日常生活场景(如持物行走)及变线或变速行走训练, 步行速度 2.5~3.0 m/min, 体质量支持 30%~40%, 要求患儿“吸气准备—屏气发力—呼气稳定”, 与外骨骼动力辅助同步在平地步行、变线或变速行走, 训练过程中强调患儿先进行深吸气, 落地时缓慢呼气。患儿训练中若出现心率>同龄最大心率 75%, 疼痛难以忍受和/或心前区不适等症状时, 立即停止训练^[17]。

1.3 质量控制 研究开始前, 与患儿及家长建立信任关系, 用通俗易懂的语言向其详细介绍该研究的方法、目的、流程、益处、风险以及随时退出的权利; 告知康复是一个长期的过程, 要有合理的期望, 避免达不到预期而中途失望放弃。实施过程中多给予支持与激励, 对于患儿及家长的疑惑, 及时解决; 对于患儿的进步及时向家长进行正向反馈, 对患儿给予贴纸、小奖品等即时奖励; 对患儿及家长进行持续的健康教育, 强调每项治疗的重要性, 增强其主观能动性。当出现依从性下降时, 及时了解原因并共同寻找解决方法。

1.4 评价方法 在干预前、干预 4 周及干预 8 周分别对三组患儿进行效果评价。均由经过培训、不知晓分组情况的 2 名心肺康复专科护士进行, 确保评估的客

观性和可靠性。①肺功能检查(Pulmonary Function Testing, PFT)。可用于儿童健康评估、呼吸系统疾病的诊断和治疗等方面^[18]。检查均在有经验的肺功能技师及心肺康复专科护士指导下完成。记录比较呼气峰值流量(Peak Expiratory Flow, PEF)、用力肺活量(Forced Vital Capacity, FVC)、第 1 秒用力呼气容积(Forced Expiratory Volume in one second, FEV1)。②Berg 平衡量表(Berg Balance Scale, BBS)^[19]。包含 14 个条目, 每个条目的评分范围为 0~4 分, 总分 0~56 分。得分越高, 表明患者的平衡功能越好。总分 0~20 分表示平衡功能差, 需要坐轮椅; 21~40 分表示患者具有一定的平衡功能, 但需要辅助; 41~56 分表示平衡功能较好。③10 米步行测试(10-Meter Walk Test, 10 MWT)。设置 1 条长 14 m 无障碍步道, 记录患儿以最快最平稳的速度通过其中 10 m 所用的时间^[20], 取 3 次测试的平均值。患儿均可使用相应助行器具进行测试。④儿童功能独立性评定表(Functional Independence Measure for Children, WeeFIM)^[21]。包括自理(8 项)、运动(5 项)、认知(5 项)3 个维度, 共 18 个项目。得分范围 18~126 分, 分数越高表示独立能力越好。

1.5 统计学方法 采用 SPSS25.0 软件进行统计分析。计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示, 组间比较采用单因素方差分析及重复测量的方差分析; 多重比较采用 Bonferroni 法进行检验水准的校正。计数资料以频数表示, 采用 χ^2 检验及 Fisher 精确概率法。等级资料比较采用 Kruskal-Wallis 秩和检验。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 三组患儿不同时间肺功能及平衡功能比较 见表 2。

2.2 三组患儿不同时间 10MWT 及功能独立性评分比较 见表 3。

表 2 三组患儿不同时间肺功能及平衡功能比较

$\bar{x} \pm s$

组别	例数	FEV1(L)			PEF(L/s)		
		干预前	干预 4 周	干预 8 周	干预前	干预 4 周	干预 8 周
呼吸组	20	1.32±0.07	1.52±0.12	1.74±0.07	3.43±0.07	3.69±0.16	4.17±0.11
机器人组	20	1.31±0.08	1.50±0.11	1.66±0.10	3.43±0.06	3.60±0.15	3.84±0.13
联合组	20	1.34±0.06	1.62±0.11	1.97±0.12	3.45±0.08	3.89±0.12	4.35±0.10
F		0.699	8.908	51.203	0.284	21.679	101.124
P		0.501	<0.001	<0.001	0.754	<0.001	<0.001
组别	例数	FVC(L)			平衡功能(分)		
		干预前	干预 4 周	干预 8 周	干预前	干预 4 周	干预 8 周
呼吸组	20	1.49±0.03	1.75±0.02	2.05±0.03	14.20±2.35	18.30±1.75	21.40±3.12
机器人组	20	1.50±0.03	1.65±0.03	1.81±0.03	14.30±2.11	24.15±2.35	30.65±2.08
联合组	20	1.50±0.02	1.90±0.03	2.20±0.03	14.60±1.82	27.20±2.63	41.15±2.50
F		0.679	454.381	851.077	0.196	79.332	288.459
P		0.611	<0.001	<0.001	0.823	<0.001	<0.001

注: 三组比较, FEV1 $F_{组间} = 38.492$ 、 $F_{时间} = 374.954$ 、 $F_{交互} = 12.662$, 均 $P < 0.001$; PEF $F_{组间} = 82.185$ 、 $F_{时间} = 557.032$ 、 $F_{交互} = 27.004$, 均 $P < 0.001$; FVC $F_{组间} = 727.285$ 、 $F_{时间} = 5025.474$ 、 $F_{交互} = 251.086$, 均 $P < 0.001$; 平衡功能 $F_{组间} = 237.702$ 、 $F_{时间} = 803.104$ 、 $F_{交互} = 91.596$, 均 $P < 0.001$ 。

表 3 三组患儿不同时间 10MWT 及功能独立性评分比较

$\bar{x} \pm s$

组别	例数	10MWT(s)			功能独立性(分)		
		干预前	干预 4 周	干预 8 周	干预前	干预 4 周	干预 8 周
呼吸组	20	82.20±5.19	75.15±5.26	69.10±1.74	19.85±1.46	24.25±1.62	31.65±2.78
机器人组	20	82.40±5.57	69.75±5.38	59.00±2.73	19.90±1.59	31.45±2.44	40.10±2.49
联合组	20	82.15±7.84	60.45±4.93	46.95±2.54	20.10±1.62	36.55±2.65	48.80±1.74
F		0.009	41.002	434.357	0.144	147.257	260.709
P		0.991	<0.001	<0.001	0.866	<0.001	<0.001

注:三组比较,10MWT $F_{组间} = 57.908$ 、 $F_{时间} = 524.527$ 、 $F_{交互} = 38.693$,均 $P < 0.001$;功能独立性 $F_{组间} = 365.986$ 、 $F_{时间} = 1332.586$ 、 $F_{交互} = 82.674$,均 $P < 0.001$ 。

3 讨论

3.1 联合训练可改善脊髓损伤患儿的肺功能

呼吸肌是由脊髓运动神经元支配,脊髓损伤可能会导致呼吸功能障碍^[22]。相关研究指出,改善呼吸功能对脊髓损伤患儿的康复至关重要^[23]。呼吸训练可以提高呼吸肌肌力与心肺适应力,增强躯体活动的灵活性,改善姿势的协调性。本研究结果表明,呼吸控制联合外骨骼机器人步行训练能显著改善脊髓损伤患儿的呼吸功能,且效果优于单一的呼吸训练或机器人步行训练。分析原因为,外骨骼机器人步行训练可以刺激大脑皮层与脊髓之间的神经可塑性变化,使运动区域与感觉区域形成新的神经连接,进而提高对运动功能的控制能力;呼吸控制训练可刺激呼吸中枢,改善对呼吸肌的控制能力,促进大脑皮层与呼吸中枢之间的神经连接,提高对呼吸控制的灵活性和有效性。二者结合可达到协同刺激中枢神经系统的功能整合,强化大脑皮层与脊髓间的神经连接,有效提升神经系统的控制与协调水平。除此之外,外骨骼机器人步行训练通过高重复性、任务导向性的步态训练,全面激活躯干核心肌群、下肢肌群,提高核心肌群的稳定与力量,而呼吸控制训练直接针对呼吸肌进行力量和耐力锻炼,从生理上改善患儿的通气能力^[24],二者结合不仅提高了运动耐力,使患儿能承受更长时间的步行训练,还优化了气体交换,为运动系统提供充足氧气供应,进一步提升训练效果,形成了良性循环。刘陵鑫等^[25]研究发现,对脑卒中患者实施下肢机器人联合呼吸训练,患者的肺功能各项指标显著改善,与本研究结果一致,表明该方法对呼吸功能的改善具有积极的作用。

3.2 联合训练可提高脊髓损伤患儿的平衡与运动功能

相关研究指出,运动训练是帮助脊髓损伤儿童改善运动功能的有效治疗方法^[26]。根据儿童脊髓损伤的病因、损伤程度、个体差异等,选择合适方法与强度,有助于患儿恢复运动能力。本研究结果显示,干预前三组患儿的平衡功能评分较低,表明需要一定的辅助;10MWT 评分结果表明脊髓损伤患儿完成步行活动需要花费大量的时间;干预 4 周与 8 周后,患儿的平衡功能评分随着干预时间的延长,评分越高,10MWT 评分随着干预时间的延长评分越低;表明平衡能力与步行能力越来越好,且联合组优于呼吸组与机器人组。分

析原因,外骨骼机器人步行训练提供稳定支撑与大量、重复且正确的步行模式感觉输入,使患儿进行重复、对称的步态循环,步行中的姿势变化均作用于前庭和本体感觉系统,提升了整体的运动控制水平,有助于重塑正常的躯干活动和姿势控制模式;同时规律的直立和步行训练可以动态调整膈肌和辅助呼吸肌的力学环境,减轻了膈肌的压力负荷,有效带动胸廓适度扩张,从而提升了呼吸肌的主动运动效率,且有研究指出,基于外骨骼的步行和平衡训练对促进脊髓损伤患者功能恢复与心肺健康具有积极的作用^[27]。除此之外,呼吸控制训练可强化腹横肌、膈肌、盆底肌等核心肌群的协同收缩与控制^[22],进一步稳定脊柱和骨盆,从而增强核心肌群的控制能力^[28];进而形成了“运动改善呼吸、呼吸支撑运动”的良性循环。

3.3 联合训练可增强脊髓损伤患儿日常生活功能独立性

脊髓损伤患儿由于神经损伤导致长期卧床的生活方式,限制了身体功能,影响了身体健康,降低了日常生活能力与质量^[3]。对于脊髓损伤患儿的康复目标是恢复身体功能,改善日常生活能力,培养社会适应能力^[29]。本研究结果显示,干预前三组脊髓损伤患儿的日常生活功能独立性处于极重度依赖水平;干预 8 周后,三组患儿较前均有改善,联合组改善最为显著(均 $P < 0.05$)。Şipal 等^[30]研究显示,外骨骼联合常规疗法对步行状态、活动能力和功能独立性有积极贡献。外骨骼机器人步行训练增强了患者的躯体稳定性与姿势控制能力,提高活动灵活性,使患儿能安全、稳定地进行日常生活活动,步行能力的提升扩大了其活动范围,提升了患儿转移、活动等参与能力^[31]。呼吸控制训练使患儿的呼吸肌得到增强,耐力水平提高,减少了患儿在进行日常活动时出现的呼吸困难和早期疲劳,使他們有能力去完成,从而减少了对辅助的依赖。二者的结合使呼吸与运动系统整合,达到了“功能提升—耐力支撑—独立完成”的康复闭环,从而在实现日常生活功能独立性方面展现出更全面的临床价值。

4 结论

本研究将呼吸控制联合外骨骼机器人步行训练用于脊髓损伤患儿,结果显示对于改善脊髓损伤患儿的呼吸功能具有积极的作用,同时显著提高了患儿的平衡能力、步行水平,患儿的日常生活活动能力得到

改善,具有一定的临床应用价值。本研究的主要局限性为类实验研究,且样本量有限,这可能限制了研究结果的普适性。后续研究需采用随机临床对照试验,扩大样本量并延长随访周期,以确立该方法的长期有效性及安全性。

参考文献:

- [1] 杨雪能,李锐娟,李波,等. 1990—2021 年中国脊髓损伤疾病负担变化趋势与预测[J]. 现代预防医学, 2025, 52(14): 2682-2688.
- [2] New P W, Lee B B, Cripps R, et al. Global mapping for the epidemiology of paediatric spinal cord damage: towards a living data repository[J]. Spinal Cord, 2019, 57(3): 183-197.
- [3] Wang J Z, Yang M, Meng M, et al. Clinical characteristics and treatment of spinal cord injury in children and adolescents[J]. Chin J Traumatol, 2023, 26(1): 8-13.
- [4] Moucheboeuf G, Griffier R, Gasq D, et al. Effects of robotic gait training after stroke: a meta-analysis[J]. Ann Phys Rehabil Med, 2020, 63(6): 518-534.
- [5] Donenberg J G, Fetters L, Johnson R. The effects of locomotor training in children with spinal cord injury: a systematic review[J]. Dev Neurorehabil, 2019, 22(4): 272-287.
- [6] Reeves B, Smith E, Broussard M, et al. Activity based restorative therapy considerations for children: medical and therapeutic perspectives for the pediatric population[J]. Front Rehabil Sci, 2023, 4: 1186212.
- [7] 李薇,郑鹏远,丁婵婵,等. 下肢外骨骼康复机器人的研究现状和发展趋势[J]. 中国设备工程, 2023(15): 257-259.
- [8] 韩稷钰,王衍鸿,王大千. 下肢外骨骼康复机器人的研究进展及发展趋势[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2022, 42(2): 241-246.
- [9] Collaborators GBD 2021 Stroke Risk Factor. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990-2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. Lancet Neurol, 2024, 23(10): 973-1003.
- [10] Rupp R, Biering-Sørensen F, Burns S P, et al. International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury: Revised 2019[J]. Top Spinal Cord Inj Rehabil, 2021, 27(2): 1-22.
- [11] Lv Q, Zhang X, Guo K, et al. Risk factors for pulmonary infection and nursing interventions post-tracheostomy in patients with spinal cord injury[J]. Infect Drug Resist, 2023, 16: 6691-6701.
- [12] Lee D K, Kim S H. The effect of respiratory exercise on trunk control, pulmonary function, and trunk muscle activity in chronic stroke patients[J]. J Phys Ther Sci, 2018, 30(5): 700-703.
- [13] 胡玲玲. 呼吸训练法在颈髓损伤患者肺康复护理中的应用进展[J]. 中华养生保健, 2023, 41(18): 58-61, 74.
- [14] Liu S, Chen F, Yin J, et al. Comparative efficacy of robotic exoskeleton and conventional gait training in patients with spinal cord injury: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. J Neuroeng Rehabil, 2025, 22(1): 121.
- [15] 郑彩娥,李秀云. 心肺康复护理技术操作规程[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020: 53.
- [16] 武亮,郭琪,胡菱,等. 中国呼吸重症康复治疗技术专家共识[J]. 中国老年保健医学, 2018, 16(5): 3-11.
- [17] 张立新,白定群,白玉龙,等. 下肢康复机器人临床应用专家共识[J]. 康复学报, 2023, 33(5): 383-396.
- [18] 冯雍,尚云晓,陈荣,等. 儿童肺功能检查和呼出气一氧化氮测定应用现状调查分析[J]. 中国实用儿科杂志, 2021, 36(3): 216-222.
- [19] Berg K. Measuring balance in the elderly: preliminary development of an instrument[J]. Physiother Can, 1989, 41(6): 304-311.
- [20] 苏盼盼,叶朋,卢倩,等. 视觉剥夺训练联合本体感觉训练对脑卒中偏瘫患者平衡功能的效果[J]. 中国康复理论与实践, 2025, 31(3): 254-263.
- [21] 王玉龙,高晓平,李雪萍,等. 康复功能评定学[M]. 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 2018: 302-303.
- [22] 王宁华,顾新,周谋望,等. 基于循证医学证据的脊髓损伤患者躯干控制障碍康复评定和康复治疗专家共识[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(3): 305-311.
- [23] 陆晓,蒋灵军,戎荣. 心肺功能障碍的康复治疗进展[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(10): 1329-1335.
- [24] Chen X, Hu S, Jia X, et al. Incremental load respiratory muscle training improves respiratory muscle strength and pulmonary function in children with bronchiectasis[J]. Can Respir J, 2024, 2024: 8884030.
- [25] 刘陵鑫,陈攀,杨帅,等. 下肢机器人训练联合呼吸训练对脑卒中患者肺功能及运动耐力的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(8): 1063-1067.
- [26] 刘倩,肖农. 儿童脊髓损伤后运动功能障碍的康复治疗进展[J]. 保健医学研究与实践, 2020, 17(1): 79-82.
- [27] Nepomuceno P, Souza W H, Pakosh M, et al. Exoskeleton-based exercises for overground gait and balance rehabilitation in spinal cord injury: a systematic review of dose and dosage parameters[J]. J Neuroeng Rehabil, 2024, 21(1): 73.
- [28] He R, Ren L. Evaluation of the benefits of respirator breathing and vomiting training and dynamic core training on improving respiratory muscle strength[J]. Respir Med, 2025, 240: 108029.
- [29] Zhao H B, Rong X J, Zhang Q, et al. Factors influencing on functional independence outcomes after hospitalization and rehabilitation in children with spinal cord injury[J]. BMC Pediatr, 2025, 25(1): 261.
- [30] Şipal M S, Yaşar E, Özişler Z, et al. First report of a new exoskeleton in incomplete spinal cord injury: FreeGait®[J]. J Spinal Cord Med, 2024: 1-11.
- [31] 刘兴朝,胡通,马艳,等. 康复机器人训练脑性瘫痪患者: 改善下肢运动功能效果的 Meta 分析[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(18): 3925-3933.