

· 综述 ·

运动训练在儿童脊髓损伤康复中应用进展

陈芳¹ 钱竞光¹ 励建安² 沈滢² 苏阳¹ 黄思思² 吴希希³ 黄颖琚³ 葛盼丽² 李勇强^{1,2}¹南京体育学院,南京 210014; ²南京医科大学第一附属医院,南京 210029; ³江苏省人民医院钟山康复分院,南京 210046

通信作者:李勇强,Email:liyongqiang_1980@163.com

【摘要】 近年来儿童脊髓损伤发病率逐年增高,损伤后运动功能恢复一直是临床康复的研究重点,运动训练是其主要的干预方式。现代智能康复设备不断推陈出新,包括减重步行训练、机器人辅助步行训练、虚拟现实技术以及功能性电刺激踏车等,在儿童脊髓损伤的功能康复中得到广泛应用。本文旨在综述运动训练在儿童脊髓损伤康复中的应用进展。

【关键词】 儿童脊髓损伤; 运动训练; 智能康复

基金项目:江苏省科技厅重点项目(BE2017007-5)

Funding: Key Project of Jiangsu Provincial Department of Science and Technology(BE2017007-5)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.08.021

脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)是一种严重的致残性疾病,累及各年龄段的患者,其中儿童脊髓损伤占整个脊髓损伤病例的2%~5%^[1-2],虽然占比不高,但对患儿及其家庭的负担不容忽视。一方面,患儿带病生存时间长,覆盖其身体活动、日常生活、教育、就业等诸多层面;另一方面,患儿仍处于生长发育时期,具备较强的神经可塑性,患儿及其家属求治愿望更为迫切,医疗支出也相应更高。为了促进SCI儿童功能的恢复,提高其生活质量,有效的康复治疗尤为重要。

运动训练是SCI的重要治疗方法。研究证实,运动训练可促进损伤后运动功能恢复,而随着运动训练在临床的应用和推广,儿童神经康复领域的研究也日益增多^[3-4]。本综述总结了近年来儿童脊髓损伤文献,旨在通过阐述运动训练的应用机制,重点介绍儿童脊髓损伤的智能运动训练,为今后SCI儿童的临床研究提供参考。

儿童SCI运动训练的应用机制

儿童处于生长发育时期,损伤时脊髓可能未发育完全,与成人SCI相比,患儿具有更大的神经恢复潜力。多项动物实验证明,损伤后运动功能的恢复具有年龄依赖性^[5-6]。Saunders等^[6]的研究发现,脊髓损伤幼鼠的步行功能比成年大鼠恢复得更好。同样,损伤年龄亦是影响SCI儿童功能恢复的重要因素^[7]。研究发现,损伤年龄越小,患儿恢复步行的可能性就越大,而5岁以下、胸髓或腰髓不完全性SCI患儿最有可能恢复步行能力^[8]。因此,运动训练对SCI儿童的益处可能超过成人。

传统观点认为,运动训练只能通过改善和代偿的机制发挥残存功能,提高运动功能,而越来越多的证据表明,运动训练可以影响神经可塑性和中枢模式发生器,促进神经保护、神经再生等,从而改善SCI儿童运动功能^[7,9]。运动训练促进SCI儿童运动功能的恢复主要基于以下机制:①中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)——CPG位于腰髓内,是一种由中间神经元网络构成的神经环路,具有独立的感覺输入和神经中枢,可自动产生稳定振荡,有序激活伸屈肌群进行交替收缩,激发

肢体节律性运动^[10]。研究显示,在脊髓损伤平面以下,通过增加肢体末端皮肤感觉、本体感觉和正常运动模式的输入,可激活CPG,促进步行能力的恢复^[11]。②神经可塑和功能重组——脊髓损伤后,在结构或功能上有重新组织的能力,运动训练可诱导机体释放神经营养因子,如脑源性神经营养因子、胶质细胞源性神经营养因子,促进神经纤维及突触发芽、增加损伤远端神经纤维的再生等,从而增强脊髓的可塑性,促进神经元回路的重组^[12-13]。

儿童SCI运动训练的应用进展

一、智能运动训练

近年来智能运动训练在SCI儿童功能康复中发挥了重要作用,主要包括减重步行训练、机器人辅助步行训练、功能性电刺激踏车、虚拟现实技术等。

(一)减重步行训练

减重步行训练(body weight support treadmill training, BWSTT)是利用悬吊装置不同程度地减少上身体重对下肢的负荷,使患者处于直立状态,可调节减重比例和活动平板速度,在治疗师的辅助下进行步行训练^[14]。BWSTT通过提供重复的、特定任务的步行练习,促进SCI儿童步行能力恢复,提高步行速度和步行距离,增强步行独立性和协调性^[15]。

有文献报道,BWSTT不仅能够诱导患儿产生交替踏步的动作,还可以增强患儿的感知能力,如视觉、触觉、本体感觉等^[16]。Pantall等^[17]的研究发现,在患儿减重步行训练时可强化感觉输入,如增加足底与履带之间的摩擦力、丰富履带上的颜色和图案,会比传统黑色、光滑的履带更能引导患儿做出踏步动作,提高患儿步速。但目前尚无高质量的证据支持BWSTT联合感觉输入对SCI儿童的影响,其疗效还需进一步验证。颈髓损伤患儿因损伤平面较高,呼吸肌往往受累,从而造成呼吸功能下降,肺通气不足,易引起肺部感染、缺氧等并发症。Argetsinger等^[18]的研究表明,减重步行训练时加入胸廓伸展任务可以改善颈髓损伤患儿呼吸功能,纠正异常的呼吸模式,其原理可能是

长期运动训练促进神经可塑性,激活损伤平面以下的神经通路,增强呼吸肌功能,使得患儿神经肌肉控制能力增强,尤其是头部和躯干的控制力。

BWSTT 是 SCI 儿童常用的训练方式,目前尚无儿童减重步行训练的运动指南,临床工作中治疗师可参考患儿及其家属的期望和医疗资源来设置治疗强度,治疗频率每周 2~5 次,每次训练 20~40 min,减重 0%~80% 不等,根据每例患儿的耐受能力和疲劳恢复情况调节运动速度^[4]。

(二) 机器人辅助步行训练

机器人辅助步行训练是一种较前沿的康复治疗方法,以高度精确的生理步态模式对下肢提供连续的步行、步态训练,具有高强度性和重复性。与传统步行训练不同,机器人控制的外骨骼或脚板可以帮助患儿髋关节、膝关节和踝关节运动,减轻了治疗师劳动强度,保证了训练过程的一致性和持续性,同时监测和记录步态参数,实现训练方案及康复评估参数化,有利于提高康复训练的效率^[19]。

脊髓损伤后步行能力的恢复是患儿及其家庭的主要康复目标,下肢康复机器人将负重、迈步和平衡相结合,使患儿早期即可进行直立位步行训练,实现步行功能。研究表明,康复机器人可以改善不完全性 SCI 患儿步行能力,提高下肢肌肉力量(特别是屈髋肌和股四头肌)、步行速度,调节肌肉张力、降低痉挛^[20]。一些完全性 SCI 患者的神经平面以下仍保留部分神经支配的皮区和肌节,通过强化步行训练后,能恢复部分运动功能^[21]。Murillo 等^[22]的研究发现,胸段完全性 SCI 患儿接受 2 个月机器人辅助步行训练后,在治疗师帮助下,能够使用助行器进行治疗性步行;虽然患儿步速较慢,且步行能量消耗较多,但对预防压疮、改善肠道功能和下肢血液循环具有良好效果。

下肢运动功能的重建对患儿生活自理和社会融入具有重要意义。Wendy 等^[23]的研究显示,在步行机器人辅助下,患儿能够从事简单的家庭活动,参与社区娱乐活动,最终能够重返校园、融入集体生活。因此,在儿童康复领域,注重患儿肢体功能康复的同时,还应帮助患儿回归家庭、重返社会。然而,目前儿童康复机器人设备费用较高,仅在一些大型的三级医院和康复医院使用,未来对儿童康复机器人的研究应强调降低生产成本、适合家庭和社区生活中使用,以提高患儿生活质量。

(三) 虚拟现实技术

虚拟现实技术(virtual reality, VR)即计算机创造仿真环境,患儿通过视觉、触觉、听觉、动觉等反馈系统与虚拟世界进行实时交互作用,从而产生“身临其境”的感觉,具有沉浸性、交互性和想象性的特征^[24]。在 VR 系统中,医生或治疗师可以根据患儿的兴趣和心理状态,选择相应的虚拟场景和任务导向式作业,激发和维持患儿训练的积极性,从而达到传统训练无法实现的康复效果。之前的研究已经证明 VR 在改善儿童生活技能、运动功能、认知功能、兴趣和动机等方面的潜力^[25-26]。

Hejrati 等^[27]将 VR 技术与非定向活动平板结合,用于 SCI 儿童的步态分析。结果发现,与传统活动平板相比,VR 系统中患儿步行的运动学参数、时空参数及步态对称性等方面改善更为明显。基于 VR 的非定向活动平板可实现步行方向和步行速度的自然变化,为患儿提供了更多的舒适感、安全感和灵活性,同时使其步行表现更接近日常生活。传统运动训练方式单一、枯燥乏味,患儿参与度较低,这也是 SCI 儿童康复治疗的难点之

一。研究表明,动机是儿童运动康复的重要因素,动机强的儿童有更好的康复效果^[28]。Brütsch 等^[29]开发了一个基于 VR 的足球场景,比较了 VR 联合康复机器人与单纯康复机器人训练对 SCI 儿童的运动参与度的影响,结果显示,联合组患儿对治疗方案满意度较高,虚拟足球场景下的视觉画面、触觉反馈及奖励机制能够提高患儿训练动机和注意力,患儿康复治疗的积极性和维持性更高。因此,在 SCI 儿童康复治疗中,VR 可以作为一种提高康复疗效的措施,增加治疗的趣味性,提高患儿训练的积极性。

(四) 功能性电刺激踏车训练

功能性电刺激踏车(function electrical stimulation cycling, FESC)是近年来兴起的一种功能性电刺激疗法,指通过预先设定的程序对下肢参与踏车运动的主要肌群给予适时、恰当的序列低频电刺激,从而驱动下肢肌群收缩完成踏车这一功能性运动^[30]。FESC 是一种有效的临床康复手段,对于提高 SCI 儿童心肺耐力、增大下肢肌肉体积和力量、增加骨密度、促进血液循环,提高整体健康水平有良好的效果^[31]。

一项 SCI 儿童成年后的并发症研究显示,患儿呼吸系统疾病发病率高达 33%,而心肺功能下降是呼吸疾病的重要原因^[32]。功能性电刺激踏车是改善患儿心肺储备功能的有效手段之一。Johnston 等^[33]的研究表明,FESC 能够提高患儿的峰值摄氧量,降低总胆固醇,但用力肺活量和静息心率没有明显改变,这可能与儿童运动强度较小有关;Johnston 等^[34]后期的研究还发现,与被动踏车相比,FESC 能够增加患儿股四头肌体积和力量($P<0.05$),减少下肢肌肉萎缩。这些功能指标的改善可能会降低患儿罹患心血管疾病、2 型糖尿病的风险,但目前此类研究文献较少,其长期疗效还需进一步验证。

运动对儿童时期的骨骼健康至关重要,然而 SCI 后肢体废用和活动受限,患儿易发生骨密度下降,损伤后 6~12 个月骨质流失达到高峰,这使得患儿成年后骨折风险增加 19%,是 SCI 成人的 4 倍^[35]。FESC 能增加患儿下肢骨密度,减少骨质疏松,预防病理性骨折的发生。Lauer 等^[36]选取 SCI 儿童 30 例,按照随机数字表法分为 FESC 组、被动踏车组、功能性电刺激组,每组 10 例,评估治疗前后髌部、股骨远端和胫骨近端的骨密度,结果显示,FESC 组髌部、股骨远端和胫骨近端骨密度分别增加了 32.4%、6.62% 和 10.3%,明显高于其他两组($P<0.05$)。Castello 等^[37]的研究也得出相似的结论,并发现 FESC 与患儿的生活质量有一定相关性,随着训练次数和治疗时间增加,患儿的生活质量也逐渐提高。

二、其他常规运动训练

除了智能运动训练外,其他常规运动训练包括:关节活动训练、肌力训练、静态牵伸、体位转移、坐位训练、神经肌肉促进技术、平衡训练、站立训练、步行训练、日常生活活动训练等。脊髓损伤后痉挛是导致患儿活动受限、关节挛缩和行走困难的重要原因。Powell 等^[38]总结了近年来缓解 SCI 儿童痉挛的物理治疗方法,指出静态牵伸和被动关节活动训练是目前临床普遍使用的缓解痉挛手段,但缺乏高质量的证据支持。

有文献报道,SCI 儿童脊柱侧弯的发生率高达 96%,其中 58%需要手术治疗;髌关节半脱位的发生率为 57%^[39]。脊柱侧弯可引起骨盆倾斜、坐位困难、压疮、疼痛、下肢矫形器适配困难和心肺问题。预防性使用脊柱矫形器、保持良好的体位姿

势、坐位和站立训练时保持髋关节适度外展可预防或缓解脊柱侧弯和髋关节畸形。Fox 等^[40]对不完全脊髓损伤患儿的步行能力和健康状况进行了 2 年随访,其结果显示,患儿长期进行社区步行后步频、步速及下肢肌力有进一步提高,同时生长发育正常,未发生脊柱侧弯和髋关节发育异常。可见,除了常规的预防措施外,坚持运动训练亦可预防骨骼肌系统并发症。

总结与展望

运动训练是一种无创性、安全性高的康复治疗手段,智能运动训练相较于其他常规运动训练具有高精度性、高强度性、重复性及趣味性等独特优势,能够改善患儿步行能力、增强下肢肌肉力量、预防并发症,提高生活质量,在 SCI 儿童中的应用已取得了一定进展。相信随着智能康复的发展,其临床应用将越来越广泛,基于家庭和社区的康复也会逐渐普及,造福更多 SCI 儿童。

未来针对 SCI 儿童的研究可以从以下三方面进行:①制定儿童 SCI 运动训练指南,确定运动训练的方式、强度、时间、频率等因素;②在研究儿童 SCI 下肢运动功能的同时,还需关注运动训练对膀胱和直肠功能、骨密度、脊柱侧弯、心肺耐力以及整体生活质量等问题的影响;③目前儿童 SCI 样本量较小,多为病例报道研究,数据和证据有限,还不能对该人群的疗效或有效性做出一般性的结论,仍需要进行更大规模、更严格的随机对照研究。

参 考 文 献

- [1] Poorman GW, Segreto FA, Beaubrun BM, et al. Traumatic fracture of the pediatric cervical spine: etiology, epidemiology, concurrent injuries, and an analysis of perioperative outcomes using the kids' inpatient database[J]. *Int J Spine Surg*, 2019, 13(1):68-78.DOI:10.14444/6009.
- [2] Piatt J, Imperato N. Epidemiology of spinal injury in childhood and adolescence in the United States: 1997-2012[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2018, 21(5):441-448.DOI:10.3171/2017.10.PEDS17530.
- [3] Behrman AL, Argetsinger LC, Roberts MT, et al. Activity-based therapy targeting neuromuscular capacity after pediatric-onset spinal cord injury[J]. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*, 2019, 25(2):132-149.DOI:10.1310/sci2502-132.
- [4] Donenberg JG, Fettes 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.DOI:10.1080/17518423.2018.1487474.
- [5] Battistuzzo CR, Callister RJ, Callister R, et al. A systematic review of exercise training to promote locomotor recovery in animal models of spinal cord injury[J]. *J Neurotrauma*, 2012, 29(8):1600-1613.DOI:10.1089/neu.2011.2199.
- [6] Saunders NR, Kitchener P, Knott GW, et al. Development of walking, swimming and neuronal connections after complete spinal cord transection in the neonatal opossum, *Monodelphis domestica*[J]. *J Neurosci*, 1998, 18(1):339-355.DOI:10.1523/JNEUROSCI.18-01-00339.1998.
- [7] Gandhi P, Chan K, Verrier MC, et al. Training to improve walking after pediatric spinal cord injury: a systematic review of parameters and walking outcomes[J]. *J Neurotrauma*, 2017, 34(9):1713-1725.

DOI: 10.1089/neu.2016.4501.

- [8] Vogel LC, Mendoza MM, Schottler JC, et al. Ambulation in children and youth with spinal cord injuries[J]. *J Spinal Cord Med*, 2007, 30(1):158-164.DOI:10.1080/10790268.2007.11754595.
- [9] Gorski K, Harbold K, Haverstick K, et al. Locomotor training in the pediatric spinal cord injury population: a systematic review of the literature[J]. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*, 2016, 22(2):135-148.DOI:10.1310/sci2202-135.
- [10] Minassian K, Hofstoetter US, Dzeladini F, et al. The human central pattern generator for locomotion: does it exist and contribute to walking[J]. *Neuroscientist*, 2017, 23(6):649-663.DOI:10.1177/1073858417699790.
- [11] Megía García A, Serrano-Muñoz D, Taylor J, et al. Transcutaneous spinal cord stimulation and motor rehabilitation in spinal cord injury: a systematic review[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2020, 34(1):3-12.DOI:10.1177/1545968319893298.
- [12] Leech KA, Hornby TG. High-Intensity locomotor exercise increases brain-derived neurotrophic factor in individuals with incomplete spinal cord injury[J]. *J Neurotrauma*, 2017, 34(6):1240-1248.DOI:10.1089/neu.2016.4532.
- [13] Li X, Wu Q, Xie C, et al. Blocking of BDNF-TrkB signaling inhibits the promotion effect of neurological function recovery after treadmill training in rats with spinal cord injury[J]. *Spinal cord*, 2019, 57(1):65-74.DOI:10.1038/s41393-018-0173-0.
- [14] Covarrubias-Escudero F, Rivera-Lillo G, Torres-Castro R, et al. Effects of body weight-support treadmill training on postural sway and gait independence in patients with chronic spinal cord injury[J]. *J Spinal Cord Med*, 2019, 42(1):57-64.DOI:10.1080/10790268.2017.1389676.
- [15] Behrman AL, Nair PM, Bowden MG, et al. Locomotor training restores walking in a nonambulatory child with chronic, severe, incomplete cervical spinal cord injury[J]. *Phys Ther*, 2008, 88(5):580-590.DOI:10.2522/ptj.20070315.
- [16] Heathcock JC, Christensen C, Bush K, et al. Treadmill training after surgical removal of a spinal tumor in infancy[J]. *Phys Ther*, 2014, 94(8):1176-1185.DOI:10.2522/ptj.20130508.
- [17] Pantall A, Teulier C, Smith BA, et al. Impact of enhanced sensory input on treadmill step frequency: infants born with myelomeningocele[J]. *Pediatr Phys Ther*, 2011, 23(1):42-52.DOI:10.1097/PEP.0b013e318206eefa.
- [18] Argetsinger LC, Singh G, Bickel SG, et al. Spinal cord injury in infancy: activity-based therapy impact on health, function, and quality of life in chronic injury[J]. *Spinal Cord Ser Cases*, 2020, 6(1):13.DOI:10.1038/s41394-020-0261-1.
- [19] Mekki M, Delgado AD, Fry A, et al. Robotic rehabilitation and spinal cord injury: a narrative review[J]. *Neurotherapeutics*, 2018, 15(3):604-617.DOI:10.1007/s13311-018-0642-3.
- [20] Lefmann S, Russo R, Hillier S. The effectiveness of robotic-assisted gait training for paediatric gait disorders: systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1):1.DOI:10.1186/s12984-016-0214-x.
- [21] Angeli CA, Boakye M, Morton RA, et al. Recovery of over-ground walking after chronic motor complete spinal cord injury[J]. *N Engl J Med*, 2018, 379(13):1244-1250.DOI:10.1056/NEJMoa1803588.
- [22] Murillo N, Kumru H, Opisso E, et al. Recovery of assisted overground stepping in a patient with chronic motor complete spinal cord injury: a

- case report[J]. *NeuroRehabilitation*, 2012, 31(4):401-407.DOI:10.3233 / NRE-2012-00810.
- [23] Altizer W, Noritz G, Paleg G. Use of a dynamic gait trainer for a child with thoracic level spinal cord injury [J]. *BMJ Case Rep*, 2017, 2017: bcr2017220756.DOI:10.1136 / bcr-2017-220756.
- [24] De Miguel-Rubio A, Rubio MD, Salazar A, et al. Effectiveness of virtual reality on functional performance after spinal cord injury: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *J Clin Med*, 2020, 9(7):2065.DOI:10.3390 / jcm9072065.
- [25] Banerjee-Guénette P, Bigford S, Glegg SMN. Facilitating the implementation of virtual reality-based therapies in pediatric rehabilitation [J]. *Phys Occup Ther Pediatr*, 2020, 40(2):201-216.DOI: 10.1080/01942638.2019.1650867.
- [26] Deutsch J E, Westcott McCoy S. Virtual reality and serious games in neurorehabilitation of children and adults: prevention, plasticity, and participation[J]. *Pediatr Phys Ther*, 2017, 29: S23-s36. DOI: 10.1097/PEP.0000000000000387.
- [27] Hejrati B, Hull D, Black J, et al. Investigation of the treadport for gait rehabilitation of spinal cord injury[J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2012, 2012:4553-4558.DOI:10.1109/ EMBC.2012.6346980.
- [28] Meyns P, Roman De Mettelinge T, Van Der Spank J, et al. Motivation in pediatric motor rehabilitation: A systematic search of the literature using the self-determination theory as a conceptual framework[J]. *Dev Neurorehabil*, 2018, 21(6):371-390. DOI: 10.1080/17518423.2017.1295286.
- [29] Brüttsch K, Schuler T, Koenig A, et al. Influence of virtual reality soccer game on walking performance in robotic assisted gait training for children[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2010, 7:15.DOI: 10.1186/1743-0003-7-15.
- [30] Fattal C, Sijobert B, Daubigney A, et al. Training with FES-assisted cycling in a subject with spinal cord injury: Psychological, physical and physiological considerations [J]. *J Spinal Cord Med*, 2020, 43(3):402-413.DOI: 10.1080/10790268.2018.1490098.
- [31] Mayson TA, Harris SR. Functional electrical stimulation cycling in youth with spinal cord injury: a review of intervention studies[J]. *J Spinal Cord Med*, 2014, 37(3):266-277. DOI: 10.1179/2045772313Y.00000000183.
- [32] Hwang M, Zebracki K, Chlan KM, et al. Longitudinal changes in medical complications in adults with pediatric-onset spinal cord injury [J]. *J Spinal Cord Med*, 2014, 37(2):171-178.DOI: 10.1179/2045772313Y.00000000150.
- [33] Johnston TE, Smith BT, Mulcahey MJ, et al. A randomized controlled trial on the effects of cycling with and without electrical stimulation on cardiorespiratory and vascular health in children with spinal cord injury [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2009, 90(8):1379-1388.DOI: 10.1016/j.apmr.2009.02.018.
- [34] Johnston TE, Modlesky CM, Betz RR, et al. Muscle changes following cycling and/or electrical stimulation in pediatric spinal cord injury[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2011, 92(12):1937-1943.DOI: 10.1016/j.apmr.2011.06.031.
- [35] Liu A, Briody J, Munns C, et al. Regional changes in bone mineral density following spinal cord injury in children[J]. *Dev Neurorehabil*, 2008, 11(1):51-59.DOI:10.1080/17518420701409764.
- [36] Lauer RT, Smith BT, Mulcahey MJ, et al. Effects of cycling and/or electrical stimulation on bone mineral density in children with spinal cord injury[J]. *Spinal Cord*, 2011, 49(8):917-923.DOI: 10.1038/sc.2011.19.
- [37] Castello F, Louis B, Cheng J, et al. The use of functional electrical stimulation cycles in children and adolescents with spinal cord dysfunction: a pilot study[J]. *J Pediatr Rehabil Med*, 2012, 5(4):261-273.DOI: 10.3233/PRM-2012-00221.
- [38] Powell A, Davidson L. Pediatric spinal cord injury: a review by organ system[J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2015, 26(1):109-132. DOI: 10.1016/j.pmr.2014.09.002.
- [39] Behrman AL, Trimble SA. Outcomes of spinal cord injuries in young children[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2012, 54(12):1078.DOI: 10.1111/j.1469-8749.2012.04440.x.
- [40] Fox EJ, Tester NJ, Phadke CP, et al. Ongoing walking recovery 2 years after locomotor training in a child with severe incomplete spinal cord injury[J]. *Phys Ther*, 2010, 90(5):793-802.DOI: 10.2522/ptj.20090171.

(修回日期:2021-08-01)

(本文编辑:阮仕衡)