

· 综述 ·

脊髓损伤神经调控重建脊髓中继环路[△]

李艺, 李文媛, 王淑影, 王莹*

(牡丹江医学院解剖教研室, 黑龙江牡丹江 157011)

摘要: 脊髓损伤 (spinal cord injury, SCI) 破坏大脑和脊髓中神经环路间的信号传递, 造成永久性运动、感觉丧失及自主神经功能障碍等。位于脊髓损伤灶上端和下端大多数神经环路在解剖学上保持完整, 上述环路可通过脊髓中继神经环路传递下行运动信号。因此, 重建中继性神经环路是最具前途的治疗策略之一。其中神经调控技术能够利用残余大脑、脑干和脊髓神经元重建脊髓中继神经环路, 改善 SCI 后神经功能障碍。为了解神经调控技术重建 SCI 后中继神经环路的最新进展, 本文针对 SCI 后大脑皮质、脑干和脊髓的中继神经环路重建进行综述, 进一步讨论 SCI 后相关神经环路神经调控的潜在机制及其意义。

关键词: 神经调控, 脊髓损伤, 神经环路, 功能整合, 中继通路

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 13-1204-06

Neuromodulation to reconstructs the spinal relay neural circuit secondary to spinal cord injury // LI Yi, LI Wen-yuan, WANG Shu-ying, WANG Ying. Department of Anatomy, Mudanjiang Medical University, Mudanjiang 157011, China

Abstract: Spinal cord injury (SCI) disrupts the signal transmission of the central nerve circuit of the spinal cord, resulting in permanent movement, sensory loss and autonomic dysfunction. However, most of the neural circuits located at the upper and lower lesion remain anatomically intact, and these circuits can transmit descending motor signals through spinal cord relay circuits. Therefore, reconstruction of the relayed neural circuit has become one of the most promising therapeutic strategies. Among them, neuroregulatory technique can reconstruct the spinal cord trunk neural circuit by using the residual brain, brainstem and spinal cord neurons, and improve the neurological dysfunction after SCI. In order to understand the latest progress of neuroregulatory techniques in the reconstruction of relayed neural circuits after SCI, this paper reviews the reconstruction of relayed neural circuits in the cerebral cortex, brainstem and spinal cord after SCI, and further discusses the potential mechanism and significance of the neural regulation of relevant neural circuits after SCI.

Key words: neuromodulation, spinal cord injury, neural circuit, functional integration, relay pathway

正常脊髓具有调节运动和自主神经功能的神经环路, 研究发现形成神经环路的神经元及其亚群的分子结构复杂多样^[1]。大脑和脑干部分区域神经环路与脊髓神经环路构成神经网络, 每个区域都由特定神经元亚群组成, 具有不同的受体和投射目标, 对运动产生独特作用。揭示大脑、脑干和脊髓的神经环路在脊髓损伤 (spinal cord injury, SCI) 后的变化和脊髓中继神经环路重建具有重要临床意义。神经调控技术通过电接口直接刺激中枢和周围神经系统来调控神经元活动, 已在临床上成功治疗 SCI。其能够刺激残余神经功能连接, 重建脊髓中继神经环路^[2]。本文综述了 SCI 后大

脑和脑干的神经环路重建, 以及脊髓中继神经环路重建的研究进展, 并探讨神经调控靶向 SCI 后神经环路重建的机制和潜在作用, 旨在精准改善 SCI 后功能重建。

1 SCI 后大脑神经环路重建

人体自主运动主要由大脑皮质输出控制信号, 下行输入激活脊髓运动神经元 (motor neuron, MN) 和产生协调运动输出的中间神经元池。以皮质脊髓束 (corticospinal tract, CST) 为靶点为下行众多神经环路

DOI:10.20184/j.cnki.issn1005-8478.100458

△基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 82371385); 黑龙江省自然科学基金项目 (编号: JQ2021H004); 黑龙江省属高校基本科研业务费项目 (编号: 2021-KYYWF-0469); 牡丹江医学院科学基金火炬计划项目 (编号: 2022-MYHJ-012); 牡丹江医学院博士科研启动基金项目 (编号: 2021-MYBSKY-039)

作者简介: 李艺, 硕士研究生, 研究方向: 神经损伤与修复, (电子信箱) 1753400374@qq.com

* **通信作者:** 王莹, (电子信箱) yingwang770224@163.com

提供了广阔通路。大脑神经环路重建的重要机制之一是双侧运动皮质重建，这一机制在单侧 SCI 的非人灵长类动物 (non-human primate, NHP) 模型研究中得以证实^[3]。SCI 早期运动和感觉皮质活动被激活，然而激活范围仅限于对侧运动和感觉皮质以及脊髓前角。SCI 后保留 CST 部分神经纤维，其能够定向生长，连接支配的脊髓灰质区域^[4]。单侧 SCI 后，CST 可从对侧背外侧柱发出分支，穿过脊髓中线投射至前角，与产生手功能的神经元连接形成突触连接，促进手功能的恢复^[5]，其原因可能是皮质神经元处于类似于发育中神经元的转录状态。在啮齿类动物和 NHP 的模型中已证实 CST 投射通路的重建^[6]。当 SCI 中断所有 CST 投射时，来自运动皮质的指令可通过其他途径中继传递，形成中继神经环路 (图 1)。运动指令可通过皮质脊髓-网状脊髓通路 (corticospino-reticulospinal pathway, C-Rs)^[7]、皮质脊髓-红核脊髓通路 (corticospino-rubrospinal pathway, C-Rb)、网状脊髓-固有脊髓通路 (reticulospino-propriospinal pathway, R-P)^[8] 及皮质脊髓-脊髓固有通路 (corticospino-propriospinal pathway, C-P)^[9]，从受损轴突发出侧枝连接，绕过损伤部位形成 CST 神经功能性中继，调控部分运动功能和肌张力。

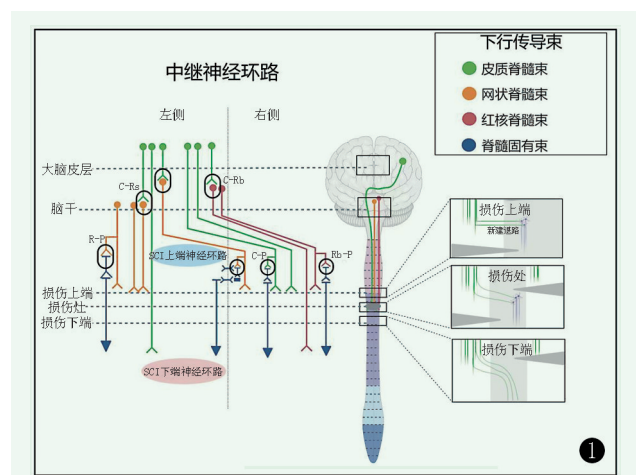


图 1. SCI 后中继神经环路的重建。
Figure 1. Reconstruction of the relay neural circuit after SCI.

1.1 皮质脊髓神经通路

研究发现，在脊髓半离断后，电刺激运动皮质，可恢复行走。尽管一侧 CST 投射中断，但通过皮质闭环电刺激，能够控制失神经支配的下肢运动^[10]，与光遗传学激活全离断 SCI 后重建皮质脊髓神经通路的研究结果相一致^[7]。脊髓全离断损伤中断所有 CST 投射，而光遗传学引导信号通过损伤灶下端残留谷氨酸能网状脊髓神经元进行中继传递，表明运动指令可通过激活损伤灶下端功能沉默备用的神经环路进行信

号传递。

重复经颅磁刺激 (repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS) 通过刺激大脑感觉运动皮质调控 CST 神经可塑性，促进 SCI 后功能恢复。其机制可能与 rTMS 诱导脑源性神经营养因子 (brain-derived neurotrophic factor, BDNF) 表达密切相关^[7]。神经调控也可间接调节 C-Rs 神经环路^[7]。经颅电刺激 (transcranial direct current stimulation, tDCS) 通过置于脑部不同分区的电极，产生电流，刺激相应大脑皮层，改善皮质神经元兴奋性，从而发挥调控中枢皮层及皮层下神经网络功能^[11]。迷走神经刺激 (vagus nerve stimulation, VNS) 激活整个脑干神经核，激发大脑释放乙酰胆碱和去甲肾上腺素，进而调控其在大脑神经环路分布，以增强其对神经康复反应。在颈椎 SCI 后，VNS 闭环电刺激促进参与手部肌肉控制的神经元神经突生长^[12]，但特定的神经元亚群是否参与以及如何促进功能恢复尚不明确。

1.2 网状脊髓通路

网状脊髓束 (reticulospinal tract, RS) 神经元起源于脑干的网状结构，其轴突主要终止于脊髓中间灰质和腹侧角。RS 轴突与大多数脊髓节段联络神经元和固有脊髓神经元建立连接^[13]。在脊髓中 RS 轴突既与 MN 直接相连，也与脊髓中间神经元 (spinal interneurons, SpINs) 连接。RS 轴突沿脊髓向下延伸，并在许多脊髓节段发出侧支，激活分布在整个脊髓中的各种神经网络。

SCI 致 CST 损伤后，RS 在运动功能恢复中发挥重要作用。研究发现，残留谷氨酸能 RS 通过与 CST 突触连接，传递皮质运动指令^[7]。在颈椎脊髓半离断损伤后，RS 神经纤维增加了对侧脊髓网状结构和颈椎脊髓固有神经元的投射^[8]。RS 可通过残留或新生轴突将运动指令关键信息中继传递至区域神经环路。电刺激桥脑内侧网状结构可诱导远端 MN 突触兴奋^[14]，电刺激 RS 能够促进上肢手功能的协调运动^[15]。

1.3 红核脊髓通路

红核脊髓束 (rubrospinal tract, RuS) 与 CST 共同向脊髓 MN 输出信号，协调肢体运动。在 CST 损伤后，RuS 可替代其部分功能。RuS 神经元起源于脑干红核，其轴突延伸至腰骶段，终止于脊髓背角和前角中间区域，大多数 RuS 轴突终止于对侧，但也有少数终止于同侧前角^[16]。应用短潜伏期肌电图结合逆行跨神经元示踪检测电刺激红核功能，结果表明 RuS 轴突与脊髓 MN 有直接单突触连接，能够激活

MN^[16, 17]。

1.4 脊髓固有通路

脊髓固有束 (propriospinal, PS) 由具有短轴突和长轴突的 SpINs 组成, 连接大多数脊髓节段, 有助于中继和传递运动指令。啮齿动物模型证实 CST 与 PS 神经元直接连接^[18], 最近研究聚焦于 PS 在 SCI 后脊髓节段重新布线的再生潜力。在脊髓完全横断后, PS 神经元亦可存活, 与其他 CST 和 RS 等长轴突神经元比较, PS 短轴突神经元具有更好的再生潜力^[19]。在颈椎半离断或交错半切 SCI 模型中, CST 新生轴突连接 PS, 迂回损伤灶向下端同侧传递运动指令^[20], 这些新生轴突和相关中继神经环路促进了运动功能的改善。研究中应用化学遗传学调控完全 SCI 小鼠胸段 SpINs, 发现兴奋性或抑制性 SpINs 导致不同的行为结果, 对小鼠站立或踏步有显著影响^[21]。因此, 完全性或不完全性 SCI 后, 在缺乏足够 CST 轴突运动指令输入的情况下, PS 是恢复功能的关键组成部分。

硬膜外电刺激 (epidural electrical stimulation, EES) 通过激活脊髓背根中大、中直径的传入神经纤维, 特别是 Ia/Ib/II 组本体感觉和低阈值皮肤传入, 增强 PS 和 MN 间的单突触传递, 通过调控 PS 促进节律性活动和后肢协调。rTMS 刺激大鼠 CST 与 PS 产生突触效能的长时程增强, 以活动依赖性方式定位于脊髓灰质内相应运动神经元池^[22]。

2 SCI 后脑干神经环路的重建

脑干多个区域神经元亚群相互作用向下传递运动指令, 脑干亦是启动和处理复杂运动任务的关键解剖结构。其中中脑运动区 (mesencephalic locomotor region, MLR) 在脊椎动物运动控制中发挥关键作用^[23], 多巴胺能神经元通路 with MLR 汇合的主要途径有两条: 一条是从腹侧被盖区 (ventral tegmental nucleus, VTA) 出发的神经通路, 称为中脑辐射束 (median forebrain bundle, MFB), 对奖励、动机、学习和情感调节等功能发挥调节作用; 另一条是从黑质出发的神经通路, 称为黑质纹状体通路, 对运动执行和姿势调节发挥调控作用。MLR 通过下行 PS 通路向脑干下部网状结构提供输入信号, 将指令传递至脊髓的运动神经环路。

大多数 SCI 后沉默神经环路中包含来源于脑干的神经通路。深部脑刺激 (deep brain stimulation, DBS) 刺激 MLR 可激活 RS, 改善 SCI 后运动能

力^[24]。这一结果与运动皮质电刺激观察结果相一致, 表明大脑未参与调控具有备用投射功能的 RS。但 MLR 很难在手术中定位, 因为 MLR 主要是中脑桥核结构中行走有关的功能结构的定义。最新研究发现 MLR 由胆碱能、谷氨酸能和 γ -氨基丁酸能兴奋性神经元组成, 形成中脑桥核和楔形核投射神经元群^[25]。DBS 刺激楔形核能够激活高速同步步态运动^[26]。这些研究表明, 应进一步探索神经调控技术靶向更精细、更具体的解剖特定区域的功能。

3 SCI 后脊髓神经环路重建

当 SCI 后损伤处上端残留的神经纤维数量丰富时, 这些神经纤维将侧枝延伸到损伤处下端重建中继神经环路, 从而支持功能恢复^[2]。当 SCI 后皮质运动指令无法直接传递到损伤处下端脊髓组织时, 即所有来自大脑的直接通路都被切断。而位于两个大脑半球之间的神经元可以形成中继, 将足够的运动信息传递过去, 下肢运动功能得以恢复^[3]。同时, SCI 损伤灶上端投射通路中断触发了位于损伤灶下端的脊髓神经环路的重建。脊髓神经环路可在没有大脑和脑干参与的情况下产生复杂的运动行为^[27]。其能够将特定任务的感觉信息转化为肌肉活动模式的能力, 以满足内在的生物力学和外在环境需求。当脊髓上神经纤维投射受损时, 感觉信息将成为运动控制的主要来源。肌肉纺锤体反馈环路的基因敲除能够阻止不完全性 SCI 后的自主恢复, 导致脑干和脊髓中继神经元无法对损伤做出反应, 抑制新的突触形成。上述结果可解释为什么 SCI 运动功能恢复依赖于感觉信息和残留的神经纤维。

虽然损伤处下端脊髓一直是 EES 治疗的主要焦点, 但基于 NHP 模型和临床四肢瘫痪患者研究表明, 以颈椎背根进入区为 EES 刺激目标也可显著提高手的灵活性^[28]。损伤灶上端 C₅ 节段 EES 可激活颈神经网络和 PS, 刺激轴突生长, 协同促进运动功能恢复^[27]。近期研究表明^[29], 在神经调控过程中, 其选择特定的神经元亚群发挥作用, 基于小鼠单细胞转录组学发现, EES 调节特异性选择表达 Vsx2 的兴奋性 SpINs。Vsx2 接收来自大直径传入神经和脑干神经元的投射, EES 加强 Vsx2 投射模式, 将来自脑干运动区域和大直径传入神经的信息转化为运动指令, 这些指令被传递至脊髓前角 MN 产生运动^[29]。当发生严重 SCI 时, 很难明确 SCI 损伤灶下端神经元是否受损, 其功能恢复可能更多依赖于特定神经元亚群的

重建。

研究发现，EES^[30-32]、脊髓内电刺激（spinal cord stimulation, SCS）^[33]或经皮电神经刺激（transcutaneous electrical nerve stimulation, TENS）^[34]治疗可激活有节奏的腿部运动、负重站立、甚至独立行走，提高运动功能，促进神经再生的能力。当保留足够数量神经纤维时，这些疗法甚至可以使这些原本沉

默的中继神经元参与脊髓神经环路。这一机制已在临床前模型中证实，可以恢复人类瘫痪肌肉活动的意志控制。EES 和 SCS 通过激活局部脊髓神经环路或步态中枢模式发生器（central pattern generator, CPG）诱导 SCI 后的功能性运动^[35]，EES 能够激活多个脊髓节段 MN 输出，促进运动恢复（表 1）。

表 1. SCI 后中继神经通路作用及神经调控干预

Table 1. The role of relay neural pathway and the intervention of neuromodulation after SCI

作者	年份	动物	干预措施	生物学效应
Riddle CN 等 ^[14]	2010	猕猴	左侧锥体束和右侧内侧面侧束进行电刺激治疗	电刺激内侧纵束可以诱导远端 MN 的突触兴奋，加强脑干与 SpINs 的联系，可能会恢复运动
Asboth L 等 ^[7]	2018	大鼠	L ₂ 和 S ₁ 进行 EES	腰骶段进行 EES，运动皮层恢复了对瘫痪腿的自适应控制
Darrow MJ 等 ^[12]	2020	大鼠	左侧颈部进行闭环 VNS	VNS 与康复训练相结合，改善了大鼠双侧 C _{7/8} 脊髓不完全性挫伤后前肢力量的恢复
Bonizzato M 等 ^[24]	2021	大鼠	在右侧大脑皮层运动区和 L ₂ 进行 DBS 与 EES 联合治疗	MLR 和腰段脊髓同时施加 EES，可以促进 SCI 腿部瘫痪的大鼠运动恢复
Kathe C 等 ^[29]	2022	人，大鼠	T _{12/13} 和 L _{1/2} 进行 EES，在神经康复期间实现持续运动	EES 调节 SpINs 亚型 Vsx2，重建中继神经环路，改善人和大鼠运动恢复

4 小结及展望

综上所述，SCI 后大脑和脑干神经环路局部的变化及脊髓中重建的中继神经环路，这些环路中继信息指令跨越损伤灶传递到损伤灶下端神经网络。残留的神经通路通过神经调控治疗可以促进其轴突出芽，改善运动功能。大脑、脑干和脊髓中解剖学上完整神经环路的神经调控已显示出改善 SCI 后神经功能的治疗前景。然而，目前完全基于重建神经环路的神经调控技术特异性较差，即使当神经调控策略将电流引导至特定神经元亚群时，其分辨率对于中枢神经系统神经网络信息传递仍然有限。识别响应电刺激并参与神经环路重建的神经元亚群可能为精准治疗 SCI 开辟新的途径，SCI 后中继脊髓神经环路重建的神经调控潜力亟待进一步深入探索。

参考文献

[1] Osseward PJ, Amin ND, Moore JD, et al. Conserved genetic signatures parcellate cardinal spinal neuron classes into local and projection subsets [J]. *Science*, 2021, 372 (6540) : 385-393. DOI: 10.1126/science.abe0690.

[2] Arber S, Costa RM. Connecting neuronal circuits for movement [J]. *Science*, 2018, 360 (6396) : 1403-1404. DOI: 10.1126/science.aat5994.

[3] Courtine G, Roy RR, Raven J, et al. Performance of locomotion and foot grasping following a unilateral thoracic corticospinal tract lesion in monkeys (*Macaca mulatta*) [J]. *Brain*, 2005, 128 (10) : 2338-2358. DOI: 10.1093/brain/awh604.

[4] Cao Y, Shi Y, Xiao Z, et al. Contralateral axon sprouting but not ipsilateral regeneration is responsible for spontaneous locomotor recovery post spinal cord hemisection [J]. *Front Cell Neurosci*, 2021, 15: 730348. DOI: 10.3389/fncel.2021.730348.

[5] Poplawski GHD, Kawaguchi R, Van Niekerk E, et al. Injured adult neurons regress to an embryonic transcriptional growth state [J]. *Nature*, 2020, 581 (7806) : 77-82. DOI: 10.1038/s41586-020-2200-5.

[6] Kazim SF, Bowers CA, Cole CD, et al. Corticospinal motor circuit plasticity after spinal cord injury: harnessing neuroplasticity to improve functional outcomes [J]. *Mol Neurobiol*, 2021, 58 (11) : 5494-5516. DOI: 10.1007/s12035-021-02484-w.

[7] Asboth L, Friedli L, Beuparant J, et al. Cortico-reticulo-spinal circuit reorganization enables functional recovery after severe spinal cord contusion [J]. *Nat Neurosci*, 2018, 21 (4) : 576-588. DOI: 10.1038/s41593-018-0093-5.

[8] May Z, Fenrich KK, Dahlby J, et al. Following spinal cord injury transected reticulospinal tract axons develop new collateral inputs to spinal interneurons in parallel with locomotor recovery [J]. *Neural Plast*, 2017, 2017: 1932875. DOI: 10.1155/2017/1932875.

[9] Bareyre FM, Kerschensteiner M, Raineteau O, et al. The injured spinal cord spontaneously forms a new intraspinal circuit in adult rats [J]. *Nat Neurosci*, 2004, 7 (3) : 269-277. DOI: 10.1038/nn1195.

[10] Bonizzato M, Martinez M. An intracortical neuroprosthesis immedi-

- ately alleviates walking deficits and improves recovery of leg control after spinal cord injury [J]. *Sci Transl Med*, 2021, 13 (586) : eabb4422. DOI: 10.1126/scitranslmed.abb4422.
- [11] 赵殿钊, 张鸿悦, 刘晓磊, 等. 经颅电刺激联合核心肌锻炼治疗非特异性腰痛 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (15) : 1366–1371. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2022.15.05.
Zhao DZ, Zhang HY, Liu XL, et al. Transcranial direct current stimulation combined with core exercise for nonspecific low back pain [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (15) : 1366–1371. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2022.15.05.
- [12] Darrow MJ, Torres M, Sosa MJ, et al. Vagus nerve stimulation paired with rehabilitative training enhances motor recovery after bilateral spinal cord injury to cervical forelimb motor pools [J]. *Neurorehabil Neural Rep*, 2020, 34 (3) : 200–209. DOI: 10.1177/1545968319895480.
- [13] Akalu Y, Frazer AK, Howatson G, et al. Identifying the role of the reticulospinal tract for strength and motor recovery: a scoping review of nonhuman and human studies [J]. *Physiol Rep*, 2023, 11 (14) : e15765. DOI: 10.14814/phy2.15765.
- [14] Riddle CN, Baker SN. Convergence of pyramidal and medial brain stem descending pathways onto macaque cervical spinal interneurons [J]. *J Neurophysiol*, 2010, 103 (5) : 2821–2832. DOI: 10.1152/jn.00491.2009.
- [15] Honeycutt CF, Kharouta M, Perreault EJ. Evidence for reticulospinal contributions to coordinated finger movements in humans [J]. *J Neurophysiol*, 2013, 110 (7) : 1476–1483. DOI: 10.1152/jn.00866.2012.
- [16] 臧宇杰, 赵廷宝. 脊髓损伤后肢体痉挛神经机制的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2014, 22 (24) : 2252–2255. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2014.24.10.
Zang YJ, Zhao TB. Mechanism of limb spasticity after spinal cord injury [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2014, 22 (24) : 2252–2255. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2014.24.10.
- [17] Chen B, Li F, Jia B, et al. Celsr3 inactivation in the brainstem impairs rubrospinal tract development and mouse behaviors in motor coordination and mechanic-induced response [J]. *Mol Neurobiol*, 2022, 59 (8) : 5179–5192. DOI: 10.1007/s12035–022–02910–7.
- [18] Ueno M, Nakamura Y, Li J, et al. Corticospinal circuits from the sensory and motor cortices differentially regulate skilled movements through distinct spinal interneurons [J]. *Cell Rep*, 2018, 23 (5) : 1286–1300. DOI: 10.1016/j.celrep.2018.03.137.
- [19] Conta AC, Stelzner DJ. Differential vulnerability of propriospinal tract neurons to spinal cord contusion injury [J]. *J Comp Neurol*, 2004, 479 (4) : 347–359. DOI: 10.1002/cne.20319.
- [20] Courtine G, Song B, Roy RR, et al. Recovery of supraspinal control of stepping via indirect propriospinal relay connections after spinal cord injury [J]. *Nat Med*, 2008, 14 (1) : 69–74. DOI: 10.1038/nm1682.
- [21] Brommer B, He M, Zhang Z, et al. Improving hindlimb locomotor function by Non-invasive AAV-mediated manipulations of propriospinal neurons in mice with complete spinal cord injury [J]. *Nat Commun*, 2021, 12 (1) : 781–788. DOI: 10.1038/s41467–021–20980–4.
- [22] Chen M, Chen Z, Xiao X, et al. Corticospinal circuit neuroplasticity may involve silent synapses: Implications for functional recovery facilitated by neuromodulation after spinal cord injury [J]. *IBRO Neurosci Rep*, 2023, 14: 185–194. DOI: 10.1016/j.ibneur.2022.08.005.
- [23] Dautan D, Kovács A, Bayasgalan T, et al. Modulation of motor behavior by the mesencephalic locomotor region [J]. *Cell Rep*, 2021, 36 (8) : 109594. DOI: 10.1016/j.celrep.2021.109594.
- [24] Bonizzato M, James ND, Pidpruzhnykova G, et al. Multi-pronged neuromodulation intervention engages the residual motor circuitry to facilitate walking in a rat model of spinal cord injury [J]. *Nat Commun*, 2021, 12 (1) : 1925–932. DOI: 10.1038/s41467–021–22137–9.
- [25] Ferreira-Pinto MJ, Kanodia H, Falasconi A, et al. Functional diversity for body actions in the mesencephalic locomotor region [J]. *Cell*, 2021, 184 (17) : 4564–4578. DOI: 10.1016/j.cell.2021.07.002.
- [26] Caggiano V, Leiras R, Goñi-Erro H, et al. Midbrain circuits that set locomotor speed and gait selection [J]. *Nature*, 2018, 553 (7689) : 455–460. DOI: 10.1038/nature25448.
- [27] Giorgi A, Cer AT, Mohan S, et al. Excitatory and inhibitory descending commissural interneurons differentially integrate supraspinal and segmental sensory signals [J]. *J Neurosci*, 2023, 43 (27) : 5014–5029. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2015–22.2023.
- [28] Courtine G, Sofroniew MV. Spinal cord repair: advances in biology and technology [J]. *Nat Med*, 2019, 25 (6) : 898–908. DOI: 10.1038/s41591–019–0475–6.
- [29] Kathe C, Skinnider MA, Hutson TH, et al. The neurons that restore walking after paralysis [J]. *Nature*, 2022, 611 (7936) : 540–547. DOI: 10.1038/s41586–022–05385–7.
- [30] Cajigas I, Vedantam A. Brain-computer interface, neuromodulation, and neurorehabilitation strategies for spinal cord injury [J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2021, 32 (3) : 407–417. DOI: 10.1016/j.nec.2021.03.012.
- [31] 房龙, 赵廷宝. 脊髓损伤后中枢性疼痛的治疗进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2012, 20 (4) : 326–328. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2012.04.11.
Fang L, Zhao TB. Progress in the treatment of central pain after spinal cord injury [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2012, 20 (4) : 326–328. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2012.04.11.
- [32] Govindarajan LN, Calvert JS, Parker SR, et al. Fast inference of spinal neuromodulation for motor control using amortized neural networks [J]. *J Neural Eng*, 2022, 19 (5) : 1741–2552. DOI: 10.1088/1741–2552/ac9646.
- [33] Chandrasekaran S, Bhagat NA, Ramdeo R, et al. Case study: persistent recovery of hand movement and tactile sensation in peripheral nerve injury using targeted transcutaneous spinal cord stimulation [J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1210544. DOI: 10.3389/fnins.2023.1210544.

[34] Kobayashi RO, Gogeoascoechea A, Tomy LJ, et al. Neural data-driven model of spinal excitability changes induced by transcutaneous electrical stimulation in spinal cord injury subjects [J]. IEEE Int Conf Rehabil Robot, 2022, 2022: 1-6. DOI: 10.1109/ICORR55369.2022.9896517.

[35] Minassian K, Bayart A, Lackner P, et al. Rare phenomena of cen-

tral rhythm and pattern generation in a case of complete spinal cord injury [J]. Nat Commun, 2023, 14 (1) : 3276-3291. DOI: 10.1038/s41467-023-39034-y.

(收稿:2023-06-29 修回:2024-01-05)
(同行评议专家:胡永胜,付秀美,贾桦)
(本文编辑:宁桦)

读者·作者·编者

《中国矫形外科杂志》网站开设播客栏目的通告

为积极响应国家新闻出版署关于组织实施 2024 年度出版融合发展工程的通知, 深化出版业数字化、智能化、绿色化发展, 推进传统出版和数字出版深度融合的指示精神。《中国矫形外科杂志》编辑部决定自 2024 年 2 月始在本刊网站开设播客栏目。该栏目每期将选取近期出版的《中国矫形外科杂志》精彩文章 3~4 篇, 通过播客的形式进行播出, 读者可以“听”杂志, 以满足不同读者需求, 为广大读者提供更加丰富、便捷的阅读体验。

手机“听”杂志的操作步骤: 百度搜索“中国矫形外科杂志官方网站”, 点开 after 点击右上角“虚拟导航栏”, 显示功能键, 点击“添加到桌面”, 在桌面通过快捷方式, 打开本刊网站→点击右上角蓝色色块(见图示)→继续医学教育→播客节目。

播客栏目将汇集本刊各期精选文章, 内容涵盖矫形外科领域的最新研究成果、临床实践经验、新技术交流等方面。我们将根据杂志出版周期, 适时更新播客栏目, 确保信息的时效性和连续性。后续我们将根据听众反映的情况, 酌情增加每期播客数量。希望这些文章能为广大读者提供有益的参考和启示, 帮助大家更好地了解矫形外科领域的发展动态和前沿技术, 以不断提高广大矫形外科临床医师的学术水平, 更好地为广大患者服务。

未来本刊网站将继续着力于为广大读者提供更多优质的内容和服务, 感谢您的关注和支持, 让我们一起为《中国矫形外科》杂志的不断发展贡献力量。

敬请关注《中国矫形外科杂志》网站, <http://jxwk.ijournal.cn>

《中国矫形外科杂志》编辑部
2024 年 2 月 22 日

