

周围神经损伤后功能康复的机制与临床干预研究进展

李思宇

黑龙江中医药大学附属第二医院康复中心, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

周围神经损伤(PNI)是临床常见疾病, 发病率约为1.46%~2.8%, 年发病率为0.05%~0.15%, 在中国约有30~50万患者, 占创伤患者的2.8%。尽管周围神经系统具有再生能力, 但轴突再生速度缓慢, 且功能恢复率不足60%, 临床治疗仍面临巨大挑战。PNI即使经规范治疗, 仅有10%~25%的患者能完全恢复受损神经功能, 因此此病的致残率仍居高不下。若治疗不及时或方案选择不当, 约75%的患者会伴有永久性肢体麻木、运动失控甚至瘫痪, 不仅严重影响日常活动能力, 更给家庭和社会带来沉重的负担。本文系统综述了近些年周围神经损伤后功能康复的分子机制、细胞机制和中枢重塑机制, 以及物理治疗、运动疗法等康复手段, 为周围神经损伤的临床康复提供参考。

关键词

周围神经损伤, 功能康复, 神经再生, 物理治疗, 中枢重塑

Research Progress on the Mechanisms and Clinical Interventions for Functional Rehabilitation after Peripheral Nerve Injury

Siyu Li

Rehabilitation Center, The Second Affiliated Hospital of Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin Heilongjiang

Received: April 26, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Peripheral nerve injury (PNI) is a common clinical disease with an incidence rate of approximately

1.46%~2.8%, and an annual incidence rate of 0.05%~0.15%. There are approximately 300,000 to 500,000 patients in China, accounting for 2.8% of trauma patients. Despite the regenerative capacity of the peripheral nervous system, axonal regeneration is slow, and the functional recovery rate is less than 60%, posing significant challenges to clinical treatment. Even with standardized treatment, only 10%~25% of patients with PNI can fully recover their impaired nerve function, resulting in a persistently high disability rate. If treatment is not timely or the treatment plan is inappropriate, about 75% of patients will experience permanent limb numbness, loss of motor control, or even paralysis, which not only severely affects their daily activity ability but also imposes a heavy burden on families and society. This article systematically reviews the molecular, cellular, and central nervous system remodeling mechanisms underlying functional recovery after peripheral nerve injury in recent years, as well as rehabilitation methods such as physical therapy and exercise therapy, providing a reference for the clinical rehabilitation of peripheral nerve injury.

Keywords

Peripheral Nerve Injury, Functional Rehabilitation, Nerve Regeneration, Physical Therapy, Central Nervous System Remodeling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

周围神经损伤(Peripheral Nerve Injury, PNI)是一种由外界直接或间接暴力作用于周围神经干及其分支引发,临床以肢体运动功能丧失、感觉传导异常及自主神经调节紊乱为主要表现[1]。随着工业化进程加快和人口老龄化趋势加剧, PNI 的发病率呈上升趋势。据研究表明, PNI 年发病率约为 1.46%~2.8%, 在中国约有 30~50 万患者[2]。PNI 不仅导致严重的功能障碍,还可能引发慢性疼痛、肌肉萎缩等并发症[3]。若未得到及时治疗,易出现严重疼痛、肌肉萎缩、关节挛缩等并发症,不仅造成患者肢体功能永久性缺损,还会增加家庭负担。目前,周围神经损伤的治疗主要包括手术和康复治疗。神经吻合术、自体神经移植等手术治疗,虽能重建神经,但自体神经供体取材受限、术后神经瘤形成风险升高、神经再生定向性差等问题始终存在,即便完成手术修复,患者整体肢体功能优良恢复率仍低于 60% [4]。近年来,随着康复医学的发展,物理治疗、运动疗法等非手术康复手段在促进神经再生、改善功能障碍方面展现出独特优势[5]。本文系统梳理周围神经损伤后功能康复的机制与临床研究进展,分析近些年来康复治疗方法的创新与应用,为临床实践提供指导。

2. 周围神经损伤后功能康复的机制

2.1. 神经再生机制

施万细胞(SCs)是周围神经系统的主要胶质细胞。生理状态下, SCs 以髓鞘维持型存在,负责包裹轴突、维持神经传导效率。但在 PNI 后 24 小时内, SCs 会快速去分化为修复型,通过 Krox20/C-Jun、NRG-1/ErbB 等信号通路精准调控,去分化后的 SCs 会停止髓鞘相关基因的表达,转而分泌多种促再生因子[6]。通过分泌溶酶体酶,快速吞噬损伤远端的髓鞘碎片和坏死轴突,为后续轴突再生清除障碍。其次,修复型 SCs 合成并释放神经生长因子(NGF)、脑源性神经营养因子(BDNF)、胶质细胞源性神经营养因子(GDNF)等多种神经营养因子,不仅能抑制神经元凋亡,还能为轴突延伸提供支持[7]。神经营养因子(NTFs)

是神经再生的核心信号分子，其表达与作用具有时序性和空间特异性，不同因子在再生的不同阶段发挥不同作用。在损伤早期，损伤远端的 SCs 会大量分泌 NGF，其浓度梯度是引导近端轴突定向延伸的关键。若局部 NGF 浓度不足，轴突会因缺乏定向信号而无序生长，甚至无法到达靶器官。

2.2. 突触可塑性机制

中枢突触重塑是 PNI 后功能康复的重要组成部分，主要与脊髓背角神经元和感觉运动皮层神经元的突触可塑性变化有关。研究表明，PNI 后，脊髓背角神经元会发生显著的突触重构，伴有树突棘密度变化和形态学改变。此外，BDNF 在中枢突触重塑中发挥关键作用。研究表明，BDNF 通过激活突触后 TrkB 受体，诱导大麻素释放，进而抑制突触前钙电流和囊泡释放概率，调节神经递质释放。同时，BDNF 还能增强脊髓突触连接强度，促进新突触形成，从而改善神经信号传递。神经再生的成功与否直接决定功能恢复的程度，以骨骼肌为例，神经肌肉接头的重建是运动功能恢复的关键[8]。神经肌肉接头是运动神经末梢与骨骼肌之间形成的突触结构，由突触前膜、突触间隙和突触后膜组成。PNI 后，运动终板因失神经支配而逐渐退化，表现为 AChR 聚集减少和突触后接点褶皱破坏。SCs 分泌的神经营养因子如 GDNF、BDNF 等对终板重建至关重要。其中，GDNF 在 PNI 早期表达达峰，能促进运动神经元存活和轴突延伸。而 BDNF 在中期显著上调，通过激活 HIF-1 α 相关通路促进轴突髓鞘化和突触重建。

2.3. 免疫微环境调控

PNI 后的免疫微环境调控与多种免疫细胞和细胞因子的动态平衡有关。研究表明，SCs 在损伤后高表达分泌型卷曲相关蛋白 1 (sFRP1)，而 sFRP1 通过与巨噬细胞 HSP90 结合，诱导巨噬细胞向促炎表型转化，加剧神经炎症。同时，芳香烃受体(AhR)在神经元中的激活也会限制轴突再生[9]。间充质干细胞(MSCs)及其外泌体(MSCs-EVs)在 PNI 后免疫微环境调控中具有重要作用。MSCs 通过旁分泌和细胞间直接接触两种机制发挥免疫调节作用[10]。在 PNI 模型中，MSCs 能够产生 PGE2、IL-4、IL-10、IL-12 和 IFN- γ 等多种免疫调节因子，通过调节巨噬细胞、T 细胞等功能状态，促进神经再生。

3. 周围神经损伤后功能康复方法

3.1. 物理治疗

3.1.1. 电刺激

物理治疗在周围神经损伤康复中的应用历史悠久，从早期简单的热疗和水疗发展到现代先进的技术，经历了漫长的演变过程。早在 20 世纪初，物理治疗主要依赖于热敷、冷敷等基础方法，通过改变局部组织温度来改善血液循环和缓解疼痛。随着电刺激的发展，电刺激疗法已广泛应用于周围神经损伤的临床康复中，成为促进神经功能修复的常用手段。将微电流作用于受损神经及效应肌肉，既可延缓失神经支配后肌肉萎缩的发生，也能为神经轴突再生与功能重建提供有利条件[11]。随着技术的发展，物理康复方法不断丰富，激光治疗、磁疗等新型方法相继应用于周围神经损伤的康复，为此病提供了更多可行方案。电刺激通过外源性电流改变神经细胞膜电位，诱发动作电位形成并激活胞内相关信号通路，同时可上调损伤区域神经生长因子(NGF)、脑源性神经营养因子(BDNF)等关键因子的表达，进而为神经再生提供支持。依据刺激电流频率差异，临床常用电刺激可分为低频、中频与高频三类，不同类型在作用机制与适用场景上各有侧重[12]。低频电刺激以兴奋运动神经、诱发肌肉节律性收缩为主要特点，多用于损伤早期，在维持肌肉容积、延缓肌萎缩、预防关节僵硬方面效果突出；中频电刺激则以改善局部血液循环、减轻神经源性疼痛为主要优势；高频电刺激在既往神经康复中应用较少，而近年研究提示，其可通过调控局部炎症水平、加速组织修复进程，在周围神经损伤康复中发挥潜在价值。

3.1.2. 热疗

热疗通过提升局部组织温度，改善局部组织血供、松弛痉挛肌肉，在周围神经损伤恢复期康复中应用广泛。局部升温可扩张微血管、提高组织血流量，为受损神经提供更充足的氧供与营养，从而加快损伤的修复，同时降低肌肉黏滞性，减少肌痉挛发作。在缓解疼痛、改善关节活动范围方面疗效较好。此外，温热刺激可提高细胞膜通透性，加速细胞内外物质交换，利于炎症介质与代谢废物清除，优化神经修复微环境。临床常用热疗方式包括蜡疗、红外线照射及超声波治疗等。蜡疗以熔融石蜡为导热介质，可塑性与保温性较好，热量传递均匀，多用于手足等部位表浅神经损伤的康复，但操作步骤相对繁琐，且存在局部烫伤风险。红外线治疗依靠特定波段电磁波产生深部热效应，操作简便、安全性较高，但作用深度有限，更适用于浅表神经损伤。超声波治疗则借助高频机械振动产生内生热与机械效应，穿透深度较深，对合并深部软组织粘连的复杂性神经损伤更为适用。

3.1.3. 冷疗

冷疗通过降低局部组织温度，抑制炎症反应、减轻组织水肿并缓解疼痛，是周围神经损伤急性期重要的康复措施。低温可降低毛细血管通透性，减少血浆渗出与组织液积聚，从而快速控制损伤后肿胀；同时可抑制神经末梢兴奋性，减慢痛觉信号传导，达到镇痛目的。此外，局部降温能够降低组织代谢率与耗氧量，减轻继发性缺血缺氧损伤，对受损神经起到一定保护作用。冰敷是临床最常用的冷疗方式，操作简便、成本低廉，多用于急性损伤现场与早期处理；冷水浸泡则可对肢体远端进行全面降温，适用于手足部位神经损伤的急性期康复。

3.2. 运动疗法

运动疗法是周围神经损伤后的重要方案之一，通过循序渐进的训练改善肌力、关节活动度与神经肌肉控制能力，最终实现肢体运动功能的整体恢复。按照用力方式，可将运动形式分为被动运动、主动辅助运动及主动抗阻运动[13]。损伤早期以被动运动为主，通过被动活动关节，维持关节活动范围、避免软组织挛缩与粘连。早期开展规范运动训练，不仅能够预防肌萎缩与关节僵硬，还可通过肌肉节律性收缩为神经再生提供力学刺激，推动功能恢复进程。急性期训练以轻柔被动活动为主，重点在于并发症预防；进入亚急性期后，可逐步增加主动辅助训练，并配合等长收缩等低强度肌力训练，改善神经肌肉控制能力；慢性期则以强化训练为核心，增加主动抗阻运动与功能性任务训练，例如针对上肢神经损伤患者开展抓握、持物等日常生活动作训练，提高肢体能力[8]。

4. 小结

周围神经损伤的康复治疗已取得显著进展，但治疗方案标准化不足、循证医学证据薄弱等问题仍制约着康复质量的提升。未来需进一步完善康复治疗的标准参数体系，开展大样本、长期临床随访，同时探索个体化治疗方案与新兴技术的融合应用，为PNI的规范化康复提供更可靠的依据。通过多学科协作(如神经外科、康复科、心理科)，我们有望为PNI患者提供更精准、高效的康复服务，最终减轻患者家庭及社会的负担。

参考文献

- [1] 田美子, 宁丽萍, 周亮, 等. 胶质细胞在神经病理性疼痛中的调控机制研究进展[J]. 山东医药, 2025, 65(9): 155-159.
- [2] 马丹丹, 程洁, 姜泽飞, 等. 张虹针灸治疗小儿周围神经损伤验案举隅[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2025, 27(9): 2745-2752.
- [3] 邓思佳, 戴巧艳, 肖万莲, 等. 周围神经损伤患者神经病理性疼痛症状体验的质性研究[J]. 中国骨科临床与基础

- 研究杂志, 2025, 15(4): 266-271.
- [4] 董凡, 王以宁, 吴子祥, 等. 丝素蛋白神经引导导管在周围神经损伤修复中的研究进展[J]. 中国修复重建外科杂志, 2025, 39(6): 777-782.
 - [5] 莫谦. 多壮温针灸结合电针治疗外伤性四肢周围神经损伤的疗效观察[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州中医药大学, 2025.
 - [6] 郭艳峰, 周涛, 戴巧英, 等. 甘草甜素对周围神经损伤模型大鼠神经再生的干预效果及其可能机制[J]. 广西医学, 2020, 42(14): 1855-1858+1874.
 - [7] 李涛, 董传江. 周围神经损伤后促红细胞生成素、他克莫司、维生素 B12 及甲强龙对神经再生的作用[J]. 海南医学, 2018, 29(12): 1735-1738.
 - [8] 刘蔡钺. 适度运动对周围神经损伤后脊髓突触可塑性变化的作用研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 第二军医大学, 2015.
 - [9] 孙美庆, 季正伦, 江华, 等. 免疫抑制对大鼠周围神经损伤再生的影响[J]. 第二军医大学学报, 2006(9): 941-945.
 - [10] 顾立强, 陈国奋, 相大勇, 等. 免疫抑制剂 FK506 加速周围神经损伤修复后功能恢复的初步临床报告[J]. 中国创伤骨科杂志, 2001(3): 37-39.
 - [11] 徐晓. 肌电图仪对损伤周围神经经皮电刺激治疗的效果[J]. 中国医疗器械信息, 2026, 32(4): 128-130.
 - [12] 刘敏琦, 高明威, 褚晓蕾, 等. 不同频率电刺激促进周围神经损伤的恢复[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(14): 3061-3069.
 - [13] 赵晓璇, 刘帅祎, 李奇, 等. 不同运动方式促进周围神经损伤后的功能恢复[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(6): 1248-1256.