

磁刺激在脊髓损伤后神经源性膀胱中的应用进展

王兆伟¹, 王 祺¹, 焦卉朵^{2*}

¹西安医学院研究生处, 陕西 西安

²空军军医大学第二附属医院康复医学科, 陕西 西安

收稿日期: 2025年10月28日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年12月1日

摘 要

脊髓损伤后神经源性膀胱是一种常见的严重并发症, 传统治疗方法效果有限。作为一种无创神经调控手段, 磁刺激技术近年来在其治疗中显示出显著潜力。本综述系统总结了磁刺激技术在脊髓损伤后神经源性膀胱治疗中的机制、临床应用及其疗效, 重点探讨了重复经颅磁刺激、骶神经磁刺激及其联合应用的创新模式。通过对这些康复治疗方法的详细分析, 明确其优势与局限性, 为脊髓损伤后神经源性膀胱的临床康复提供更高效解决策略。

关键词

磁刺激, 脊髓损伤, 神经源性膀胱

Advances in the Application of Magnetic Stimulation in Neurogenic Bladder after Spinal Cord Injury

Zhaowei Wang¹, Qi Wang¹, Huiduo Jiao^{2*}

¹Graduate School of Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Department of Rehabilitation Medicine, The Second Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an Shaanxi

Received: October 28, 2025; accepted: November 21, 2025; published: December 1, 2025

Abstract

Neurogenic bladder after spinal cord injury is a common and serious complication, and traditional

*通讯作者。

文章引用: 王兆伟, 王祺, 焦卉朵. 磁刺激在脊髓损伤后神经源性膀胱中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(12): 323-330. DOI: 10.12677/acm.2025.15123414

treatment methods have limited effects. As a non-invasive neural regulation method, magnetic stimulation technology has shown significant potential in its application for treating neurogenic bladder after spinal cord injury in recent years. This review systematically summarizes the mechanism, clinical application, and therapeutic efficacy of magnetic stimulation technology in the treatment of neurogenic bladder after spinal cord injury, focusing on the innovative models of repetitive transcranial magnetic stimulation, sacral nerve magnetic stimulation, and their combined applications. Through a detailed analysis of these rehabilitation treatment methods, the advantages and limitations are clarified, providing more efficient solutions for the clinical rehabilitation of neurogenic bladder after spinal cord injury.

Keywords

Magnetic Stimulation, Spinal Cord Injury, Neurogenic Bladder

Copyright © 2025 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

脊髓损伤(Spinal Cord Injury, SCI)是指由各种原因导致的脊髓原发性或继发性损伤,进而引起脊髓结构的破坏,甚至完全断裂,导致患者出现感觉、运动以及括约肌功能障碍[1]。神经源性膀胱(Neurogenic Bladder, NB)是脊髓损伤后最为常见且最具挑战性的并发症之一,调查显示,超过80%的脊髓损伤患者会表现出不同程度的膀胱功能障碍,主要临床表现为尿潴留、尿失禁及排尿困难等[2][3]。这些功能障碍不仅严重损害患者的自尊与生活质量,还可能导致反复的泌尿系统感染、肾积水,甚至最终发展为终末期肾衰竭,成为长期影响患者生存预后的关键因素。

面对这一临床难题,尽管目前有多种保守治疗方案可供选择,包括导尿、手法辅助、盆底训练、药物治疗等,但传统治疗方案存在明显的局限性[4]。间歇导尿虽被视为排空膀胱的“金标准”,却无法恢复生理性排尿,且存在感染风险与操作不便的问题[5]。至于骶神经电刺激等有创神经调控手段,虽效果明确,但其侵入性、高成本及严格的手术适应症限制了其广泛应用。在此背景下,磁刺激(Magnetic Stimulation)作为一种新兴的无创神经调控手段,展现出独特的应用潜力与优势。该技术利用时变磁场在组织内产生感应电流,从而兴奋或抑制神经组织,兼具无创、深部刺激和副作用小等特点。本综述旨在全面梳理磁刺激技术在治疗脊髓损伤后神经源性膀胱方面的作用机制及其多样化的临床应用方案,以期为此领域的临床实践和科学研究提供具有指导意义的参考。

2. 磁刺激治疗 SCI 后 NB 的作用机制

2.1. 神经解剖基础

正常的排尿活动依赖于一个完整且层级分明的“大脑皮层-脑干-骶髓”神经调控通路。当适合排尿时,大脑皮层作为最高中枢,负责发出排尿的起始指令,开启脑桥排尿中枢,而骶髓(S2-S4节段)的副交感神经核团作为最终共同通路,介导的逼尿肌收缩,伴有盆底和尿道内括约肌的松弛,导致有效的膀胱排空[6]。

脊髓损伤(SCI)严重破坏了这一精密的传导通路。位于脑桥与骶髓之间的传导束路中断,导致大脑的conscious control无法下传,骶髓排尿中枢失去高级中枢的抑制性控制,从而引发膀胱功能失衡[1]。表现

为逼尿肌过度活动(detrusor overactivity, DO)、逼尿肌括约肌协同失调(detrusor-sphincter dyssnergia, DSD)、逼尿肌反射减退或无反射 (detrusorhyporeflexia/areflexia, DH/DA)三种类型[2], 严重威胁上尿路安全。在此病理状态下, 位于损伤平面以下的骶髓排尿中枢本身及其反射弧通常保持相对完整, 这为磁刺激进行神经调控提供了关键的解剖学基础。

2.2. 不同类型磁刺激的作用机制

2.2.1. 重复经颅磁刺激

经颅磁刺激(Transcranial Magnetic Stimulation, TMS)作为一种无创的中枢神经调控技术, 其作用机制在于通过时变磁场在脑皮层产生感应电流, 从而调节皮层神经元的兴奋性, TMS 通常包括单脉冲、双脉冲、重复经颅磁刺激(Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS) [7]。当 TMS 靶向与排尿控制相关的初级运动皮层或辅助运动区时, 它能够跨过脊髓损伤病灶, 对残存的神经网络进行自上而下地调制。其调控效应具有频率依赖性, 即高频 rTMS (≥ 5 Hz)能够提高皮层兴奋性, 增强对膀胱的下行抑制性控制, 从而改善逼尿肌过度活动; 而低频 rTMS (≤ 1 Hz)则可能通过抑制异常增高的皮层兴奋性或调节不稳定的神经网络, 间接恢复对骶髓排尿中枢的稳态控制[8]。

2.2.2. 骶神经磁刺激

与 rTMS 的中枢干预不同, 骶神经磁刺激, 如重复功能性磁刺激(Repetitive Functional Magnetic Stimulation, rFMS), 是一种外周靶点的干预方式。其刺激靶点通常为骶神经根(尤其是 S3 神经根), 该神经根同时包含支配逼尿肌的副交感神经纤维和支配尿道括约肌的躯体运动纤维。对于逼尿肌反射亢进的患者, 适当的刺激参数可以抑制逼尿肌的异常收缩, 增加膀胱容量; 而对于逼尿肌无力型患者, rFMS 则可能通过激活支配逼尿肌的副交感神经纤维, 改善膀胱收缩力, 促进膀胱有效排空, 减少残余尿量[9]。

2.2.3. “中枢 - 外周” 闭环刺激的协同机制

近年来, 联合干预策略展现出比单一疗法更优的潜力。将中枢的 rTMS 与外周的骶神经磁刺激联合应用, 构成了“中枢 - 外周”协同干预模式。其理论基础在于, rTMS 负责从上至下重塑大脑的调控指令, 而骶神经磁刺激则负责激活或调节骶髓中枢, 并上传感觉反馈[10]。rTMS 可提高中枢神经系统对外周传入信号的响应性, 而外周刺激传入的感觉反馈又能进一步巩固和强化中枢调控环路的重塑, 从而实现更显著的治疗效果。

3. 磁刺激在 SCI 后 NB 的临床应用

3.1. 骶神经磁刺激

骶神经磁刺激标准方案是使用圆形或双锥形线圈, 常置于骶神经, 刺激参数范围较宽, 频率通常在 5~20 Hz 之间。例如, Fergany L A 等[11]研究发现, 对骶上 SCI 患者施加 20 次 15 Hz 磁刺激, 在改善神经源性膀胱过度活动症(Overactive Bladder, OAB)的尿动力学参数(包括最大膀胱容量、膀胱初感觉容量和最大尿流率)方面, 优于经皮神经电刺激。随后, Khedr E M 等[12]的研究进一步证实, 10 天的 15 Hz 重复腰骶磁刺激能显著改善排尿日记指标(包括每 24 h 平均排尿和尿失禁次数), 且效果可持续至治疗结束后 1 个月。在此基础上, 陈志[13]与宋志明等[14]均同样证实了 8 周 15 Hz 骶神经根磁刺激对 SCI 相关神经源性 OAB 患者排尿日记和尿流动力学指标的显著改善, 并且宋志明等[14]强调了其在提升患者生活质量方面的价值。与此相呼应, 潘钰[15]与王梦婷等[16]研究分别从主观感受、生活质量、排尿日记以及特定膀胱容量下的逼尿肌压力等角度, 进一步证实了 15 Hz 刺激第三骶椎(S3)神经孔的疗效。

然而, 最佳的刺激频率并非固定不变。陆飞等[17]直接对比不同频率的 s3 神经根 rFMS 对 SCI 后神

经源性逼尿肌过度活动(Neurogenic Detrusor Overactivity, NDO)疗效, 8周治疗后发现 15 Hz S3 神经根刺激在改善尿动力学参数和临床评分方面均优于 5 Hz。同时, 宋晨等[18]也对比了 5 Hz 与 20 Hz 的疗效, 结果显示 20 Hz 组在改善排尿功能和神经电生理指标上效果更显著。尽管高频刺激研究广泛, 但低频刺激也展现出独特优势。Niu T 等[19]初步研究发现, 1Hz 刺激在改善尿道与逼尿肌压力协调性方面可能优于 30 Hz; 据此, 他们的长期干预研究显示, 16 周第一腰椎(L1)椎体水平 1 Hz 磁刺激能改善多项膀胱功能指标, 但在之后的假刺激中发现疗效具有可逆性。类似地, 陶媛媛等[20]在基础治疗上联合 L1 水平 1Hz 刺激 4 周, 同样观察到患者膀胱功能与生活质量的全面提升。

此外, 为了追求更佳疗效, 联合治疗策略已成为一个重要研究方向。Wang F 等[21]将 15 Hz 骶神经磁刺激与膀胱功能训练结合, 治疗 40 天后膀胱功能及生活质量提升优于单一训练。而 Chen L 等[22]则系统地比较了骶神经根磁刺激联合推拿治疗与单一疗法的差异, 4 周的治疗发现骶神经根磁刺激联合推拿的疗效显著优于任一单独疗法。另外, 陈铖[23]等人采用的磁刺激联合行为治疗及连红强等[24]采用磁刺激联合针刺疗法, 均一致地证明了联合方案的有效性。最后, 李奕琴等[25]的研究为此提供了强有力的证据, 其结果表明, 融合常规护理、电针与磁刺激的联合方案, 其疗效显著优于任何单一治疗方法。

综上所述, 现有文献表明磁刺激是治疗 SCI 后 NB 的有效手段, 其疗效受刺激参数(如频率、部位)和治疗方案影响。总体上, 高频刺激骶神经根(如 S3)可有效改善膀胱储尿与排尿功能, 低频刺激(如 1 Hz)作用于腰椎水平在改善逼尿肌-尿道协调性上有潜力。而且, 磁刺激与膀胱训练、推拿等康复技术的联合治疗方案能协同增效, 疗效更优于单一干预措施。

3.2. 重复经颅磁刺激(rTMS)

研究指出, 初级运动皮层(Primary Motor Cortex, M1)上的高频 rTMS 可以改善多发性硬化症后膀胱功能障碍患者, 低频 rTMS 似乎是治疗帕金森病和可能的其他神经退行性疾病患者的神经源性下尿路功能障碍的有效方法[26]。rTMS 同样可通过调控中枢神经系统的高级功能来间接改善脊髓损伤后神经源性膀胱功能, 当前的研究普遍倾向于采用高频刺激(频率范围在 10~20 Hz), 并将其刺激靶点集中在与排尿控制密切相关的 M1 区。

许开英等[27]的研究为此提供了有力的证据。他们对不完全性 SCI 后 NB 患者实施了为期 4 周的双侧 M1 区 20 Hz rTMS 刺激, 研究结果显示, 相比较对照组, 实验组 24 小时排尿次数、尿失禁次数和残余尿量显著减少, 而日均单次排尿量、最大膀胱容量和最大尿流率显著增加, 并且生活满意度指数及下尿路症状(LUTS)评分也优于对照组。在此基础上, 邓皓月等[28]研究进一步验证和补充了上述结论, 该研究同样针对双侧 M1 区, 但采用了 10 Hz 的交替刺激 4 周, 其结果不仅证实了许开英[27]的发现, 显示患者的残余尿量、日平均单次排尿量、最大尿流率、最大膀胱容量和膀胱顺应性均优于假刺激组与常规治疗组, 并且发现患者的生活质量(Qualiveen 评分)也得到了显著提升。

综合以上两项研究可以表明, 针对初级运动皮层(M1 区)的高频 rTMS 刺激, 能够有效增强脊髓损伤患者的中枢性膀胱控制能力, 从而在客观的膀胱功能指标和主观的生活质量及满意度方面均产生显著的临床改善效果。

3.3. “中枢-外周”闭环磁刺激

在脊髓损伤后神经源性膀胱的磁刺激治疗领域, 从单一靶点刺激转向了多靶点联合的“闭环”干预模式, 采用 S3 神经根联合大脑 M1 区的重复磁刺激方案序贯或同步刺激构建动态治疗回路。姜晓乐[29]与徐子涵等[30]研究均对 SCI 后 NB 患者实施了 M1 区 5 Hz 刺激联合 S3 神经根 15 Hz 刺激的治疗方案。经过 4 周的治疗, 联合组患者的尿动力学及排尿日记指标均显著优于单一刺激组或对照组。此外, 姜晓

乐等[29]的研究还指出,联合组在神经源性膀胱症状评分(NBSS)方面的改善效果明显优于其他组别。类似地,王文盛等[31]将 60 例患者分为三组,结果显示闭环式刺激组(包括 M1 区 10 Hz rTMS 和 S3 神经根 5 Hz FMS)在残余尿量、膀胱顺应性、最大尿流率及 Qualiveen 评分上的改善显著优于外周刺激组和对照组。

除常用 5 Hz 与 10 Hz 频率的 M1 区刺激外,其他高频频率刺激也被应用于联合闭环刺激。其中,蒋金金等[32]通过 8 周治疗(20 Hz S3 神经根联合 20 Hz 双侧 M1 区)也报告试验组在初始尿意膀胱容量、残余尿量及生活质量评分上改善更显著。同样,黄姣姣等[33]采用双侧 M1 区 50 Hz 刺激联合 20 Hz 骶尾部刺激,显示治疗组在尿动力学、排尿日记指标、核心下尿路症状评分(CLSS)和泌尿症状困扰评分量表(USDS)评分方面均优于对照组。另外,李文等[34]应用外周-中枢闭环模式(15 Hz 腰骶部 S2~S4 和 10 Hz 大脑皮层旁中央小叶、额叶),治疗 4 周后患者在尿动力学、排尿日记指标及泌尿症状困扰评分量表(USDS)、国际下尿路症状(LUTS)评分,以及世界卫生组织生存质量测定简表(WHOQOL-BREF)评分方面均较常规治疗有显著改善。

Liu Y 等[10]通过回顾性分析强调,基于 TMS 的闭环方式在脊髓损伤后第 1 天、第 90 天和第 180 天对生存质量(ADL)具有持续积极影响,尤其在第 180 天效果最突出。综上所述,这些研究一致表明,闭环磁刺激多靶点联合策略在改善脊髓损伤后神经源性膀胱的尿动力学参数、日常生活指标以及生活质量和感染率方面,均显著优于单一刺激模式,凸显了其临床应用的优越性和可持续性。

4. 疗效评价指标

为了全面且客观地评估磁刺激的治疗效果,当前临床研究通常综合采用主观和客观两类评价指标。主观指标主要涵盖各类标准化量表和问卷。其中,神经源性膀胱症状评分(NBSS)是专门用于评估神经源性膀胱患者症状严重程度的工具。此外,膀胱过度活动症症状评分(OABSS)、国际下尿路症状评分(LUTS)、核心下尿路症状评分(CLSS)以及泌尿症状困扰评分量表(USDS)也被广泛应用于尿路症状严重程度的评估。除了尿路症状评估外,生活质量指标能直接反映治疗对患者日常生活和社会参与度的改善情况。例如,神经源性膀胱生命质量量表(Qualiveen)、世界卫生组织生存质量测定简表(WHOQOL-BREF)、尿失禁生活质量量表(I-QOL)以及常用的 Barthel 指数,均为评价疗效价值的关键维度。

客观指标为评估提供了量化的数据支持。排尿日记详细记录了 24 小时内导尿次数、平均单次排尿量、漏尿次数及尿失禁次数等关键日常数据,真实反映了患者在现实生活中的膀胱功能状态。尿动力学检查作为膀胱功能检测的“金标准”,能够提供最为精确的生理参数,包括膀胱容量、残余尿量、逼尿肌压力和最大尿流率等,这些指标是判断膀胱储尿和排尿功能的核心依据。此外,未来研究可借助影像学检查如超声,从不同角度评估膀胱的形态、结构、周围组织情况及残余尿量,从而使磁刺激治疗神经源性膀胱的疗效评价更加全面和准确。

5. TMS 治疗参数及安全性

磁刺激作为一种非侵入性的神经调控技术,在未来的临床治疗应用中,最为关键的是安全性与耐受性。在 rTMS 治疗开始前,首先要进行静息运动阈值(RMT)测定,以此确定安全刺激强度。连续 10 次单脉冲刺激大脑半球拇指运动区皮层中,至少有 5 条动作诱发电位波幅 $> 50 \mu\text{V}$ 的最小刺激强度,即 RMT。针对 SCI 后 NB, rTMS 目前最为常见的治疗方案为单侧或双侧 M1 区,频率为 5~20 Hz,强度为 80%~100%,疗程约为 4 周。其最为常见的不良反应包括头痛、头皮不适、短暂性听力变化等,通常在治疗结束后会自行消失,无长期的不良影响。其中最为严重的不良事件是诱发癫痫,这类情况大多发生在安全指南发布之前。尽管其发生率极低[35],但在治疗前必须详细评估患者的癫痫病史、金属植入物、心脏疾病等禁忌

证, 并严格遵循安全指南进行操作[36], 同时制定应对不良反应发生的预案。

骶神经磁刺激部位多集中于 S2~S4, 尤其以 S3 神经孔为常见。开始先采用单个脉冲刺激 S3 神经根, 患者会有双侧足趾收缩以及肛门收缩的感觉, 以此表现及患者耐受程度来调整刺激强度[22], 其常见频率为 5~20 Hz, 疗程为 4~16 周。骶神经磁刺激可能会引起局部不适、肌肉抽搐以及皮肤反应, 不过这些症状会随治疗结束而消失。同 rTMS 一样, 因为脊髓损伤后常常会伴随手术植入金属或其他固定物, 骶神经磁刺激需要进行严格的禁忌症筛查。从卫生经济学的视角来看, 相较于侵入性及高成本的骶神经调控 (SNM), 非侵入性的磁刺激尽管在疗效持久性方面或许存在一定欠缺, 但其无创、可重复、低成本使得其成为有创手术前一种极具成本效益的阶梯性治疗方案。

6. 总结与展望

磁刺激作用于受损排尿调控通路不同节点, 实现膀胱功能多层次、多模式神经调控。rTMS “自上而下” 重塑中枢指令, rFMS “自下而上” 调制骶髓排尿中枢。“中枢-外周” 联合刺激策略及与其他康复技术的综合方案, 协同效应与临床优越性显著, 优于单一疗法, 标志治疗理念迈向基于神经环路的整合性康复新阶段。尽管磁刺激技术前景广阔, 但临床转化与优化面临挑战。未来研究需借助多模态神经影像、神经电生理及动物模型, 从多层面阐明磁刺激诱导神经可塑性及联合刺激协同作用机制, 并通过大规模、多中心随机对照试验, 建立参数优化体系, 探索个体化精准治疗方案。

参考文献

- [1] Bareyre, F. and Loy, K. (2019) Rehabilitation Following Spinal Cord Injury: How Animal Models Can Help Our Understanding of Exercise-Induced Neuroplasticity. *Neural Regeneration Research*, **14**, 405-412. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.245951>
- [2] Hamid, R., Averbeck, M.A., Chiang, H., Garcia, A., Al Mousa, R.T., Oh, S., et al. (2018) Epidemiology and Pathophysiology of Neurogenic Bladder after Spinal Cord Injury. *World Journal of Urology*, **36**, 1517-1527. <https://doi.org/10.1007/s00345-018-2301-z>
- [3] Tate, D.G., Wheeler, T., Lane, G.I., Forchheimer, M., Anderson, K.D., Biering-Sorensen, F., et al. (2020) Recommendations for Evaluation of Neurogenic Bladder and Bowel Dysfunction after Spinal Cord Injury and/or Disease. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, **43**, 141-164. <https://doi.org/10.1080/10790268.2019.1706033>
- [4] Romo, P.G.B., Smith, C.P., Cox, A., Averbeck, M.A., Dowling, C., Beckford, C., et al. (2018) Non-Surgical Urologic Management of Neurogenic Bladder after Spinal Cord Injury. *World Journal of Urology*, **36**, 1555-1568. <https://doi.org/10.1007/s00345-018-2419-z>
- [5] Fitzpatrick, M.A. and Nwafo, N. (2024) Urinary Tract Infection Diagnostic and Management Considerations in People with Spinal Cord Injury and Neurogenic Bladder. *Infectious Disease Clinics of North America*, **38**, 381-393. <https://doi.org/10.1016/j.idc.2024.03.012>
- [6] Panicker, J.N. (2020) Neurogenic Bladder: Epidemiology, Diagnosis, and Management. *Seminars in Neurology*, **40**, 569-579. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1713876>
- [7] Somaa, F.A., de Graaf, T.A. and Sack, A.T. (2022) Transcranial Magnetic Stimulation in the Treatment of Neurological Diseases. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article ID: 793253. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.793253>
- [8] Lefaucheur, J., Aleman, A., Baeken, C., Benninger, D.H., Brunelin, J., Di Lazzaro, V., et al. (2020) Evidence-Based Guidelines on the Therapeutic Use of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS): An Update (2014-2018). *Clinical Neurophysiology*, **131**, 474-528. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.11.002>
- [9] El-Habashy, H., Nada, M.M., Maher, E.A., Shamloul, R., Maged, M. and Abdelazim, M.S. (2019) The Effect of Cortical versus Sacral Repetitive Magnetic Stimulation on Lower Urinary Tract Dysfunction in Patients with Multiple Sclerosis. *Acta Neurologica Belgica*, **120**, 141-147. <https://doi.org/10.1007/s13760-019-01257-6>
- [10] Liu, Y., Huang, B., Huang, G., Wu, Z., Xu, S., Ye, W., et al. (2023) Transcranial Magnetic Stimulation-Based Closed-Loop Modality for Activity of Daily Living Gain in Spinal Cord Injury: A Retrospective Study Using Propensity Score Matching Analysis. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, **59**, 327-344. <https://doi.org/10.23736/s1973-9087.23.07674-8>
- [11] Fergany, L.A., Shaker, H., Arafa, M. and Elbadry, M.S. (2017) Does Sacral Pulsed Electromagnetic Field Therapy Have

- a Better Effect than Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation in Patients with Neurogenic Overactive Bladder? *Arab Journal of Urology*, 15, 148-152. <https://doi.org/10.1016/j.aju.2017.01.007>
- [12] Khedr, E.M., Alkady, E.A.M., El-Hammady, D.H., Khalifa, F.A.M. and bin-Humam, S. (2011) Repetitive Lumbosacral Nerve Magnetic Stimulation Improves Bladder Dysfunction Due to Lumbosacral Nerve Injury: A Pilot Randomized Controlled Study. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25, 570-576. <https://doi.org/10.1177/1545968311400091>
 - [13] 陈志, 张超宇. 骶神经根功能性磁刺激对脊髓损伤相关神经源性膀胱过度活动症的疗效分析[J]. 颈腰痛杂志, 2022, 43(1): 98-100.
 - [14] 宋志明, 安恒远, 张华, 等. 骶神经根功能性磁刺激对脊髓损伤后神经源性膀胱过度活动症的作用[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2019, 29(6): 544-548.
 - [15] 潘钰, 陈晓松, 宋为群, 等. 骶神经根磁刺激对脊髓损伤后逼尿肌反射亢进的作用[J]. 中国康复医学杂志, 2007, 22(6): 518-520.
 - [16] 王梦婷, 秦义婷, 程清, 等. 骶神经磁刺激对逼尿肌无力的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2020, 42(8): 729-733.
 - [17] 陆飞, 闫振壮, 苏清伦, 等. 不同频率高频磁刺激对脊髓损伤后神经源性膀胱患者治疗效果的比较[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(7): 852-854.
 - [18] 宋晨, 李江, 韩超, 等. 不同频率功能性磁刺激对脊髓损伤后尿潴留患者排尿功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2022, 44(1): 57-61.
 - [19] Niu, T., Bennett, C.J., Keller, T.L., Leiter, J.C. and Lu, D.C. (2018) A Proof-of-Concept Study of Transcutaneous Magnetic Spinal Cord Stimulation for Neurogenic Bladder. *Scientific Reports*, 8, Article No. 12549. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30232-z>
 - [20] 陶媛媛, 张大伟, 冯晓燕, 等. 脊髓重复磁刺激对骶上脊髓损伤后神经源性膀胱的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2023, 45(10): 899-903.
 - [21] Wang, F., Mi, S. and Guo, H. (2023) Exploring the Effect of Bladder Functional Training Combined with Repetitive Sacral Root Magnetic Stimulation in the Treatment of Neurogenic Bladder. *World Neurosurgery*, 177, e440-e445. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.06.072>
 - [22] Chen, L. and Li, Y. (2023) Efficacy of the Magnetic Stimulation of Sacral Nerve Roots Combined with Tui-Na on Neurogenic Bladder after Spinal Cord Injury: Preliminary Short-Term Results. *European Spine Journal*, 32, 2441-2447. <https://doi.org/10.1007/s00586-023-07760-y>
 - [23] 陈铖, 夏婷, 张少武. 骶神经根磁刺激联合行为治疗对脊髓损伤后膀胱过度活动症的临床疗效观察[J]. 神经损伤与功能重建, 2022, 17(6): 363-366.
 - [24] 连红强, 张丽蓉, 寄婧. 针刺“三阴穴”联合重复经颅磁刺激治疗脊髓损伤后神经源膀胱疗效研究[J]. 中医临床研究, 2021, 13(21): 98-100.
 - [25] 李奕琴, 李娜, 何晓阔, 等. 电针结合骶神经根磁刺激治疗脊髓损伤后神经源性膀胱的临床观察[J]. 中国康复, 2015(2): 103-105.
 - [26] Nardone, R., Versace, V., Sebastianelli, L., Brigo, F., Golaszewski, S., Christova, M., et al. (2019) Transcranial Magnetic Stimulation and Bladder Function: A Systematic Review. *Clinical Neurophysiology*, 130, 2032-2037. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.08.020>
 - [27] 许开英, 卢巍. 重复经颅磁刺激对脊髓损伤后神经源性膀胱的疗效[J]. 医疗装备, 2023, 36(15): 43-46.
 - [28] 邓皓月, 袁昌艳, 王树琼, 等. 磁刺激初级运动皮层(M1 区)对不完全性脊髓损伤患者膀胱功能的影响[J]. 重庆医科大学学报, 2020, 45(1): 122-125.
 - [29] 娄晓乐, 宋佳亭, 韩雪, 等. 经颅联合外周双向反馈磁刺激对脊髓损伤后神经源性膀胱患者膀胱及排尿功能的效果[J]. 实用医学杂志, 2025, 41(6): 859-865.
 - [30] 徐子涵, 毕耘枫, 李江, 等. 重复磁刺激 S3 神经根联合 M1 区治疗脊髓损伤后尿潴留[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(11): 1719-1723.
 - [31] 王文盛, 龙耀斌, 黄雅琳, 等. 闭环式磁刺激对不完全性脊髓损伤后神经源性膀胱疗效的初步研究[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(2): 241-244.
 - [32] 蒋金金, 尹凯月, 宋娜, 等. 多靶点重复磁刺激对脊髓损伤后尿潴留患者的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2022, 44(5): 433-436.
 - [33] 黄姣姣, 尚清, 张会春, 等. 重复经颅磁刺激结合间歇导尿对脊髓损伤后神经源性膀胱患儿的尿动力学及排尿功能的影响[J]. 临床与病理杂志, 2022, 42(4): 834-840.

- [34] 李文, 梁寿一, 周嘉铭, 等. 重复经颅磁刺激外周-中枢闭环治疗模式治疗脊髓损伤后神经源性膀胱的研究[J]. 中国医学创新, 2024, 21(12): 140-144.
- [35] Chou, Y., Ton That, V., Chen, A.Y., Sundman, M. and Huang, Y. (2020) TMS-Induced Seizure Cases Stratified by Population, Stimulation Protocol, and Stimulation Site: A Systematic Literature Search. *Clinical Neurophysiology*, **131**, 1019-1020. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2020.02.008>
- [36] Rossi, S., Antal, A., Bestmann, S., Bikson, M., Brewer, C., Brockmöller, J., *et al.* (2021) Safety and Recommendations for TMS Use in Healthy Subjects and Patient Populations, with Updates on Training, Ethical and Regulatory Issues: Expert Guidelines. *Clinical Neurophysiology*, **132**, 269-306. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2020.10.003>