

肌电生物反馈在脑瘫足下垂患儿中的临床应用及进展

张 萌¹, 陈小聪^{2*}

¹西安医学院研究生工作部, 陕西 西安

²西安市儿童医院康复医学科, 陕西 西安

收稿日期: 2025年8月17日; 录用日期: 2025年9月11日; 发布日期: 2025年9月19日

摘 要

足下垂是脑性瘫痪患儿常见的足踝问题, 也是脑瘫康复聚焦的靶点之一, 足下垂降低患儿的步行能力, 尤其妨碍摆动相廓清功能, 从而增加跌倒风险, 严重时患儿会丧失步行移动能力。近年来随着康复治疗的不进步, 新的更具有循证医学依据的技术出现, 更有助于患儿康复潜能的挖掘。其中, 肌电生物反馈疗法因其具有高级神经中枢参与, 与周围神经肌肉形成环路反馈的理论基础, 特殊儿童中的应用也较为广泛, 肌电生物反馈可以激活大脑的可塑机制, 精准肌肉训练, 增强肌肉力量和协调性。因此本文通过分析总结国内外关于肌电生物反馈特点及临床应用方面文献, 综述了肌电生物反馈在脑性瘫痪足下垂患儿的应用进展情况, 为临床研究提供一定的理论参考。

关键词

疗效, 肌电生物反馈, 足下垂, 运动障碍, 脑性瘫痪, 综述

Clinical Application and Progress of Electromyographic Biofeedback in Children with Cerebral Palsy and Foot Drop

Meng Zhang¹, Xiaocong Chen^{2*}

¹Graduate Work Department of Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Department of Rehabilitation Medicine, Xi'an Children's Hospital, Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 17th, 2025; accepted: Sep. 11th, 2025; published: Sep. 19th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张萌, 陈小聪. 肌电生物反馈在脑瘫足下垂患儿中的临床应用及进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(9): 1298-1306. DOI: 10.12677/acm.2025.1592624

Abstract

Foot drop is a common ankle problem in children with cerebral palsy (CP) and a key therapeutic target in CP rehabilitation. It reduces ambulatory capacity, most notably by interfering with toe clearance during the swing phase of gait and thereby increasing fall risk; in severe cases, walking ability is lost altogether. Over recent years, continual advances in rehabilitation have brought forth new, more evidence-based techniques that help unlock each child's recovery potential. Among them, electromyographic (EMG) biofeedback is grounded in a theoretical model that engages higher cortical centers and establishes a closed feedback loop with peripheral neuromuscular structures. It is already widely used in pediatric populations, can trigger neuroplastic mechanisms, and enables precise muscle training to enhance strength and coordination. By reviewing and synthesizing domestic and international literature on the characteristics and clinical applications of EMG biofeedback, this paper summarizes current progress in its use for children with CP-related foot drop, providing a theoretical reference for future clinical research.

Keywords

Efficacy, Electromyographic Biofeedback, Foot Drop, Movement Disorder, Cerebral Palsy, Review

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

脑性瘫痪(cerebral palsy, CP), 简称脑瘫, 是一组持续存在的中枢性运动和姿势发育障碍、活动受限症候群, 这种症候群是由发育中的胎儿或婴幼儿脑部非进行性损伤所致。脑瘫的运动障碍常伴有感觉、知觉、认知、交流和行为障碍以及癫痫和继发性肌肉、骨骼等问题[1]。脑瘫是由不同原因导致的、不同种类和严重程度多样化的症候群, 其主要的临床表现是持续存在的姿势和运动发育障碍及活动受限。运动发育障碍和中枢性姿势异常是脑瘫的核心表现。目前, 临床尚无彻底治愈脑瘫患儿的有效手段, 临床康复治疗多以解决脑瘫儿童的运动功能障碍为主[2]。脑瘫运动障碍包括肌张力的增高、肌肉无力和选择性运动控制障碍, 其导致姿势平衡缺陷、协调问题及异常步态的形成, 其中足下垂是痉挛性脑瘫患儿常见的异常步态, 主要表现为足尖下垂, 并常伴有足内翻, 造成足底不能有效接触地面, 行走时使身体重心不能有效前移, 从而导致步行功能障碍, 严重的足下垂影响患儿步行移动能力[3]。据不完全统计, 痉挛性脑瘫儿童中足下垂步态障碍发生率超过 50% [4]。脑性瘫痪足下垂患儿目前临床上主要采用的康复训练方法有肌力训练、增强力量训练、缓解肌张力及主被动关节活动、矫形支具、传统康复手段, 如针灸、推拿等[5] [6]; 这些技术多是从肢体运动力学、随意性、矫形思维来改善足下垂, 未融入神经-肌肉不可分割的主从功能关系, 忽视了大脑高级中枢才是运动的组织者, 发出运动指令并不断接收来自视觉的、本体感觉的及其它感官信息反馈, 从而不断修正行为功能。新的具有循证理论依据的方法将成为治疗技术研发和应用的关注点, 近年来, 肌电生物反馈作为一种新型的康复辅助设备已被证实可以借助电子传感器无创地监测生理信息, 并反馈给患者, 通过生物反馈训练重塑新的行为运动模式。同时还能抑制异常增高的脊神经元活动, 减轻肌张力过高引起的关节挛缩[7] [8]。肌电生物反馈治疗因操作简单、安全、有效、配合程度好等优势在运动医疗及康复中很受欢迎[9]。

肌电生物反馈疗法是应用特制的肌电图生物反馈仪, 通过皮肤电极从肌肉中引出肌电图, 利用生物反馈技术将患者意识不到的自身生物信号——肌电值, 通过视觉和图形反馈及听觉等信息展现在患者面前, 再通过眼睛、耳朵等感觉器官反馈给大脑, 让患者感知自身的生理信号和功能, 再设法通过主观意志加强这种讯号(即加强肌电活动)使之向理想方向发展[10]。该系统能够自动察觉患者意识信号的改变, 从而自动调节肌电检出的阈值, 因此这种治疗方法真正做到了个体化治疗, 能收到其他治疗方法所达不到的效果。本文就肌电生物反馈疗法在脑性瘫痪患儿康复中的应用及研究进展进行综述, 为后期临床相关研究提供一定参考。

2. 研究现状及挑战

肌电生物反馈治疗技术因其具有生物信号反馈优势, 能够引导患者主动参与训练中, 具有大脑神经网络工作的范式, 近年来在孤独症、格林-巴利综合征儿童康复中应用研究[11] [12], 其疗效得到证实。而对于以运动障碍为主要表现的脑瘫儿童, 肌肉运动的可视化即肌电信号则能直观反映肌肉收缩及舒张运动, 因此, 肌电生物反馈是脑瘫儿童运动康复中的核心技术, 且肌电生物反馈治疗技术逐渐替代一代低频电刺激治疗, 其具有高级神经中枢参与, 与周围神经肌肉形成环路反馈的理论基础, 可以激活大脑的可塑机制, 精准肌肉训练, 增强肌肉力量和协调性。目前肌电生物反馈已被证实可以用于改善痉挛[13], 国内外相关研究也表明肌电生物反馈在改善肌张力、平衡能力、运动功能、步态等方面也展现出显著潜力[14]。且肌电生物反馈仪成本较低, 操作相对简单、无侵入性, 适配场景灵活, 可针对不同部位进行训练, 痉挛性偏瘫患儿上肢的抓握、下肢的站立行走、躯干的核心控制等, 治疗师方便操作, 家长在经过专业培训后也可协助患儿居家使用, 更有助于患儿居家管理。肌电生物反馈训练反馈直观易懂, 且有语音提醒, 患儿及家长均可以通过信号变化感知肌肉是否发力, 但这要求患儿有一定的认知和理解能力, 年幼的脑瘫患儿, 认知理解能力有限, 这也会降低患儿的治疗疗效, 我们可以通过增加动画及音乐, 增加趣味性从而协助患儿完成反馈训练。尽管肌电生物反馈技术在脑性瘫痪康复中展现出显著疗效, 但目前仍存在样本量小、长期疗效证据不足、疗效评价体系的不统一、治疗方案无标准化等问题值得进一步探究。

3. 痉挛性脑瘫足下垂的原因及步态

痉挛性脑性瘫痪属于中枢性瘫痪, 损伤了运动调控相关脑区及神经通路, 由于上运动神经元损伤, 失去了对下运动神经元的抑制作用, 导致牵张反射亢进, 表现为肌肉痉挛、关节僵硬等。脑瘫患儿由于肌张力增高、主动运动减少形成长期异常姿势, 继发肌肉、关节等问题, 最终形成持续的运动障碍[15]。其中足下垂为脑瘫患儿常见的异常步态。足下垂影响步态摆动相廓清功能, 使廓清不充分甚至不能, 患儿往往以躯干过度侧屈, 或屈髋、屈膝以代偿因足背屈不充分对摆动相廓清的影响, 从而加重姿势异常, 足下垂会降低患儿的步行能力, 从而增加跌倒风险, 严重时患儿会丧失步行移动能力。针对痉挛性足下垂传统的治疗方法是缓解小腿三头肌痉挛及被动肌肉拉伸, 受限于脑瘫患儿认知能力的不足, 这些治疗往往是被训练, 研究证明, 有主观参与的主动训练较传统的被动训练更有效。目前对痉挛性偏瘫足下垂的研究多以针对小腿三头肌痉挛训练为主, 但治疗也不尽人意。徐林等学者提出, 胫骨前肌为足背屈主要肌肉, 正常人足背屈时胫前肌力量为足背伸总肌力的 60%左右, 将胫前肌作用发挥出来能较好解决足下垂问题[16] [17]。胫骨前肌物理或者力量不足也会导致足下垂异常姿势的出现, 在康复治疗中, 缓解小腿三头肌痉挛同时, 也要重视胫骨前肌力量训练, 两种策略并进, 可能会有叠加效应。伍丹等学者提出, 脑瘫患儿出现尖足主要是由于小腿肌肉运动失调引起踝关节的活动障碍导致。踝关节背屈时胫骨前肌起主要作用, 踝关节跖屈时腓肠肌起主要作用, 胫骨前肌和腓肠肌互为拮抗肌。胫骨前肌及腓肠肌功

能失调为导致脑瘫患儿下肢姿势异常和运动障碍的主要原因[18]。脑瘫患儿踝关节跖屈增加或马蹄是继发于小腿三头肌痉挛或挛缩[19], 进而引起踝关节跖屈, 患儿只能靠前足甚至足趾行走[19]-[21]。其主要的病理步态表现为支撑相足跟旋前, 前脚掌及足趾内收内旋, 具有不同程度马蹄内翻, 骨盆旋前运动不一致, 摆动相中期足背屈不足, 严重时引起廓清障碍, 步长的缩短, 步速的降低, 增加了跌倒的风险。因此, 对足下垂的改善成为脑瘫患儿病理性步态姿势的重要处置靶点。肌电生物反馈可以从以下几个方面改善脑瘫足下垂患儿的运动障碍。

4. 激活肌肉力量, 改善运动能力

痉挛性偏瘫足下垂患儿踝关节周围肌肉牵张反射控制紊乱, 导致姿势平衡缺陷及协调问题, 引发足廓清障碍, 造成跌倒事件发生, 其根本原因在于肌力、肌张力的失衡, 提高肌力, 降低肌张力, 调整姿势控制, 促进平衡功能是改善足下垂的重要因素。肌电生物反馈利用皮肤表面电极记录沿肌肉长度的电位差, 放大信号以简化的格式显示给患儿, 可检查肌肉激活模式, 作为支持和改善各种神经肌肉康复方法的工具[22], 也可根据疾病的不同阶段采取阶段性治疗措施, 包括肌肉耐力训练、协调功能训练、肌肉兴奋性反馈训练、肌肉放松反馈训练等, 以改善、恢复受刺激的肌肉或肌群。一项肌电生物反馈治疗对格林-巴利综合征患儿肌力恢复的影响的研究中发现[23], 在治疗 2 周、1 个月、3 个月、6 个月后, 肌电生物反馈组神经恢复情况、肌肉恢复情况、肌肉力量、GMFM 评分、BI 评分等指标均高于对照组($P < 0.05$), 说明肌电生物反馈治疗能有效改善肢体活动度, 促进肢体快速康复。在 142 例痉挛性脑性瘫痪的患儿的研究中发现[24], 常规康复训练基础上辅以肌电生物反馈治疗的患儿在治疗 12 周后, 采用改良 Ashworth 痉挛量表、Berg 平衡量表及日常生活能力评定量表等进行分析, 结果提示: 在常规康复训练的基础上联合肌电生物反馈疗法可明显的改善痉挛性脑瘫患儿的腓肠肌肌张力、平衡功能、ADL 能力。这与高晶等人的研究结果相一致[25]。目前国内外相关研究均表明, 肌电生物反馈疗法在提高脑瘫患儿肌肉收缩功能与抑制痉挛肌肉肌张力方面有效[26] [27]。因此肌电生物反馈常用于肌肉强化和预防通过不自主收缩引起的痉挛。脑瘫患儿中的一些主要神经肌肉缺陷包括肌纤维直径和大小的减小及由此引起的强度的减小, 肌电生物反馈疗法已经被研究可有效地改善[28], 从肌纤维层面激活肌肉, 改善肌肉力量、调节肌张力, 从而调整姿势控制, 促进平衡功能。一项国外研究表明在急性卒中患者中进行肌电生物反馈训练可以提高患者日常生活活动能力[29]。由于脑瘫患儿患侧肌肉运动失调, 肌电生物反馈疗法在调节肌力、肌张力, 预防痉挛方面有效, Dogma-Asian 等人报道肌电生物反馈疗法能降低肌肉痉挛, 提高运动功能和日常生活能力, 对偏瘫上肢神经功能的恢复有效[30]。这证明肌电生物反馈可以调整患者的姿势控制能力, 从而提高日常生活能力。国内外相关研究发现[31]-[33], 肌电生物反馈疗法通过反复主动地训练, 强化患肢肌肉运动, 增强肌肉力量、完成肌肉收缩及关节活动、降低肌肉痉挛, 且肌电生物反馈有主动参与, 加强中枢神经系统的感觉输入, 激发本体感觉及运动神经元的兴奋, 逐渐恢复大脑对患侧肢体的运动控制及协调平衡, 可有效促进患者患肢运动功能的恢复, 从而提高日常生活能力, 让痉挛性偏瘫患儿回归社会。

5. 提供反馈, 增强动力

“中枢-外周-中枢”闭环康复干预模式在脑神经受损的患者肢体功能障碍中发挥着重要作用[34]。脑性瘫痪由于损伤已经形成尚无治愈方法, 早期康复治疗可以延缓病程的进展, 预防并发症的发生[35]。因此, 脑瘫患儿的康复训练及日常管理尤为重要[36]。根据《中国脑性瘫痪康复指南 2022》中提出了目标为导向、脑瘫儿童愉快和有动力地主动参与康复训练的脑瘫康复治疗原则[2], 肌电生物反馈结合了主动运动的思想, 它可以给患者视觉提示, 以了解肢体肌肉运动激活发生的位置, 帮助患者早期开始训练, 并在肢体肌肉运动激活无法通过其他手段检测到的阶段为患者提供有用的反馈, 从而完成“中枢-外周

- 中枢”闭环康复干预模式。反馈的完成主要依赖于神经的可塑性, 有研究者提出, 当神经细胞收到频繁刺激时, 相邻的神经细胞突触效能会增加, 定义了神经可塑性的概念[37]。脑损伤的患者在经过学习、训练后脑功能会在一定程度上恢复[38]。肌电生物反馈通过创建了一个增强的“感知-行动-反馈”闭环, 从强化体感皮层输入、依赖小脑和基底节优化运动输出、皮层重组、功能映射、协调神经网络抑制异常协同, 以促进神经控制等方面完成反馈闭环, 促进了脑功能的恢复。Agnes Sturma 在一项表面肌电生物反馈在上肢神经损伤康复中的临床应用中发现[39], 应用表面肌电生物反馈恢复神经移位患者上肢功能与仿生重建患者表面肌电生物反馈的应用, 在经过三个阶段治疗后, 所有患者都恢复了主动肘关节屈曲对抗重力。在康复过程中, 患者提到, 在实际运动之前可视化肌肉活动有助于他们在康复期间直观感受到肌肉的收缩, 更有助于保持康复动力, 促进功能恢复。患侧肢体重复的、持续的反馈训练有助于建立新的感觉记忆, 增加感觉皮质的映射, 提高神经的可塑性, 有效的反馈训练会增强患者训练动力还可提升疗效。一项针对偏瘫患者上肢进行功能性电刺激的研究表明[40], 在治疗过程中患者被鼓励使用患侧肢体进行运动, 此时运动信息会传递到中枢神经系统, 大量重复的肌肉活动会刺激大脑皮质进行功能重组。sEMG 通过帮助患者定位具有弱收缩动作的肌肉, 减少了患儿由于注意不到肌肉的弱收缩导致的康复训练的推迟及延误, 且 sEMG 使肌肉活动可视化, 增加对目标的认识, 有助于患者理解运动命令导致肌肉激活, 从而形成一种心理上的正反馈机制, 更有助于患者在康复期间保持动力。痉挛性偏瘫患儿足下垂其主要原因是促进足背屈的胫骨前肌无力而促进趾屈的小腿三头肌痉挛, 进行肌电生物反馈治疗时, 将电极片贴附于患儿偏瘫侧胫骨前肌肌腹, 根据可视的肌电信号及语音提醒, 有助于患儿注意到胫骨前肌的有效发力, 且重复、持续的反馈训练可保持动力, 通过神经重塑, 增强疗效, 有助于从神经层面改善患儿的异常姿势。

6. 改善步态质量 重塑运动模式

痉挛性偏瘫患儿多以皮质及锥体系为病变部位, 临床表现多见运动障碍、姿势障碍、肌肉痉挛等, 严重影响了患儿的运动功能、平衡协调能力、日常生活能力及社会参与能力, 也会影响患儿的行走能力, 造成异常的行走姿势[41][42], 改善步态质量是痉挛性偏瘫患儿有效行走、独立从事功能性活动和参与社会的重要前提。足下垂是痉挛性偏瘫患儿常见的步态障碍, 主要由于踝关节背屈肌肉无力及趾屈肌肉痉挛导致[43], 小腿三头肌牵张反射亢进从而限制小腿肌肉的延伸及踝关节的背屈, 导致患儿行走时前进的推力降低。这种异常的肌肉激活, 增加了患儿的能量消耗, 还降低了患儿的行走速度[44]。肌电生物反馈主要通过刺激适当的肌肉群, 如胫骨前肌等, 以促进踝关节背屈, 防止足部跌倒。FES 通过改善肌肉力量和减少肌肉痉挛来支持行走[45], 也可以纠正步态摆动状态偏差, 提高步行能力[46]。Zhu Q 等人在一项功能性电刺激对脑性瘫痪儿童步态参数影响的 Meta 分析中发现[47], 功能性电刺激可提高脑瘫患儿的步行速度($SMD = 0.82, P < 0.0001$), 增加脑瘫患儿的步行步长($SMD = 1.34, 95\%CI = 1.07, 1.60, Z = 9.91, P < 0.0001$), 结果表明, 功能性电刺激治疗可提高脑瘫患儿的步态速度和步长, 从而改善脑瘫患儿的行走。这与 Belizón-Bravo N 等人的研究结果一致[48]。联合干预方案正在成为肌电生物反馈研究的重要趋势, 不同组合针对偏瘫足下垂的异常姿势改善提供了多靶点解决方案。Dost Sürücü G 等人将 Brunnstrom 分期 III 期以下的 40 例脑卒中偏瘫足下垂患者纳入研究[49], 研究组在对照组的基础上对患侧的胫骨前肌进行了 3 周肌电生物反馈治疗, 结果表明, 在进行常规康复训练的基础上进行肌电生物反馈疗法可以改善其临床治疗效果和痉挛状态。这与 Arpa S 等人的研究结果相一致[50]。在提高步长与步速, 改善步态质量后, 肌电生物反馈还可协助患儿重塑新运动模式, 由于步行是一项动态任务, 痉挛性偏瘫足下垂患儿在步行过程中很难保持平衡, 儿童需要缩短步伐, 减少身体的摆动, 以保持步态稳定和保持重心[51], 且患儿的运动模式主要是异常协同运动及分离运动障碍。肌电生物反馈疗法可以提供肌肉激活的即时信息,

加强特定的肌肉活动,使肌肉之间协调性恢复,从而避免异常协同模式和代偿策略[52]。肌电生物反馈的应用可以支持运动控制能力受损的肌肉或神经,以增强行走过程中的控制和执行力[5],有效改善足下垂患儿的廓清障碍,同时肌电生物反馈可帮助患儿建立新的运动模式。在标准神经转移后,个体定制的sEMG生物反馈可以通过肌肉激活不能被检测到的阶段提供视觉线索来促进早期感觉运动再教育,提高对新目标肌肉的认识,进而促进肌肉活动的分离,帮助患儿建立认知需求过程中的新运动模式,指导患者使用新的运动模式[53]。此外,通过建立新的运动模式和成功激活肌肉活动分离后的皮层重组,可以在不激活肌肉的情况下为患者提供有价值的反馈,从而进一步恢复神经支配肌肉的功能。肌电生物反馈疗法可以改善由于踝关节背屈不足导致的足下垂症状,从而减少了跌倒事件发生,增强了行走过程中的稳定性,且肌电生物反馈有助于建立正确的运动模式。练习,重复,以及适当的生物反馈结构化训练,随着新运动模式的建立和皮质重新映射,在成功康复后,无需激活供体肌肉即可实现对神经支配肌肉的控制[54]。这项技术的出现将大大改善脑瘫足下垂患儿由于肌无力、肌痉挛和自主运动能力丧失,引发的习得性废用及代偿策略,可以纠正患儿的异常协同运动模式,促进新运动模式的形成。

7. 总结

综上所述,目前肌电生物反馈治疗在脑瘫足下垂患儿的临床康复治疗中的作用主要体现在:① 激活肌肉,改善肌肉力量,调节肌张力;② 向中枢神经系统提供了大量的本体的、运动的、皮质感觉神经冲动,提高目标肌群运动控制能力,从而调整姿势控制,促进平衡功能;③ 从增加步长,提高步速等方面改善患儿的异常姿势;④ 神经可塑性,兴奋大脑皮质,且提供反馈,增强康复训练动力;⑤ 激活肌肉活动,促进皮层重组,纠正异常协同运动,从而形成新的运动模式;肌电生物反馈作为一种新的,非侵入性的治疗技术,操作安全、简单,可以改善痉挛性偏瘫足下垂患儿的肢体功能障碍,在康复领域具有巨大的潜力。但就以上文献发现,肌电生物反馈应用于肢体活动上的研究较多,对躯干及核心的研究内容较少,并且在吞咽、呼吸、语言等方面的研究也较少,值得进一步研究。肌电生物反馈研究目前多为小样本研究,且疗效评价体系的不统一,各研究采用的评估工具和指标差异较大,针对下肢运动功能,使用GMFM、MAS、BBS等不同量表,导致结果难以直接比较。肌电生物反馈使用后脑瘫足下垂患儿功能有所改善,但缺乏长期追踪研究。在此基础上,针对不同患儿的病情功能状态,治疗方案标准化与个性化平衡也是肌电生物反馈治疗的一大难题。目前肌电生物反馈的参数设置(如训练频率、强度、时长)缺乏循证共识,各机构实践差异显著。从纳入研究看,疗程从6周到6个月不等,每周2~5次,每次20~60分钟[369],这种变异性影响了疗效的可比性。个体化的设计肌电生物反馈治疗与其他康复治疗的联合治疗模式,也需进一步探究。

参考文献

- [1] 李晓捷,唐久来,马丙祥,等. 脑性瘫痪的定义、诊断标准及临床分型[J]. 中华实用儿科临床杂志, 2014, 29(19): 1520.
- [2] 张建奎,李晓捷,唐久来,等. 中国脑性瘫痪康复指南(2022)核心内容解读[J]. 中华实用儿科临床杂志, 2022, 37(24): 1841-1853.
- [3] Wu, M., Kim, J., Gaebler-Spira, D.J., Schmit, B.D. and Arora, P. (2017) Robotic Resistance Treadmill Training Improves Locomotor Function in Children with Cerebral Palsy: A Randomized Controlled Pilot Study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **98**, 2126-2133. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2017.04.022>
- [4] Rethlefsen, S.A., Blumstein, G., Kay, R.M., Dorey, F. and Wren, T.A.L. (2016) Prevalence of Specific Gait Abnormalities in Children with Cerebral Palsy Revisited: Influence of Age, Prior Surgery, and Gross Motor Function Classification System Level. *Developmental Medicine & Child Neurology*, **59**, 79-88. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13205>
- [5] Novak, I., Morgan, C., Fahey, M., Finch-Edmondson, M., Galea, C., Hines, A., et al. (2020) State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy. *Current*

- Neurology and Neuroscience Reports*, **20**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1007/s11910-020-1022-z>
- [6] dos Santos Glória, I.P., Politti, F., Leal Junior, E.C.P., Lucareli, P.R.G., Herpich, C.M., Antonialli, F.C., *et al.* (2017) Kinesio Taping Does Not Alter Muscle Torque, Muscle Activity or Jumping Performance in Professional Soccer Players: A Randomized, Placebo-Controlled, Blind, Clinical Trial. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, **30**, 869-877. <https://doi.org/10.3233/bmr-160556>
 - [7] 何兵荣, 许波, 张玉龙. 电子生物反馈疗法在脑梗死治疗中的应用效果[J]. 江西医药, 2022, 57(10): 1367-1369.
 - [8] 唐顺姣, 马显送, 张德琼, 等. 电子生物反馈疗法联合丹黄祛瘀胶囊治疗盆腔淤血综合征的临床疗效观察[J]. 当代临床医刊, 2022, 35(4): 29-30.
 - [9] 顾娟, 纪玲玲, 梅金华, 等. 电子生物反馈联合康复训练治疗脑卒中后肢体痉挛的效果观察[J]. 南通大学学报(医学版), 2023, 43(6): 597-599.
 - [10] He, M., Lei, C., Zhong, D., Liu, Q., Zhang, H., Huang, Y., *et al.* (2019) The Effectiveness and Safety of Electromyography Biofeedback Therapy for Motor Dysfunction of Children with Cerebral Palsy: A Protocol for Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicine*, **98**, e16786. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000016786>
 - [11] 韩陈, 吴德, 陶芳标, 等. 孤独症谱系障碍患儿的发声和听声特征研究进展[J]. 中华儿科杂志, 2025, 63(3): 316-319.
 - [12] H Siddiqui, S., H Siddiqui, T., U Babar, M., Khoja, A. and Khan, S. (2019) Outcomes of Patients with Guillain Barre Syndrome—Experience from a Tertiary Care Hospital of a Developing Asian Country and Review of Regional Literature. *Journal of Clinical Neuroscience*, **62**, 195-198. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2018.11.031>
 - [13] 马利中, 樊留博, 朱靖. 肌电生物反馈法或中药熏蒸法辅助治疗脑卒中偏瘫下肢痉挛的疗效比较[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2009, 31(2): 103-104.
 - [14] Moreau, N.G., Bodkin, A.W., Bjornson, K., Hobbs, A., Soileau, M. and Lahasky, K. (2016) Effectiveness of Rehabilitation Interventions to Improve Gait Speed in Children with Cerebral Palsy: Systematic Review and Meta-Analysis. *Physical Therapy*, **96**, 1938-1954. <https://doi.org/10.2522/ptj.20150401>
 - [15] 胡玲, 陈玉霞, 王志娇, 等. 基于三维步态分析的个性化康复治疗对脑性瘫痪患儿步行功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2012(4): 268-271.
 - [16] 徐林, 纪树荣, 洪毅, 等. 选择性腰骶神经后根切断治疗儿童脑瘫痉挛[J]. 中华小儿外科杂志, 1993, 14(1): 9-11.
 - [17] 徐林, 洪毅, 王安庆, 等. 高选择性脊神经后根切断术治疗肢体痉挛[J]. 中华医学杂志, 1993, 73(5): 292-294.
 - [18] 伍丹, 张洲. 踝足矫形器矫治小儿脑瘫尖足的疗效分析[J]. 按摩与康复医学, 2017, 8(16): 41-42.
 - [19] Park, C.I., Park, E.S., Kim, H.W. and Rha, D. (2006) Soft Tissue Surgery for Equinus Deformity in Spastic Hemiplegic Cerebral Palsy: Effects on Kinematic and Kinetic Parameters. *Yonsei Medical Journal*, **47**, 657-666. <https://doi.org/10.3349/ymj.2006.47.5.657>
 - [20] Massaad, F., Van Den Hecke, A., Renders, A. and Detrembleur, C. (2006) Influence of Equinus Treatments on the Vertical Displacement of the Body's Centre of Mass in Children with Cerebral Palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, **48**, 813-818. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2006.tb01228.x>
 - [21] Wren, T.A.L., Patrick Do, K. and Kay, R.M. (2004) Gastrocnemius and Soleus Lengths in Cerebral Palsy Equinus Gait—Differences between Children with and without Static Contracture and Effects of Gastrocnemius Recession. *Journal of Biomechanics*, **37**, 1321-1327. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2003.12.035>
 - [22] McManus, L., De Vito, G. and Lowery, M.M. (2020) Analysis and Biophysics of Surface EMG for Physiotherapists and Kinesiologists: Toward a Common Language with Rehabilitation Engineers. *Frontiers in Neurology*, **11**, Article 576729. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.576729>
 - [23] Liu, Q., Xue, J., Zhao, P., Ling, Y., Liu, S., Du, Y., *et al.* (2021) Effect of Electromyographic Biofeedback Therapy on Muscle Strength Recovery in Children with Guillain-Barré Syndrome. *Journal of Healthcare Engineering*, **2021**, Article ID: 1220368. <https://doi.org/10.1155/2021/1220368>
 - [24] 赵斌, 薛晶晶, 高晶, 等. 肌电生物反馈联合常规康复训练治疗痉挛型脑瘫患儿的疗效观察[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2023, 45(10): 928-930.
 - [25] 高晶, 岳虹霓, 毛红梅, 等. 肌电生物反馈综合治疗促进痉挛性双瘫型脑瘫患儿下肢运动功能的疗效观察[J]. 中国康复医学杂志, 2010, 25(1): 42-45.
 - [26] Pu, F., Fan, X., Yang, Y., Chen, W., Li, S., Li, D., *et al.* (2014) Feedback System Based on Plantar Pressure for Monitoring Toe-Walking Strides in Children with Cerebral Palsy. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **93**, 122-129. <https://doi.org/10.1097/phm.0b013e3182a54207>
 - [27] Baram, Y. and Lenger, R. (2012) Gait Improvement in Patients with Cerebral Palsy by Visual and Auditory Feedback.

- Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*, **15**, 48-52. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1403.2011.00412.x>
- [28] Bergquist, A.J., Clair, J.M., Lagerquist, O., Mang, C.S., Okuma, Y. and Collins, D.F. (2011) Neuromuscular Electrical Stimulation: Implications of the Electrically Evoked Sensory Volley. *European Journal of Applied Physiology*, **111**, 2409-2426. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2087-9>
 - [29] Francisco, G., Chae, J., Chawla, H., Kirshblum, S., Zorowitz, R., Lewis, G., et al. (1998) Electromyogram-Triggered Neuromuscular Stimulation for Improving the Arm Function of Acute Stroke Survivors: A Randomized Pilot Study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **79**, 570-575. [https://doi.org/10.1016/s0003-9993\(98\)90074-0](https://doi.org/10.1016/s0003-9993(98)90074-0)
 - [30] Doğan-Aslan, M., Nakipoğlu-Yüzer, G.F., Doğan, A., Karabay, İ. and Özgirgin, N. (2012) The Effect of Electromyographic Biofeedback Treatment in Improving Upper Extremity Functioning of Patients with Hemiplegic Stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **21**, 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2010.06.006>
 - [31] Cho, S.H., Shin, H.K., Kwon, Y.H., et al. (2007) Cortical Activation Changes Induced by Visual Biofeedback Tracking Training in Chronic Stroke Patients. *NeuroRehabilitation*, **22**, 77-84.
 - [32] Lourenção, M.I.P., Battistella, L.R., de Brito, C.M.M., Tsukimoto, G.R. and Miyazaki, M.H. (2008) Effect of Biofeedback Accompanying Occupational Therapy and Functional Electrical Stimulation in Hemiplegic Patients. *International Journal of Rehabilitation Research*, **31**, 33-41. <https://doi.org/10.1097/mrr.0b013e3282f4524c>
 - [33] 冯淑曼, 李学, 杨红旗, 等. 肌电生物反馈联合康复训练对多发性硬化患者下肢肌肉痉挛和步行功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2019, 41(5): 361-363.
 - [34] 徐硕, 贾杰. “中枢-外周-中枢”闭环康复——脑卒中后手功能康复新理念的临床应用进展[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(10): 1537-1541.
 - [35] Gillett, J.G., Lichtwark, G.A., Boyd, R.N., et al. (2018) Functional Anaerobic and Strength Training in Young Adults with Cerebral Palsy. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **50**, 1549-1557.
 - [36] Meixner, C., O'Donoghue, C.R. and Hart, V. (2017) Impact of the Brain Injury Family Intervention (BIFI) Training on Rehabilitation Providers: A Mixed Methods Study. *NeuroRehabilitation: An International, Interdisciplinary Journal*, **40**, 545-552. <https://doi.org/10.3233/nre-171441>
 - [37] Cohen, E.J., Quarta, E., Bravi, R., Granato, A. and Minciocchi, D. (2017) Neural Plasticity and Network Remodeling: From Concepts to Pathology. *Neuroscience*, **344**, 326-345. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.12.048>
 - [38] 蔡淼, 洪杰. 脑卒中患者下肢神经损伤的临床康复技术研究进展[J]. 中华生物医学工程杂志, 2025, 31(3): 237-240.
 - [39] Sturma, A., Hruby, L.A., Prahm, C., Mayer, J.A. and Aszmann, O.C. (2018) Rehabilitation of Upper Extremity Nerve Injuries Using Surface EMG Biofeedback: Protocols for Clinical Application. *Frontiers in Neuroscience*, **12**, Article 906. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00906>
 - [40] Lourencao, M.I.P., Battistella, L.R., Martins, L.C. and Litvov, J. (2005) Analysis of the Results of Functional Electrical Stimulation on Hemiplegic Patients' Upper Extremities Using the Minnesota Manual Dexterity Test. *International Journal of Rehabilitation Research*, **28**, 25-31. <https://doi.org/10.1097/00004356-200503000-00004>
 - [41] Mathewson, M.A. and Lieber, R.L. (2015) Pathophysiology of Muscle Contractures in Cerebral Palsy. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, **26**, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2014.09.005>
 - [42] Gilson, K., Davis, E., Reddihough, D., Graham, K. and Waters, E. (2014) Quality of Life in Children with Cerebral Palsy: Implications for Practice. *Journal of Child Neurology*, **29**, 1134-1140. <https://doi.org/10.1177/0883073814535502>
 - [43] 胡跃林, 任怀禹, 苗欣. 慢性踝关节不稳神经肌肉控制机制的研究进展[J]. 足踝外科电子杂志, 2022, 9(3): 117-124.
 - [44] van der Krogt, M., Doorenbosch, C., Becher, J. and Harlaar, J. (2010) Dynamic Spasticity of Plantar Flexor Muscles in Cerebral Palsy Gait. *Journal of Rehabilitation Medicine*, **42**, 656-663. <https://doi.org/10.2340/16501977-0579>
 - [45] Moll, I., Vles, J.S.H., Soudant, D.L.H.M., Witlox, A.M.A., Staal, H.M., Speth, L.A.W.M., et al. (2017) Functional Electrical Stimulation of the Ankle Dorsiflexors during Walking in Spastic Cerebral Palsy: A Systematic Review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, **59**, 1230-1236. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13501>
 - [46] Wright, P.A., Durham, S., Ewins, D.J. and Swain, I.D. (2012) Neuromuscular Electrical Stimulation for Children with Cerebral Palsy: A Review. *Archives of Disease in Childhood*, **97**, 364-371. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2011-300437>
 - [47] Zhu, Q., Gao, G., Wang, K. and Lin, J. (2022) Effect of Functional Electrical Stimulation on Gait Parameters in Children with Cerebral Palsy: A Meta-Analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, **2022**, Article ID: 3972958. <https://doi.org/10.1155/2022/3972958>
 - [48] Belizón-Bravo, N., Romero-Galisteo, R.P., Cano-Bravo, F., Gonzalez-Medina, G., Pinero-Pinto, E. and Luque-Moreno, C. (2021) Effects of Dynamic Suit Orthoses on the Spatio-Temporal Gait Parameters in Children with Cerebral Palsy: A

-
- Systematic Review. *Children*, **8**, Article 1016. <https://doi.org/10.3390/children8111016>
- [49] Dost Sürücü, G. and Tezen, Ö. (2020) The Effect of EMG Biofeedback on Lower Extremity Functions in Hemiplegic Patients. *Acta Neurologica Belgica*, **121**, 113-118. <https://doi.org/10.1007/s13760-019-01261-w>
- [50] Arpa, S. and Ozcakil, S. (2019) Does Electromyographic Biofeedback Improve Exercise Effects in Hemiplegic Patients? A Pilot Randomized Controlled Trial. *Journal of Rehabilitation Medicine*, **51**, 109-112. <https://doi.org/10.2340/16501977-2513>
- [51] Apolo-Arenas, M.D., Jerônimo, A.F.d.A., Caña-Pino, A., Fernandes, O., Alegrete, J. and Parraca, J.A. (2021) Standardized Outcomes Measures in Physical Therapy Practice for Treatment and Rehabilitation of Cerebral Palsy: A Systematic Review. *Journal of Personalized Medicine*, **11**, Article 604. <https://doi.org/10.3390/jpm11070604>
- [52] Novak, C.B. and von der Heyde, R.L. (2013) Evidence and Techniques in Rehabilitation Following Nerve Injuries. *Hand Clinics*, **29**, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2013.04.012>
- [53] Kahn, L.C. and Moore, A.M. (2016) Donor Activation Focused Rehabilitation Approach: Maximizing Outcomes after Nerve Transfers. *Hand Clinics*, **32**, 263-277. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2015.12.014>
- [54] Lirio-Romero, C., Torres-Lacomba, M., Gómez-Blanco, A., Acero-Cortés, A., Retana-Garrido, A., de la Villa-Polo, P., et al. (2021) Electromyographic Biofeedback Improves Upper Extremity Function: A Randomized, Single-Blinded, Controlled Trial. *Physiotherapy*, **110**, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2020.02.002>