

文章编号: 1004-7220(2022)04-0726-07

痉挛型脑瘫儿童手术后表面肌电信号和关节角度评估

唐源敏^{1,2}, 罗雪芹^{1,2}, 孙继明³, 喻洪流^{1,2}, 孟青云⁴, 李素姣^{1,2}

(1. 上海理工大学 医疗器械与食品学院, 康复工程与技术研究所, 上海 200093; 2. 上海康复器械工程技术研究中心, 上海 200093; 3. 上海浦南医院 功能神经外科, 上海 200125; 4. 上海健康医学院 医疗器械学院, 上海 201318)

摘要:目的 通过表面肌电(surface electromyography, sEMG)和关节角度评估脑瘫儿童手术后运动功能。方法 采集 16 名痉挛型脑瘫患儿手术前后直线行走时股直肌、股二头肌、半腱肌、胫骨前肌、腓肠肌内外侧 sEMG 和髋、膝、踝关节角度, 计算各步态时期 sEMG 均方根、积分肌电值和关节角度均值, 进行肌力肌张力评估。结果 手术后, 患儿下肢肌肉肌张力均显著降低($P < 0.05$), 股直肌和股二头肌在摆动阶段肌力减小。胫骨前肌在摆动中末期肌力增大($P < 0.05$)。髋、膝关节屈曲角降低($P < 0.05$)。踝关节背屈角增大($P < 0.05$), 内翻角减小($P < 0.05$)。结论 治疗后患者蹲伏步态和马蹄内翻足均得到改善, 运动功能得到提升。sEMG 结合关节角度分析可对患者肌肉功能进行定量评估, 为临床诊断提供参考。

关键词: 痉挛型脑性瘫痪; 表面肌电信号; 关节角度; 运动学分析; 步态生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.04.023

Assessment of Postoperative Surface Electromyography and Joint Angle in Children with Spastic Cerebral Palsy

TANG Yuanmin^{1,2}, LUO Xueqin^{1,2}, SUN Jiming³, YU Hongliu^{1,2}, MENG Qingyun⁴, LI Sujiao^{1,2}

(1. Institute of Rehabilitation Engineering and Technology, School of Medical Device and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Assistive Devices, Shanghai 200093, China; 3. Department of Functional Neurosurgery, Shanghai Punan Hospital, Shanghai 200125, China; 4. College of Medical Device, Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 201318, China)

Abstract: Objective To analyze and assess the postoperative motor function in children with spastic cerebral palsy (SCP) by surface electromyography (sEMG) and joint angle. **Methods** Sixteen children with SCP were involved in this study. The sEMG of rectus femoris, biceps femoris, semitendinosus, tibialis anterior, lateral gastrocnemius and medial gastrocnemius muscles and joint angles of the hip, knee and ankle during straight walking were collected preoperatively and postoperatively. In every gait phase, the mean values of joint angles, root mean square and integrated electromyography of sEMG were calculated, to evaluate muscle strength and muscular tension quantitatively. **Results** The muscle tension of lower limbs was significantly decreased ($P < 0.05$). The muscle strength of rectus femoris and biceps femoris was decreased in the swing phase. At the

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-09-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC2007902), 国家自然科学基金项目(62073224)

通信作者: 李素姣, 副教授, E-mail: sujiaoli2015@foxmail.com

midswing and terminal swing phase, the strength of tibialis anterior increased significantly ($P < 0.05$). The flexion angle of hip and knee decreased significantly ($P < 0.05$). The dorsiflexion angle of ankle increased significantly ($P < 0.05$), and the varus angle decreased significantly ($P < 0.05$). **Conclusions** After operation, the crouching gait and clubfoot were improved positively. Therefore, the motor function of children was improved. Combining sEMG and joint angle can evaluate the muscle function of patients quantitatively, and it also can provide references for clinical diagnosis.

Key words: spastic cerebral palsy (SCP); surface electromyography (sEMG) signal; joint angle; kinematic analysis; gait biomechanics

针对具有严重运动障碍的痉挛型脑瘫 (spastic cerebral palsy, SCP) 患者, 现代医学治疗手段主要包括外科手段干预及功能康复训练。其中, 外科治疗方法包括神经外科手术和矫形手术。功能性选择性脊神经后根切断术 (functional selective posterior rhizotomy, FSPR) 是用于解除 SCP 痉挛、调节肌张力和平衡肌力的一种神经外科手术^[1]。跟腱延长术和胫骨前肌肌腱劈裂移位术作为矫形手术 [本文中, 两者统称为肌力肌张力调整术 (muscle strength muscular tension adjustment, MSMTA)], 主要用于解决由长期痉挛所致的肌腱挛缩与骨关节畸形^[2-3]。一般情况下, 外科医生会针对特定的功能障碍对患者进行神经外科和矫形复合手术, 以调节肌张力并平衡肌力^[4]。在本文中, FSPR 和 MSMTA 的复合手术被用来解除痉挛并矫正关节变形。

术后运动功能评估可直观地对患儿的运动能力进行评定, 是手术疗效评估中不可或缺的环节。近年来, 表面肌电 (surface electromyography, sEMG) 信号分析被广泛应用到运动分析领域, 为 SCP 肌肉功能的量化评估提供技术手段^[5]。sEMG 可用于反映 SCP 患者步行周期中的肌肉功能状态^[6]。许晶莉等^[7]研究表明, sEMG 可定量反映肌肉功能, 其时域指标可用于 SCP 肌肉功能评估。然而目前结合步态分析 SCP 肌力肌张力变化的研究较少。

在 1 个步态周期中, 下肢肌肉具有 1 次或 2 次持续的电活动短脉冲, 当 sEMG 活动水平达到静态水平的预定值时, 该肌肉处于激活状态^[8]。研究表明, 肌肉处于激活状态时, sEMG 的均方根 (root mean square, RMS) 和积分肌电值 (integrated electromyography, iEMG) 与肌力有正相关性, 处于非激活状态时, 与肌张力有正相关性^[9-10]。基于这一特点, 可对肌力和肌张力做出定量评估。因此, 本

文旨结合 sEMG 和下肢肌肉步态生物力学, 评价复合手术后肌力和肌张力变化, 并对关节角度进行运动学分析, 客观定量地评估患儿术后运动功能, 为后续的治疗和康复提供依据, 并为 SCP 运动功能评估提供新思路或新方法。

1 对象和方法

1.1 受试者

纳入 2019 年 7 月~2020 年 7 月接受 FSPR 和 MSMTA 复合手术治疗的 16 例 SCP 患儿 (偏瘫 2 人, 双瘫 14 人)。其中男性 10 名, 女性 6 名, 年龄 4~17 岁, 平均年龄 (9.82 ± 4.82) 岁。入选标准: ① 符合 SCP 诊断标准; ② 年龄 ≥ 3 岁; ③ 粗大运动功能分类水平 I~III 级; ④ 肌力 ≥ 3 级; ⑤ 智力水平正常; ⑥ 呈蹲伏步态; ⑦ 呈马蹄内翻足; ⑧ 可配合评估及术后康复训练, 家属已签署知情同意书的患儿。排除标准: ① 进行本实验前接受过其他治疗 (手术、骨科矫形或肉毒杆菌毒素注射等); ② 不具备独立行走能力。

1.2 实验设备

采用美国 Noraxon 公司人体三维运动检测系统记录 SCP 患者髋、膝、踝关节角度 (采样频率 200 Hz) 和 6 块肌肉的 sEMG (采样频率 1.5 kHz), 分别为股直肌、股二头肌、半腱肌、胫骨前肌、外侧腓肠肌、内侧腓肠肌 (见图 1)。以上肌肉功能主要包括髋、膝、踝的屈伸以及足的内外翻。其中, Noraxon 三维运动检测系统 MyoMotion 模块用于测量关节角度, MyoMuscle 模块用于测量 sEMG, MyoSync 模块作为同步器保证测得的关节角度和 sEMG 同步。

1.3 实验方案设计

患儿在 FSPR 手术至少 1 个月 after 接受 MSMTA 治疗。其中, FSPR 手术节段均为 L5~S1, MSMTA



图1 NORAXON 关节角度、表面肌电信号采集
Fig.1 Joint angle and sEMG signal collection using NORAXON

采用“Z”型跟腱延长术和胫骨前肌腱劈裂移位术。所有受试者的患侧均在 FSPR 术前、MSMTA 后 6 个月分别进行人体三维运动关节角度和 sEMG 数据采集。数据采集实验在无干扰的康复室中进行,受试者统一着短裤。清洁受试者被测部位皮肤,选取合适位置粘贴关节角度传感器和 sEMG 电极。所有传感器放置粘贴好后,受试者先以自身行走节奏进行短暂步行练习。实验开始后,受试者按照自己最适宜的步行速度直线行走 20 m,并同步记录关节角度和 sEMG 数据。

1.4 实验数据处理

根据步行力、承载的传递变化及双脚的触地和离地,1 个完整的步态周期可分为 8 个时期:首次触地、承重反应期、支撑中期、支撑末期、摆动前期、摆动初期、摆动中期和摆动末期^[11]。根据下肢关节在不同时期的运动学特征不同,对实验数据的处理方案如下:按照不同步态时相,划分实验数据,并分别处理受试者 1 个步态周期中所有时期 sEMG 的 RMS 和 iEMG,以及髌、膝和踝关节角度。为减小误差,每位受试者选取患侧在稳定步行时的 6 个完整连续步态周期。此外,由于首次触地占整个步态周期的比例较小,实验数据均按首次触地后的 7 个步态时期进行划分。

对 sEMG 数据的处理如下:对原始 sEMG 数据进行六阶 20~500 Hz 巴特沃斯带通滤波^[12]去噪和三阶 50 Hz 巴特沃斯陷波滤波消除工频干扰,然后采用窗长 10 ms 滑动窗口计算信号的 RMS 和 iEMG,为了消除其他因素的影响,对于每个 sEMG

通道,均获得峰值 RMS 和 iEMG 并将其用于归一化^[13]。归一化后计算每位患者各个步态时期 RMS 和 iEMG 均值,用于后续统计分析。

为分析蹲伏步态和马蹄内翻足的术后改善效果,主要分析髌、膝关节矢状面角度(伸展/屈曲角度)、踝关节矢状面角度(跖屈/背屈角度)和冠状面角度(内翻/外翻角度)在各个步态时期的平均值。

1.5 统计学分析

使用 SPSS 25.0 软件对数据进行统计学处理。数据呈正态分布,分别对受试者手术前后不同步态时期 sEMG 信号的 RMS 和 iEMG、关节(髌、膝和踝关节)角度进行配对 *t* 检验,显著性检验标准为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 基于 sEMG 信号的手术前后效果评估

步态周期中下肢肌肉激活的时间如图 2 所示^[8]。根据肌肉激活状态,并结合 sEMG 的 RMS 和 iEMG 与肌力肌张力的关系,可将手术前后肌肉活动 sEMG 信号的 RMS、iEMG 变化转化为肌肉肌力和肌张力的变化。

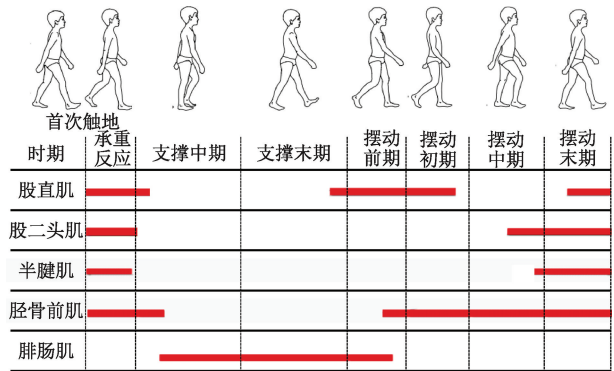


图2 标准步态中下肢肌肉激活时间(红色条)

Fig.2 Activation time for muscles in the lower extremities during the gait cycle (red bar)

图 3 所示为手术前后大腿主要肌肉 RMS、iEMG 均值变化。经配对 *t* 检验,在摆动前期 ($P_{RMS} < 0.05$, $P_{iEMG} < 0.05$) 和摆动初期 ($P_{RMS} < 0.05$, $P_{iEMG} < 0.05$) 股直肌的 RMS 和 iEMG 均显著减小,此时股直肌处于激活状态,故股直肌肌力显著降低。股二头肌的 RMS 和 iEMG 在承重反应期显著增大 ($P_{RMS} < 0.05$, $P_{iEMG} < 0.05$);而在摆动前期至摆动中期这一段时

期,均表现为显著减小($P_{RMS} < 0.05$, $P_{iEMG} < 0.05$)。在步态周期中,股二头肌在承重反应期和摆动中期处于激活状态,故股二头肌在承重反应期肌力增大,在摆动中期肌力减小;在摆动前期和摆动初期处于非激活状态,肌张力减小,即痉挛得到缓解。

在承重反应期半腱肌处于激活状态,RMS 和 iEMG 显著增大($P_{RMS} < 0.05$, $P_{iEMG} < 0.05$),则肌力增大;在摆动前期半腱肌处于非激活状态,RMS 和 iEMG 显著减小($P_{RMS} < 0.05$, $P_{iEMG} < 0.05$),即肌张力显著减小。

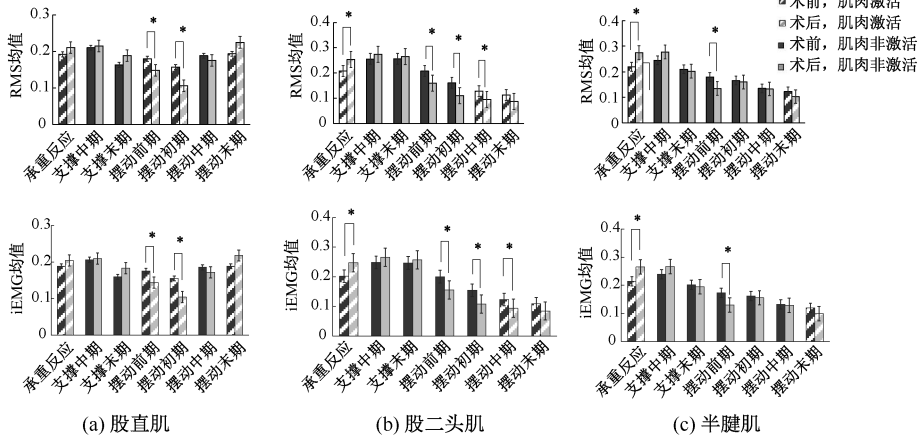


图3 手术前后大腿肌肉肌电信号 RMS 和 iEMG 比较(* $P < 0.05$)

Fig. 3 Comparison of root mean square and integrated electromyogram for surface electromyography signals of thigh muscles before and after operation (a) Rectus femoris, (b) Biceps femoris, (c) Semitendinosus

手术前后小腿主要肌肉 RMS 和 iEMG 均值变化如图4所示。其中,胫骨前肌的 RMS 和 iEMG 在支撑末期显著减小($P_{RMS} < 0.05$, $P_{iEMG} < 0.05$),此时胫骨前肌处于非激活状态,提示肌张力减小;在摆动

中期和摆动末期显著增大($P_{RMS} < 0.05$, $P_{iEMG} < 0.05$),此时胫骨前肌处于激活状态,即肌力增大。外侧腓肠肌和内侧腓肠肌的 RMS 和 iEMG 在支撑中期、支撑末期和摆动前期均显著增大($P_{RMS} <$

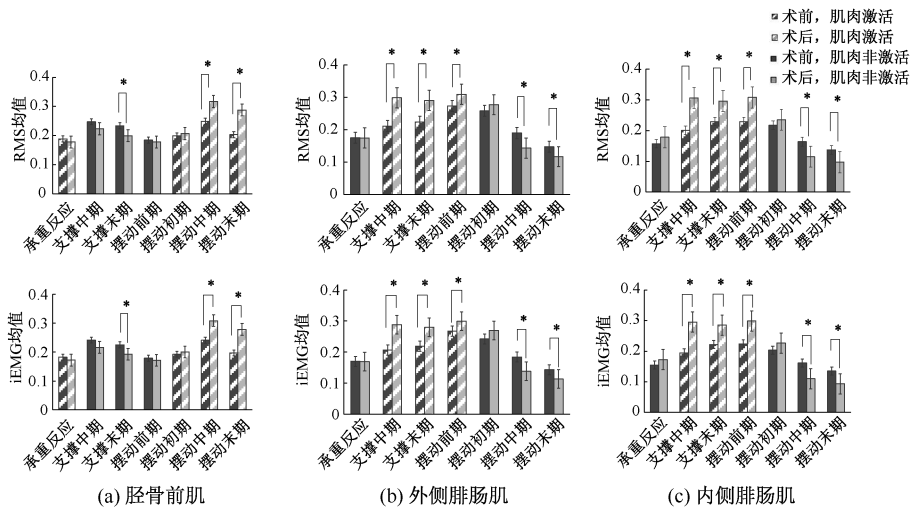


图4 手术前后小腿肌肉肌电信号 RMS 和 iEMG 比较(* $P < 0.05$)

Fig. 4 Comparison of root mean square and integrated electromyogram for surface electromyography signals of calf muscles before and after operation (a) Tibialis anterior, (b) Lateral gastrocnemius muscle, (c) Medial gastrocnemius muscle

0.05, $P_{iEMG} < 0.05$), 此时腓肠肌处于激活状态, 则肌力增大; 处于非激活状态的摆动中期和摆动末期内外侧腓肠肌的 RMS 和 iEMG 均显著减小 ($P_{RMS} < 0.05, P_{iEMG} < 0.05$), 即肌张力显著减小。

2.2 基于关节角度的手术前后效果评估

复合手术治疗前后患者完整步态周期内各关节角度均有显著性差异。髋、膝关节屈曲角度均显著减小 ($P < 0.05$), 踝关节背屈和外翻角度均显著增大 ($P < 0.05$), 见表 1。

表 1 患儿手术前后各关节角度比较 ($*P < 0.05$)

Tab. 1 Comparison of preoperative and postoperative joint angles for patients 单位: ($^{\circ}$)

阶段	髋屈曲/伸展	膝屈曲/伸展	踝背屈/跖屈	踝内翻/外翻
术前	8.68±13.51	20.05±17.43	-5.15±13.38	-0.76±13.81
术后	5.28±15.70*	18.69±16.66*	1.00±8.55*	2.28±10.33*

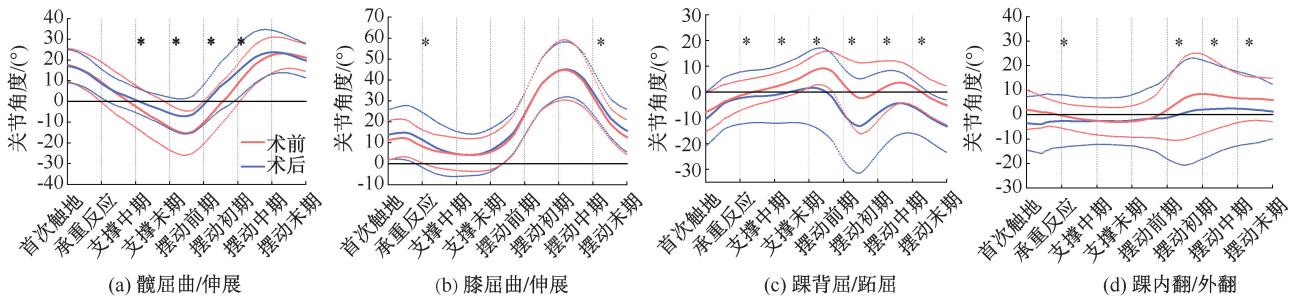


图 5 下肢关节手术前后运动曲线

Fig. 5 Kinematic curves of lower limbs before and after operation dorsiflexion/plantarflexion, (d) Ankle inversion/eversion

注: $*P < 0.05$, 虚线为标准偏差。

3 讨论

sEMG 在一定程度上反映了肌纤维兴奋传导的情况, 可对患者神经肌肉系统功能进行诊断^[14]。其中, RMS 为一段时间内瞬时肌电放电幅度的平方根, 体现了肌肉放电的有效值; iEMG 是肌肉收缩特性的特异性指标, 反映了一段时间内肌肉运动单元的放电总量。两者可以客观评价 SCP 的临床治疗效果。SCP 患儿运动学分析可记录受试者的姿势异常和具体关节角度的数据, 对 SCP 的临床诊断以及康复训练具有指导意义^[15-16]。本文将 sEMG 时域特征 RMS 和 iEMG 和步态周期中肌肉激活状态结合分析评价脑瘫儿童术后肌力和肌张力的变化, 并结合运动学分析, 进一步对 SCP 患儿运动功能进

行了定量评估。结果表明, 复合手术后患儿肌张力高和肌力不足的问题有明显改善, 进一步地, 对患者蹲伏步态和马蹄内翻足起到明显的改善作用。蹲伏步态以髋关节不能完全伸展和膝关节屈曲为特征, 患者因屈髋屈膝肌群肌力肌张力过高以及伸髋伸膝肌群肌力不足, 无法直立行走^[17]。从术后髋膝关节屈曲角度变化可以看出, 髋膝关节伸展不足问题得到改善。股直肌主要作用为屈髋和伸膝, 实验结果显示, 在摆动前期和摆动初期, 股直肌肌力减小, 髋关节屈曲角度减小, 髋屈曲畸形得到改善。股二头肌和半腱肌均有伸髋和屈膝作用, 在首次触地至承重反应时期, 两者肌力显著增大, 髋关节伸展能力得到增强, 膝关节位置得以稳定。在摆动中期, 股二头肌肌力降低, 膝关节屈曲角度减

(a) Hip flexion/extension, (b) Knee flexion/extension, (c) Ankle

小,膝关节屈曲畸形得到改善。

马蹄内翻足主要特征为足跖屈挛缩、内翻以及内收,同时合并肌肉、肌腱和韧带的挛缩^[18]。本文结果显示,术后足背屈角度不足和足内翻畸形均得到改善。手术后,腓肠肌肌张力减小,缓解足跖屈挛缩,且踝关节跖屈角度明显减小,患者的踝背屈能力得到提升。在支撑相阶段,踝关节背屈角度增加有助于增加足底屈肌的力量,利于身体向前迈进^[19]。支撑中期至摆动前期,腓肠肌激活,术后结果显示其肌力增大,更有助于控制小腿向前倾斜。另一方面,足内翻可能会导致脚底无法有效接触地面,且身体重心无法有效向前移动,从而导致行走功能障碍。而胫骨前肌肌张力减小,改善了足内翻挛缩,且承重反应时期,足由内翻变成外翻,符合正常步态规律,即距下关节在足跟着地时内翻 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$,足跟着地后,立刻开始快速外翻并延续到支撑中期。

从运动生物力学的角度来看,在承重反应期,股二头肌和半腱肌离心激活。本实验结果显示,手术后其肌力增大,髋关节伸展不足得到改善,关节受到力的影响减弱。支撑中期为下肢最大的负重期,此时腓肠肌离心收缩,保持前足压在地面上,至支撑后期,腓肠肌转换到向心收缩以帮助为后续运动提供必要的推力。此时,患者术后腓肠肌肌力增大,有助于产生驱动人体向前运动的动力,从而加速身体前移。在摆动前期和初期,股直肌向心收缩,髋关节主动屈曲,术后患儿股直肌肌力减小利于改善髋关节过度屈曲,从而进行正常的抬腿运动,而此时膝关节处于被动屈曲状态,术后股二头肌和半腱肌肌张力降低可减轻患者膝关节屈膝的负担。在摆动阶段,患儿术后腓肠肌肌张力的减小有利于踝关节从跖屈过渡到背屈,改善其踝跖屈挛缩、背屈不足问题。且腓肠肌肌张力减小可使腿部速度变慢,使足平稳着地。术后胫骨前肌在摆动中末期肌力增加,有助于提高踝背屈能力,提供前进的动力并防止足下垂。在摆动阶段的后半段,股二头肌肌力减小,髋关节屈曲运动的速度降低,从而启动髋关节伸展。

FSPR 手术可有效阻止肌肉周围感觉神经根过度兴奋性的传入,使患者异常高的肌肉张力接近正常水平,缓解肢体痉挛,同时可长久有效地解决患

者因肌肉痉挛带来的痛苦,为患者最大限度恢复运动功能提供坚实基础^[20]。当患者接受 FSPR 手术治疗后,肢体肌肉张力得到明显降低。但由于患者肌肉长时间处于痉挛状态,已发生不同程度的挛缩和畸形,故正常肌肉收缩运动模式的恢复是患者行走的前提^[21]。MSMTA 通过延长或转移肌腱进而使关节囊松解,矫正肢体畸形,改善肌肉力量平衡,恢复活动肢体的正常姿势,提高患者日常生活自理能力。由上述结果可见,FSPR 和 MSMTA 结合治疗后患者的运动功能得到提升。由于 SCP 治疗是一个多科室合作的过程,本文仅对手术治疗的患儿进行运动评估,具有一定的局限性。未来将对其他治疗方式和康复训练进行研究,从而开展多方面的运动评估。

4 结论

本文通过提取 sEMG 的时域特征 RMS 和 iEMG,结合下肢肌肉步态生物力学以及关节角度分析,对经复合手术治疗的 SCP 患儿运动功能进行定量评价。研究结果有助于为康复医师提供客观依据,制定更合适的康复计划,减轻患者及其家庭的负担。

参考文献:

- [1] 杜爱民,孙成彦,彭云川,等. 腰骶部功能性选择性脊神经后根切断术治疗痉挛性脑瘫的效果[J]. 中国医药导报, 2015, 12(24): 158-161.
- [2] FITOUSSI F, BACHY M. Tendon lengthening and transfer [J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2015, 101(1): S149-S157.
- [3] AGATWAL A, JANDIAL G, GUPTA N. Comparison of three different methods of anterior tibial tendon transfer for relapsed clubfoot: A pilot study [J]. J Clin Orthop Trauma, 2020, 11(2): 240-244.
- [4] 郭景泉,罗毅,高宇,等. 跟腱延长及胫骨肌与肌腱移植修复脑瘫致马蹄内翻足: 恢复踝关节及足功能的评价[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(2): 241-245.
- [5] 汤璐. 小儿脑瘫运动功能障碍评估研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [6] DI NF, STRAZZA A, MENGARELLI A, et al. EMG-based characterization of walking asymmetry in children with mild hemiplegic cerebral palsy [J]. Biosensors, 2019, 9(3): 82-93.
- [7] 许晶莉,范艳萍,代早荣. 表面肌电图在脑瘫患儿疗效评估

- 中的应用研究[J]. 中国康复, 2013, 28(1): 29-32.
- [8] 唐纳德·A·诺伊曼. 骨骼肌肉功能解剖学. 第2版[M]. 人民军医出版社, 2014: 660-662.
- [9] WANG S, MIAO S, PING Z, *et al.* Assessment of surface electromyographic clinical analysis of selective femoral neurectomy on cerebral palsy with stiff knee [J]. *J. Neurosci*, 2011, 199(1): 98-102.
- [10] ONISHI H, YAGI R, AKASAKA K, *et al.* Relationship between EMG signals and force in human vastus lateralis muscle using multiple bipolar wire electrodes [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2000, 10(1): 59-67.
- [11] VAUGHAN CL, DAVIS BL, O'CONNOR JC. Dynamics of human gait [M]. Cape town: Human kinetics publishers, 1999: 11.
- [12] 茅晨, 徐国政, 高翔. 表面肌电信号采集系统的设计[J]. 电子技术, 2017, 46(11): 66-69.
- [13] GAGNAT Y, BRÆNDIL SM, ROELEVELD K. Surface electromyography normalization affects the interpretation of muscle activity and coactivation in children with cerebral palsy during walking [J]. *Front. Neurol*, 2020, 11: 202.
- [14] CAPPELLINI G, SYLOS-LABINI F, ASSENZA C, *et al.* Clinical relevance of state-of-the-art analysis of surface electromyography in cerebral palsy [J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 583296.
- [15] 蔡宗远, 王少白, 李国安. 人体运动分析的发展与应用回顾[J]. 医用生物力学, 2016, 31(4): 362-368.
- CAI ZY, WANG SB, LI GA. Human motion analysis: A review of its development and applications [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(4): 362-368.
- [16] 王雪森, 闫松华, 郑华, 等. 痉挛型脑瘫儿童步态运动学特征[J]. 医用生物力学, 2018, 33(5): 459-464.
- WANG XS, YAN SH, ZHENG H, *et al.* Kinematic characteristics of gait for children with spastic cerebral palsy [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(5): 459-464.
- [17] 何强勇, 赵勇, 符文杰, 等. 痉挛型脑性瘫痪蹲伏步态的分析与康复治疗管理[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(4): 507-511.
- [18] YAPP L, ARNOLD G, NASIR S, *et al.* Assessment of talipes equinovarus treated by Ponseti technique: Three-year preliminary report [J]. *Foot*, 2012, 2(22): 90-94.
- [19] WINTER DA. Energy generation and absorption at the ankle and knee during fast, natural, and slow cadences [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1983, 175: 147-154.
- [20] 徐杰, 徐林, 曾杰, 等. 选择性脊神经后根切断术改善脑瘫患者痉挛及粗大运动的临床观察[J]. 中国骨伤, 2019, 32(9): 815-818.
- [21] WANG KK, MUNGER ME, CHEN BPJ, *et al.* Selective dorsal rhizotomy in ambulant children with cerebral palsy [J]. *J Child Orthop*, 2018, 12(5): 413-427.