

表面肌电在脑瘫康复中的应用进展

刘方^{1,2}, 俞国俊², 黄美欢², 郭莹莹^{1,2}

【关键词】 表面肌电; 脑瘫; 评估

【中图分类号】 R49; R742 【DOI】 10.3870/zgkf.2023.10.010

脑性瘫痪(cerebral palsy, CP)是一组由于发育中胎儿或婴幼儿脑部非进行性损伤,引起的运动和姿势发育持续性障碍综合征,运动障碍常伴有感觉、知觉、认知、交流及行为障碍,导致患儿活动受限,影响日常生活^[1]。临床上,患儿常表现为肌肉张力的增高或肌力低下,肌肉力量之间的不平衡导致患儿精细功能下降、走路姿势的异常等,进而影响患儿的自理能力和生活质量。因此,解决神经肌肉功能的异常是患儿的首要目标,也是康复方案制定的主要内容。同时,对神经肌肉功能精准评估又是个性化方案制定的前提条件。目前用于评估 CP 的肌肉水平以及运动功能工具主要是临床量表,其方法的评估结果存在一定的主观性,不能客观量化肌肉的功能水平。表面肌电图(surface electromyography, sEMG)是在 20 世纪 30~50 年代针式肌电图迅速发展的基础上出现的, sEMG 是利用电极贴片引导从肌肉表面记录下来的神经-肌肉系统活动时的生物电信号,以无创、探测空间大、重复性好等优势能够对 CP 患儿肌肉功能异常作出客观定量的评估和诊断^[2-3]。本文主要从上肢功能、步态、吞咽等方面对 sEMG 在脑瘫康复中的应用进行综述,以探讨 sEMG 在 CP 神经肌肉功能评估中的应用价值。

1 sEMG 的信号来源

肌电信号主要来源于大脑皮层控制下的脊髓 α 运动神经元产生的生物电活动^[4-5]。当人体处于躯体活动状态时,由中枢神经控制下的脊髓神经产生动作电位并沿轴突传递,当传递至轴突末梢时,动作电位触发接头前膜 Ca^{2+} 通道,释放乙酰胆碱并激活终板膜中 N2 型乙酰胆碱受体阳离子通道,使运动终板处的离子通道发生变化,产生终板电位。当终板电位超过去极化阈值时,爆发动作电位并传导至整个肌细胞膜,最后

产生肌纤维动作电位,引起肌纤维收缩,产生肌肉力量^[6,13]。肌肉收缩产生的电信号经皮下组织传导,通过电信号采集设备检测到的微弱电位差,即肌电信号^[5]。其募集到的运动神经元越多,肌肉所产生的力量越大,肌电信号就越强烈。所采集到的肌电信号的强弱与活动时运动单位的数量、类型、放电频率、运动单位活动同步化的程度、运动单位募集方式等有关。此外,测量性等因素与肌电信号的强度也有密切的关系^[5,13]。

2 sEMG 的分析方法

2.1 时域分析 时域分析是以时间为自变量,用来描述 sEMG 的振幅特征。常被用来实时反应肌肉的活动状态^[7]。其分析指标主要包括积分肌电值(integrate electromyography, iEMG)、均方根值(root mean square, RMS)、平均振幅(average amplitude, MA)等^[8,46]。

2.2 频域分析 频域分析是将检测到的肌电信号进行快速傅立叶转换之后所获得的肌电信号的频谱或功率谱,常被用于反应肌肉活动时的疲劳程度^[11]。有学者提出频域分析相较于时域分析更加有意义。定量描述肌电信号的频谱和功率谱特征的指标主要有平均功率频率(mean power frequency, MPF)、中位频率(mean frequency, MF)。MPF 在反映肌肉活动状态方面比 MF 更加敏感^[12]。MPF 是波谱曲线重心的频率,其值的高低与运动方式和运动强度有关,当运动出现疲劳时,MPF 下降。

2.3 时频分析 时频分析对于肌肉疲劳度的判断以及肌肉生理变化的综合信息非常重要,此分析方法解决了时域分析和频域分析信号不稳定的问题^[8]。目前,用于表面肌电信号的时频分析方法中最常用的是小波分析^[16]。小波分析是傅立叶转换的一个新发展,可以聚焦到分析对象的任意细节,具有可变的时频分析窗口,能够同时提供关于时域和频域两方面的信息,并能够以一种有效、稳定的方式对肌电信号进行提取^[13]。

2.4 非线性分析 sEMG 的非线性分析在提取特征

基金项目:广东省医学科学技术研究基金项目(A2021035)

收稿日期:2022-10-09

作者单位:1. 佳木斯大学康复医学院,黑龙江 佳木斯 154007;2. 深圳市儿童医院康复科,深圳 518034

作者简介:刘方(1997-),女,硕士研究生,主要从事脑性瘫痪康复方面的研究。

通讯作者:俞国俊,103872187@qq.com

分析时具有一定的降噪功能,常用于盲源信号的处理和分析。利用非线性动力学的方法用于分析肌电信号和特征值的提取已经成为了新的研究趋势。主要参数包括:李雅普诺夫指数、熵、复杂度^[8]。李雅普诺夫指数是指系统在相空间中相邻轨道间收敛或发散的指数率。熵主要用于肌肉疲劳度的研究,并且在识别肌肉疲劳状态的研究中,熵被证实可用于疲劳分类。复杂度主要用于分析肌肉在动态收缩条件下的表面肌电信号。

3 sEMG 在脑瘫患儿中的应用

3.1 上肢功能评定 CP 大多数都伴有上肢功能障碍,并且上肢功能障碍的发病率在 57%~83%,最常见于痉挛型偏瘫患儿。由于上肢屈肌张力增高,导致一侧上肢功能受限,进一步出现双侧上肢活动不协调,日常生活能力下降等问题^[14]。因此量化患儿上肢的运动质量是康复治疗的基础,同时也有利于深入了解患儿的损伤机制和病情程度^[15]。有学者提出,在 CP 患者中,肘关节的伸展和腕关节肌肉与日常生活能力具有较高的相关性,腕关节的肌肉功能和手的活动对于上肢精细功能的发挥具有重要意义^[17-18]。因此,腕关节的活动和肌肉的功能水平是患儿上肢正常活动的关键^[20]。Rios 和 Xu 等^[17-18]利用 sEMG 研究了偏瘫患儿在最大等长收缩的情况下腕屈肌和腕伸肌的肌肉活动状态。研究表明,患儿在腕伸肌进行最大自主等长收缩(maximum isometric voluntary contraction, MVIC)状态下,患侧腕屈肌的 iEMG 和 RMS 均高于健侧,表现出较高的协同收缩,表示腕伸肌在 MVIC 状态下,腕屈肌存在较高的肌肉激活,进一步反映腕屈肌可能存在肌张力增高的问题^[34]。因此,促进腕伸肌收缩,抑制腕屈肌激活,对于增加患儿上肢的运动协调能力,关节稳定性都是非常重要的。此外,CP 是由于中枢神经调节机制受损导致的患儿运动功能障碍。Tong 等^[19]利用 sEMG 非线性分析多尺度熵(multi-scale entropy, MSE)量化分析了 CP 患儿上肢肌肉疲劳度的研究表明,当患儿肌肉出现疲劳时,MSE 曲线下降的幅度将会减小,可能是由于肌纤维传导的速度下降和运动单位同步化增加的结果。这可能有助于解释 CP 患儿肌肉易疲劳背后的神经病理学变化,同时还可以提供客观量化的证据,进一步提出针对性的解决方案。sEMG 通过对患儿上肢肌肉的激活模式、协同收缩、疲劳度的研究,可客观量化神经肌肉的功能异常,深入了解患儿上肢运动功能障碍的发生机制,在临床的应用方面具有很大潜力。同时,基于 sEMG 的评价结果,制定针对性的临床干预计划,对 CP 患儿精细

功能以及日常生活能力的提高具有关键性的意义。

3.2 步态分析 异常步态是 CP 常见的临床症状,主要有剪刀步态、偏瘫步态等,其主要原因是由于神经肌肉功能的异常导致部分肌肉出现肌张力增高、痉挛、肌力下降等问题,对患儿的生活质量和心理造成严重的影响^[21,48]。基于 sEMG 量化性的评估方式,能够对患儿肌肉在活动状态下的激活,运动单位的募集、协同收缩等作出客观评价^[44,50]。因此 sEMG 所提供的量化客观的评估结果,对于优化患儿治疗方案,提高双下肢运动功能具有重要意义。首先肌肉的正常激活才能够保证患儿稳定且有效的行走,如果肌肉激活的时间过长或过短将会降低患儿行走的灵活性,增加关节的负荷和能量消耗,降低步行效率^[22]。2019 年 Francesco 等^[23]对 16 名偏瘫患儿的研究结果显示,由于患儿步行时胫骨前肌激活减少,导致踝背屈不足,从而量化了偏瘫患儿步行时的不对称行为。2020 年 Francesco^[24]又进一步评估了偏瘫患儿双下肢 sEMG 的变异性,并首次使用变异性指数 CV(患儿行走过程中肌肉激活的可变性)计算了 CP 患儿胫骨前肌和腓肠肌肌肉在行走过程中的变异性,发现 CP 患儿较正常儿童变异指数增加。利用 sEMG 观察 CP 患儿在步行时下肢肌肉的激活程度可以发现,下肢肌肉激活程度的不同可能会影响患儿肌肉力量的产生,同时也可作为区别 CP 患儿与正常儿童的参考指标。因此,改善 CP 患儿主动肌和拮抗肌之间的肌肉激活,可能有助于肌群之间的力量协调,从而提高步行效率。此外,Wei 等^[25]利用 sEMG 对 10 名粗大功能分级 I~III 级的 CP 患儿进行了步态分析,提出平均绝对值和过零点值对 CP 患儿步态相位的识别具有较高的准确性,并根据患儿的步态相位提出了意图驱动的机器人对于患儿异常步态的改善可能具有积极意义。因此,sEMG 不仅可通过检测 CP 患儿肌肉激活情况评价其步态行为并为进一步诊断提供理论依据,同时还可对患儿步态异常的原因作出解释,从而提供针对改善此步态的康复方法。Yu 等^[26,44]通过对 CP 患儿进行的 sEMG 评估结合步态分析的研究结果也支持以上观点。以上研究表明依据 sEMG 信号,能够对 CP 患儿进行肌肉的评估、异常步态的分析、康复方案的制定提供参考依据。无论是对患儿异常步态的改善还是家长的配合度方面都有着较高的实用价值,但是目前关于 sEMG 在 CP 患儿中的应用,纳入研究的患儿大多是粗大运动功能分级 I~III 级的患儿,具备一定的行走能力,针对严重程度较高患儿的研究还很少。

3.3 吞咽功能评定 CP 患儿的吞咽障碍是由于大脑皮质和皮质下神经调控障碍引起的功能性吞咽障碍,

引起食物残留或者不能顺利送入胃内等问题。严重者将会出现营养不良、脱水、吸入性肺炎等并发症,危及患儿生命^[27-28]。2013年我国专家针对吞咽障碍人群制定了吞咽筛查评估流程,专家所提出的视频透视吞咽检查是评估吞咽困难的金标准。但是由于患儿年龄小,配合度差以及评估方式本身存在辐射、不能识别咽和喉的神经肌肉的异常等一系列问题,难以在临床上实施^[29-30]。近年来,sEMG以其可靠、简便、无创、无辐射等优势在CP患儿吞咽障碍的评估以及诊疗等领域得到了学者的认可^[31]。2003年Vaiman等^[32]首次确定了健康儿童在单次吞咽和不间断饮水期间肌肉活动度和振幅的正常肌电值。这为识别和筛查吞咽异常的患儿提供了一个参考标准。此后,2013年Tseng等^[33]针对CP吞咽障碍患儿的sEMG特征进行的研究表明,患儿在3ml和最大吞咽量时,颏下肌群和舌骨下肌群的表面肌电参数值均较对照组高,在3毫升吞咽容量下,最大振幅值是吞咽障碍患儿的最佳预测指标。2019年国内学者何金华也提出吞咽障碍患儿的颏下肌群和舌骨下肌群的iEMG均高于对照组,吞咽障碍的严重程度与iEMG呈正相关,可在一定程度上反映患儿的肌力与肌张力^[29]。因此,在临床评估中如果患儿颏下肌群和舌骨下肌群的振幅值和iEMG增高,提示患儿可能患有吞咽功能障碍^[35]。最后,通过观察患儿在饮水期间的sEMG可得出,sEMG的振幅值可作为辅助诊断CP患儿吞咽障碍的可靠参考指标。同时,通过iEMG量化患儿吞咽肌群肌力肌张力方面的价值还发现,iEMG对患儿吞咽功能障碍的CP患儿进行严重程度的分级具有较高的参考意义^[33,31,51]。虽然sEMG能够定性评估脑瘫患儿吞咽肌群功能的异常,同时还能定量分析患儿异常肌群在不同状态下的肌电信号变化,但是目前国内外关于sEMG在CP吞咽障碍中的研究还很少,需要进一步证实其方法在脑瘫患儿应用中的信度和效度。

3.4 康复疗效的评估 sEMG除了能够用于评估CP患儿的神经肌肉功能状态,解释运动障碍的生理病理学机制以及对疾病进行诊断及分类之外,还能够用于评价某一临床干预手段的有效性。目前用于缓解CP患儿肌肉痉挛,增加肌肉力量的治疗方式,已经趋于成熟。但是,针对治疗方式对患儿治疗效果的评价还未有客观量化的标准。例如:传统的运动疗法以及外科手术治疗等,大多利用量表和医生的主观经验进行评价^[49]。因此,迫切需要一种客观的评估方式用于量化患儿的治疗效果^[37]。如Li等^[36]采用sEMG对痉挛型脑瘫患儿在手术治疗前后进行了客观量化了评估,通过测定患儿在行走时的关节活动度和6块主要肌肉

的均方根值,结果显示经手术治疗后患儿肌肉痉挛和肌力不足等问题得到了明显改善。唐源敏等^[38]采用sEMG的RMS和iEMG量化了患儿经复合手术治疗后的肌肉的改善情况,表明患儿下肢肌张力得到了有效缓解,蹲伏步态和马蹄足内翻有了显著改善。国内学者陆祖韬等^[39]通过研究离心收缩和约束诱导训练降低患侧肌张力的效果,依据sEMG的RMS表明,患儿治疗后上肢屈肘肌群的痉挛状态也有了明显好转。以上研究表明,CP患儿的肌张力和肌力与RMS具有高度相关性,并呈正相关性^[40]。可得出,RMS能够作为评价治疗前后神经肌肉状态的可靠指标,以此为依据可对某种治疗方式的治疗效果进行量化^[41]。此外,Audrey等^[42]就部分CP患儿在短时间步行训练之后出现蹲伏步态恶化的现象进行研究,表明,患儿股直肌的MF下降,疲劳度显著增加,并首次提出膝关节屈曲角度的增加可能与股直肌疲劳度的增加有关,同时,臀部肌肉力量的增加有助于改善患儿的蹲伏步态^[43,47]。sEMG在康复疗效的评估方面,凸显了其独特优势,不仅能够量化某种治疗方式的疗效,同时还能够反映其治疗方式背后的作用机制,对治疗师进一步制定康复计划提供参考依据。未来还需要深入探讨表面肌电在定量评估康复疗效中的应用价值,推动临床的普及。

3.5 sEMG与其他评估方式 目前临床上用于评估CP患儿神经肌肉功能的工具除了sEMG,还有改良Ashworth痉挛评定量表、改良Tardieu量表等临床评估量表以及剪切波弹性成像(shear wave elastography,SWE)和磁共振成像(magnetic resonance imaging,MRI)等影像学方法也被广泛应用。首先,临床量表的评估方式一般不受病情、环境等的影响,同时具有操作简便、价格低廉等优势,在临床上具有较高的实用性,但是评估结果往往伴随评估医师的主观性经验,缺乏对患儿肌肉功能的客观性评价。其次,影像学的评估方式在一定程度上改善了传统量表的局限性,能够在很大程度上对患儿肌肉硬度、肌肉体积等肌肉参数作出客观量化的评价,进一步反映患儿的肌肉功能状态,但是研究发现,SWE存在超声探头位置的摆放以及二维超声图像的参数提取等方面的问题,还未得到解决。MRI也存在设备庞大、检查费用高、检查禁忌症较多等一系列问题,同时,临床量表和影像学检查在评估时都是在患儿静止或者被动状态下进行的,缺乏患儿在神经肌肉活动状态下的检测和评估,因此,限制了在临床上的使用。sEMG能够获取患儿在主动活动状态下肌肉激活和失活的时刻,评价主动肌和拮抗肌的协调性以及肌肉的疲劳状态,对CP患儿神经肌

肉功能作出更加全面精确的评估。但是,sEMG 的评估对环境要求较高,容易受到邻近肌肉的影响,还存在对深层和脂肪较厚区域的肌肉检测不准确等局限性。Gennisson 等^[52]将 sEMG 与 SWE 相结合,研究了肱二头肌的肌电信号与硬度之间的关系,结果显示健康受试者肱二头肌肌电信号的 RMS 与肌肉剪切模量之间存在线性关系。樊留博等^[53]将改良 Ashworth 痉挛评定量表、sEMG 和 SWE 等评估方式相结合共同评价了基于 Bobath 理念的强化膝关节控制训练在痉挛型偏瘫患者中的疗效。经 6 周干预后的评价结果显示,其方法能够显著改善患者的步行功能。基于以上研究发现,sEMG 与其他评估方式相结合,不仅能够解决各评估方法存在的问题,同时还能发挥各个评估方法的优势,在最大程度上对 CP 患儿的神经肌肉功能作出精准的评价。因此,在临床上,针对 CP 患儿神经肌肉的评价,采用多种评估方式相结合的方式,对于脑瘫患儿日后的康复将起着关键性的作用。

4 小结与展望

本文主要综述了 sEMG 在 CP 中的应用,探讨了 sEMG 在客观评估和诊断 CP 神经肌肉异常所引起运动功能障碍的可行性和可靠性。sEMG 通过量化患儿的肌肉功能水平,为进一步解释患儿神经肌肉的病理生理机制提供新思路,也为临床医生优化患儿的康复方案提供参考依据。虽然已经有大量研究证实了 sEMG 可作为辅助诊断 CP 的实用性工具。但是在评估过程中,患儿采取什么样的姿势以及确切的评估指标,还缺乏统一的参考标准。此外,sEMG 主要应用于具备一定认知能力且粗大运动功能分级 I-III 级的患儿,在临床或者实验纳入患儿的标准方面存在一定的局限性。因此,制定统一的评估参考指标增加在 CP 康复中的实用性是今后研究的重点方向。

【参考文献】

- [1] Gulati S, Sondhi V. Cerebral Palsy: An Overview[J]. Indian journal of pediatrics, 2017, 85(11) : 1006-1016.
- [2] Cappellini G, Sylos LF, Assenza C, et al. Clinical Relevance of State-of-the-Art Analysis of Surface Electromyography in Cerebral Palsy[J]. Frontiers in Neurology, 2020, 11 : 583296-583296.
- [3] 王健,金德闻. 康复医学领域的表面肌电应用研究[J]. 中国康复医学杂志, 2006, 21(1):6-7.
- [4] Mylena M, Thomas H, Oliver R. Mathematically modelling surface EMG signals[J]. PAMM, 2014, 14(1) : 123-124.
- [5] Zhao J, She JH, Wang DH, et al. Extreme Gradient Boosting for Surface Electromyography Classification on Time-Domain Features[J]. jacciii, 2022, 26(5) : 722-730.
- [6] Xie HG, Liu JN, He YC, et al. Surface electromyography study on a-symmetry in paravertebral muscle degeneration in patients with degenerative lumbar scoliosis[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1) : 18675-18675.
- [7] Kylie KH, Adam SH, Brent DJ, et al. Motor unit action potential amplitude during low torque fatiguing contractions versus high-torque non-fatiguing contractions; a multilevel analysis[J]. European Journal of Applied Physiology, 2021, 121(4) : 1-13.
- [8] Sun JQ, Liu GD, Sun YB et al. Application of Surface Electromyography in Exercise Fatigue: A Review[J]. Frontiers in Systems Neuroscience, 2022, 16 : 893275-893275.
- [9] Mohd MA, Abid AK, Mohd F. Effects of vibration therapy on neuromuscular efficiency & features of the EMG signal based on endurance test[J]. Journal of Bodywork & Movement Therapies, 2020, 24(4) : 325-335.
- [10] Cui CH, Xin EQ, Qu ML, et al. Fatigue and Abnormal State Detection by Using EMG Signal During Football Training [J]. International Journal of Distributed Systems and Technologies (IJ DST), 2021, 12(2) : 13-23.
- [11] Chandra S, Hayashibe M, Thondiyath A. Muscle Fatigue Induced Hand Tremor Clustering in Dynamic Laparoscopic Manipulation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 50(12) : 1-12.
- [12] Wang J, Yue L, Chen ZH, et al. Effect of Hospital-Family Rehabilitation Intervention on Walking Function and Lower Limb Surface Electromyography in Children with Cerebral Palsy[J]. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2022 : 7034670-7034670.
- [13] 李玉章. 表面肌电在体育中的应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2015:5-275.
- [14] Park H, Choi JY, Yi SH, et al. Relationship between the more-affected upper limb function and daily activity performance in children with cerebral palsy: a cross-sectional study[J]. BMC Pediatrics, 2021, 21(1):459-459.
- [15] Metzler MJ, OGrady K, Fay LD, et al. Feasibility of High Repetition Upper Extremity Rehabilitation for Children with Unilateral Cerebral Palsy. [J]. Physical & occupational therapy in pediatrics, 2021, 42(3):11-17.
- [16] Yu Y. Research on athlete skipping surface electromyography and energy consumption based on principal component analysis of wavelet packet[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 40(2) : 2217-2227.
- [17] Rios DC, Gilbertson T, McCoy SW, et al. NeuroGame Therapy to improve wrist control in children with cerebral palsy: a case series[J]. Developmental neurorehabilitation, 2013, 16(6) : 398-409.
- [18] Kaishou X, Jian NMi, Lu H, et al. Surface Electromyography of Wrist Flexors and Extensors in Children With Hemiplegic Cerebral Palsy[J]. PM&R, 2015, 7(3) : 270-275.
- [19] Tong H, Xu Z, Hong JM, et al. Fatiguing Effects on the Multi-Scale Entropy of Surface Electromyography in Children with Cerebral Palsy [J]. Entropy, 2016, 18(5) : 177.
- [20] Yanran L, Xu Z, Yanan G, et al. Motor Function Evaluation of Hemiplegic Upper-Extremities Using Data Fusion from Wearable Inertial and Surface EMG Sensors[J]. Sensors, 2017, 17(3) : 582-582.
- [21] Žarković D, Šorfova M, Tufano JJ, et al. Gait changes following robot-

- assisted gait training in children with cerebral palsy[J]. *Physiological research*, 2021, 70(3) : 397-408.
- [22] Gagnat Y, Brændvik SM, Roeleveld K. Surface Electromyography Normalization Affects the Interpretation of Muscle Activity and Coactivation in Children With Cerebral Palsy During Walking. [J]. *Frontiers in neurology*, 2020, 11 : 202.
- [23] Francesco DN, Annachiara S, Alessandro M, et al. EMG-Based Characterization of Walking Asymmetry in Children with Mild Hemiplegic Cerebral Palsy[J]. *Biosensors*, 2019, 9(3) : 82-82.
- [24] Francesco DN, Spinsante S, Pagliuca C, et al. Variability of Muscular Recruitment in Hemiplegic Walking Assessed by EMG Analysis[J]. *Electronics*, 2020, 9(10) : 1572-1572.
- [25] Wei PN, Xie RF, Tang R, et al. sEMG Based Gait Phase Recognition for Children with Spastic Cerebral Palsy. [J]. *Annals of biomedical engineering*, 2019, 47(1) : 223-230.
- [26] Yu L, Yan L, Chen MJ, et al. Cyclostationary Modeling of Surface Electromyography Signal During Gait Cycles and Its Application for Cerebral Palsy Diagnosis[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2018, 23(1) : 56-61.
- [27] 中华医学会儿科学分会康复学组. 儿童脑性瘫痪吞咽障碍的康复建议[J]. *中华儿科杂志*, 2022, 60(3) : 192-196.
- [28] Speyer R, Cordier R, Kim JH, et al. Prevalence of drooling, swallowing, and feeding problems in cerebral palsy across the lifespan: a systematic review and meta-analyses [J]. *Developmental medicine and child neurology*, 2019, 61(11) : 1249-1258.
- [29] 何金华, 张娟, 袁丽平, 等. 表面肌电图在儿童吞咽障碍疾病中的应用[J]. *中国当代儿科杂志*, 2019, 21(11) : 1089-1093.
- [30] Wang YC, Chou W, Lin BS, et al. The use of surface electromyography in dysphagia evaluation[J]. *Technology and Health Care*, 2017, 25(5) : 1025-1028.
- [31] Vandebrauene C, Dick C. The value of surface electromyography in the rehabilitation of oropharyngeal dysphagia[J]. *B-ENT*, 2020, 4(S-1P2) : 67-72.
- [32] Michael V, Samuel S, Ephraim E. Surface electromyographic studies of swallowing in normal children, age 4 - 12 years[J]. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 2003, 68(1) : 65-73.
- [33] Tseng FF. Surface electromyography for diagnosing dysphagia in patients with cerebral palsy[J]. *World Journal of Otorhinolaryngology*, 2013, 3(2) : 35-35.
- [34] 徐开寿, 何璐, 麦坚凝. 偏瘫型脑瘫患儿腕屈伸肌群最大等长收缩时的表面肌电特征研究[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2014, 36(8) : 617-620.
- [35] 王玉娟. 探讨表面肌电监测在评估脑瘫儿童口部运动训练康复治疗效果中的应用价值[J]. *中国实用医药*, 2020, 15(13) : 170-172.
- [36] Li SJ, Luo XQ, Zhang S, et al. Evaluation of Multilevel Surgeries in Children With Spastic Cerebral Palsy Based on Surface Electromyography[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2021, 15 : 680645-680645.
- [37] Arya B K, Mohapatra J, Subramanya K, et al. Surface EMG analysis and changes in gait following electrical stimulation of quadriceps femoris and tibialis anterior in children with spastic cerebral palsy[J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2012, 2012 : 5726-9.
- [38] 唐源敏, 罗雪芹, 孙继名, 等. 痉挛型脑瘫儿童手术后表面肌电信号和关节角度评估[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(4) : 726-732.
- [39] 陆祖韬, 倪钰飞, 顾秋燕, 等. 离心收缩训练联合强制诱导运动疗法对痉挛型偏瘫儿童上肢功能及表面肌电特征的影响[J]. *中国儿童保健杂志*, 2022, 30(7) : 801-805.
- [40] Bonikowski M, Mrozek P. Changes in surface EMG patterns in children with cerebral palsy during robotic gait training[J]. *Gait & Posture*, 2012, 36 : 70-70.
- [41] Buddhdev P, Fry NR, LePage R, et al. Abnormality of standing posture improves in patients with bilateral spastic cerebral palsy following lower limb surgery[J]. *Gait & Posture*, 2017, 54 : 255-258.
- [42] Audrey P, Annie PL, Fabien DM, et al. Muscle fatigue during a short walking exercise in children with cerebral palsy who walk in a crouch gait[J]. *Gait & Posture*, 2019, 72 : 22-27.
- [43] Colm D, Emer L, Marie J, et al. Determining the most effective exercise for gluteal muscle activation in children with cerebral palsy using surface electromyography[J]. *Gait & Posture*, 2019, 70 : 270-274.
- [44] 黄桂兰, 许意, 任彩丽, 等. 表面肌电结合等速测试仪评价功能性电刺激对脑卒中患者下肢痉挛及其功能影响的临床研究[J]. *中国康复*, 2022, 37(1) : 17-20.
- [45] Giannasi L, Matsui M, Politti F, et al. Surface electromyographic of masseter muscles in patients with cerebral palsy: A pilot study[J]. *Gait & Posture*, 2017, 57 : 297-297.
- [46] Medved V, Medved S, Kova? I. Critical Appraisal of Surface Electromyography (sEMG) as a Taught Subject and Clinical Tool in Medicine and Kinesiology [J]. *Frontiers in neurology*, 2020, 11 : 560363-560363.
- [47] Vinti M, Saikia MJ, Donoghue J, et al. A modified surface EMG biomarker for gait assessment in spastic cerebral palsy[J]. *Human Movement Science*, 2021, 80 : 102875-102875.
- [48] Richard TL, Carrie S, Patricia AS, et al. Assessment of wavelet analysis of gait in children with typical development and cerebral palsy[J]. *Journal of Biomechanics*, 2005, 38(6) : 1351-1357.
- [49] 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.
- [50] Chen X, Wu Q, Tang L, et al. Quantitative assessment of lower limbs gross motor function in children with cerebral palsy based on surface EMG and inertial sensors[J]. *Medical & biological engineering & computing*, 2020, 58(1) : 101-116.
- [51] 顾怡雯, 舒锦. 表面肌电生物反馈与神经肌肉电刺激对脑卒中吞咽障碍疗效及生活质量的影响[J]. *中国康复*, 2021, 36(10) : 599-603.
- [52] Gennisson JL. Human muscle hardness assessment during incremental isometric contraction using transient elastography[J]. *Journal of Biomechanics*, 2005, 38(7) : 1543-1550.
- [53] 樊留博, 江毅卿, 刘宝华, 等. 基于 Bobath 理念的强化膝关节控制训练在痉挛性偏瘫患者康复中的应用[J]. *温州医科大学学报*, 2017, 47(1) : 23-28.