

# 体外冲击波联合肌电生物反馈对痉挛型脑瘫患儿下肢运动能力的影响

李雪明<sup>1</sup> 刘孟<sup>2</sup> 王奎<sup>1</sup> 汤艳<sup>1</sup> 周云<sup>1</sup>

<sup>1</sup>安徽医科大学第二附属医院康复运动医学科,合肥 230601; <sup>2</sup>中国科技大学附属第一医院康复医学科,合肥 230001

通信作者:周云,Email:zhoukeg@163.com

**【摘要】目的** 探讨体外冲击波(ESWT)联合肌电生物反馈对痉挛型脑瘫患儿下肢运动能力的影响。**方法** 选取 2~7 岁痉挛型脑瘫患儿 50 例,按照随机数字表法将其分为对照组和实验组,每组 25 例。两组患儿均接受肌电生物反馈和常规康复治疗,实验组在此基础上给予低能量 ESWT 治疗。治疗前及治疗 8 周后(治疗后),采用肌电设备采集两组患儿胫骨前肌的积分肌电值(iEMG)和均方根值(RMS),利用改良 Ashworth 量表(MAS)、改良 Tardieu 量表评定法(MTS)、粗大运动功能评定量表(GMFM-88)D 区与 E 区分别评定两组患儿的下肢痉挛程度及运动能力。**结果** 治疗前,两组患儿胫骨前肌表面肌电 iEMG 和 RMS, MAS、MTS、GMFM-88 结果比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ )。治疗后,两组患儿胫骨前肌表面肌电 iEMG 和 RMS, MAS、MTS 中 R1、MTS 中 R2 与 R1 的差值、GMFM-88 D 区和 E 区结果均较组内治疗前改善( $P<0.05$ )。实验组治疗后胫骨前肌表面肌电 iEMG [ $(67.04\pm 12.84)\mu\text{V}\cdot\text{s}$ ] 和 RMS [ $(69.32\pm 12.84)\mu\text{V}$ ], MAS [(1.98±0.60)分]、MTS 中 R1 [(19.28±5.62)°]、MTS 中 R2 与 R1 的差值 [(7.16±5.11)°]、GMFM-88 D 区 [(30.65±5.05)分] 和 E 区 [(56.81±7.36)分] 结果均较对照组改善优异( $P<0.05$ )。**结论** ESWT 联合肌电生物反馈能较好地改善痉挛型脑瘫患儿的下肢痉挛程度及运动功能。

**【关键词】** 体外冲击波治疗; 肌电生物反馈; 痉挛型脑瘫; 下肢运动功能

**基金项目:**安徽医科大学第二附属医院(2021 年度)临床研究培育计划(2021LCYB06)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.10.011

## Combining electromyographic biofeedback with extracorporeal shockwave therapy can better relieve lower limb spasticity and improve the motor functioning of children with spastic cerebral palsy

Li Xueming<sup>1</sup>, Liu Meng<sup>2</sup>, Wang Kui<sup>1</sup>, Tang Yan<sup>1</sup>, Zhou Yun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Rehabilitation Medicine, The Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230601, China; <sup>2</sup>Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital of USTC, Anhui Provincial Hospital, Hefei 230001, China

Corresponding author: Zhou Yun, Email: zhoukeg@163.com

**【Abstract】 Objective** To explore the effect of combining extracorporeal shockwave therapy (ESWT) with electromyographic biofeedback on the motor functioning of children with spastic cerebral palsy. **Methods** Fifty children with spastic cerebral palsy (2-7 years old) were randomized into a control group and an experimental group, each of 25. Both groups received routine rehabilitation and electric stimulation therapy with electromyographic biofeedback, while the experimental group was additionally provided with ESWT. Before and after 8 weeks of treatment, integral electromyograms were recorded and the root mean square values of the electromyogram recorded from the tibialis anterior muscle were computed. Lower limb spasticity and motor ability were evaluated by using the Modified Ashworth Scale (MAS), the Modified Tardieu Scale (MTS), and the D and E regions of the Gross Motor Function Measurement Scale (GMFM-88). **Results** After the treatment the results of both groups had improved significantly in terms of the surface electromyography of the tibialis anterior muscle, MAS scores, R1 in the MTS and the difference between R2 and R1, and the GMFM-88 regional scores. All of the improvements were significantly greater in the experimental group than in the control group, on average. **Conclusions** Combining ESWT with EMG biofeedback can better relieve lower limb spasticity and improve the motor functioning of children with spastic cerebral palsy.

**【Key words】** Extracorporeal shockwave therapy; Electromyographic biofeedback; Spastic cerebral palsy;

## Lower limb motor function

**Funding:** The Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University's 2021 Clinical Research Incubation Program (project 2021LCYB06)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.10.011

痉挛型脑性瘫痪是在胎儿或婴幼儿时期,因非进行性锥体系受损所致的运动障碍,主要表现为持续存在的牵张反射亢进和姿势异常,常分为痉挛型四肢瘫、痉挛型双瘫和痉挛型偏瘫<sup>[1]</sup>。患儿因上运动神经元损伤出现下肢肌群肌张力升高,导致下肢肌肉萎缩、纤维化、肌腹缩短<sup>[2]</sup>,而较短的肌腹可导致肌力不足<sup>[3]</sup>。为了增加纤维长度,肌肉纤维必须接受足够的拉伸刺激。但传统手法牵伸对脑瘫患儿步态、步速和粗大运动功能等的改善作用有限<sup>[4]</sup>,这可能与牵伸时的承力点主要在肌腱有关。而其它的干预方式,如选择性脊神经后根切断术、肉毒毒素注射<sup>[5]</sup>或药物治疗,通常具有侵入性、缺乏持久性或特异性等缺点。

体外冲击波(extracorporeal shock wave therapy, ESWT)作为一种无创治疗,是上运动神经元损伤后痉挛的有效治疗方法,安全性较好,可改善高张力肌肉的延展性<sup>[6]</sup>。ESWT可直接作用于痉挛或短缩的肌腹,其长期效果优于肉毒毒素注射<sup>[5]</sup>,其对脑瘫患儿运动能力影响的报道较少。肌电生物反馈作为一种具有视听反馈作用的神经肌肉电刺激,已被证实可用于改善痉挛<sup>[7]</sup>,但对下肢肌力的作用尚缺乏更多证据。本研究采用 ESWT 联合肌电生物反馈治疗痉挛型脑瘫患儿,观察其对患儿下肢运动功能的影响,旨在为痉挛型脑瘫患儿的康复治疗提供参考。

## 对象与方法

### 一、研究对象

纳入标准:①符合痉挛型脑性瘫痪(包括痉挛型四肢瘫、痉挛型双瘫、痉挛型偏瘫)的诊断标准<sup>[1]</sup>;②粗大运动功能分级(gross motor function classification system, GMFCS) I~III 级,且行走时有尖足步态;③患儿能配合治疗;④患儿视力及听力正常;⑤经改良 Ashworth 量表(modified Ashworth scale, MAS) 评定,患儿小腿三头肌(一侧或双侧)肌张力 $\geq$ I+级;⑥患儿家长签署治疗知情同意书。

排除标准:①半年内曾进行跟腱延长术、选择性脊神经后根切断术或下肢肌群肉毒毒素注射者;②合并有其它神经肌肉疾病者,如遗传代谢性疾病、癫痫等;③既往有出血性疾病,如凝血功能不全等;④下肢存在浅感觉功能障碍者;⑤小腿后侧皮肤出现破溃、感染且未愈者;⑥下肢有血栓性疾病者。

选取 2020 年 6 月至 2022 年 11 月由安徽医科大学第二附属医院收治住院的痉挛型脑瘫患儿 50 例,按照随机数字表法将其分为对照组和实验组,每组 25 例。两组患儿的性别、平均年龄、GMFCS 分级、小腿三头肌 MAS 分级比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),具有可比性,详见表 1。本研究已获得安徽医科大学第二附属医院医学研究伦理委员会批准(YX2022-164)。

### 二、治疗方法

两组患儿均进行常规康复训练和肌电生物反馈治疗。常规康复训练包括核心肌群稳定训练、坐站转移训练、站立平衡训练、关节活动度训练等,每日 1 次,每次 40 min,每周 5 d,共 8 周。肌电生物反馈采用加拿大产 SA9800 型肌电生物反馈训练仪进行,患儿取坐位,使用酒精棉球对局部皮肤进行脱脂处理,将电极放置于胫骨前肌肌腹处,保持电极和参考电极中心距离为 20 mm,充分固定后对患儿进行详细指导,在开始治疗后进行主动踝背屈活动,使屏幕上的信号幅度达到最大并保持 8 s,10 个主动收缩后休息 1 min,共治疗 20 min,每周治疗 5 次,共 8 周。

实验组在上述基础上增加小腿三头肌 ESWT 治疗。痉挛型偏瘫患儿仅治疗单侧,痉挛型双瘫及四肢瘫患儿若双侧小腿三头肌 MAS 均 $\geq$ I+级,则进行双侧治疗。使用瑞士产 Swiss Dolor Clast 发散式体外冲击波治疗仪,帮助患儿俯卧于治疗床上,膝关节伸直,足置于床缘以外;匀速背屈踝关节出现抵抗时,记录此时的角度;随后在小腿后侧涂抹耦合剂,调整初始治疗剂量为 0.5 bar,治疗频率 6 Hz,将探头沿着小腿三头肌肌腹方向移动冲击 2000 次,观察踝关节背屈角度,

表 1 两组患儿的一般资料

组别	例数	性别(例)		平均年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$ )	GMFCS 分级(例)			小腿三头肌 MAS 分级(例)		
		男	女		I	II	III	I+	II	III
对照组	25	18	7	4.27 $\pm$ 2.18	5	14	6	7	10	8
实验组	25	19	6	4.14 $\pm$ 2.00	7	15	3	8	12	5

注:若患儿双侧小腿三头肌 MAS 分级不一致,以较严重一侧下肢为研究对象

若患儿可耐受且角度改善 $>5^\circ$ ,则记为首次治疗。若未达到上述标准,则下次治疗时强度增加 0.5 bar(最高至 2.0 bar),重复上述观察,至患儿可耐受且踝背屈改善 $>5^\circ$ 。每周治疗 3 次,隔日治疗 1 次,连续 8 周。

### 三、评定方法

治疗前及治疗 8 周后(治疗后),采集两组患儿胫骨前肌的积分肌电值(integrated electromyography, iEMG)和均方根值(root mean square, RMS),利用 MAS、改良 Tardieu 量表评定法(modified Tardieu scale, MTS)、粗大运动功能评定量表(gross motor function measure-88, GMFM-88)D 区与 E 区分别评定两组患儿的下肢痉挛程度及运动能力。所有评估均在不明确分组的情况下由同一位经验丰富的医师进行。

1. 胫骨前肌表面肌电:采用美国产 Trigno 型表面肌电设备,含无线表面肌电系统、外置传感器,采样频率 2 kHz,共模抑制比 $>80$  dB,模拟/数字转换 16 位,测试时间 5 s,分析软件使用带通滤波,可用通道数 8 个。收集患儿胫骨前肌在最大等长收缩时的 iEMG 和 RMS。检测 3 次,取平均值。

2. MAS:采用 MAS 进行小腿三头肌痉挛程度的评定,该评分分为 0、I、I+、II、III、IV 共 6 个等级,对应赋值为 0、1、1.5、2、3、4 分,评分越高,表示痉挛程度越严重<sup>[8]</sup>。

3. MTS:采用 MTS 对患儿的踝关节背屈角度进行评定。帮助患儿仰卧并伸直膝关节,嘱患儿放松,此状态下为踝关节初始位置,此时快速背屈踝关节,感受到卡顿时停止,测量此时的踝关节背屈角度,即 R1;随后再次以相对较慢的速度背屈踝关节,到关节活动受限处停止,测量踝关节背屈角度,即 R2;计算 R1 与 R2 的差值<sup>[8]</sup>。

4. GMFM-88:采用 GMFM-88 D 区(站立位)与 E 区(行走与跑跳)对患儿的运动能力进行评定,每项均采用 0、1、2、3 共 4 级评分,其中 D 区总分为 39 分(13 项),E 区总分为 72 分(24 项)。D 区、E 区分数越高,

表示下肢运动功能越好<sup>[9]</sup>。

### 四、统计学方法

采用 SPSS 26.0 版统计学软件进行数据处理,计量资料以均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x}\pm s$ )形式表示。计数资料比较采用卡方检验,组内计量资料比较采用配对  $t$  检验,两组间比较采用两独立样本  $t$  检验。 $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

## 结 果

### 一、两组患儿治疗前后胫骨前肌表面肌电 iEMG 和 RMS 比较

治疗前,两组患儿胫骨前肌表面肌电 iEMG 和 RMS 比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ )。治疗后,两组患儿胫骨前肌表面肌电 iEMG 和 RMS 均较组内治疗前改善( $P<0.05$ ),且实验组治疗后胫骨前肌表面肌电 iEMG 和 RMS 改善较对照组优异,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。详见表 2。

表 2 两组患儿治疗前后胫骨前肌表面肌电 iEMG 和 RMS 比较

组别	例数	iEMG ( $\mu V \cdot s, \bar{x}\pm s$ )	RMS ( $\mu V, \bar{x}\pm s$ )
对照组			
治疗前	25	38.20 $\pm$ 5.85	52.72 $\pm$ 10.25
治疗后	25	56.24 $\pm$ 10.81 <sup>a</sup>	61.32 $\pm$ 12.24 <sup>a</sup>
实验组			
治疗前	25	37.68 $\pm$ 7.16	51.40 $\pm$ 9.06
治疗后	25	67.04 $\pm$ 12.84 <sup>ab</sup>	69.32 $\pm$ 12.84 <sup>ab</sup>

注:与组内治疗前比较,<sup>a</sup> $P<0.05$ ;与对照组治疗后比较,<sup>b</sup> $P<0.05$

### 二、两组患儿治疗前后 MAS、MTS、GMFM-88 结果比较

治疗前,两组患儿 MAS、MTS、GMFM-88 结果比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ )。治疗后,两组患儿 MAS、MTS 中 R1、MTS 中 R2 与 R1 的差值、GMFM-88 D 区和 E 区结果均较组内治疗前改善( $P<0.05$ ),且实验组治疗后上述指标改善较对照组优异,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。详见表 3。

表 3 两组患儿治疗前后 MAS、MTS、GMFM-88 结果比较( $\bar{x}\pm s$ )

组别	例数	MAS(分)	MTS( $^\circ$ )			GMFM-88(分)	
			R1	R2	R2 与 R1 的差值	D 区	E 区
对照组							
治疗前	25	2.88 $\pm$ 0.77	12.64 $\pm$ 3.47	25.76 $\pm$ 7.05	13.12 $\pm$ 4.91	21.58 $\pm$ 4.47	46.95 $\pm$ 5.52
治疗后	25	2.34 $\pm$ 0.64 <sup>a</sup>	16.84 $\pm$ 3.61 <sup>a</sup>	26.96 $\pm$ 5.84	10.12 $\pm$ 4.72 <sup>a</sup>	26.78 $\pm$ 4.96 <sup>a</sup>	52.64 $\pm$ 6.75 <sup>a</sup>
实验组							
治疗前	25	2.82 $\pm$ 0.72	12.96 $\pm$ 4.69	24.32 $\pm$ 8.60	11.36 $\pm$ 5.15	23.21 $\pm$ 4.83	47.60 $\pm$ 5.78
治疗后	25	1.98 $\pm$ 0.60 <sup>ab</sup>	19.28 $\pm$ 5.62 <sup>ab</sup>	26.44 $\pm$ 6.25	7.16 $\pm$ 5.11 <sup>ab</sup>	30.65 $\pm$ 5.05 <sup>ab</sup>	56.81 $\pm$ 7.36 <sup>ab</sup>

注:与组内治疗前比较,<sup>a</sup> $P<0.05$ ;与对照组治疗后比较,<sup>b</sup> $P<0.05$

## 讨 论

本研究结果表明,ESWT 联合肌电生物反馈治疗后,实验组患儿的下肢痉挛情况改善,运动能力有所提高。

脑性瘫痪是儿童期获得性躯体残疾的常见原因之一,其中痉挛型脑性瘫痪因牵张反射亢进更易出现肌肉和骨骼障碍。有研究表明,痉挛型脑瘫患儿的骨骼肌纤维生长速度落后于正常儿童<sup>[10]</sup>,具体指标包括肌肉的宽度、厚度、体积<sup>[11]</sup>,最终会导致患儿成年后肌肉体积变小、纤维长度变短、力量变弱,运动耐量降低,更易疲劳<sup>[12-13]</sup>。在已有的治疗手段中,局部肉毒毒素注射和选择性脊神经后根切断术常被用于减轻肌张力,但有研究发现肉毒毒素会导致肌肉萎缩和纤维化,其不利影响可能已超过痉挛的短期治疗效果<sup>[14-15]</sup>。选择性脊神经后根切断术作为有创操作,不可逆地切断了传入神经。ESWT 作为一种安全有效的改善痉挛的手段,其长效性已得到了较多验证<sup>[5,16-17]</sup>。

肌电生物反馈可将目标肌肉自主收缩时产生的电信号转变为可视化信号,属于主动增强型反馈。患儿可以通过听觉或视觉了解肌肉的目前状态,达到主动收缩的结果,整个治疗过程更趋近于游戏<sup>[7]</sup>。iEMG 代表了在一定时间内肌肉参与活动时运动单位的放电总量,数值越高,说明肌肉活动能力越好,而 RMS 代表了肌电信号振幅的变化,其值越大,说明肌力越强。既往的研究发现,肌电生物反馈联合常规康复治疗可以更有效地激活胫骨前肌<sup>[18]</sup>。本研究发现,实验组的胫骨前肌表面肌电 iEMG 和 RMS 值改善更明显,这可能与拮抗肌-小腿三头肌的痉挛程度降低有关。在日常行走过程中,当拮抗肌阻力降低后,作为踝背屈的主要肌肉,胫骨前肌更易活动。

痉挛型脑瘫患儿通常会行走困难,其原因多认为是小腿三头肌的速度依赖性牵张反射亢进,导致站立早期相小腿三头肌被激活,而这种激活限制了小腿肌肉的延展和踝关节背屈,导致前进的推进力降低<sup>[19]</sup>。这种异常的肌肉激活使能量消耗增加、行走速度降低。踝关节的过度抵抗存在神经和非神经因素,一般认为,MTS 评估中缓慢牵伸踝关节时,R2 角度代表非神经因素,快速牵伸时的 R1 角度代表神经因素,R2 与 R1 的差值代表动态痉挛程度<sup>[20]</sup>。本研究发现,对照组患儿小腿三头肌 MAS 评分及踝关节 MTS 的 R1 角度均得到了改善,踝关节 MTS R2 与 R1 的差值明显减小,说明治疗后导致痉挛的神经因素得到了控制,且患儿运动时的动态痉挛程度降低,这可能与常规康复治疗及肌电生物反馈治疗后,患儿的踝背屈肌力增加有关。而踝背屈肌肌力增加可反射性地抑制小腿三头

肌的兴奋性,并改善尖足步态<sup>[21]</sup>。实验组联合 ESWT 治疗后,上述指标出现了更明显的改善,说明 ESWT 可进一步抑制小腿三头肌的异常激活、降低痉挛程度,其原理可能是 ESWT 增加了一氧化氮(一种促进肌肉松弛的神经递质)的产生、减少了神经肌肉接头中乙酰胆碱受体的数量,刺激了肌肉纺锤体,从而恢复肌肉延展性<sup>[22]</sup>。而治疗后实验组 R2 角度未见有统计学意义的改变,提示患儿小腿三头肌仍然存在不同程度的挛缩,说明常规康复治疗、肌电生物反馈治疗以及 ESWT 对挛缩的影响较小,但此结果并不排除是由本研究观察时间较短所致。

除肌张力及肌电信号等静态指标外,本研究还对脑瘫患儿的下肢运动能力进行了比较。在脑瘫患儿行走过程中,减轻踝跖屈肌-小腿三头肌的过早激活对步态维持至关重要<sup>[22]</sup>。痉挛型脑瘫患儿除小腿三头肌肌张力增高外,因胫骨前肌无力导致行走过程中的踝背屈肌无力,亦会出现行走步态异常。有研究表明,步态模式异常可能伴有姿势控制不稳定,其中髌、踝关节的活动异常会导致行走时的平衡能力降低<sup>[23]</sup>。Kimoto 等<sup>[24]</sup>研究发现,行走效率较低儿童的下肢肌肉力量与行走效率之间存在明显的线性关系。本研究中,对照组的 GMFM-88 D 区及 E 区评分较组内治疗前升高,分析认为与肌电生物反馈治疗抑制了小腿后肌群的异常激活模式<sup>[25]</sup>、提高了胫骨前肌的肌力<sup>[18]</sup>有关。有研究表明,脑瘫患儿踝关节的控制能力在行走过程中具有重要意义<sup>[26]</sup>。这与本研究结果相符,在降低小腿三头肌痉挛程度、改善踝关节活动度、提高胫骨前肌肌力后,实验组患儿的运动能力得到了较大幅度的改善。

综上所述,对痉挛型脑瘫患儿实施 ESWT 结合肌电生物反馈的治疗方式,可帮助患儿更好地降低痉挛程度、改善肌肉功能,从而提高患儿的运动能力。本研究存在一定的不足之处,如研究中未对相应肌肉进行活检,未能从细胞和分子水平对 ESWT、肌电生物反馈的治疗机制进行研究,今后将针对上述不足进行更深入的探讨。

## 参 考 文 献

- [1] 中国康复医学会儿童康复专业委员会,中国残疾人康复协会小儿脑性瘫痪康复专业委员会,中国医师协会康复医师分会儿童康复专业委员会,等.中国脑性瘫痪康复指南(2022)第一章:概论[J].中华实用儿科临床杂志,2022,37(12):887-892. DOI:10.3760/ema.j.cn101070-20220505-00500.
- [2] Lee DY. Differences of the ankle plantar flexor length in typically developing children and children with spastic hemiplegic cerebral palsy [J]. J Exerc Rehabil, 2019, 15(3): 445-448. DOI: 10.12965/jer.1938216.108.
- [3] Mathewson MA, Ward SR, Chambers HG, et al. High resolution muscle measurements provide insights into equinus contractures in pa-

- tients with cerebral palsy [J]. *J Orthop Res*, 2015, 33 ( 1 ) : 33-39. DOI:10.1002/jor.22728.
- [ 4 ] Kruse A, Habersack A, Weide G, et al. Eight weeks of proprioceptive neuromuscular facilitation stretching and static stretching do not affect muscle-tendon properties, muscle strength, and joint function in children with spastic cerebral palsy [ J ]. *Clin Biomech*, 2023, 107: 106011. DOI:10.1016/j.clinbiomech.2023.106011.
- [ 5 ] Hsu PC, Chang KV, Chiu YH, et al. Comparative effectiveness of botulinum toxin injections and extracorporeal shockwave therapy for post-stroke spasticity: a systematic review and network meta-analysis [ J ]. *EClinicalMedicine*, 2022, 43: 101222. DOI: 10.1016/j.eclinm.2021.101222.
- [ 6 ] 中国研究型医院学会冲击波医学专业委员会.中国骨肌疾病体外冲击波疗法指南(2019年版)[J].中国医学前沿杂志(电子版), 2019, 11(4): 1-10. DOI:10.12037/YXQY.2019.04-01.
- [ 7 ] 马利中,樊留博,朱靖,等.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. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2009.02.010.
- [ 8 ] 严晓华,何璐,郑韵,等.改良 Ashworth 量表与改良 Tardieu 量表在痉挛型脑瘫患儿评定中的信度研究[J].中国康复医学杂志, 2015, 30(1): 18-21. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2015.01.005.
- [ 9 ] 王以文,陈功勋,朱登纳,等.基于共识选择健康测量工具对粗大运动功能评估 88 项和 66 项测量学属性的系统评价[J].中国循证儿科杂志, 2022, 17 ( 5 ) : 336-342. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5501.2022.05.003.
- [ 10 ] Willerslev-Olsen M, Lund MC, Lorentzen J, et al. Impaired muscle growth precedes development of increased stiffness of the triceps surae musculotendinous unit in children with cerebral palsy [ J ]. *Dev Med Child Neurol*, 2018, 60(7): 672-679. DOI:10.1111/dmcn.13729.
- [ 11 ] Hanssen B, Peeters N, Vandekerckhove I, et al. The contribution of decreased muscle size to muscle weakness in children with spastic cerebral palsy [ J ]. *Front Neurol*, 2021, 12: 692582. DOI:10.3389/fneur.2021.692582.
- [ 12 ] Jacobson DN, Löwing K, Tedroff K. Health-related quality of life, pain, and fatigue in young adults with cerebral palsy [ J ]. *Dev Med Child Neurol*, 2020, 62(3): 372-378. DOI:10.1111/dmcn.14413.
- [ 13 ] McPhee PG, Brunton LK, Timmons BW, et al. Fatigue and its relationship with physical activity, age, and body composition in adults with cerebral palsy [ J ]. *Dev Med Child Neurol*, 2017, 59(4): 367-373. DOI:10.1111/dmcn.13306.
- [ 14 ] Multani I, Manji J, Hastings-Ison T, et al. Botulinum toxin in the management of children with cerebral palsy [ J ]. *Paediatr Drugs*, 2019, 21(4): 261-281. DOI:10.1007/s40272-019-00344-8.
- [ 15 ] De Beukelaer N, Weide G, Huyghe E, et al. Reduced cross-sectional muscle growth six months after botulinum toxin type-A injection in children with spastic cerebral palsy [ J ]. *Toxins*, 2022, 14(2): 139. DOI:10.3390/toxins14020139.
- [ 16 ] Zhang HL, Jin RJ, Guan L, et al. Extracorporeal shock wave therapy on spasticity after upper motor neuron injury: a systematic review and meta-analysis [ J ]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2022, 101(7): 615-623. DOI:10.1097/PHM.0000000000001977.
- [ 17 ] Vidal X, Martí-Fàbregas J, Canet O, et al. Efficacy of radial extracorporeal shock wave therapy compared with botulinum toxin type A injection in treatment of lower extremity spasticity in subjects with cerebral palsy: a randomized, controlled, cross-over study [ J ]. *J Rehabil Med*, 2020, 52(6): jrm00076. DOI:10.2340/16501977-2703.
- [ 18 ] 黄晓艳,庞冰,吴怡瑾,等.康复训练结合电子生物反馈理疗治疗早产儿痉挛型脑性瘫痪的临床效果分析[J].中国实用医药, 2021, 16(24): 204-206. DOI: 10.14163/j.cnki.11-5547/r.2021.24.073.
- [ 19 ] Van der Krogt MM, Doorenbosch CA, Becher JG, et al. Dynamic spasticity of plantar flexor muscles in cerebral palsy gait [ J ]. *J Rehabil Med*, 2010, 42(7): 656-663. DOI:10.2340/16501977-0579.
- [ 20 ] Patrick E, Ada L. The Tardieu scale differentiates contracture from spasticity whereas the Ashworth scale is confounded by it [ J ]. *Clin Rehabil*, 2006, 20(2): 173-182. DOI:10.1191/0269215506cr9220a.
- [ 21 ] Fox AS, Carty CP, Modenese L, et al. Simulating the effect of muscle weakness and contracture on neuromuscular control of normal gait in children [ J ]. *Gait Posture*, 2018, 61: 169-175. DOI:10.1016/j.gaitpost.2018.01.010.
- [ 22 ] Yang E, Lew HL, Özçakar L, et al. Recent advances in the treatment of spasticity: extracorporeal shock wave therapy [ J ]. *J Clin Med*, 2021, 10(20): 4723. DOI:10.3390/jcm10204723.
- [ 23 ] Chakraborty S, Nandy A, Kesar TM. Gait deficits and dynamic stability in children and adolescents with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis [ J ]. *Clin Biomech*, 2020, 71: 11-23. DOI:10.1016/j.clinbiomech.2019.09.005.
- [ 24 ] Kimoto M, Okada K, Sakamoto H, et al. Relationship between walking efficiency and muscular strength of the lower limbs in children with cerebral palsy [ J ]. *J Phys Ther Sci*, 2019, 31(3): 232-235. DOI:10.1589/jpts.31.232.
- [ 25 ] Flux E, Bar-On L, Buizer AI, et al. Electromyographic biofeedback-driven gaming to alter calf muscle activation during gait in children with spastic cerebral palsy [ J ]. *Gait Posture*, 2023, 102: 10-17. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2023.02.012.
- [ 26 ] Lorentzen J, Willerslev-Olsen M, Larsen HH, et al. Maturation of feedforward toe walking motor program is impaired in children with cerebral palsy [ J ]. *Brain*, 2019, 142 ( 3 ) : 526-541. DOI: 10.1093/brain/awz002.

(修回日期:2023-09-02)

(本文编辑:凌琛)