

步态分析对于痉挛型脑性瘫痪下肢矫形领域最新进展

毛佳蓓, 陆洋阳, 金晟, 沈敏, 徐纯鑫, 陈岑, 翟歆昶, 刘静

作者单位:200092 上海,上海交通大学医学院附属新华医院小儿泌尿外科(毛佳蓓);200127 上海,同济大学附属养志康复医院(上海市阳光康复中心)(陆洋阳,沈敏,徐纯鑫,陈岑);200127 上海,上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心骨科(金晟);201203 上海,上海中医药大学康复医学院(翟歆昶,刘静)
作者简介:毛佳蓓(1990—),女,护师。研究方向:儿童护理
通讯作者:陆洋阳,E-mail:young9165@126.com

【摘要】 步态分析可分为三维步态分析和观察性步态评估,对于脑性瘫痪下肢矫形手术的选择有着指导意义。文章主要综述了观察性步态评估的信度和效度,以及近年来步态分析在各种不同步态模式的痉挛型脑性瘫痪患儿下肢畸形处理的最新研究。
【关键词】 步态分析; 下肢矫形; 研究进展
doi:10.3969/j.issn.1674-3865.2023.01.007
【中图分类号】 R742.3 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1674-3865(2023)01-0029-05

Recent progress of gait analysis in the field of lower limb orthosis in spastic cerebral palsy MAO Jiabei, LU Yangyang, JIN Sheng, SHEN Min, XU Chunxin, CHEN Cen, ZHAI Xindie, LIU Jing. Xinhua Hospital Affiliated To Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200092, China

【Abstract】 Gait analysis can be divided into three-dimensional gait analysis and observational gait assessment, which has guiding significance for the selection of lower limb correction surgery for cerebral palsy. This article reviews the reliability and validity of observational gait assessment and the latest research on gait analysis in the management of lower limb deformity in children with spastic cerebral palsy with various gait patterns in recent years.
【Keywords】 Gait analysis; Lower limb orthosis; Research progress

下肢畸形是痉挛型脑性瘫痪(简称脑瘫)常见的肌肉骨骼问题^[1]。脑瘫患儿在步行中会出现真性跖屈步态、跳跃步态、假性跖屈步态和蹲伏步态^[2],每种异常步态模式会导致不同的下肢畸形问题。有些程度相对较轻的畸形,在康复等治疗方法的介入下,随着时间的推移可以得到解决。更多的畸形由于长期肌肉痉挛和肌力失衡,常伴有不同程度的固定畸形,甚至产生骨性畸形。骨科矫形治疗是目前针对下肢畸形较为有效且直观的方法^[3]。一个理想的骨科矫形治疗方案对于下肢畸形来说尤为重要,这需要有各方面详细的评估数据来支撑矫形方案制定。以往骨科矫形方案制定依据大多建立在医生肉眼观察、临床查体以及量表评估,缺乏对于患儿步行时下肢动态数据的收集,步态分析可以有效弥补这一不足。步态分析可分为三维步态分析(three-dimen-

sional gait analysis, 3DGA)和观察性步态评估,两者皆可收集患儿步行过程中的运动学数据,而3DGA通过精准的建立三维模型,加上配置设备可额外收集患儿步行中的动力学数据、肌电数据、氧耗情况等。因此,将步态分析应用于脑瘫下肢矫形手术方案制定是必要且有着重要指导意义的。

本综述的目的是通过阅读近几年来国内外发表的医学文献,综述使用观察性步态评估与3DGA对存在不同步态问题的痉挛型脑瘫患儿下肢矫形诊疗的最新进展。

1 观察性步态评估

视觉步态评估量表被开发并使用^[4-5]。爱丁堡视觉步态评分(Edinburgh visual gait score, EVGS)是一种通过影像记录对脑瘫患儿进行步态评估的方法。在现有的观察性步态评估中, EVGS是最可靠

的,具有最高的有效性^[6]。EVGS 由 17 个项目组成,包括支撑相和摆动相时踝关节、膝关节、髋关节、骨盆和躯干的运动。根据偏离正常值的情况,每一项都可以得到 0、1 或 2 分。得分以 0~68 的分值表示,0 分表示正常步态^[7]。

1.1 观察性步态评估的信度和效度 通过比较 EVGS 得分与 3DGA 数据发现,EVGS 各观察者间的一致性为 60%~90%,并在下列情况中更为可靠:远端关节(足/踝/膝 63%~90%;髋/躯干/骨盆 60%~76%)、经验丰富者(专业人员 66%~91%,中等经验者 62%~90%,无经验者 41%~87%)与使用于功能更高的患儿(GMFCS I 65%~96%,II 为 58%~90%,III 为 35%~65%)。EVGS 的信度、效度及其一致性都可使其成为标准化步态评估^[8]。

EVGS 和粗大运动功能测量 66 项(gross motor function measure 66,GMFM-66)两者之间有显著的相关性($r = -0.69 \sim -0.73, P < 0.001$),这一结果有助于将 EVGS 应用于粗大运动功能分级系统(gross motor function classification system,GMFCS) III 级伴有轻度至中度病理步态的脑瘫患儿的评估中^[9]。有另一项研究也表明了 EVGS 与行走计时测试($r = 0.46, P = 0.03$)和 GMFCS($r = 0.45, P = 0.00$)呈中度相关^[10]。这些研究结果皆证明了 EVGS 可对脑瘫患儿进行标准化步态评估。

1.2 观察性步态评估运用于痉挛型脑瘫患儿下肢矫形诊疗 随着人们对视觉步态分析结果的认可,目前已有骨科矫形手术使用 EVGS 进行研究。Tsang 等^[11]使用 EVGS 来评估胫前肌肌腱缩短和小腿肌腱延长治疗痉挛型脑瘫患儿马蹄足畸形的疗效。研究中以 3DGA 为金指标进行探讨,但额外加入了 EVGS,两者皆证明手术的良好疗效。另一项研究,仅采用 EVGS 作为步态评估数据,表明了痉挛型双瘫患儿进行单次多节段手术(single-event multilevel surgery,SEMLS)能显著地长期改善功能及患儿独立性至成年^[12]。

在无法配备完整 3DGA 设备的情况下的,EVGS 能为有经验的临床医生对痉挛型脑瘫患儿的诊治提供指导性意见,让临床医生了解患儿的病理步态偏差以及其治疗前后变化的客观数据。

2 3DGA

3DGA 是应用计算机辅助技术,通过建立受试者模型,记录在真实三维空间中的步行状态,并在虚拟三维空间中重建受试者步行每一时刻运动状态的高新技术^[13]。3DGA 系统可以记录各关节在特定阶段的运动、肌肉活动、产生的地面反作用力、关节

的扭矩和相应做功,以及行走时足底压力和耗氧量,这些数据较好地保存运动细节,并真实地记录运动轨迹,数据精度高。由此可针对运动障碍与关节结构、肌肉功能、神经支配、运动控制和能量代谢之间的复杂关系进行分析。随着现代精准医疗的不断发展,三维运动捕捉系统已逐渐成为各项医学领域研究、评估、治疗的主要工具^[14-16]。

2.1 3DGA 应用于存在不同步态问题的痉挛型脑瘫患儿下肢矫形诊疗 痉挛型脑瘫患儿随着年龄增长,其痉挛模式会发生一定程度的变化。最常见的变化是从跖屈步态模式(腓肠肌痉挛所引起)转变为膝、髋关节屈曲角度增加(此过程中可能出现跳跃步态),直至最后彻底变为膝、髋关节屈曲、踝关节背屈的蹲伏步态^[17]。大多数痉挛型双瘫或四肢瘫的患儿,最终都会进展为蹲伏步态,但若是进行了不恰当的跟腱延长手术则可能加速这一发展的进程,加重蹲伏程度^[18]。因此,在正确的时间选择适当的方案进行手术对痉挛型脑瘫患儿的下肢矫形有着至关重要的意义。步态分析能够有效帮助骨科医生做出判断,提高矫形成功率,帮助患儿更好的改善生活。

2.2 真性跖屈步态 痉挛型脑瘫患儿开始步行后,由于小腿三头肌的痉挛,会导致真性跖屈步态的产生。步态支撑相时,真性跖屈往往会隐藏于膝关节过伸当中。

Pilloni 等^[19]针对跟腱延长手术治疗真性跖屈步态易发生矫形过度的情况展开研究。选取 18 例痉挛型双瘫脑瘫患儿[平均年龄(9.6 ± 4.7)岁]接受双侧跟腱延长手术进行矫形,受试者在手术前及手术后约 12 个月进行 3DGA。通过时空参数、运动学及动力学数据、步态变量评分判断跟腱延长术后结果是否良好。踝关节背屈改善证明真性跖屈得到了成功的矫形,但同时要关注初始着地时膝关节屈曲角度的变化,若屈曲角度增加则可能提示矫形过度,是蹲伏步态的早期指标。因此,研究者认同跟腱延长方法的有效性及其临床价值,但对于不同运动表现的患儿要通过 3DGA 采用不同的解决方案。

3DGA 数据(运动学数据,步态评分)也可用于评估拇长屈肌腱转移术的疗效,并探讨术后并发症情况^[20]。研究对 10 例拇长屈肌腱转移术后的脑瘫患儿(平均年龄 7.3 岁)进行为期平均 35 个月的随访。量化评估表明拇长屈肌腱转移术可增加足跟着地模式的出现,并在摆动相时减少足拖拽,与此同时会导致跟行足风险,故骨科医生应建立确定转移部位的准确标准。

痉挛型脑瘫患儿出现真性跖屈步态后,随之而

来的畸形也会增加,其中马蹄足是较为常见的一种。3DGA 在马蹄足畸形发展以及评估马蹄足畸形矫形疗效的研究中也起着至关重要的作用^[21-23]。近年来国内对于马蹄足手术前后疗效也开始采用 3DGA 作为主要评判标准^[24-26]。

2.3 跳跃步态 跳跃步态在痉挛型双瘫患儿中很常见,更多地累积近端肌群,除小腿三头肌痉挛外,还伴有腓绳肌、屈髋肌群的痉挛。出现马蹄足,膝关节和髋关节呈屈曲状态,骨盆前倾,腰椎前凸加重。在摆动相时由于股直肌运动,会出现膝关节僵直^[27]。

人们对于跳跃步态的了解还不全面,有研究纳入 10 例跳跃步态的脑瘫患儿,使用 3DGA 采集患儿以舒适速度下行走的下肢运动学、动力学及肌电图,采用 *t* 检验和 Wilcoxon 秩检验进行数据分析。膝关节最大屈曲角度在第 6 分钟时显著增大($P=0.01$),且与膝关节伸肌无力相关($r=-0.504, P=0.03$),仅臀中肌出现肌肉疲劳($P=0.01$)。研究者得出结论,跳跃步态的脑瘫患儿更容易出现膝关节屈曲增加,且在治疗干预中要对臀中肌提高重视^[28]。

Leonchuk 等^[29]致力于研究跳跃步态脑瘫患儿的 SEMLS 疗效,他们发现在脑瘫患儿中存在医源骨科疾病的患者数量较高。在 5 岁前进行小腿三头肌经皮纤维切除术或跟腱延长的极端负面后果是导致蹲伏步态的产生,即使患儿是 GMFSC I/II 的高功能者。这一并发症多数发生在初次术后 5~7 年,医生和家长会忽略与之前手术的相关性。

2.4 假性跖屈步态 随着患儿的生长发育,其年龄和体质量增长,步态也随之发生变化,膝关节和髋关节屈曲角度不断增加,踝关节跖屈则逐渐减小^[30]。通常伴随这些改变,假性跖屈步态开始显现,患儿看似仍采用前足着地模式、跖屈步态,但这是个假性跖屈。在矢状面运动学数据中,踝关节的背屈角度在正常范围内,但膝关节和髋关节在整个支撑相中都表现为过度屈曲。

Vandekerckhove 等^[31]建立了 6 400 个肌肉骨骼模型,探究髋关节肌肉无力和股骨畸形对脑瘫患儿步态表现的影响。每个模型进行脑瘫步态模拟,计算肌肉力量。该研究结果提示手术矫正股骨畸形比髋关节肌肉力量训练更能提高脑瘫患儿的功能,但作者特地提出髋关节无力和股骨畸形能限制假性跖屈步态的加重。

2.5 蹲伏步态 蹲伏步态表现为髋、膝、踝关节过度屈曲,这种模式是较为严重的痉挛型双瘫患儿的自然史,在大多数四肢瘫患儿中也是如此^[32]。在上文也提及过,幼年时不恰当的跟腱延长是导致蹲伏

步态最常见的原因。当跟腱被延长,腓绳肌和髂腰肌的痉挛/挛缩没得到关注,且没进行适当的处理,膝关节和髋关节会迅速增加屈曲角度。蹲伏步态会导致患儿步行姿势的极度不美观,且耗能巨大,此外膝关节疼痛、高位髌骨和胫骨扭转等骨性畸形也会随之出现。倘若无法适当地处理这些下肢畸形问题,最终会使患儿丧失步行能力。

Park 等^[33]的研究纳入 33 例膝关节屈曲固定畸形平均角度为 38° 的脑瘫患儿,手术时年龄平均 12.2 岁,平均随访 26.9 个月,测量股骨远端截骨手术前后的临床、放射学和 3DGA 参数,在最终随访时发现膝关节屈曲挛缩程度、髌骨高度和步行指数均有明显改善。股骨远端截骨术是治疗膝关节屈曲挛缩和髌骨畸形最有效、最常用的治疗策略。但单一手术无法解决患儿的所有下肢畸形问题,通常会采用 SEMLS 来达到理想疗效^[34-36]。关于影响 SEMLS 的因素也有研究进行探讨,将 258 例 SEMLS 手术前后进行过 2 次 3DGA 的脑瘫患儿纳入 SEMLS 组,同一数据库寻找至少接受了 2 次 3DGA 且未被手术干预的脑瘫患儿组成对照组(88 名),对两组的人口统计学数据、步行指数等进行分析比较,研究结果显示术前较低的步行指数、较高的步速和 GMFCS 水平与 SEMLS 术后的良好预后相关^[37]。

针对蹲伏步态的膝关节屈曲挛缩畸形,需要更适当的矫形手术处理,提高患儿的预后及生活质量。Hyer 等^[38]通过观察 28 例蹲伏步态脑瘫患儿股骨远端截骨术和髌腱重叠手术前后的影像学 and 3DGA 数据,得出结论,髌腱重叠术是一种简单、安全的处理股四头肌供血不足的技术。一项回顾性分析针对髌韧带推进利用 3DGA 建立肌肉骨骼模型来量化髌骨位置、膝关节力矩和运动学数据。髌韧带推进组髌骨高度显著降低($P=0.004$),膝关节伸展力矩峰值明显增加($P=0.008$)。肌肉骨骼模型是测定髌骨高度的有效工具,髌韧带推进改善了蹲伏步态患儿的髌骨位置、膝关节伸展力矩以及运动学,是一种有效处理蹲伏步态的手术方法^[39]。

此外,地面反应式踝足矫形器(ground reaction ankle-foot orthosis, GRAFO)被提出能改善蹲伏问题^[40],有部分骨科医生认为 GRAFO 对于蹲伏步态的改善能力大于一般静态踝足矫形器(solid ankle-foot orthosis, SAFO),但 Ries 和 Schwartz^[41]回顾性分析了 147 名穿戴 GRAFO 或 SAFO 的蹲伏步态脑瘫患儿在赤足和穿带矫形器下行走的 3DGA 数据,结果表明 SAFO 和 GRAFO 在纠正脑瘫患儿的蹲伏步态方面同样有效,同时提出踝足矫形器改

善蹲伏的主要影响因素是矫形器的中性角度,对踝足矫形器的制作和角度选取提出了较高的要求。

2.6 下肢力线异常 下肢扭转是脑瘫患儿常见的病理问题,胫骨、股骨的扭转会导致步行障碍、增加步行消耗、降低步行效率等。体格检查、CT 和 X 线常被用于评估下肢静态力线排列,但无法对患儿在步行中的下肢力线异常进行评估。3DGA 是测量步行过程中动态旋转的最优工具。Riad 等^[42]的前瞻性研究纳入偏瘫脑瘫患儿 45 例,平均年龄 17.7 (13.0~24.0) 岁,GMFCS 分级 I 级,进行体格检查、3DGA 和磁共振成像评估下肢旋转。轻度偏瘫脑瘫患儿股骨前倾角不对称,患侧增加的解剖内旋和动态内旋被骨盆外旋所代偿,适当的旋转矫正能良好地改善步态异常。严重的股骨横断面畸形需要进行股骨去旋转截骨术(femoral derotational osteotomy, FDO),对于手术指征有明确的共识,包括日常生活、物理评估、患儿和家长意愿、观察性步态、3DGA、影像学检查、术前麻醉检查等多方面^[43]。

FDO 被认为是治疗脑瘫内旋步态的金标准方法,Vermuyten 等^[44]对 31 例脑瘫患儿 FDO 术后进行随访,采用术前、术后 1 年、术后 3 年的临床和 3DGA 数据,结果显示 FDO 对髋关节旋转和股骨前倾角有显著纠正作用,术后 1 年与术后 3 年对比无显著变化,可持续纠正内旋步态,此外手术时年龄对畸形复发和运动学参数影响甚微。

3 总结

3DGA 通常用于脑瘫患儿的评估和治疗决策,特别对于下肢畸形矫形方面,使用 3DGA 能充分了解患儿的步行模式,决定适当的手术方案,预防术后并发症的出现。在国外,许多手术指征也加入了 3DGA 数据,这对于手术选择是不可或缺的指标。但由于 3DGA 实验室需要专业人员以及较为昂贵的设备,无法在国内普及,相较于脑瘫发病人数、儿童骨科门诊数量,国内 3DGA 实验室完全无法满足,哪怕在各个一线城市,也仅有极少数医院配备有专业的 3DGA 实验室可为脑瘫患儿提供评估,但根据以往研究证明步态分析对脑瘫患儿的下肢矫形意义重大,在无法使用 3DGA 情况下,观察性步态分析的普及显得尤为重要,EVGS 在脑瘫步态分析领域中的信度效度都得到认可,是代替 3DGA 的首选。目前在国外,关于步态分析在脑瘫患儿各领域的运用研究已成为主流,但在国内相关的研究较少,随着科技与医疗水平的发展,步态分析在脑瘫患儿中的运用将不可替代,不仅方便临床工作,更造福患儿以及他们的家庭。

参考文献

[1] Sees JP, Truong WH, Novacheck TF, et al. What's New in the Orthopaedic Treatment of Ambulatory Children With Cerebral Palsy Using Gait Analysis[J]. J Pediatr Orthop, 2020, 40(6): e498-503.

[2] Armand S, Decoulon G, Bonnefoy-Mazure A. Gait analysis in children with cerebral palsy[J]. EFORT Open Rev, 2016, 1(12): 448-460.

[3] Chin EM, Gwynn HE, Robinson S, et al. Principles of Medical and Surgical Treatment of Cerebral Palsy[J]. Neurol Clin, 2020, 38(2): 397-416.

[4] Narayanan UG. The role of gait analysis in the orthopaedic management of ambulatory cerebral palsy[J]. Curr Opin Pediatr, 2007, 19(1): 38-43.

[5] Brown CR, Hillman SJ, Richardson AM, et al. Reliability and validity of the Visual Gait Assessment Scale for children with hemiplegic cerebral palsy when used by experienced and inexperienced observers[J]. Gait Posture, 2008, 27(4): 648-652.

[6] Rathinam C, Bateman A, Peirson J, et al. Observational gait assessment tools in paediatrics-a systematic review[J]. Gait Posture, 2014, 40(2): 279-285.

[7] Read HS, Elizabeth Hazlewood M, Hillman SJ, et al. Edinburgh visual gait score for use in cerebral palsy[J]. J Pediatr Orthop, 2003, 23(3): 296-301.

[8] Del Pilar Duque Orozco M, Abousamra O, Church C, et al. Reliability and validity of Edinburgh visual gait score as an evaluation tool for children with cerebral palsy[J]. Gait Posture, 2016, 49: 14-18.

[9] Abe H, Koyanagi S, Kusumoto Y, et al. Intra-rater and inter-rater reliability, minimal detectable change, and construct validity of the Edinburgh Visual Gait Score in children with cerebral palsy[J]. Gait Posture, 2022, 94: 119-123.

[10] Folle MR, Tedesco AP, Nicolini-Panisson RD. Correlation between visual gait analysis and functional aspects in cerebral palsy[J]. Acta Ortop Bras, 2016, 24(5): 259-261.

[11] Tsang STJ, McMorran D, Robinson L, et al. A cohort study of tibialis anterior tendon shortening in combination with calf muscle lengthening in spastic equinus in cerebral palsy[J]. Gait Posture, 2016, 50: 23-27.

[12] Jones MD, Gardner R, Pyman J, et al. Long-term outcomes following multilevel surgery in cerebral palsy[J]. J Pediatr Orthop, 2020, 40(7): 351-356.

[13] 谭菁华, 薛静波, 谢勇, 等. 光学三维运动捕捉系统用于生物力学测试的精准度分析[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(12): 1822-1827.

[14] Schmid S, Studer D, Hasler CC, et al. Quantifying spinal gait kinematics using an enhanced optical motion capture approach in adolescent idiopathic scoliosis[J]. Gait Posture, 2016, 44: 231-237.

[15] Phutane U, Liphardt AM, Bräunig J, et al. Evaluation of Optical and Radar Based Motion Capturing Technologies for Characterizing Hand Movement in Rheumatoid Arthritis-A Pilot

- Study[J]. *Sensors*(Basel, Switzerland), 2021, 21(4):1208.
- [16] Cuadrado J, Michaud F, Lugris U, et al. Using Accelerometer Data to Tune the Parameters of an Extended Kalman Filter for Optical Motion Capture: Preliminary Application to Gait Analysis[J]. *Sensors*(Basel, Switzerland), 2021, 21(2):427.
- [17] Lee EH, Nather A, Goh J, et al. Gait analysis in cerebral palsy [J]. *Ann Acad Med Singap*, 1985, 14(1):37-43.
- [18] Borton DC, Walker K, Pirpiris M, et al. Isolated calf lengthening in cerebral palsy. Outcome analysis of risk factors[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2001, 83(3):364-370.
- [19] Pilloni G, Pau M, Costici F, et al. Use of 3D gait analysis as predictor of Achilles tendon lengthening surgery outcomes in children with cerebral palsy[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2019, 55(2):250-257.
- [20] Fujita H, Fusagawa H, Nishibu H, et al. Motion analysis and surgical results of anterior transfer of flexor hallucis longus for equinovarus gait in children with hemiplegia[J]. *J Orthop Sci*, 2021, 26(3):441-447.
- [21] Dussa CU, Böhm H, Döderlein L, et al. Treatment of spastic varus/ equinovarus foot with split-tendon transfers in cerebral palsy: How does it affect the hindfoot motion[J]. *Gait Posture*, 2022, 92:343-350.
- [22] Sarıkaya İ A, Bırsel SE, Şeker A, et al. The split transfer of tibialis anterior tendon to peroneus tertius tendon for equinovarus foot in children with cerebral palsy[J]. *Acta Orthop Traumatol Turc*, 2020, 54(3):262-268.
- [23] Horsch A, Götze M, Geisbüsch A, et al. Prevalence and classification of equinus foot in bilateral spastic cerebral palsy[J]. *World J Pediatr*, 2019, 15(3):276-280.
- [24] 郑炳铃, 王健, 尹靖宇, 等. 足三关节融合术联合康复训练治疗脑瘫马蹄足部畸形的临床分析[J]. *中国现代药物应用*, 2017, 11(15):45-46.
- [25] 徐桂豪, 郑炳铃, 莫扬海, 等. 手术配合系统康复治疗对脑瘫痉挛性马蹄足患儿步态的影响[J]. *中国骨科临床与基础研究杂志*, 2021, 13(1):40-45.
- [26] 冯重睿, 郭永亮, 郑炳铃, 等. 痉挛型脑性瘫痪马蹄足跟腱延长术后系统康复训练患儿三维步态分析表现[J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(10):1243-1246.
- [27] Sutherland DH, Davids JR. Common gait abnormalities of the knee in cerebral palsy [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1993, (288):139-147.
- [28] Parent A, Dal Maso F, Pouliot-Laforte A, et al. Short Walking Exercise Leads to Gait Changes and Muscle Fatigue in Children With Cerebral Palsy Who Walk With Jump Gait[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2021, 100(11):1093-1099.
- [29] Leonchuk SS, Chibirov GM, Dolganova T, et al. Single-Event Multilevel Orthopedic Surgery in Children with True Equinus Gait and Jump Knee Gait[M]. *Understanding in children with Cerebral Palsy: Orthopedic Problems* (Editor Dmitry Popkov), 2020.
- [30] Molenaers G, Desloovere K, De Cat J, et al. Single event multilevel botulinum toxin type A treatment and surgery: similarities and differences[J]. *Eur J Neurol*, 2001, 8:88-97.
- [31] Vandekerckhove I, Wesseling M, Kainz H, et al. The effect of hip muscle weakness and femoral bony deformities on gait performance[J]. *Gait Posture*, 2021, 83:280-286.
- [32] Sutherland DH, Cooper L. The pathomechanics of progressive crouch gait in spastic diplegia[J]. *Orthop Clin North Am*, 1978, 9(1):143-154.
- [33] Park H, Park BK, Park KB, et al. Distal Femoral Shortening Osteotomy for Severe Knee Flexion Contracture and Crouch Gait in Cerebral Palsy[J]. *J Clin Med*, 2019, 8(9):1354.
- [34] Dreher T, Thomason P, Švehlík M, et al. Long-term development of gait after multilevel surgery in children with cerebral palsy: a multicentre cohort study[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2018, 60(1):88-93.
- [35] Moisan G, Bonnefoy-Mazure A, De Coulon G, et al. Assessment of gait quality and efficiency after undergoing a single-event multilevel surgery in children with cerebral palsy presenting an intoeing gait pattern[J]. *Childs Nerv Syst*, 2022, 38(8):1523-1530.
- [36] Amirmudin NA, Lavelle G, Theologis T, et al. Multilevel Surgery for Children With Cerebral Palsy: A Meta-analysis[J]. *Pediatrics*, 2019, 143(4):e20183390.
- [37] de Freitas Guardini KM, Kawamura CM, Lopes JAF, et al. Factors related to better outcomes after single-event multilevel surgery (SEMLS) in patients with cerebral palsy[J]. *Gait Posture*, 2021, 86:260-265.
- [38] Hyer LC, Carpenter AM, Saraswat P, et al. Outcomes of Patellar Tendon Imbrication With Distal Femoral Extension Osteotomy for Treatment of Crouch Gait[J]. *J Pediatr Orthop*, 2021, 41(5):e356-366.
- [39] Karabulut D, Arslan YZ, Salami F, et al. Biomechanical assessment of patellar tendon advancement in patients with cerebral palsy and crouch gait[J]. *Knee*, 2021, 32:46-55.
- [40] Davids JR, Rowan F, Davis RB. Indications for orthoses to improve gait in children with cerebral palsy[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2007, 15(3):178-188.
- [41] Ries AJ, Schwartz MH. Ground reaction and solid ankle-foot orthoses are equivalent for the correction of crouch gait in children with cerebral palsy[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2019, 61(2):219-225.
- [42] Riad J, Finnbogason T, Broström E. Anatomical and dynamic rotational alignment in spastic unilateral cerebral palsy[J]. *Gait Posture*, 2020, 81:153-158.
- [43] McCarthy J, Wade Shrader M, Graham K, et al. Establishing surgical indications for hamstring lengthening and femoral derotational osteotomy in ambulatory children with cerebral palsy[J]. *J Child Orthop*, 2020, 14(1):50-57.
- [44] Vermuyten L, Desloovere K, Molenaers G, et al. Proximal femoral derotation osteotomy in children with CP: long term outcome and the role of age at time of surgery[J]. *Acta Orthop Belg*, 2021, 87(1):167-173.

(收稿日期:2022-10-19)

(本文编辑:刘颖;外审专家:吕智海)