

股骨远端短缩截骨及髌韧带下移治疗脑瘫蹲伏步态的临床疗效

刘璇, 刘倩, 陈维秀, 王若义, 王春田*

山东大学齐鲁第二医院小儿外科, 山东 济南

收稿日期: 2025年11月18日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月22日

摘要

目的: 探讨股骨远端短缩截骨(distal femoral shortening osteotomy, DFSO)联合髌韧带下移(patellar tendon advancement, PTA)术治疗脑性瘫痪患者重度膝关节屈曲挛缩和蹲伏步态的临床疗效及安全性。方法: 回顾分析2019年11月至2025年10月期间在我中心接受DFSO联合PTA手术的22例脑瘫患儿的临床资料。所有患者均为粗大运动功能分级(Gross Motor Function Classification System, GMFCS) III级, 手术时年龄(13.41 ± 2.79)岁, 男13例, 女9例。比较术前与术后膝关节屈曲角度、骨盆前倾角及步态运动学参数变化, 并分析角度改善与临床因素的相关性。平均随访时间58.5个月。结果: 术后站立期膝关节最大伸展度平均提高 25.21° ($P < 0.001$), 骨盆前倾角平均增加 7.83° ($P < 0.05$)。角度改善幅度与术前屈曲角度呈正相关, 与术后残余角度呈负相关。步态偏离指数(Gait Deviation Index, GDI)及时空参数较术前改善趋势未达统计学显著水平。随访期间未出现骨不连、神经损伤等严重并发症。结论: DFSO联合PTA术能有效矫正重度膝关节屈曲挛缩, 改善膝伸展功能并减轻骨盆前倾代偿, 术式安全可行。手术医师应关注术后骨盆姿态变化并加强康复训练, 以优化长期步态恢复。

关键词

股骨远端短缩截骨术, 髌韧带下移, 重度膝关节屈曲挛缩, 蹲伏步态, 脑性瘫痪

Efficacy of Combined Distal Femoral Shortening Osteotomy and Patellar Tendon Advancement for Crouch Gait in Cerebral Palsy

Xuan Liu, Qian Liu, Weixiu Chen, Ruoyi Wang, Chuntian Wang*

Department of Pediatric Surgery, The Second Qilu Hospital of Shandong University, Jinan Shandong

*通讯作者。

文章引用: 刘璇, 刘倩, 陈维秀, 王若义, 王春田. 股骨远端短缩截骨及髌韧带下移治疗脑瘫蹲伏步态的临床疗效[J]. 临床医学进展, 2025, 15(12): 2445-2454. DOI: 10.12677/acm.2025.15123676

Abstract

Objective: To investigate the clinical efficacy and safety of distal femoral shortening osteotomy (DFS0) combined with patellar tendon advancement (PTA) in the treatment of severe knee flexion contracture and crouch gait in patients with cerebral palsy. **Methods:** A retrospective analysis was conducted on the clinical data of 22 children with cerebral palsy who underwent DFS0 combined with PTA at our center between November 2019 and October 2025. All patients were classified as Gross Motor Function Classification System (GMFCS) level III, with a mean operative age of 13.41 ± 2.79 years, including 13 males and 9 females. Preoperative and postoperative knee flexion angle, pelvic tilt angle, and gait kinematic parameters were compared. The correlation between angle improvement and clinical factors was analyzed. The mean follow-up period was 58.5 months. **Results:** Postoperatively, the maximum knee extension during the stance phase improved by an average of 25.21° ($P < 0.001$), with an average increase of 7.83° in the pelvic tilt angle ($P < 0.05$). The magnitude of angle improvement was positively correlated with the preoperative flexion angle and negatively correlated with the postoperative residual angle. Improvement trends in the Gait Deviation Index (GDI) and spatiotemporal parameters were observed but did not reach statistical significance. No serious complications such as nonunion or nerve injury occurred during the follow-up period. **Conclusions:** DFS0 combined with PTA effectively corrects severe knee flexion contracture, improves knee extension function, and reduces compensatory pelvic anterior tilt. The procedure is safe and feasible. Surgeons should pay attention to postoperative pelvic posture changes and reinforce rehabilitation training to optimize long-term gait recovery.

Keywords

Distal Femoral Shortening Osteotomy, Patellar Tendon Advancement, Severe Knee Flexion Contracture, Crouch Gait, Cerebral Palsy

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

蹲伏步态是痉挛型脑瘫患儿常见的一种步态异常，在双瘫亚型中尤为典型。以支撑期膝关节过度屈曲，伴随髋关节屈曲及踝关节背屈增加为特点[1]-[3]。该畸形的发生与股四头肌无力、腘绳肌痉挛与软组织挛缩等密切相关[2] [4]。长期异常步态会进一步导致腘绳肌短缩、膝关节屈曲挛缩及骨盆前倾等继发性改变，最终形成固定性畸形[2] [5]。

对于已形成固定性畸形的重度膝屈曲，单纯软组织手术效果有限，骨性矫形手术成为必要选择[6] [7]。股骨远端伸展截骨术(distal femoral extension osteotomy, DFEO)是目前临床常用术式，能有效改善膝关节伸展力线[8] [9]。然而，该术式在矫正严重畸形时面临两大挑战：可能因牵拉导致腓总神经损伤，发生率约 10% [10]-[12]。此外，术后可能加重骨盆前倾，影响整体矫形效果[9]。

股骨远端短缩伸展截骨术(distal femoral shortening osteotomy, DFSO)通过截骨短缩在实现矫形的同时降低软组织张力，为重度畸形患者提供了新的治疗思路。Park 等[13]的研究表明 DFSO 联合髌韧带下移(patellar tendon advancement, PTA)能显著改善膝关节功能且神经并发症风险较低，但术后骨盆姿态变化仍

需深入探讨。

目前,关于 DFSSO 联合 PTA 治疗脑瘫重度膝关节屈曲畸形的系统研究仍缺乏。本研究将手术适应证扩大至固定膝屈曲畸形 $\geq 35^\circ$ 的重度病例,并首次系统量化术后骨盆-膝关节运动学的联动变化规律。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

本研究经医院伦理委员会批准(伦理审查批件号: KYLL202510743)。所有患者均知情且同意。研究采用回顾性队列分析,纳入 2019 年 11 月至 2025 年 10 月期间接受 DFSSO 联合 PTA 手术治疗的脑瘫痉挛型蹲伏步态患儿。所有病例均符合严格筛选标准,核心手术指征为全身麻醉下测量的膝关节固定屈曲挛缩角度 $35^\circ\sim 40^\circ$ 之间。纳入标准要求患儿符合最新痉挛型脑瘫诊断标准,年龄 6~18 岁,粗大运动功能分级(Gross Motor Function Classification System, GMFCS) I~III 级,存在 $\geq 35^\circ$ 的固定膝屈曲挛缩伴典型蹲伏步态,且经过系统保守治疗 ≥ 6 个月效果不佳。排除标准包括:需要同期行重大髋/踝关节矫形手术者;合并其他进行性神经肌肉疾病或骨骼发育异常者;既往接受过 SDR 或可能显著改变下肢力线的重大骨性手术者;术前 6 个月内接受肉毒毒素注射者;伴有影响术后康复的重度内科疾病者;以及随访资料不完整无法进行有效评估者。经过严格筛选,最终 22 例 GMFCS III 级患儿纳入最终分析,其中男性 13 例,女性 9 例,手术时平均年龄为 13.41 ± 2.72 岁。左侧肢体受累 16 例,右侧 6 例。术后随访时间 35~79 个月,平均随访时间 58.5 个月。所有患儿均由同一医疗团队完成治疗,临床及影像学资料完整。一般资料见表 1。

Table 1. Patient demographic and clinical characteristics

表 1. 患者一般资料

变量名	基本特征(n = 22)
年龄(岁)	13.41 ± 2.72
术前角度($^\circ$)	36.73 ± 2.24
术后角度($^\circ$)	11.00 ± 2.34
减小度数($^\circ$)	25.73 ± 2.65
骨盆前倾角($^\circ$)	7.91 ± 0.95
性别	
·女	9 (40.91%)
·男	13 (59.09%)
患侧	
·右	6 (27.27%)
·左	16 (72.73%)

2.2. 外科手术程序

所有手术操作均由同一支经验丰富的小儿骨科团队完成,确保技术一致性。DFSSO 手术采用标准的股骨远端外侧入路[14] [15],暴露股骨髁上区域。术前基于站立位下肢全长 X 线片精确评估股骨机械轴与力线关系,初步规划截骨范围。术中关键步骤是根据全身麻醉下实测的固定屈曲角度,精确计算并切除一个梯形的股骨髁上骨块,其基底边长度即为所需的短缩量。这一设计使得在伸直位对合截骨面后,

不仅能够矫正屈曲畸形，还能使膝关节完全伸直时双侧腘窝角恢复至 30°~35°的生理范围，同时确保髌关节完全伸直，有效降低了术后神经血管牵拉风险。所有 22 例患儿均采用股骨远端解剖刀片钢板进行牢固的内固定。PTA 手术根据胫骨近端生长板的闭合状态采用个体化术式。对于生长板未闭合的患儿(n = 17)，采用保留骨膜的髌腱背侧半推进技术；对于生长板已闭合的年长患儿(n = 5)，则采用带胫骨结节骨块的髌腱移位术，并以加压螺钉可靠固定。根据患儿个体化畸形情况，部分病例同期实施了辅助手术(详见表 2)，所有手术决策均于术前多学科讨论中制定。手术图片见图 1，术前术后对比图见图 2。

Table 2. Concurrent adjunctive surgical procedures (n = 22 Patients)

表 2. 同期实施的辅助手术情况(n = 22 患者)

辅助手术类型	患者例数	涉及肢体数
跟腱延长术	16	28
内收肌松解术	15	26
腘绳肌延长术	8	12
胫前肌外移术	2	2
踝关节/足部其他矫形术	5	7

注：一名患者可能接受一种以上辅助手术。



(a) 截骨部位的显露与标记；(b) 股骨远端短缩截骨的实施；(c) 截骨后的内固定。

Figure 1. Distal femoral shortening osteotomy (DFSO)

图 1. 股骨远端短缩截骨术



(a) 术前患者下肢自然伸展状态图；(b) 术后患者下肢经包扎处理后状态。

Figure 2. Preoperative and postoperative comparison

图 2. 术前术后对比图

2.3. 术后康复方案

所有患者术后均遵循一套统一的标准化、分阶段康复流程。术后 0 至 6 周(阶段一),患肢以长腿石膏牢固固定,康复重点在于积极的踝泵运动以预防深静脉血栓,同时进行上肢与核心肌群的力量训练,并辅以严格的肢体肿胀管理与疼痛控制。术后第 6 周至 3 个月(阶段二),拆除石膏,更换为可调式膝关节支具;在康复治疗师指导下,开始进行主动辅助的膝关节活动度训练,并依据影像学检查及患者耐受情况,逐渐从部分负重过渡到完全负重行走。术后 3 至 6 个月(阶段三),康复核心转为肌力强化,重点针对股四头肌、臀大肌等伸膝与伸髋肌群进行抗阻训练,并同步引入静态与动态平衡训练、重心转移技巧以及基础的步态再训练。术后 6 个月以后(阶段四),则侧重于进阶的功能性训练与社区融合,内容包括跨越障碍、上下楼梯等复杂任务,并鼓励患者参与社区内的步行活动,以进一步提升其运动能力、耐力与生活质量。

2.4. 评估方法与指标

2.4.1. 骨盆前倾角测量

于术前及末次随访时,拍摄标准站立位侧方骨盆 X 光片。在 X 光片上,定义骨盆前倾角为双侧股骨头中心点连线与骶骨平台平面垂线之间的夹角,由两位不知晓分组情况的高年资医师独立测量并取平均值。

2.4.2. 步态分析

本研究采用 VICON MX 三维运动分析系统(8 台红外摄像头, 100 Hz 采样频率)进行标准化步态数据采集。严格按照 Plug-in Gait 生物力学模型,由同一位具有 10 年以上经验的技师在患儿体表特定骨性标志点放置 15 个被动反光标记点。数据采集时,要求患儿以自然、舒适的速度赤足行走,采集至少 5 个有效步态周期的数据。所有运动学数据经过 6 Hz 低通滤波处理后,重点分析髋、膝、踝关节在步态周期中各关键时相的运动角度变化。

2.5. 统计分析

采用 SPSS 26.0 统计软件进行数据分析。计量资料符合正态分布者以均值 $\pm$ 标准差表示。术前与术后各项指标的对比,根据正态性检验(Shapiro-Wilk 检验)结果,选用配对样本 t 检验或 Wilcoxon 符号秩检验。所有统计检验均为双侧检验,以 $P < 0.05$ 认为差异具有统计学意义。

3. 结果

如前述,经筛选后,所有纳入研究的 22 例患者 GMFCS 均为 III 级。所有患者接受手术时年龄(13.41 ± 2.79)岁,其中男 13 例,女 9 例。术后随访时间范围为 35~79 个月,平均随访时间 58.5 个月,在术后随访过程中未出现骨不连或神经功能受损等重大并发症。膝关节屈曲挛缩平均改善了 $25.73^\circ \pm 2.65^\circ$,骨盆前倾角平均增加 $7.91^\circ \pm 0.95^\circ$ 。手术前后改善情况见表 3。

Table 3. Preoperative and postoperative comparison
表 3. 手术前后改善情况

手术前后角度变化	
术前角度($^\circ$)	36.73 ± 2.24
术后角度($^\circ$)	11.00 ± 2.34
统计量	44.508
P 值	<0.001

我们采用皮尔逊(Pearson)、斯皮尔曼(Spearman)及肯德尔(Kendall)相关性检验分析术后膝关节屈曲角度改善度与各临床变量的关系(见表4)。结果显示:术前角度与角度改善度呈显著正相关(Pearson $r = 0.554$, $P = 0.007$; Spearman $\rho = 0.592$, $P = 0.004$; Kendall $\tau = 0.471$, $P = 0.005$), 术后角度与角度改善度呈显著负相关(Pearson $r = -0.602$, $P = 0.003$; Spearman $\rho = -0.617$, $P = 0.002$; Kendall $\tau = -0.505$, $P = 0.002$), 提示术前畸形较重且术后矫正充分的患者通常获得更明显的角度改善。此外, 性别与角度改善度亦存在显著相关(Pearson $r = 0.508$, $P = 0.016$), 其中女性患者改善幅度较大。骨盆前倾角、患侧及年龄与角度改善度之间的相关性均无统计学意义(P 均 >0.05)。

Table 4. Correlation between postoperative improvement in knee flexion angle and clinical variables
表 4. 术后膝关节屈曲角度改善度与各临床变量的关系

变量名	皮尔逊 相关系数	皮尔逊 相关 P 值	斯皮尔曼等级 相关系数	斯皮尔曼等级 相关 P 值	肯德尔 相关系数	肯德尔 相关 P 值
骨盆前倾角(°)	0.008	0.971	0.017	0.939	0.037	0.834
性别	0.508	0.016	0.492	0.020	0.425	0.024
患侧	0.371	0.089	0.316	0.152	0.273	0.147
年龄(岁)	-0.003	0.988	0.014	0.952	-0.005	0.977
术前角度(°)	0.554	0.007	0.592	0.004	0.471	0.005
术后角度(°)	-0.602	0.003	-0.617	0.002	-0.505	0.002

术前与术后步态运动学参数的比较结果见表5。术后患者的步态偏离指数(Gait Deviation Index, GDI)较术前降低(58.68 ± 11.29 vs 52.08 ± 10.08), 差异无统计学意义($P = 0.105$), 提示整体步态模式在术后未见改善。步行速度(74.74 ± 26.66 cm/s vs 75.25 ± 24.21 cm/s, $P = 0.961$)和步频(106.27 ± 18.65 次/min vs 99.10 ± 25.34 次/min, $P = 0.421$)较术前差异亦无统计学意义, 说明手术后患者的行走节奏及运动稳定性基本保持一致。

在时空参数方面, 摆动期时长由 34.31%增加至 36.26% ($P = 0.201$), 步长由 47.69 cm 降至 45.96 cm ($P = 0.650$), 差异均无统计学意义, 提示手术后患者下肢周期性步态节律及跨步幅度总体保持稳定。

在初始接触期的运动学参数方面, 骨盆角度由 17.66° 增至 18.68° ($P = 0.758$), 呈轻度前倾趋势; 髌关节屈曲角度由 10.17° 降至 8.55° ($P = 0.137$), 膝关节屈曲角度由 60.86° 降至 48.84° ($P = 0.244$), 踝关节角度由 28.44° 增至 31.58° ($P = 0.584$), 均未显示显著差异。尽管统计学上未达显著水平, 膝关节屈曲度下降约 12° 的变化在临床上可能反映出术后膝关节伸展控制能力的改善。

在中支撑期, 骨盆角度由 9.59° 增至 13.07° ($P = 0.319$), 呈轻度前倾趋势; 髌关节角度由 48.66° 增至 54.03° ($P = 0.186$); 膝关节角度由 48.86° 降至 39.96° ($P = 0.073$), 呈现明显的屈曲减少趋势。该变化虽未达到显著性水平, 但与手术后膝关节伸展功能的增强方向一致, 提示患者在中期支撑阶段的负重与步态稳定性可能有所改善。

在末期支撑及摆动期, 骨盆、髌关节及踝关节的运动学参数较术前均无显著变化($P > 0.05$), 提示手术后患者在步态后期的关节活动度总体稳定。

总体而言, 术后患者在膝关节伸展控制及骨盆前倾方面表现出一定改善趋势, 而髌、踝关节的运动学变化较小。尽管多数指标差异未达统计学显著水平, 但整体趋势与手术预期相符, 提示该术式可能在优化膝关节过屈和骨盆前倾方面具有潜在的积极作用。

Table 5. Comparison of preoperative and postoperative gait kinematic parameters**表 5.** 术前与术后步态运动学参数的比较

指标	术前(均值 $\pm$ SD)	术后(均值 $\pm$ SD)	P 值
步态偏离指数	58.68 $\pm$ 11.29	52.08 $\pm$ 10.08	0.1048
步行速度(cm/s)	74.74 $\pm$ 26.66	75.25 $\pm$ 24.21	0.9612
步频(步/min)	106.27 $\pm$ 18.65	99.10 $\pm$ 25.34	0.4209
摆动期时长(%)	34.31 $\pm$ 4.08	36.26 $\pm$ 6.17	0.201
步长(cm)	47.69 $\pm$ 10.81	45.96 $\pm$ 9.55	0.6499
初始接触期骨盆角度	17.66 $\pm$ 6.88	18.68 $\pm$ 6.97	0.7583
初始接触期髋关节角度	10.17 $\pm$ 3.33	8.55 $\pm$ 2.85	0.1372
初始接触期膝关节角度	60.86 $\pm$ 23.39	48.84 $\pm$ 20.89	0.244
初始接触期踝关节角度	28.44 $\pm$ 12.20	31.58 $\pm$ 13.61	0.5837
中支撑期骨盆角度	9.59 $\pm$ 9.93	13.07 $\pm$ 7.95	0.3185
中支撑期髋关节角度	48.66 $\pm$ 12.81	54.03 $\pm$ 12.08	0.1856
中支撑期膝关节角度	48.86 $\pm$ 18.10	39.96 $\pm$ 13.54	0.0733
中支撑期踝关节角度	16.42 $\pm$ 10.58	19.99 $\pm$ 11.06	0.4459
末端支撑期骨盆角度	10.80 $\pm$ 6.72	11.41 $\pm$ 6.54	0.8146
末端支撑期髋关节角度	14.10 $\pm$ 9.53	14.82 $\pm$ 12.54	0.8727
末端支撑期膝关节角度	46.19 $\pm$ 22.78	50.45 $\pm$ 19.46	0.4363
末端支撑期踝关节角度	4.84 $\pm$ 16.18	4.13 $\pm$ 16.38	0.8786
支撑期膝关节最大屈曲角	66.32 $\pm$ 21.22	65.94 $\pm$ 14.72	0.9483
支撑期膝关节最小屈曲角	34.44 $\pm$ 17.76	44.38 $\pm$ 21.77	0.1678
摆动期膝关节最大屈曲角	61.22 $\pm$ 9.78	53.54 $\pm$ 15.72	0.1338
摆动期膝关节最小屈曲角	30.76 $\pm$ 9.05	27.88 $\pm$ 11.84	0.5075
支撑期膝关节活动范围	27.75 $\pm$ 9.53	21.80 $\pm$ 10.64	0.0463
摆动期膝关节活动范围	25.78 $\pm$ 16.25	27.49 $\pm$ 10.94	0.7583

4. 讨论

本研究纳入 GMFCS III 级痉挛型脑瘫患儿, 结果显示术后膝关节屈曲挛缩平均改善 25.73°、骨盆前倾角平均增加 7.91°, 随访期间未出现骨不连或神经损伤等重大并发症。总体结果表明, 本术式在矫正屈膝畸形方面具有确切疗效与良好安全性。与既往综述相比, DFSO 及 PTA 有一定优势。Paliaga 等[2]综述指出, DFEO 联合 PTA 能显著改善膝关节伸展运动学参数, 而本研究采用的 DFSO 在实现相同矫形目标的同时, 通过股骨短缩有效降低了传统 DFEO 可能带来的神经血管牵拉风险。这一技术特点对于固定屈曲畸形严重的 GMFCS III 级患儿尤为重要, 因为该群体往往伴有更明显的软组织挛缩和神经张力增高。Geisbüsch 等[8]的中期研究与本研究结果一致, 证实了股骨远端截骨术联合 PTA 在中重度屈膝步态矫正中的效果。

本研究结果显示, DFSSO 联合 PTA 能有效矫正重度膝关节屈曲挛缩(平均改善 25.73°), 且未出现严重并发症, 表明该术式在结构矫形方面具有明确优势。然而, 尽管局部结构改善显著, 整体步态功能(如 GDI、步行速度等)并未同步提升, 这一矛盾现象凸显, 对于 GMFCS III 级患者, 局限于结构矫形不足以实现功能突破, 其根本原因在于未被解决的神经肌肉功能缺陷。肌力低下是阻碍功能转化的核心限制因素。经典研究证实, GMFCS III 级患者的下肢关键肌群存在广泛性肌无力, 其髌、膝伸肌峰值力矩显著低于典型发育儿童[16]。本研究中, 术后膝关节力线的矫正为步态改善创造了潜在的生物力学条件, 但患者因肌力不足, 无法产生足够的支撑力矩与推进力来有效利用这一新的力线, 从而导致整体步态效能未见提升。

生物力学代偿机制进一步解释了步态模式难以优化的原因。生物力学模型研究[17]表明, 在髌、膝伸肌肌力不足的情况下, 身体会通过增加骨盆前倾等代偿策略维持重心稳定与前进动量, 这与本研究中术后骨盆前倾角度增加的现象高度契合。该代偿并非手术直接后果, 而是患者在固有肌力缺陷背景下, 为适应新力线而采取的被动生物力学调整, 恰好反映了原发肌力缺陷的持续影响。未来的康复方向应聚焦于循证干预。鉴于上述限制, 术后康复必须超越传统的关节活动度训练, 转而针对核心障碍: 肌力与运动控制进行强化。基于循证证据综述[18], 任务导向性、高强度的力量训练被推荐为改善脑瘫儿童运动功能的有效干预措施。因此, 针对本研究患者群体, 术后康复计划应整合针对髌、膝、踝伸肌的循证力量训练, 并融入真实场景下的任务特异性练习, 促进肌力增长向功能应用转化, 实现结构改善到功能获益的跨越。综上, GMFCS III 级患者固有的严重肌力低下及由此引发的生物力学代偿, 是导致 DFSSO 联合 PTA 术后结构改善无法有效转化为整体步态功能提升的根本原因。未来的治疗策略应强调“结构矫形”与“功能康复”并重, 在精准手术的基础上, 辅以基于循证医学的针对性肌力与功能训练, 方可为患者带来最大程度的临床收益。

对于术后骨盆前倾增加, 研究者认为可能与髌屈肌痉挛、髌伸肌无力或肌纤维相对过长、以及屈伸肌群间的力量失衡等有关[4] [19]。我们认为这可能源于髌周肌群的力量失衡, 特别是髌屈肌痉挛与髌伸肌相对无力之间的复杂相互作用。此外, 股骨短缩可能导致髌、膝双关节的腘绳肌功能性延长, 而 PTA 在增强伸膝力矩的同时, 也可能通过筋膜链对骨盆姿态产生额外影响。因此, 术前细致的髌周肌群评估和术后针对性的骨盆控制训练对优化疗效至关重要。

相关性分析显示, 术前膝屈曲角度与改善幅度呈显著正相关, 而术后残余角度与改善幅度呈负相关, 提示术前畸形越重且术后矫正越充分者疗效越佳。研究指出, 术前屈曲挛缩程度可作为术后步态改善的重要预测指标[20]。但肌力、姿态控制及康复依从性仍是关键影响因素[2]。然而, GDI 未显著改善, 可能 GMFCS III 级患儿基础运动功能损害较重有关。既往研究表明, 单一事件多水平外科手术(Single-event multilevel surgery, SEMLS)后步态质量提升与 GMFCS 等级密切相关, I~II 级患者改善显著, 而 III 级患者提升相对有限[21]。研究者在 10 年随访研究中发现, SEMLS 后膝伸展及步态改善可长期维持, 但部分患者需额外干预以维持疗效[22]。

本研究未见骨不连、神经损伤等严重并发症。这与 Park 等[13]针对脑瘫患儿行 DFSSO $\pm$ PTA 的中期随访研究显示, 该术式能显著改善膝伸展和步态质量, 但同样报告了术后骨盆前倾增加的情况, 仅见少数短期膝部不适, 无永久性神经或血管损伤。该研究认为短缩截骨可在避免牵张性神经并发症的同时恢复膝关节伸展力矩。Watts 等[23] PTA 术后应关注髌骨应力集中与轻度半脱位的风险, 但在本组病例中未观察到相关并发症, 可能与术中精确控制截骨量和髌腱移位幅度有关。

此外, 本研究中的所有患者均同期接受了多种辅助性软组织手术(见表 2), 这可能是影响最终步态功能结果的另一重要因素。本组患儿中最常实施的辅助手术为跟腱延长术(16/22 例)与内收肌松解术(15/22 例)。这些手术旨在协同纠正下肢多平面、多关节的复合畸形, 其本身是脑瘫痉挛型蹲伏步态 SEMLS 的

常规与必要组成部分[2][7]。然而,多部位的软组织松解与延长在缓解原发痉挛与挛缩的同时,也可能暂时性或永久性地改变下肢生物力学链条与肌肉本体感觉反馈[21]。例如,跟腱延长在改善踝背屈的同时,可能直接削弱蹬离期的推进力;内收肌与腘绳肌的延长则可能影响骨盆-髋关节的侧向与矢状面稳定性[4][19]。这些改变要求中枢神经系统在术后重新适应与整合新的运动模式。对于本研究中基础运动功能已严重受损的 GMFCS III 级患儿而言,其固有的运动控制障碍使得这种神经肌肉系统的再适应过程可能尤为困难且不完全[1][3],这或许部分解释了为何膝关节的局部结构改善未能有效转化为整体步态参数的显著提升。未来的研究有必要通过更精细的亚组分析,进一步辨析不同辅助手术组合对最终功能结局的具体影响。

本研究为单中心回顾性研究,样本量有限且缺乏对照组,统计功效可能不足;其次,本研究最终纳入的患者均为 GMFCS III 级,尽管这有助于聚焦于重度功能障碍群体并减少组内异质性,但结果可能无法推广至 GMFCS I 或 II 级的患者。步态分析仅基于运动学参数,未结合肌电与动力学指标,难以全面反映肌群协调及能量代谢变化。未来应通过多中心前瞻性研究,引入三维步态与动力学分析,纳入更广泛功能分级的患者以验证本术式的普适性,并按 GMFCS 分层探讨术后步态恢复模式。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突。

作者贡献声明

刘璇:起草文章、统计分析、分析和解释数据;刘倩:采集数据、技术或材料支持;陈维秀:行政、技术或材料支持;王若义:行政、技术或材料支持;王春田:采集数据、文章审阅、指导、支持性贡献。

致 谢

感谢本次科研及论文协作过程中导师及科室同事的指导和大力支持。

基金项目

济南市市校融合发展战略工程项目(JNSX2023009)。

参考文献

- [1] Graham, H.K., Rosenbaum, P., Paneth, N., Dan, B., Lin, J., Damiano, D.L., *et al.* (2016) Cerebral Palsy. *Nature Reviews Disease Primers*, 2, Article No. 15082. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2015.82>
- [2] Pandey, R.A., Johari, A.N. and Shetty, T. (2023) Crouch Gait in Cerebral Palsy: Current Concepts Review. *Indian Journal of Orthopaedics*, 57, 1913-1926. <https://doi.org/10.1007/s43465-023-01002-5>
- [3] Schwartz, M.H., Rozumalski, A. and Steele, K.M. (2016) Dynamic Motor Control Is Associated with Treatment Outcomes for Children with Cerebral Palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 58, 1139-1145. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13126>
- [4] Steele, K.M., Seth, A., Hicks, J.L., *et al.* (2010). Muscle Contributions to Support and Progression during Single-Limb Stance in Crouch Gait. *Journal of Biomechanics*, 38, 448-456.
- [5] Gillespie, C.S., Hall, B.J., George, A.M., Hennigan, D., Sneade, C., Cawker, S., *et al.* (2023) Selective Dorsal Rhizotomy in Non-Ambulant Children with Cerebral Palsy: A Multi-Center Prospective Study. *Child's Nervous System*, 40, 171-180. <https://doi.org/10.1007/s00381-023-06062-4>
- [6] Kay, R.M., McCarthy, J., Narayanan, U., Rhodes, J., Rutz, E., Shilt, J., *et al.* (2022) Finding Consensus for Hamstring Surgery in Ambulatory Children with Cerebral Palsy Using the Delphi Method. *Journal of Children's Orthopaedics*, 16, 55-64. <https://doi.org/10.1177/18632521221080474>
- [7] Rutz, E., Novacheck, T.F., Dreher, T., Davids, J.R., McCarthy, J., Kay, R.M., *et al.* (2022) Distal Femoral Extension Osteotomy and Patellar Tendon Advancement or Shortening in Ambulatory Children with Cerebral Palsy: A Modified

- Delphi Consensus Study and Literature Review. *Journal of Children's Orthopaedics*, **16**, 442-453. <https://doi.org/10.1177/18632521221137391>
- [8] Geisbüsch, A., Klotz, M.C.M., Putz, C., Renkawitz, T. and Horsch, A. (2022) Mid-Term Results of Distal Femoral Extension and Shortening Osteotomy in Treating Flexed Knee Gait in Children with Cerebral Palsy. *Children*, **9**, Article No. 1427. <https://doi.org/10.3390/children9101427>
- [9] Klotz, M.C.M., Hirsch, K., Heitzmann, D., Maier, M.W., Hagmann, S. and Dreher, T. (2016) Distal Femoral Extension and Shortening Osteotomy as a Part of Multilevel Surgery in Children with Cerebral Palsy. *World Journal of Pediatrics*, **13**, 353-359. <https://doi.org/10.1007/s12519-016-0086-y>
- [10] Healy, M.T., Schwartz, M.H., Stout, J.L., Gage, J.R. and Novacheck, T.F. (2011) Is Simultaneous Hamstring Lengthening Necessary When Performing Distal Femoral Extension Osteotomy and Patellar Tendon Advancement? *Gait & Posture*, **33**, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.08.014>
- [11] Erdal, O.A., Gorgun, B., Sarikaya, I.A. and Inan, M. (2021) Intraoperative Neuromonitoring during Distal Femoral Extension Osteotomy in Children with Cerebral Palsy. *Journal of Pediatric Orthopaedics B*, **31**, 194-201. <https://doi.org/10.1097/bpb.0000000000000882>
- [12] İnan, M., Sarikaya, İ.A., Yildirim, E. and Güven, M.F. (2015) Neurological Complications after Supracondylar Femoral Osteotomy in Cerebral Palsy. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, **35**, 290-295. <https://doi.org/10.1097/bpo.0000000000000264>
- [13] Park, H., Park, B.K., Park, K., Abdel-Baki, S.W., Rhee, I., Kim, C.W., et al. (2019) Distal Femoral Shortening Osteotomy for Severe Knee Flexion Contracture and Crouch Gait in Cerebral Palsy. *Journal of Clinical Medicine*, **8**, Article No. 1354. <https://doi.org/10.3390/jcm8091354>
- [14] Stout, J.L., Gage, J.R., Schwartz, M.H. and Novacheck, T.F. (2008) Distal Femoral Extension Osteotomy and Patellar Tendon Advancement to Treat Persistent Crouch Gait in Cerebral Palsy. *The Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*, **90**, 2470-2484. <https://doi.org/10.2106/jbjs.g.00327>
- [15] Novacheck, T.F., Stout, J.L., Gage, J.R. and Schwartz, M.H. (2009) Distal Femoral Extension Osteotomy and Patellar Tendon Advancement to Treat Persistent Crouch Gait in Cerebral Palsy: Surgical Technique. *Journal of Bone and Joint Surgery*, **91**, 271-286. <https://doi.org/10.2106/jbjs.i.00316>
- [16] Wiley, M.E. and Damiano, D.L. (1998) Lower-Extremity Strength Profiles in Spastic Cerebral Palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, **40**, 100-107. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1998.tb15369.x>
- [17] Arnold, A.S., Anderson, F.C., Pandey, M.G. and Delp, S.L. (2005) Muscular Contributions to Hip and Knee Extension during the Single Limb Stance Phase of Normal Gait: A Framework for Investigating the Causes of Crouch Gait. *Journal of Biomechanics*, **38**, 2181-2189. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.09.036>
- [18] 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**, 3-24. <https://doi.org/10.1007/s11910-020-1022-z>
- [19] Böhm, H., Hösl, M. and Döderlein, L. (2017) Predictors for Anterior Pelvic Tilt Following Surgical Correction of Flexed Knee Gait Including Patellar Tendon Shortening in Children with Cerebral Palsy. *Gait & Posture*, **54**, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.02.015>
- [20] Pantzar-Castilla, E., Chen, B.P., Miller, F. and Riad, J. (2021) The Influence of Preoperative Knee Flexion Contracture Severity on Short-Term Outcome of Orthopedic Surgery in Ambulatory Children with Bilateral Cerebral Palsy. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **22**, Article No. 481. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04362-x>
- [21] de Freitas Guardini, K.M., Kawamura, C.M., Lopes, J.A.F., Fujino, M.H., Blumetti, F.C. and de Moraes Filho, M.C. (2021) Factors Related to Better Outcomes after Single-Event Multilevel Surgery (SEMLS) in Patients with Cerebral Palsy. *Gait & Posture*, **86**, 260-265. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.03.032>
- [22] Visscher, R., Hasler, N., Freslier, M., Singh, N.B., Taylor, W.R., Brunner, R., et al. (2021) Long-Term Follow-Up after Multilevel Surgery in Cerebral Palsy. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **142**, 2131-2138. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-03797-0>
- [23] Watts, R.E., Gorbachova, T., Fritz, R.C., Saad, S.S., Lutz, A.M., Kim, J., et al. (2023) Patellar Tracking: An Old Problem with New Insights. *RadioGraphics*, **43**, e220177. <https://doi.org/10.1148/rg.220177>