

· 综 述 ·

前交叉韧带内增强修复的研究现状

曹慧源, 王广积*

(海南医学院附属海南医院, 海南海口 570100)

摘要: 前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 断裂无法愈合的观念近年来随着对基础生物学认识的提高正在发生改变。内增强技术的引入使人们对急性 ACL 断裂的修复重新产生了兴趣。内增强技术可以通过分担 ACL 修复后负荷以减少松弛和微动, 为 ACL 组织愈合提供稳定的环境。ACL 内增强修复是一种很有前途的治疗急性近端 ACL 断裂的方法, 它不仅可以达到标准前交叉韧带重建 (anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR) 的疗效, 而且可以减轻疼痛, 加快康复。然而, 在选择患者时年龄、运动水平和治疗时机等方面目前尚缺乏量化标准。本文针对前交叉韧带内增强修复的应用进展进行综述, 综合评估该技术的实际意义。

关键词: 前交叉韧带, 前交叉韧带修复, 关节镜, 内增强

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 15-1410-05

Current research in anterior cruciate ligament repair with internal brace // CAO Hui-yuan, WANG Guang-ji. Hainan Hospital, Hainan Medical College, Haikou 570100, China

Abstract: The concept that torn anterior cruciate ligament (ACL) cannot heal is changing with the comprehensive understanding the basic biology in recent years. There has been a renewed interest in repair of acute ACL tear with newer internal brace technique, which had been proven to reduce relaxation and micromotion by sharing the load of ACL after repair, and provides a stable environment for ACL tissue healing. The ACL repair with internal brace technique is a promising treatment for acute proximal ACL tear, which not only lead almost the equivalent efficacy to standard anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR), but also reduce the pain and speed up the rehabilitation. However, there still is a lack in terms of quantitative standards of age, level of sports participation and timing of treating while patient selected. In this paper, research progress in anterior cruciate ligament repair with internal brace is reviewed to evaluate the practical significance of this technique.

Key words: anterior cruciate ligament, anterior cruciate ligament repair, arthroscopy, internal brace

虽然目前肌腱移植 ACLR 是手术治疗 ACL 断裂的金标准, 但是研究显示只有 50%~65% 的休闲运动员恢复到受伤前的运动水平, 仍存在不同程度的膝前疼痛、本体感觉丧失、腘绳肌力量下降、临床失败等问题^[1-3]。ACLR 康复周期较长, 患者平均在 11 周后恢复工作, 9~12 个月后开始逐渐恢复运动^[4]。过去人们普遍认为断裂的 ACL 无法愈合且导致膝关节稳定性丧失, 随着现代关节镜手术技术进步、对 ACL 愈合的基础生物学认识的提高和内增强技术引入, 人们对急性 ACL 断裂的修复再次提起兴趣^[5]。Costa-Paz 等^[6]和 Steadman 等^[7]的研究证实近端 ACL 断裂是可以愈合的。近年来研究提出使用内增强技术的激进型修复, 通过术后负荷缓解张力导致的

松弛和微动, 配合加速康复方案改善整体预后^[8]。本文针对前交叉韧带内增强修复的应用进展进行综述, 综合评估该技术的实际意义。

1 内增强技术

内增强技术通过使用增强装置分担负荷来保护修复的 ACL, 进而提高手术成功率。该技术已被广泛用于踝关节外侧稳定性重建、跟腱修复、肘尺侧副韧带修复、十字韧带撕脱骨折治疗、内侧副韧带重建等治疗中, 力学性能和生物相容性表现良好^[9]。动态韧带内稳定术 (dynamic intraligamentary stabilization, DIS)^[10] 和内增强韧带增大术 (internal brace ligament

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.15.13

作者简介: 曹慧源, 住院医师, 研究方向: 运动医学, (电话) 13098978532, (电子信箱) caohuiyuan1996@163.com

* 通信作者: 王广积, (电子信箱) guangjiwang@aliyun.com

augmentation, IBLA)^[11]是目前主要的 ACL 内增强修复技术, 被证实可有效限制缝合修复处的缝隙扩大, 为肌腱愈合提供稳定的环境, 并改善术后膝关节功能评分^[12]。

1.1 DIS

DIS 技术经骨道用缝合线将 ACL 的胫骨残端缝合并固定到股骨端, 从而恢复了 ACL 的解剖位置。再用 1 根高强度缝线作为内增强装置, 经骨道穿过膝关节, 穿过撕裂的 ACL 中间, 支架从胫骨止点后方通过, 以防止损伤 ACL 胫骨端血供和神经。在股骨侧, 支架通过股骨解剖止点, 用微型钛板固定。胫骨使用动态弹簧-螺钉系统固定产生张力。根据患者的性别, 将胫骨近端在一个恒定的后抽屉位置, 施加 50~80 N 的力固定。内置机制允许 8 mm 的动态偏移, 确保绳索在整个运动范围内保持持续的张力。

1.2 IBLA

IBLA 是用缝合线套索将 ACL 近端断裂的残端通过股骨骨道与股骨外侧髁的内侧壁或近端残端拉近。然后用高强度缝线通过骨道穿过膝关节, 微型钛板固定在股骨上, 沿交叉韧带从股骨止点延伸到胫骨止点, 用外排锚钉固定在胫骨上。内增强装置作为二级静态稳定装置, 通过在愈合阶段保护韧带和支持早期动员来促进韧带的自然愈合。

2 研究基础

2.1 组织学研究

由于 ACL 潜在愈合能力有限, ACL 损伤的自然愈合过程缓慢且形成瘢痕组织, 无法再现原始生物学和机械特性^[13]。韧带愈合的 3 个主要级联阶段已被定义为对损伤的反应, 包括损伤早期的炎症阶段(炎症细胞聚集, 纤维蛋白凝结, 促血管生成和增殖生长因子释放)、增殖阶段(成纤维细胞增殖伴胶原基质生成填补损伤, 血管形成)及重塑阶段(在应力作用下肌腱细胞减少, 基质重新排列)^[14]。Murray 等^[15]通过体外细胞培养试验与体内组织学和免疫组织化学技术相结合, 研究发现受损内侧副韧带(medial collateral ligament, MCL)和 ACL 细胞具有相当的增殖率, 并且每条韧带在断裂后都能够重建血管。在损伤后 1 年的时间点能观察到韧带内胶原蛋白生成。ACL 和 MCL 内在愈合反应存在差异。ACL 受伤部位由于关节内滑液冲刷和关节运动的作用, 使得早期愈合所需的纤维蛋白/血小板支架无法形成。相比之下, 在损伤的 MCL 中, 可以形成稳定断

端的血凝块。这个临时支架允许 MCL 组织生长, 最终愈合。ACL 中无法形成稳定临时支架可能是其无法愈合的关键机制^[16]。另外, ACL 的动脉血液供应来自滑膜内的网状网络, 近端密度最大, 韧带体部和远端 1/3 的血供相对较差^[17]。此外最近的一项研究还发现与完整韧带相比, ACL 撕裂后患者的血管数量会显著增加, 这增加了支持 ACL 愈合潜力的证据^[18]。

2.2 生物力学研究

Bachmaier 等^[12]对猪模型中不同固定形式的 ACL 内增强修复进行生物力学研究发现内增强技术可以减少修复术后 ACL 的峰值负荷, 并将间隙限制在 3 mm 以内, 形成临时支架, 为早期的炎症阶段和增殖阶段提供稳定环境。改善当前 ACL 修复的力学特性, 允许早期活动范围和加速康复。Häberli 等^[19]进行了一项生物力学研究, 通过模拟 ACL 内增强修复后早期术后康复阶段的膝关节活动过程, 在对 8 例平均年龄 35.5 岁的新鲜冷冻人体尸体膝关节在进行 50 000 次 0°~70°屈伸运动后评估不同角度的 Lachman/KT-1000 试验前后位移增加量不多, 并指出该程序并不影响 ACL 愈合。此外, Kohl 等^[20]将 6 例从尸体中采集的人膝关节的髌骨肌腱、关节囊和所有与胫骨和股骨相连的肌肉附件全部去除, 只保留完整的侧副韧带和前后交叉韧带, 然后对 DIS 术后膝关节生物力学进行评估, 发现进行 50 个循环后 DIS 术后膝关节的胫骨前后移动距离从 3.0 mm 增加到 3.2 mm; 远远小于不采用 ACL 内增强修复的膝关节前后移动距离(从 3.2 mm 增加到 11.2 mm)。认为该技术可以将撕裂的 ACL 两端紧密连接, 为 ACL 的愈合创造适当的环境, 并为膝关节提供足够的前后稳定性。Schliemann 等^[21]研究将预设 60 N 或 80 N 张力的 DIS 修复 ACL 与完整 ACL 的膝关节相比较, 在模拟 Lachman/KT-1000 试验和旋转移位试验中的胫骨平台前移显著减少。同时预设 60 N 还是 80 N 张力对 DIS 修复 ACL 术后膝关节运动也有显著影响, 预设张力为 80 N 的 DIS 修复 ACL 与完整的前 ACL 在限制胫骨前移方面无显著差异。然而, 预设张力为 60 N 的 DIS 修复 ACL 不能恢复到完整前 ACL 的膝关节所有屈曲程度的膝关节运动学。得到的结论是 ACL 内增强修复可以在 ACL 愈合期间为膝关节稳定提供支持, 认为该技术生在物力学上优于其他 ACL 断裂手术治疗方法。Massey 等^[22]对 20 例股骨近端撕脱型 ACL 损伤的尸体膝关节分别进行单纯 ACL 修复或内增强修复, 进行比较发现内增强修复组的平均失效负

荷 693 N 远大于单纯修复组 279 N；刚度和失效能量方面也均高于单纯修复组（83 N/mm vs 58 N/mm 和 16.88 J vs 6.91 J）。另外还指出了2种方法的失效模式有所不同，其中80%的单纯修复失败是由于连接ACL缝合线失效，内增强修复组90%的失败是由于纽扣钢板拉过股骨。所以内增强修复的失效负荷与患者骨密度呈高度正相关。

3 临床研究

在重返运动方面，Ortmaier等^[23]研究ACL内增强修复和使用腘绳肌腱（hamstring tendon, HT）或股四头肌肌腱（quadriceps tendon, QT）ACLR术后重返运动的情况。随访时间为12个月，重返运动率91.3%，各组内或组间运动项目的数量和恢复时间差异均无统计学意义。可以认为在重返运动方面ACL内增强修复和自体HT及QT ACLR的患者满意度均良好。长期随访显示ACL内增强修复和ACLR患者的膝关节功能进行评价也没有显著差异^[24, 25]。虽然ACL内增强修复和ACLR获得了相似的功能结果，但Bieri等^[26]将53例ACL内增强修复患者与ACLR患者匹配，在损伤后2年的期间进行随访分析发现，ACL内增强修复患者比接受ACLR的患者提前1个月恢复工作，两组在治疗费用、翻修率和二次关节镜检查方面没有差异。ACL内增强修复手术要求时机较早，这可能是导致恢复时间差异的主要原因。对于手术时机的选择还需要更多的对照研究和实践经验。作者认为ACL内增强修复相比于ACLR的创伤要小，所以理论上在术后疼痛方面也会减轻。为了确定接受ACL内增强修复的患者是否比接受ACLR的患者经历的短期疼痛更少，Connolly等^[27]对比36例ACL内增强修复患者和71例ACLR患者术后的平均视觉模拟量表疼痛评分，发现接受ACL内增强修复的患者术后2周左右疼痛评分（ 2.8 ± 1.8 ）低于ACLR患者（ 4.1 ± 2.3 ），说明接受ACL内增强修复可以减轻患者经历的术后早期疼痛，减少止痛药用量。Vermeijden等^[28]共纳入21例一侧行ACLR，另一侧行ACL内增强修复患者进行2~10年的随访，33%的人喜欢修复膝关节，11%的人喜欢重建膝关节，56%的人没有偏好；然而，78%的人表示修复的膝关节在康复期间疼痛较小，83%的人报告修复后活动范围恢复更快。表明修复的膝关节在康复期间疼痛减轻，功能恢复较早。对于膝关节稳定性和再撕裂风险，Glasbrenner等^[29]认为ACL内增强修复术后5年，膝

关节稳定性和患者满意度与ACLR后相当。但是研究还指出对于年轻和损伤前活动水平高的是两组复发不稳定和翻修率明显大于ACLR。支持对年龄>25岁且活动水平不高的急性ACL撕裂患者选择ACL内增强修复，对于年轻或者活动水平高的患者进行这种治疗时必须慎重考虑^[30, 31]。

4 ACL内增强修复的意义

ACL内增强修复骨道大小不到ACLR所需的骨道的一半，侵入性较小，避免了取腱，术后膝前疼痛、供体区无力等并发症发生少，对膝关节稳定性及功能有一定帮助；保留了ACL原生组织对临床结局和预后有重要意义。ACL滑膜覆盖的血管为组织细胞增殖提供支持^[32]，尤其在近端血管更加丰富。在Jiang等^[33]的研究中，在ACL内增强修复组中观察到典型的血管结构，包括许多红细胞。这表明早期修复有效地保留了残端的血管结构，并对组织愈合有显著影响。此外，本体感受器可以将膝关节的位置和运动姿势反馈给大脑，保留ACL组织中的本体感受器有利于康复锻炼和恢复运动^[34]。ACL内增强修复相比与重建来说能更好的恢复ACL的天然解剖，膝关节生物力学更加正常而且发生创伤后骨关节炎的风险降低^[5]。另一个优点是，在发生再次破裂时可以执行ACLR的难度相较于翻修更低。

5 局限性

首先该技术对于手术时机要求较严格，陈旧性韧带损伤修复效果欠佳。据报道，关节镜ACLR治疗早期与晚期ACL损伤的临床疗效相当^[35]，而ACL内增强修复则应在ACL断裂后的14~21d内进行^[36]。但是在某些医疗机构中，并不总能得到及时的诊治。目前还没有关于损伤后较长时间再尝试修复的报告，ACL断裂后随着时间的推移，残端在失去血供的情况下会逐渐向两端短缩，直至完全瘢痕吸收^[37]，组织质量和可修复性会随着时间的推移而恶化。其次对损伤部位有要求，韧带远端损伤效果不明确，研究结果表明，近端撕裂模式比远端或中间部分撕裂具有更好的愈合潜力，使用ACL内增强修复可以提高手术的成功率^[38]。肌腱质量也是重要影响因素，肌腱断端已经萎缩吸收或者损伤后肌腱组织紊乱则张力不支持早期ACL内增强修复^[39]。

6 小 结

过去 10 年的一个重要发现是 ACL 能够愈合并重新稳定膝关节, 使 ACL 内增强修复再次成为人们关注的焦点。使用 ACL 内增强修复几乎能达到与标准 ACLR 相等的疗效, 而且可能减少手术并发症并缩短术后康复周期。ACL 内增强修复是一种很有前途的治疗急性近端 ACL 撕裂的方法。它不仅可以达到 ACLR 的疗效, 而且可以减轻疼痛, 加快康复。然而, 在选择患者时的年龄、运动参与水平和治疗时间等方面都有局限性。支持 ACL 内增强修复的理想患者是有急性 ACL 近端断裂的 25 岁以上的非高水平运动员。

参考文献

- [1] Rousseau R, Labruyere C, Kajetanek C, et al. Complications after anterior cruciate ligament reconstruction and their relation to the type of graft: a prospective study of 958 cases [J]. *Am J Sports Med*, 2019, 47 (11): 2543–2549.
- [2] Sandon A, Engström B, Forssblad M. High risk of further anterior cruciate ligament injury in a 10-year follow-up study of anterior cruciate ligament-reconstructed soccer players in the Swedish national knee ligament registry [J]. *Arthroscopy*, 2020, 36 (1): 189–195.
- [3] Sonnery-Cottet B, Saithna A. Editorial commentary: Let's all agree—anterior cruciate ligament reconstruction outcomes need to be improved and extra-articular procedures have an essential role [J]. *Arthroscopy*, 2020, 36 (6): 1702–1705.
- [4] Musahl V, Karlsson J. Anterior cruciate ligament tear [J]. *N Engl J Med*, 2019, 380 (24): 2341–2348.
- [5] Kiapour AM, Murray MM. Basic science of anterior cruciate ligament injury and repair [J]. *Bone Joint Res*, 2014, 3 (2): 20–31.
- [6] Costa-Paz M, Ayerza MA, Tanoira I, et al. Spontaneous healing in complete ACL ruptures: a clinical and MRI study [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2012, 470 (4): 979–985.
- [7] Steadman JR, Matheny LM, Briggs KK, et al. Outcomes following healing response in older, active patients: a primary anterior cruciate ligament repair technique [J]. *J Knee Surg*, 2012, 25 (3): 255–260.
- [8] Heusdens CHW. ACL repair: a game changer or will history repeat itself? A critical appraisal [J]. *J Clin Med*, 2021, 10 (5): 912.
- [9] 徐飞, 李彦林, 王国梁, 等. 内减张技术在辅助前交叉韧带重建中的研究进展 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2021, 35 (12): 1630–1636.
- [10] Egli S, Kohlhof H, Zumstein M, et al. Dynamic intraligamentary stabilization: novel technique for preserving the ruptured ACL [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2015, 23 (4): 1215–1221.
- [11] Mackay GM, Blyth MJ, Anthony I, et al. A review of ligament augmentation with the Internal Brace™: the surgical principle is described for the lateral ankle ligament and ACL repair in particular, and a comprehensive review of other surgical applications and techniques is presented [J]. *Surg Technol Int*, 2015, 26: 239–255.
- [12] Bachmaier S, DiFelice GS, Sonnery-Cottet B, et al. Treatment of acute proximal anterior cruciate ligament tears—part 2: the role of internal bracing on gap formation and stabilization of repair techniques [J]. *Orthop J Sports Med*, 2020, 8 (1): 2325967119897423.
- [13] Amini M, Venkatesan JK, Liu W, et al. Advanced gene therapy strategies for the repair of ACL injuries [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23 (22): 14467.
- [14] Murray MM. Current status and potential of primary ACL repair [J]. *Clin Sports Med*, 2009, 28 (1): 51–61.
- [15] Murray MM, Fleming BC. Biology of anterior cruciate ligament injury and repair: kappa delta ann doner vaughn award paper 2013 [J]. *J Orthop Res*, 2013, 31 (10): 1501–1506.
- [16] Murray MM. Optimizing outcomes of ACL surgery—is autograft reconstruction the only reasonable option [J]. *J Orthop Res*, 2021, 39 (9): 1843–1850.
- [17] Toy BJ, Yeasting RA, Morse DE, et al. Arterial supply to the human anterior cruciate ligament [J]. *J Athl Train*, 1995, 30 (2): 149–152.
- [18] Takeuchi S, Rothrauff BB, Kanto R, et al. Superb microvascular imaging (SMI) detects increased vascularity of the torn anterior cruciate ligament [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30 (1): 93–101.
- [19] Häberli J, Henle P, Acklin YP, et al. Knee joint kinematics with dynamic augmentation of primary anterior cruciate ligament repair—a biomechanical study [J]. *J Exp Orthop*, 2016, 3 (1): 29.
- [20] Kohl S, Evangelopoulos DS, Ahmad SS, et al. A novel technique, dynamic intraligamentary stabilization creates optimal conditions for primary ACL healing: a preliminary biomechanical study [J]. *Knee*, 2014, 21 (2): 477–480.
- [21] Schliemann B, Lenschow S, Domnick C, et al. Knee joint kinematics after dynamic intraligamentary stabilization: cadaveric study on a novel anterior cruciate ligament repair technique [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2017, 25 (4): 1184–1190.
- [22] Massey P, Parker D, McClary K, et al. Biomechanical comparison of anterior cruciate ligament repair with internal brace augmentation versus anterior cruciate ligament repair without augmentation [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2020, 77: 105065.
- [23] Ortmaier R, Fink C, Schobersberger W, et al. Return to sports after anterior cruciate ligament injury: a matched-pair analysis of repair with internal brace and reconstruction using hamstring or quadriceps tendons [J]. *Sportverletz Sportschaden*, 2021, 35 (1): 36–44.
- [24] Schneider KN, Schliemann B, Gosheger G, et al. Good to excellent functional short-term outcome and low revision rates following primary anterior cruciate ligament repair using suture augmentation [J]. *J Clin Med*, 2020, 9 (10): 3068.
- [25] Heusdens CHW, Blockhuys K, Roelant E, et al. Suture tape aug-

- mentation ACL repair, stable knee, and favorable PROMs, but a re-rupture rate of 11% within 2 years [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2021, 29 (11): 3706-3714.
- [26] Bieri KS, Scholz SM, Kohl S, et al. Dynamic intraligamentary stabilization versus conventional ACL reconstruction: a matched study on return to work [J]. *Injury*, 2017, 48 (6): 1243-1248.
- [27] Connolly PT, Zittel KW, Panish BJ, et al. A comparison of postoperative pain between anterior cruciate ligament reconstruction and repair [J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2021, 31 (7): 1403-1409.
- [28] Vermeijden HD, Monaco E, Marzilli F, et al. Primary repair versus reconstruction in patients with bilateral anterior cruciate ligament injuries: What do patients prefer [J]. *Adv Orthop*, 2022, 2022: 3558311.
- [29] Glasbrenner J, Raschke MJ, Kittl C, et al. Comparable instrumented knee joint laxity and patient-reported outcomes after ACL repair with dynamic intraligamentary stabilization or ACL reconstruction: 5-year results of a randomized controlled trial [J]. *Am J Sports Med*, 2022, 50 (12): 3256-3264.
- [30] Ahmad SS, Schürholz K, Liechti EF, et al. Seventy percent long-term survival of the repaired ACL after dynamic intraligamentary stabilization [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2020, 28 (2): 594-598.
- [31] Hoogeslag RAG, Huis In't Veld R, Brouwer RW, et al. Acute anterior cruciate ligament rupture: repair or reconstruction? Five-year results of a randomized controlled clinical trial [J]. *Am J Sports Med*, 2022, 50 (7): 1779-1787.
- [32] Takahashi T, Kondo E, Yasuda K, et al. Effects of remnant tissue preservation on the tendon graft in anterior cruciate ligament reconstruction: a biomechanical and histological study [J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44 (7): 1708-1716.
- [33] Jiang L, Chen T, Sun S, et al. Nonbone marrow CD34+ cells are crucial for endothelial repair of injured artery [J]. *Circ Res*, 2021, 129 (8): 146-165.
- [34] 李光磊, 王宝鹏, 张汉宽, 等. 前交叉韧带解剖学研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (16): 1491-1495.
- [35] 张振, 赵甲军, 左坦坦, 等. 关节镜下前交叉韧带重建的手术时机 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2020, 28 (4): 307-313.
- [36] Malahias MA, Chytas D, Nakamura K, et al. A narrative review of four different new techniques in primary anterior cruciate ligament repair: "Back to the future" or another trend [J]. *Sports Med Open*, 2018, 4 (1): 37.
- [37] 周鹏, 邵宏斌, 杨勤旭, 等. 前交叉韧带重建膝关节本体感觉的恢复 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019, 27 (12): 1073-1077.
- [38] van Eck CF, Limpisvasti O, ElAttrache NS. Is there a role for internal bracing and repair of the anterior cruciate ligament? A systematic literature review [J]. *Am J Sports Med*, 2018, 46 (9): 2291-2298.
- [39] Haviv B, Kittani M, Yaari L, et al. The detached stump of the torn anterior cruciate ligament adheres to the femoral notch wall and then to the posterior cruciate ligament within 6 months from injury [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27 (8): 2653-2658.
- (收稿:2023-02-01 修回:2023-03-24)
(同行评议专家: 龚继承 陈 磊 贾丙申)
(本文编辑: 宁 桦)

(上接 1409 页)

- [29] Williams SA, Elliott C, Valentine J, et al. Combining strength training and botulinum neurotoxin intervention in children with cerebral palsy: the impact on muscle morphology and strength [J]. *Disabil Rehabil*, 2013, 35 (7): 596-605.
- [30] Chruscikowski E, Fry N, Noble JJ, et al. Selective motor control correlates with gait abnormality in children with cerebral palsy [J]. *Gait Posture*, 2017, 52 (1): 107-109.
- [31] Zhou JY, Lowe E, Cahill-Rowley K, et al. Influence of impaired selective motor control on gait in children with cerebral palsy [J]. *J Child Orthop*, 2019, 13 (1): 73-81.
- [32] Kimberley TJ, Novak I, Boyd L, et al. Stepping up to rethink the future of rehabilitation: IV STEP considerations and inspirations [J]. *Pediatr Phys Ther*, 2017, 41 (suppl 3): S76-S85.
- (收稿:2022-08-25 修回:2023-02-10)
(同行评议专家: 臧建成 李贵涛)
(本文编辑: 宁 桦)