

863.

(6) 邓军民, 杨盛家, 余松兰, 等. 糖尿病患者的足底动力学分析 (J). 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(50): 9845-9847.

(7) 袁刚, 张木勋, 张建华. 糖尿病患者足底压力研究 (J). 中国糖尿病杂志, 2002, 10(5): 262-264.

(8) Begg L, Burns J. A comparison of insole materials on plantar pressure and comfort in the neuroischaemic diabetic foot (J). Clinical Biomechanics, 2008, 23(5): 710-711.

(9) Lobmann R, Kayser R, Kasten G, et al. Effects of preventative footwear on foot pressure as determined by pedobarography in diabetic patients: a prospective study (J). Diabetic Medicine, 2001, 18(4): 314-319.

(10) Tsai YC, Chang SL, Yang SW, et al. Effect of Insole and Sock Materials on Walking Plantar Pressure in Diabetic Patients (J). Journal of Biomechanics, 2007, 40(2): S448.

(11) Mulder G, Tenenhaus M, D'Souza GF. Reduction of diabetic foot ulcer healing times through use of advanced treatment modalities (J). International Journal of Lower Extremity Wounds, 2014, 13(4): 335-346.

(12) 杨川, 陈黎红, 严励, 等. 糖尿病护足鞋对足底压力的影响 (J). 中国糖尿病杂志, 2007, 15(11): 651-653.

(13) Mueller MJ, Lott DJ, Hastings MK, et al. Efficacy and mechanism of orthotic devices to unload metatarsal heads in people with diabetes and a history of ulcers (J). PHYS THER, 2006, 86(6): 833-842.

(14) Rizzo L, Tedeschi A, Fallani E, et al. Custom-Made orthosis and shoes in a structured follow-up program reduces the incidence of neuropathic ulcers in high-risk diabetic foot patients (J). International Journal of Lower Extremity Wounds, 2012, 11(1): 59-64.

〔文章编号〕 1007-0893(2021)05-0196-03

DOI: 10.16458/j.cnki.1007-0893.2021.05.088

前交叉韧带重建术后移植物的 MRI 评估研究进展

林伟强¹ 雷益^{2*} 吕嘉玲² 李顶夫²

(1. 广州医科大学研究生学院, 广东 广州 511436; 2. 深圳市第二人民医院, 广东 深圳 518035)

〔摘要〕 前交叉韧带重建术 (ACLR) 被广泛应用于前交叉韧带 (ACL) 损伤治疗, MRI 成为 ACLR 术后主要的随访方法。韧带移植物的愈合情况对患者康复计划的调整以及重返运动的时机选择至关重要。ACLR 术后初期, 移植物需要经历血管化、细胞增生、重塑等复杂的变化; 同时, ACLR 术后相关并发症、再损伤以及膝关节退行性变发生亦是临床关注的热点。笔者就 ACLR 术后的 MRI 评估研究进展进行综述。

〔关键词〕 前交叉韧带重建术; 移植物; 磁共振成像

〔中图分类号〕 R 445.2 〔文献标识码〕 A

前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 损伤是膝关节疾病中较为常见的一种类型, ACL 损伤在外伤人群中的发生率为 20.9%^[1], 而前交叉韧带重建术 (anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR) 是 ACL 断裂首选的方法^[2-5]。目前膝关节主、客观功能评分是临床上 ACLR 术后随访常用的评分指标, 但容易受手术操作者经验及患者肌肉紧张程度等因素的影响; 关节镜可以直视韧带移植物的

恢复情况, 但不作为随访的首选, 而且对骨道段的移植物无法评价。MRI 具有无创、无辐射等优点, 具有良好的软组织分辨率, 成为 ACLR 术后评估肌腱移植物愈合及韧带化过程的首选。随着影像技术学的发展, 更多 MRI 的功能成像序列 (如 T2 mapping, 扩散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI)) 等亦逐渐使用于 ACLR 后移植物的评估与随访。

〔收稿日期〕 2020 - 12 - 16

〔基金项目〕 深圳市卫生计生系统科研项目资助课题 (SZFZ2018061)

〔作者简介〕 林伟强, 男, 住院医师, 主要从事放射科工作。

〔*通信作者〕 雷益 (E-mail: leiyi2011@163.com; Tel: 13602658583)

1 ACLR 术后短期的移植物信号改变

动物实验表明, ACLR 术后移植物短期内经历血管化、细胞增生、重塑等复杂的病理生理变化^[6-8]。ACLR 术后, 移植物 MRI 信号变化复杂, 于 9~12 个月时移植物 T2 信号达到峰值, 随着时间的延长, ACL 移植物 T2 信号逐渐降低^[9-12], 但移植物成熟期各报道不尽相同, 有部分学者发现因为移植物的不同、个人原因等, 可见少部分移植物 12 个月后 T2 信号未达到峰值, 随着时间仍在增长, 而血管重建过程的延长, 提示移植物韧带化推迟, 这也得到了 Malinin 等学者的组织学认证^[13-14]。

目前, 大部分文献对移植物的评估主要通过信噪比 (signal to noise ratio, SNQ) 进行量化评估。郑晓熙等^[15]研究表明, ACLR 术后 2 年, ACL 移植物 SNQ 值较术后 6 月及 12 月显著降低, 提示 ACL 移植物进入成熟期。结合前交叉韧带重建术后 6 个月移植物 SNQ 值及临床主观评分, 可预测术后 12 个月 ACL 移植物的愈合情况^[16]。

随着磁共振功能成像的发展, 一些新的技术, 如 T1rho、T2 mapping、DTI 等逐步应用至 ACLR 术后移植物的随访。T2 弛豫时间可以监测胶原蛋白的构象、含量及组织水分的变化, 在分子水平进行量化评估。另外, 研究表明移植物的容积与韧带移植物的特性也密切相关。一项猪 ACL 修复 / 重建模型的研究表明移植物的体积和 T2 弛豫时间两者相结合, 与单独使用每个变量相比, 可以提高对移植物结构性能的预测^[17]。

2 超短回波时间成像分析的应用

超短回波时间 (ultrashort echo time, UTE) 通过组织内水的状态差异而成像特性, 快速衰变短 T2 信号代表与 ACL 移植物组织内胶原结构紧密结合的水, 而慢衰变长 T2 信号代表自由组织水。UTE-T2 和 T2 mapping 在评估人体膝关节 ACL 移植物成熟程度方面的潜在临床应用价值, 与组织学评估的时间过程一致^[18]。Fukuda T^[19]等学者初步研究证明了 UTE 快速衰变 T2 的定量分析可反映移植修复过程中胶原重塑的潜在可能, 评估前交叉韧带成熟度的纵向变化。Chu CR 等学者^[18]研究发现 UTE-T2 提示移植物在术后 6 个月明显增高, T2 和 UTE-T2 显示 6 个月~1 年的移植物成分相对稳定, 随后从 1~2 年逐渐降低, 提示移植物胶原结构的逐渐成熟; 两组病人在不同的磁共振扫描仪得出的结果没有统计学差异, 提示 T2 和 UTE-T2 测量的可重复性。

3 DTI 成像的应用

DTI 是利用组织中水分子扩散运动存在各向异性的原理, 能够定量地评价纤维的走行和连接, 反映纤维结构的扩散各向异性特征^[20-22], 已普遍用于中枢神经系统白质纤维束的显示, 在其它富含纤维组织中的应用也越来越多, 但应用于韧带成像的报道相对较少^[22-25]。

DTI 及弥散张量纤维束成像 (diffusion tensor tractography, DTT) 最常见的 DTI 参数包括: (1) 分数各向异性 (fractional anisotropy, FA), 描述扩散过程各向异性的程度, 范围在 0 (各向同性) 和 1 (各向异性) 之间; (2) 平均扩散系数 (mean diffusivity, MD), 即水的总体自由扩散系数。FA 是用于描述组织各向异性程度的 DTI 的定量指标。陈立勋等^[26] 研究表明 DTT 对正常前交叉韧带体部显示良好, 韧带体部表现为不同的颜色, 代表不同的纤维走向, 符合前交叉韧带不同于其它韧带的内部波浪状纤维走向。Pieter Van Dyck 等人^[27] 研究表明, 不同阶段的 ACL 移植物有不同的 FA 值和 ADC 值, 术后最长的患者 (10 年) 的 FA 值明显高于其他患者; 在 ACLR 术后 4~8 个月, 滑膜组织包裹移植物, 从而提供其血管供应, 导致细胞外基质的改变, 增加细胞内水分含量, 减少胶原的定向, 减少胶原纤维密度^[28], 即 FA 值下降, MD 值升高; DTI 对于前交叉韧带移植物每个时期的影像学评估是可行的; 随着移植物重塑阶段的进展, 移植物重新结构将朝向天然 ACL 的性质发展, 随着含水量和胶原蛋白纤维重新获得其组织并达到平行排列更密集, 而 FA 随时间增加, MD 随时间减少。杨献峰等^[29] 研究者对 ACL 移植物的上 1/3、中、下 1/3 进行测量, 而他们得到 ACL 移植物的 FA 值明显高于正常前交叉韧带, 三项指标的 ADC 值均低于正常前交叉韧带; 提示 ACL 移植物比正常前交叉韧带更具有各向异性; 但 DTI 无法显示 ACL 移植物的上下附着处, 主要原因可能是因为受其邻近骨皮质引起磁场不均匀的敏感性增高所致。

目前影像学表现逐渐成为 ACLR 术后的主要疗效评分的辅助检查方向, 通过影像学的表现评估 ACLR 术后膝关节的稳定性, 移植物、并发症等愈合情况, 再结合临床检查, 更加全面、明确地为接下来的康复或治疗方法提供了有效的诊断依据。而现在的常规 MRI 评分系统操作较为复杂, 而功能成像应用的范围越来越广泛, 而相关性序列 (T2-mapping、DTI 等) 的开发与应用, 可以对于 ACL 及其移植物进行更直观的评估, 得到微观水平的信息; 在未来, 量化的影像学指标结合临床相关检查, 对 ACL 及其移植物进行更加有效、简便的评估。

〔参考文献〕

- (1) 丁兆明, 陈兵. 膝关节前交叉韧带损伤的外伤原因流行病学调查 (J). 滨州医学院学报, 2020, 43(1): 27-29.
- (2) Dargel J, Gotter M, Mader K, et al. Biomechanics of the anterior cruciate ligament and implications for surgical reconstruction (J). Strategies Trauma Limb Reconstr, 2007, 2(1): 1-12.
- (3) Toritsuka Y, Amano H, Kuwano M, et al. Outcome of double-bundle ACL reconstruction using hamstring tendons (J). Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2009, 17(5):

- 456-463.
- (4) Marx A, Siebold R, Sobau C, et al. ACL reconstruction in skeletally immature patients (J) . Z Orthop Unfall, 2008, 146(6): 715-719.
- (5) Clayton RA, Court-Brown CM. The epidemiology of musculoskeletal tendinous and ligamentous injuries (J) . Injury, 2008, 39(12): 1338-1344.
- (6) Takahashi N, Yabuki S, Aoki Y, et al. Pathomechanisms of nerve root injury caused by disc herniation: an experimental study of mechanical compression and chemical irritation (J) . Spine, 2003, 28(5): 435-441.
- (7) Cho DC, Cheong JH, Yang MS, et al. The Effect of Minocycline on Motor Neuron Recovery and Neuropathic Pain in a Rat Model of Spinal Cord Injury (J) . Journal of Korean Neurosurgical Society, 2011, 49(2): 83-91.
- (8) Munro KM, Perreau VM, Turnley AM, et al. Differential Gene Expression in the EphA4 Knockout Spinal Cord and Analysis of the Inflammatory Response Following Spinal Cord Injury (J) . PLoS ONE, 2012, 7(5): e37635.
- (9) 李梅, 李明华. 前交叉韧带重建后的MRI评价 (J) . 国外医学(临床放射学分册), 2004, 27(5): 426.
- (10) 邓军, 梁碧玲, 陈建宇, 等. 前交叉韧带重建术后三维MRI表现 (J) . 中华放射学杂志, 2011, 45(12): 1143-1146.
- (11) Li H, Tao H, Cho S, et al. Difference in graft maturity of the reconstructed anterior cruciate ligament 2 years postoperatively: a comparison between autografts and allografts in young men using clinical and 3. 0T magnetic resonance imaging evaluation (J) . Am J Sports Med, 2012, 40(7): 1519-1526.
- (12) 吴艳, 曾旭文, 梁治平, 等. MR评价前交叉韧带重建术后膝关节稳定性 (J) . 中山大学学报(医学科学版), 2015, 36(2): 257-263.
- (13) Malinin TI, Levitt RL, Bashore C et al. A study of retrieved allografts used to replace anterior cruciate ligaments (J) . Arthroscopy, 2002, 18(2): 163-170.
- (14) Muramatsu K, Hachiya Y, Izawa H. Serial evaluation of human anterior cruciate ligament grafts by contrast-enhanced magnetic resonance imaging: comparison of allografts and autografts (J) . Arthroscopy, 2008, 24(9): 1038-1044.
- (15) 郑晓熙, 王成, 龚熹. 前交叉韧带重建术后移植愈合的临床研究 (J) . 中国运动医学杂志, 2017, 16(11): 956-960.
- (16) Li H, Chen J, Li H, et al, MRI-based ACL graft maturity does not predict clinical and functional outcomes during the first year after ACL reconstruction (J) . Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2017, 25(10): 3171-3178.
- (17) Biercevicz AM, Miranda DL, Machan JT, et al. In situ, noninvasive, T2*-weighted MRI-derived parameters predict ex vivo structural properties of an anterior cruciate ligament reconstruction or bioenhanced primary repair in a porcine model (J) . Am J Sports Med, 2013, 41(3): 560-566.
- (18) Chu CR, Williams AA. Quantitative MRI UTE-T2*and T2*Show Progressive and Continued Graft Maturation Over 2 Years in Human Patients After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction (J) . Orthop J Sports Med, 2019, 7(8): 232596711986305-232596711986305.
- (19) Fukuda T, Wengler K, Tank D, et al. Abbreviated quantitative UTE imaging in anterior cruciate ligament reconstruction (J) . BMC Musculoskelet Disord, 2019, 20(1): 426-440.
- (20) Bittersohl B, Miese FR, Hosalkar HS, et al. T2star mapping of hip joint cartilage in various histological grades of degeneration (J) . Osteoarthritis, 2012, 20(7): 653-660.
- (21) Florisson JM, Dudink J, Koning IV, et al. Assessment of white matter microstructural integrity in children with syndromic craniosynostosis: a diffusion-tensor imaging study (J) . Radiology, 2011, 261(2): 534-541.
- (22) Zijta FM, Lakeman M, Froeling M, et al. Evaluation of the female pelvic floor in pelvic organ prolapse using 3. 0-Tesla diffusion tensor imaging and fibre tractography (J) . Eur Radiol, 2012, 22(12): 2806-2813.
- (23) 李敏. DTI检测膝关节早期骨性关节炎软骨退变的应用进展 (J) . 实用放射学杂志, 2016, 32(1): 137-140.
- (24) Zhu J, Zhang X, Ma Y, et al. Ultrastructural and morphological characteristics of human anterior cruciate ligament and hamstring tendons (J) . Anatomical Record Advances In Integrative Anatomy And Evolutionary Biology, 2012, 295(9): 1430-1436.
- (25) Jones J, Lerner A, Kim PE, et al. Diffusion tensor imaging in the assessment of ossification of the posterior longitudinal ligament: a report on preliminary results in 3 cases and review of the literature (J) . Neurosurg focus, 2011, 30(3): E14.
- (26) 陈立勋, 赵衡, 李劲松, 等. 健康人前交叉韧带的扩散张量成像及其与MRI的比较 (J) . 中南大学学报(医学版), 2013, 38(6): 610-616.
- (27) Dyck PV, Froeling M, Smet ED, et al. Diffusion tensor imaging of the anterior cruciate ligament graft (J) . Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2017, 46(5): 1423-1432.
- (28) Janssen RP, Scheffler SU. Intra-articular remodelling of hamstring tendon grafts after anterior cruciate ligament reconstruction (J) . Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2014, 22(9): 2102-2108.
- (29) Yang XF, Chen DY, Shi DQ, et al. Diffusion Tensor Imaging for Anatomical and Quantitative Evaluation of the Anterior Cruciate Ligament and ACL Grafts (J) . Journal of Orthopaedic Translation, 2014, 2(4): 224.