

论 著 · 骨肌

基于T2 Mapping技术对慢性踝关节外侧不稳患者距腓前韧带质量的评价*

陈水斌¹ 林 毅¹ 罗爱芳¹
卢锦婷¹ 肖玉辉¹ 刘庆军^{2,*}1.第九〇九医院(厦门大学附属东南医院)
放射诊断科2.第九〇九医院(厦门大学附属东南医院)
骨科(福建 漳州 363000)

【摘要】目的 确定距腓前韧带(ATFL)的T2正常参考值,并探讨使用T2值定量评估慢性踝关节外侧不稳(CLA)患者ATFL质量的价值。方法 比较30例CLA患者和30例健康者(对照组)的临床和影像学资料。使用MRI T2* mapping技术测量ATFL的T2*值。采用多元线性回归模型根据年龄、身高和体重构建T2*值预测模型。分别计算受试者的T2*预测值、T2*比值(实际T2值/T2*预测值)。测量CLA患者踝关节应力位X线片的距骨倾斜角、距骨前移距离。结果 对照组和CLA组ATFL的T2*值分别为10.82 ± 1.84 ms和14.05 ± 4.60 ms, CLA组更高($t=3.571, P=0.001$)。ATFL参考值预测模型公式如下: $T2^* \text{值}(\text{ms}) = 14.9 + 0.14 \times \text{年龄}(\text{岁}) - 4.7 \times \text{身高}(\text{m}) - 0.03 \times \text{体重}(\text{kg})$, 预测模型的拟合度较好($R^2=0.66, P<0.001$)。T2*比值与距骨倾斜角呈显著正相关($r=0.66, P=0.007$)。随着关节镜中评估分级升高, T2*值呈现升高趋势($r=0.354, P=0.021$)。ATFL质量差者的T2*值最高, 差异具有统计学意义($H=14.692, P<0.001$)。结论 CLA患者的MRI T2*值高于对照组。T2*比值与距骨倾斜角正相关, T2*值可用于术前ATFL质量定量评估。

【关键词】慢性踝关节外侧不稳; 距腓前韧带;
磁共振成像; T2*值

【中图分类号】R445.2

【文献标识码】A

【基金项目】2024年福建省自然科学基金

基金(2024J011582, 2024J011578)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.10.050

Evaluation of Anterior Talofibular Ligament Quality in Patients with Chronic Lateral Ankle Instability Based on T2 Mapping Technology*

CHEN Shui-bin¹, LIN Yi¹, LUO Ai-fang¹, LU Jin-ting¹, XIAO Yu-hui¹, LIU Qing-jun^{2,*}.

1.Department of Radiological Diagnosis, The 909th Hospital (Dongnan Hospital of Xiamen University), Zhangzhou 363000, Fujian Province, China

2.Department of Orthopaedics, The 909th Hospital (Dongnan Hospital of Xiamen University), Zhangzhou 363000, Fujian Province, China

ABSTRACT

Objective To determine the normal reference values of the T2 value of the anterior talofibular ligament (ATFL) and to explore the value of using the T2 value to quantitatively assess the quality of the ATFL in patients with chronic lateral ankle instability (CLA). **Methods** The clinical and imaging data of 30 patients with CLA and 30 healthy individuals were compared. The T2* value of the ATFL was measured using MRI T2* mapping technology. A multiple linear regression model was used to construct a predictive model for the T2* value based on age, height, and weight. The predicted T2* value and the T2* ratio (actual T2 value / predicted T2* value) of the subjects were calculated separately. The talar tilt angle and the anterior talar translation distance on the stress radiographs of the ankle joint in patients with CLA were measured. **Results** The T2* values of the ATFL in the healthy group and the CLA group were 10.82 ± 1.84 ms and 14.05 ± 4.60 ms, respectively, with the CLA group having a higher value ($t=3.571, P=0.001$). The reference value predictive model for the ATFL is as follows: $T2^* \text{ value (ms)} = 14.9 + 0.14 \times \text{age (years)} - 4.7 \times \text{height (m)} - 0.03 \times \text{weight (kg)}$. The predictive model had a good fit ($R^2=0.66, P<0.001$). The T2* ratio was significantly positively correlated with the talar tilt angle ($r=0.66, P=0.007$). With the increase of the arthroscopic evaluation grade, the T2* value showed an increasing trend ($r=0.354, P=0.021$). The T2* value was the highest in patients with poor ATFL quality, and the difference was statistically significant ($H=14.692, P<0.001$). **Conclusion** The MRI T2* value of patients with CLA was higher than that of healthy individuals, and the T2* ratio was correlated with the talar tilt angle, suggesting that the T2* value could be used for preoperative quantitative assessment of the ATFL.

Keywords: Chronic Lateral Ankle Instability; Anterior Talofibular Ligament; Magnetic Resonance Imaging; T2* Value

踝关节扭伤后导致的距腓前韧带(anterior talofibular ligament, ATFL)损伤是造成慢性外侧踝关节不稳(CLA)的主要原因。对于CLA保守治疗无效患者, 需进行手术治疗^[1-3]。若CLA患者残存ATFL质量尚可, 关节镜下修复术是首选治疗方式^[4]。然而目前尚缺乏术前定量评估ATFL的可靠方法^[5]。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)不仅能清晰显示韧带形态, 还可通过定量指标评估组织特性^[6-8]。其中基于T2 mapping技术的T2*值可反映组织内水分含量及胶原纤维排列状态以评估韧带质量^[9]。最近的报道显示, T2*值增加与膝关节前交叉韧带表面纤维束结构破坏相关^[10-11]。而T2*值与踝关节韧带, 尤其ATFL质量关系仍未研究。基于此, 本研究尝试分析ATFL的T2*正常参考范围, 并探讨T2*值定量评估CLA患者ATFL质量的可行性, 以期帮助临床医生为此类患者精准治疗决策提供帮助。

1 资料与方法

1.1 一般资料 收集2021年1月至2024年12月接受关节镜下治疗的30例CLA患者及30例健康志愿者。CLA组入组标准: (1)踝关节扭伤3个月后仍存在机械性不稳症状, 且经过3个月保守治疗(包括物理治疗及支具固定等)症状未见改善; (2)拟行关节镜下ATFL修复术。排除标准: (1)踝关节骨关节炎、类风湿性关节炎、合并踝关节骨软骨损伤; (2)既往踝关节手术史; (3)严重骨质疏松; (4)MRI检查图像质量伪影严重, 影响诊断。健康志愿者均无踝关节外伤史及慢性疼痛症状。研究开始前经过我院伦理委员会审核。

1.2 MRI扫描方案 所有患者和健康志愿者采用Philips Ingenia (Healthcare) 3.0T MRI扫描仪, 使用8通道踝关节专用线圈进行踝关节中立位检查, 包括三维T2加权成像(重复时间/回波时间=1400/62毫秒, 体素尺寸 $0.5 \times 0.5 \times 0.6 \text{ mm}^3$)及T2* mapping成像。高分辨率T2* mapping成像采用多回波快速场回波序列, 具体参数为: 重复时间32毫秒; 回波时间2.3、4.6、6.9、9.2、11.5、13.8、16.1毫秒; 翻转角13°; 体素尺寸 $0.6 \times 0.6 \times 0.6 \text{ mm}^3$; 压缩感知加速因子4.6。该序列扫描时间为5分4秒。

1.3 图像分析和诊断 将所有MRI数据传输到工作站, 使用影像归档和通信系统进行图像分析。分别由2名具有5年以上肌肉骨骼影像诊断经验的放射科医师基于三维T2加权

【第一作者】陈水斌, 男, 副主任医师, 主要研究方向: 骨肌系统MRI诊断。E-mail: chenshuibin909@126.com

【通讯作者】刘庆军, 男, 主任医师, 主要研究方向: 四肢创伤治疗。E-mail: lqjun175@163.com

成像图像独立分析，结合足踝解剖学知识在横断面、矢状面及冠状面三个平面对T2*mapping图像进行手动分割，分别手动勾画ATFL中段最大横截面的感兴趣区测量T2*值。计算并记录三者平均值。采用多元线性回归模型基于患者年龄、身高、体重构建针对ATFL的T2*值预测模型。计算ATFL的T2*比值=T2*测量值÷模型参考值。

根据T2加权像评估ATFL形态学特征，分为正常型、迂曲型、变薄型及增粗型。

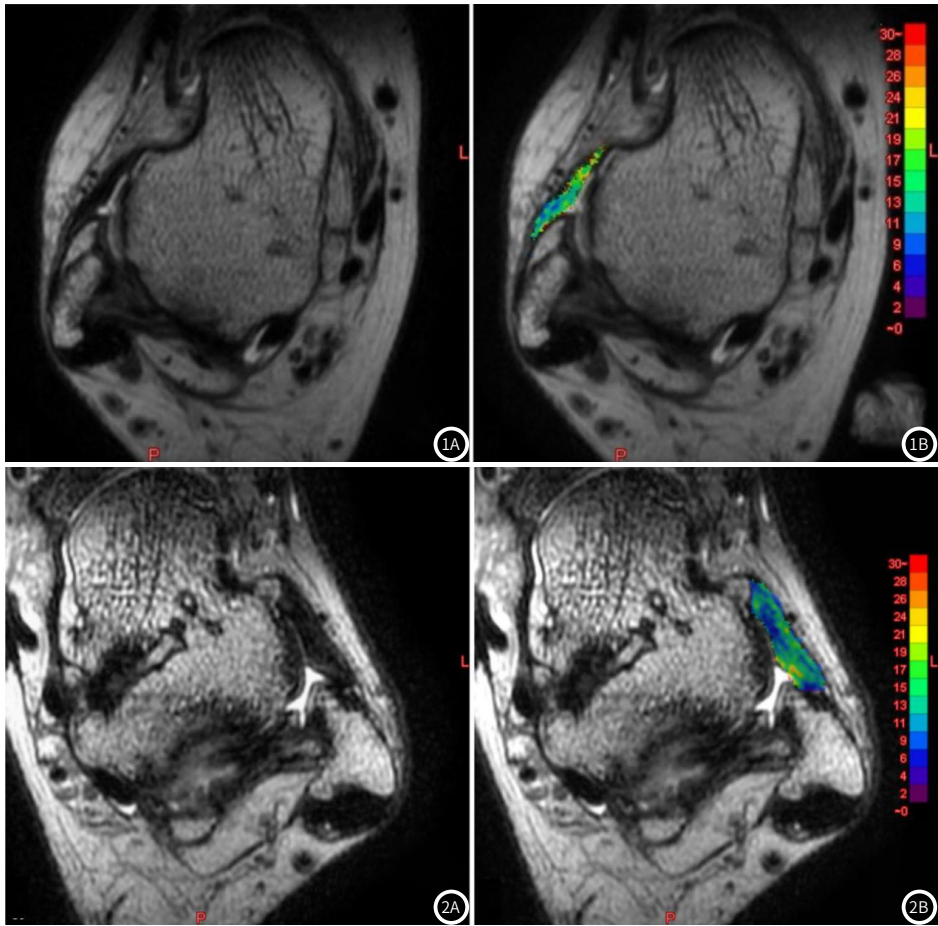


图1 一例37岁女性CLAI患者的3D T2加权图像和T2*mapping图像融合图像。1A: T2加权像显示ATFL的厚度正常。1B: T2*值测量为16.2 ms，参考值为10.1ms，T2*比值为1.60。
图2 一例25岁女性CLAI患者的3D T2加权图像和T2*mapping图像融合图像。2A: T2加权像显示ATFL增厚。2B: T2*值测量为11.2 ms，参考值9.3ms，T2*比值为1.20。

1.4 应力位X线及关节镜 所有CLAI患者均进行踝关节应力位X线片检查，测量距骨倾斜角及距骨前移距离。所有CLAI患者在MRI检查后均接受关节镜下ATFL修复术。由两名足踝外科医师根据关节镜表现评估ATFL张力(紧绷、轻度松弛、松弛)及质量(优、中、差)。
1.5统计学分析 采用SPSS 26.0软件进行数据处理。满足正态分布的计量资料采用平均值±标准差进行描述，组间差异使用t检验，不符合正态分布的计量资料采用中位数(四分位数间距)进行描述，组间差异使用Mann-Whitney U检验。以T2值为因变量，根据受试者年龄、身高、体重为自变量建立多元线性回归构建T2*值预测模型，通过R²值评价多元线性回归模型拟合优度：0~0.25(弱)、0.26~0.50(中)、0.51~1.00(强)。采用Spearman相关系数分析T2*值、T2*比值与距骨倾斜角、距骨前移距离的相关性。通过Kruskal-Wallis检验比较关节镜评估分组的T2*值差异。P<0.05认为差异具有统计学意义。

2 结 果

2.1 不同受试者一般资料比较 全部对照组受试者的ATFL在T2图像上均未见信号异常。两组患者性别构成、年龄、身高、体重差异均无统计学意义。CLAI患者T2*值较对照组更高，差异有统计学意义(P<0.05)，详见表1。

表1 两组受试者一般资料及T2*值差异比较

项目	对照组(n = 30)	CLAI 患者 (n = 30)	统计值	P值
性别(n)			1.071	0.301
男性	16(53.33)	12(40.00)		
女性	14(46.67)	18(60.00)		
年龄(岁)	39.77 ± 10.42	34.73 ± 15.26	1.494	0.141
身高(cm)	167.25 ± 8.99	163.72 ± 6.51	1.742	0.087
体重(kg)	62.16 ± 12.32	66.35 ± 14.82	1.191	0.239
T2*值(ms)	10.82 ± 1.84	14.05 ± 4.60	3.571	0.001

2.2 ATFLT2*值参考值预测模型构建 多元线性回归分析显示，T2*值与年龄、身高、体重相关，ATFL参考值预测模型公式如下：T2*值(ms)=14.9+0.14×年龄(岁) - 4.7×身高(m) - 0.03×体重(kg)，预测模型的拟合度较好(R²=0.66, P<0.001)，详见图3。各变量方差膨胀因子分别为：年龄1.3、身高1.9、体重2.2。上方方差膨胀因子均<10，该预测模型无多重共线性。

2.3 ATFL生物力学与T2*值相关性 健康组AT平均为 3.82 ± 1.41 mm。CLAI组距骨倾斜角、距骨前移距离及AT分别为 $13.13 \pm 4.62^\circ$ 、 7.75 ± 1.91 mm、 8.91 ± 3.03 mm。T2*比值与距骨倾斜角($r=0.66$, $P=0.007$)、T2值*与距骨前移距离($r=0.57$, $P=0.033$)均呈正相关关系, 详见表2。

2.4 ATFL形态学与T2*值相关性 T2加权像中ATFL形态分为: 正常型 9.61 ± 1.43 ms(2例, 6.7%)、正常增厚伴迂曲状 13.80 ± 3.95 ms(4例, 13.3%)、增粗型 13.58 ± 4.21 ms(12例, 40%)、变薄型

18.18 ± 8.87 ms(4例, 13.3%)。形态学特征与T2*值无明显相关性(P 均 >0.05)。

关节镜术中评估显示: ATFL张力分级(紧绷0例、轻度松弛20例、松弛10例), 质量分级(优6例、中16例、差8例)。使用Spearman相关性分析可见, 随着关节镜中评估分级升高, T2*值呈现升高趋势($r=0.354$, $P=0.021$)。根据Kruskal-Wallis分析, ATFL质量差者的T2*值最高, 差异具有统计学意义($H=14.692$, $P<0.001$), 详见表3。

表2 不稳定性测量值与T2*值、T2*比值的相关系数

项目	数值	与T2*值 $r(95\% CI)$	与T2*值 P 值	与T2*比值 $r(95\% CI)$	与T2*比值 P 值
距骨倾斜角(度)	13.13 ± 4.62	$0.50(-0.016 \sim 0.81)$	0.057	$0.66(0.23 \sim 0.88)$	0.007
距骨前移距离(mm)	7.75 ± 1.91	$0.57(0.057 \sim 0.84)$	0.033	$0.40(-0.16 \sim 0.77)$	0.152
AT(mm)	8.91 ± 3.03	$0.09(-0.44 \sim 0.58)$	0.747	$-0.03(-0.53 \sim 0.49)$	0.919

表3 关节镜检查结果中T2*值与 ATFL 张力或 ATFL 质量的比较

项目	ATFL张力			ATFL质量			
	轻度松弛	松弛	相关性	良好	中等	差	相关性
n	20	10		6	16	8	
T2*值	13.28 ± 3.76	15.58 ± 6.16	$r=0.183$	13.24 ± 5.56	12.83 ± 3.32	17.07 ± 5.98	$r=0.354$

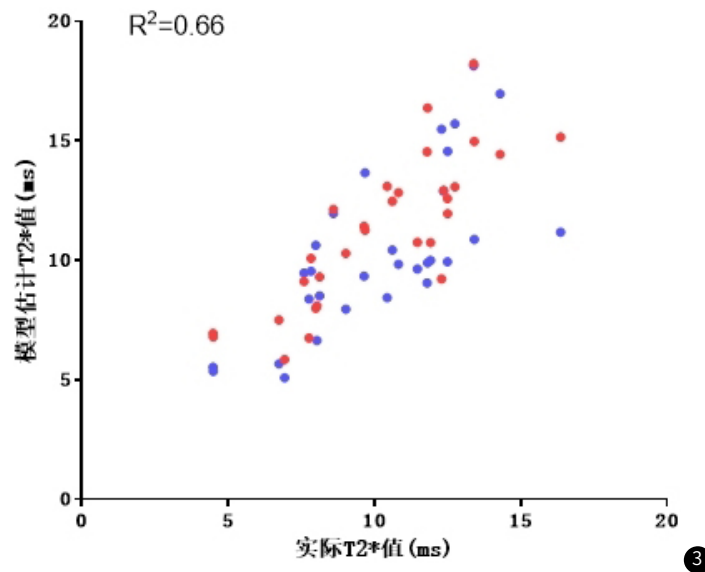


图3 基于多元线性回归模型预测的T2*参考值与实际T2*值的对比图。

3 讨论

80%~90%的踝关节外侧副韧带复合体损伤是由踝关节扭伤引起, 踝关节内翻是踝关节扭伤最常见的损伤机制^[4]。而ATFL作为外侧复合体中最薄弱韧带、最易损伤的结构, 在踝关节扭伤时极易发生撕裂损伤^[12]。由于患者对早期ATFL损伤重视程度不足, 加之临床上ATFL损伤漏诊率较高, 患者若延迟治疗或保守治疗效果不满意、韧带愈合不良, 就会导致患者出现慢性踝关节外侧不稳, 影响患者生活质量^[13]。MRI对于ATFL诊断和预后评估具有一定作用, 可提供术前ATFL的完整性、薄弱程度以及是否合并关节内病变、骨髓水肿和其他损伤等多种诊断信息^[14-15]。MRI的无创性有助于踝关节扭伤患者的随访。快速准确诊断急性ATFL损伤不

仅有利于及时治疗、降低踝关节反复扭伤风险, 而且对于避免发生慢性踝关节不稳定、创伤后踝关节骨关节炎至关重要。既往研究证实, T2*值可动态监测前交叉韧带重建术后移植物韧带质量及与膝关节松弛度关联^[10]。本研究将T2*mapping技术拓展至踝关节ATFL评估领域, 并证实了其临床应用的可行性, 为术前精准评估ATFL状态提供了新思路。

传统应力位X线片虽可评估踝关节不稳程度, 如有学者发现距骨倾斜角 $>15^\circ$ 可提示韧带存在撕脱、退化及严重损伤^[16], 但传统应力位X线片无法直接反映ATFL质量状态。既往研究表明, T2*值升高提示胶原纤维排列较为稀疏、韧带周围存在瘢痕组织, 为

ATFL定量评价提供了基础^[17]。本研究在健康人群中发现ATFL的T2*值与年龄存在正相关。既往组织学研究已证实,年龄相关的胶原纤维排列紊乱是导致T2值升高的病理基础^[18]。这提示踝关节韧带可能存在与膝关节前交叉韧带相似的退行性改变机制,这对踝关节生物力学老化理论研究可能带来一定帮助。

为了减少单纯使用T2*对CLAI患者的ATFL诊断的个体变异性,我们使用T2*标准化比值来评估患者ATFL质量。同时基于上述发现,构建了基于年龄等因素的ATFL参考值预测模型($R^2=0.66$)。本研究使用MRI T2*mapping技术定量评估ATFL质量,发现距骨倾斜角与T2*比值间存在正相关性,提示T2*值可定量分析ATFL的结构完整性,为今后外科医生个体化精准评估和制定治疗策略提供参考。

在关节镜检查评估中发现ATFL韧带质量与患者T2*值存在一定相关性,ATFL质量差的患者,T2*值相对更高,因此术前T2*值可以客观且定量地评估ATFL质量。与传统开放手术相比,关节镜修复术因微创、康复期更短等优势已成为CLAI主流术式^[4,19]。本研究结果对于T2*比值升高者,提示ATFL胶原结构严重破坏,临床医生应需谨慎选择单纯修复术,而应考虑加强重建方案以避免术后再松弛。当然,未来仍需要分析术后T2*随时间变化情况以及与手术治疗效果间关系。

本研究存在以下局限性。首先,本研究为单中心研究,样本量相对较小,且缺少针对患者治疗后T2*值的随访,今后仍需要更大样本研究进一步验证本结论;其次,CLAI患者均接受修复手术,未获取ATFL组织样本,未行病理诊断ATFL的胶原含量和方向,同时缺少T2*值与术后结局关系分析;第三,由于关节镜的视野有限,很难对整条ATFL进行关节镜评估。当然,不同厂家机器由于参数不完全相同可能导致测量T2*值存在一定差异,本结果的外推性仍需要不同机构进行验证。

综上所述,CLAI患者的MRI T2*值高于健康参与者,T2*比值与距骨倾斜角正相关,T2*值对术前ATFL质量定量评估具有作用。基于T2 mapping技术对ATFL术前分析具有较大的临床应用前景。

参考文献

- [1] 郑果,杨钱冬,王震宇,等.距腓前韧带损伤临床流行病学分析[J].实用骨科杂志,2022,28(8):696-701.
- [2] Chen RP,Wang QH,Li MY,et al.Progress in diagnosis and treatment of acute injury to the anterior talofibular ligament[J].World J Clin Cases,2023,11(15):3395-3407.
- [3] 张松,顾加祥,刘宏君,等.距腓前韧带损伤影响踝关节外侧结构不稳的诊疗进展[J].实用临床医药杂志,2019,23(15):129-132.
- [4] 中华医学会运动医疗分会足踝专业委员会,中国医师协会运动医学医师分会足踝学组.慢性踝关节外侧不稳手术治疗专家共识[J].中华医学杂志,2021,101(37):2940-2946.
- [5] 连晨宇,王安鸿,熊世凯,等.踝关节外侧副韧带慢性损伤的治疗策略[J].足踝外科电子杂志,2021,8(1):47-52.

- [6] Kim JS,Kim MS,Kim DK,et al.Magnetic resonance imaging characteristics of a lateral ligament injury in acute ankle sprains among athletes[J].Orthop J Sports Med,2023,11(11):23259671231207688.
- [7] Alvarez CAD,Hattori S,Kato Y,et al.Dynamic high-resolution ultrasound in the diagnosis of calcaneofibular ligament injury in chronic lateral ankle injury:a comparison with three-dimensional magnetic resonance imaging[J].J Med Ultrason (2001),2020,47(2):313-317.
- [8] 王颀,周游.慢性踝关节不稳的影像学研究进展[J].中国运动医学杂志,2023,42(5):395-400.
- [9] Takashima H,Yoshimoto M,Ogon I,et al.Lumbar disc degeneration assessment usingT2*relaxation time with ultra-short TE[J].Magn Reson Imaging,2020,73:11-14.
- [10] Wang HM,Shultz SJ,Ross SE,et al.Relationship of anterior cruciate ligament volume and T2* relaxation time to anterior knee laxity[J].Orthop J Sports Med,2021,9(2):2325967120979986.
- [11] Anz AW,Edison J,Denney TS,et al.3-T MRI mapping is a valid in vivo method of quantitatively evaluating the anterior cruciate ligament:rater reliability and comparison across age[J].Skeletal Radiol,2020,49(3):443-452.
- [12] 陈昉谷,曹圣轩,马听.急性外侧踝关节扭伤诊疗的争议问题[J].国际外科学杂志,2024,51(3):145-152.
- [13] 钟俊,王文.不同解剖修复策略改善慢性踝关节外侧不稳的网状Meta分析[J].中国组织工程研究,2024,28(9):1470-1476.
- [14] Mollon B,Wasserstein D,Murphy GM,et al.High ankle sprains in professional ice hockey players:prognosis and correlation between magnetic resonance imaging patterns of injury and return to play[J].Orthop J Sports Med,2019,7(9):2325967119871578.
- [15] Tan DW,Teh DJW,Chee YH.Accuracy of magnetic resonance imaging in diagnosing lateral ankle ligament injuries:A comparative study with surgical findings and timings of scans[J].Asia Pac J Sports Med Arthrosc Rehabil Technol,2016,7:15-20.
- [16] Hashimoto T,Inokuchi S,Kokubo T.Clinical study of chronic lateral ankle instability:injured ligaments compared with stress X-ray examination[J].J Orthop Sci,2009,14(6):699-703.
- [17] Lima da Cruz GJ,Velasco C,Lavin B,et al.Myocardial T1,T2,T2*,and fat fraction quantification via low-rank motion-corrected cardiac MR fingerprinting[J].Magn Reson Med,2022,87(6):2757-2774.
- [18] Beveridge JE,Machan JT,Walsh EG,et al.Magnetic resonance measurements of tissue quantity and quality using T(2) *relaxometry predict temporal changes in the biomechanical properties of the healing ACL[J].J Orthop Res,2018,36(6):1701-1709.
- [19] Zhi X,Lv Z,Zhang C,et al.Does arthroscopic repair show superiority over open repair of lateral ankle ligament for chronic lateral ankle instability: a systematic review and metaanalysis[J].J Orthop Surg Res,2020,15(1):355.

(收稿日期:2025-03-11)
(校对编辑:翁佳鸿、韩敏求)