

· 临床研究 ·

前交叉韧带断裂患者本体感觉和脑灰质体积变化的研究

刘凯¹ 徐志鹏² 王强³¹ 青岛市市立医院运动医学康复中心, 青岛 266000; ² 青岛市市立医院放射科, 青岛 266000;³ 青岛大学附属医院康复医学科, 青岛 266000

通信作者: 王强, Email: sakulawangqiang@hotmail.com

【摘要】 目的 探索前交叉韧带断裂患者本体感觉的改变和脑结构重塑的特征, 以及两者的关系。**方法** 纳入经临床资料和影像学诊断证实的单纯右侧前交叉韧带完全断裂且右利手男性患者 18 例设为病例组, 另选取活动水平相匹配的右利手健康男性 18 例作为对照组。分别使用膝关节稳定度测试仪 (Kneelax3, 荷兰)、等速肌力测试系统 (ISOMed2000, 美国)、改良的星偏移平衡测试 (mSEBT)、单腿跳距离 (SHD) 测试等设备和方法对受试的胫骨前移程度 (APST)、主动关节位置觉 (AART)、平衡功能等方面进行评估; 脑结构图像使用磁共振成像设备 (3.0T) 采集并使用 SPM 8 软件进行分析, 并分析脑标准灰质体积变化与患者功能的相关性。**结果** 病例组的 APST、AART、mSEBT、SHD 等各项指标与对照组比较, 差异均有统计学意义 ($P < 0.01$)。与对照组相比, 病例组的左侧小脑脚 1 区部位标准灰质体积显著增大, 右侧大脑的辅助运动区、顶上回、顶下缘角回、尾状核和海马旁回部位显著减小。经 Pearson 相关分析发现, 右侧辅助运动区、顶上回、顶下缘角回、尾状核的标准灰质体积变化与 mSEBT 得分显著负相关 ($P < 0.05$)。**结论** 前交叉韧带断裂患者的神经肌肉控制能力下降且脑结构发生了可塑性改变; 前交叉韧带断裂患者的运动控制策略由皮质向皮质下运动控制策略转移; mSEBT 可间接反映前交叉韧带断裂患者脑结构的变化。

【关键词】 断裂; 前交叉韧带; 本体感觉; 标准灰质体积; 磁共振成像

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.04.012

Changes in proprioception and the volume of grey matter after anterior cruciate ligament rupture

Liu Kai¹, Xu Zhipeng², Wang Qiang³¹ Sports Medicine and Rehabilitation Center, Qingdao Municipal Hospital, Qingdao 266000, China; ² Department of Radiology, Qingdao Municipal Hospital, Qingdao 266000, China; ³ Department of Rehabilitation Medicine, The Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao 266000, China

Corresponding author: Wang Qiang, Email: sakulawangqiang@hotmail.com

【Abstract】 Objective To investigate any changes in proprioception or grey matter volume (GMV) after anterior cruciate ligament (ACL) rupture. **Methods** Eighteen male patients with right-side ACL rupture (diagnosed through clinical examination and MRI) and healthy right hand function constituted the case group, while another 18 right-handed healthy counterparts were enrolled as the control group. Proprioception, balance and functional performance were assessed for both groups using the anteroposterior shift of the tibia (APST), an active angle reproduction test (AART), a modified star excursion balance test (mSEBT) and single-leg hop distance (SHD). MRI (at 3.0T) was used to collect the brain structure images and SPM8 software was used to perform voxel-based morphometry. Any correlation between changes in function and GMV were analyzed. **Results** Significant differences were observed between the two groups in their average APST, AART, SEBT and SHD scores. Compared with the healthy controls, the average volume of grey matter in the cerebellum-crus1-L was significantly larger in the case group, while their Supp_Motor_Area_R, Parietal_Sup_R, Parietal_Inf_R, Caudate_R and ParaHippocampal_R grey matter volumes were significantly smaller. Among the case group, the average volumes of their Supp_Motor_Area_Rs, Parietal_Sup_Rs, Parietal_Inf_Rs, and Caudate_Rs were negatively correlated with their mSEBT scores. **Conclusions** The brain's structure changes after ACL rupture and neuromuscular control becomes impaired. The cortical motor control strategy shifts to subcortical motor control after ACL rupture. The mSEBT can reflect indirectly the changes in brain structure plasticity after ACL rupture.

【Key words】 Anterior cruciate ligament; Proprioception; Grey matter volume; MRI; Star excursion balance test

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.04.012

据调查,美国每年前交叉韧带断裂发病人数约 20 万,一般人群的发生率为 38/10 万,而从事足球运动人群的发生率更高为 60/10 万^[1],近年来我国的前交叉韧带断裂损伤亦成为最常见的运动伤病之一^[2]。由于前交叉韧带中含有本体感受器,其断裂造成前交叉韧带-腓绳肌反射弧中断、延迟或改变,干扰了神经肌肉控制^[3],最终导致中枢神经系统功能重塑^[4],而中枢神经系统的适应性改变是造成损伤后膝功能障碍的重要原因^[5]。如果能够鉴别出前交叉韧带断裂患者与健康人之间脑激活的不同,即可以选择有针对性的康复策略给予刺激,从而对患者功能产生积极影响。

本研究的目的在于,探索前交叉韧带断裂后患者与健康对照人群本体感觉和功能表现的差别以及脑结构的不同,并在此基础上检验前交叉韧带断裂患者本体感觉、功能表现和脑结构改变的相关性,分析前交叉韧带断裂患者本体感觉的改变对其脑可塑性的影响。

对象和方法

一、研究对象

入选标准^[6]:①经临床资料及影像学诊断证实的单纯右侧前交叉韧带断裂;②男性,右利手,年龄 18~30 岁;③损伤时间 3~12 个月;④所有患者均签署知情同意书。

排除标准:①患肢合并严重的韧带和半月板损伤;②患侧制动超过 2 周;③近 1 个月下肢受过其它运动损伤,如踝扭伤等;④对侧下肢存在运动损伤;⑤严重椎间盘突出等不适合参加测试的其他疾病。

选取 2017 年 6 月至 2018 年 6 月在青岛市市立医院骨科运动医学中心就诊且符合上述标准的前交叉韧带完全断裂患者 18 例作为病例组,平均病程(7.20±3.24)个月;另选取 18 例右利手男性健康志愿者作为对照组。2 组受试的平均年龄、平均身高、平均体重和 Tegner 活动水平评分^[7]等一般资料经统计学分析比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),详见表 1。本研究获青岛市市立医院医学伦理审查委员会批准(审批号 2017 临审字第 018 号)。

表 1 2 组受试的一般资料

组别	例数	平均年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	平均身高 (m, $\bar{x}\pm s$)	平均体重 (kg, $\bar{x}\pm s$)	Tegner 评分 (分, $\bar{x}\pm s$)
病例组	18	25.43±2.71	1.75±0.43	85.25±4.28	5.52±1.03
对照组	18	24.66±3.21	1.76±0.67	84.56±5.12	5.45±1.12

二、评估方法

Tegner 活动水平评分:由患者自我评估,将活动水

平进行数字化分级(0~10 分)^[7]。0 分代表由于膝关节损伤造成残疾;1~5 分代表工作或休闲运动水平,从静坐工作到重徒手劳动;6~9 分代表大强度的休闲类运动或竞赛类运动水平;10 分代表国家级或国际级的足球或橄榄球运动员水平。

胫骨前移程度(anteroposterior shift of the tibia, APST)测量^[8]:采用膝关节稳定度测试仪(Kneelax 3, 荷兰)行 APST 测量,患肢固定在机器上,屈曲 30°,施加应力 132N。

膝本体感觉的测量^[9]:使用等速肌力测试系统(ISOmed2000, 美国)检测患肢的主动关节位置觉(active angle reproduction test, AART)。具体方法为屏蔽患者视觉,患肢以 2(°)/s 的角速度从屈膝 90°位被动伸膝到屈膝 30°位,维持 5 s,感受此处的关节位置;然后回到屈膝 90°位,去除仪器角度限制设置,令患者主动屈膝到原屈膝 30°位,手动按下停止键,记录此处的关节角度,重复 3 次测试取平均值。

改良的星偏移平衡测试(modified star excursion balance test, mSEBT)^[10]:在地面上画出前向、左后向、右后向(各相距 120°)三个带有距离刻度的方向线,患者双手叉腰、裸足,患侧下肢大脚趾放在 3 个方向的中心点,健侧大脚趾沿方向线尽量伸向远处,在完成一次无负重触地后返回,记录该距离。患者患足移动或健足负重触地均为不成功。患者事先每方向进行 4 次练习以学习该测试动作,每方向进行 3 次成功的测试并各自取平均值。mSEBT 整体的结果为 3 个方向平均值的平均值。数据的标准化采用公式(距离/腿长)×100%,其中腿长为髌前上棘到内踝中心的距离^[11]。

单腿跳距离(single-leg hop distance, SHD)测试^[12]:星偏移平衡测试后休息 10 min。患者患侧单腿站立,尽力向前跳,测量该距离。事先进行单腿跳的练习直到自我感觉可以完成该测试,健侧足落地或者身体其他部位着地来平衡身体均为失败,共进行 3 次成功的测试并取平均值。数据的标准化亦采用公式(距离/腿长)×100%,其中腿长为髌前上棘到内踝中心的距离。

三、磁共振检查

数据采集:使用 3.0T 磁共振设备(Philips 公司,荷兰),32 通道头部相控阵线圈。所有扫描均由同一位影像技师操作完成。受试者仰卧于检查床上,佩戴耳塞减少外部刺激,头部摆放舒适并固定,嘱其保持清醒、放松、闭目状态,尽量保持头部不动,尽量不进行思考。扫描序列包括 T₁WI、T₂WI 及基于体素的形态学测量(voxel based morphometry, VBM)扫描,扫描范围

包括整个大脑、小脑及脑干。VBM 成像采用三维加权快速扰相梯度回波(fast spoiled gradient recall,FSPGR)序列,扫描参数为重复时间(TR)8.2 ms,恢复时间(TE)3.7 ms,扫描视野(FOV)256 mm×256 mm,重建矩阵 256×256,体素 1 mm×1 mm×1 mm,层厚 1.0 mm,层数 196,层间距 0 mm。

数据预处理:所有受试的图像数据采集结束后,在 Matlab2013b 平台上使用 SPM8(statistical parametric mapping)软件自带的 VBM 8 软件包进行,具体步骤包括数据格式转化、图像质量检查、剔除有头动伪影影响实验结果的图像、图像配准及方位与原点位置调整、组织分割及空间标准化、提取及整理所有被试的标准化灰质体积图,所得图像进行质量检验和高斯平滑(8 mm×8 mm×8 mm)。

四、统计学方法

使用 SPSS 22.0 版统计软件对所有受试的临床资料进行统计学分析处理,数据符合正态分布和方差齐性检验,计量资料用($\bar{x} \pm s$)表示,两组各项功能评分采用独立样本 t 检验, $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。使用 SPM 8 对病例组和对照组进行独立样本 t 检验,

选择组水平建模,Mask 选择基于阈值,绝对阈值为 0.2,对模型进行估计,设计对比,得出统计参数图(统计量 T 图),进行多重比较校正,得到 2 组被试者大脑皮质灰质体积存在显著组间差异的脑区($P < 0.001$,未校正)。采用 Pearson 相关分析病例组脑灰质体积异常的脑区与功能检查结果的相关性。

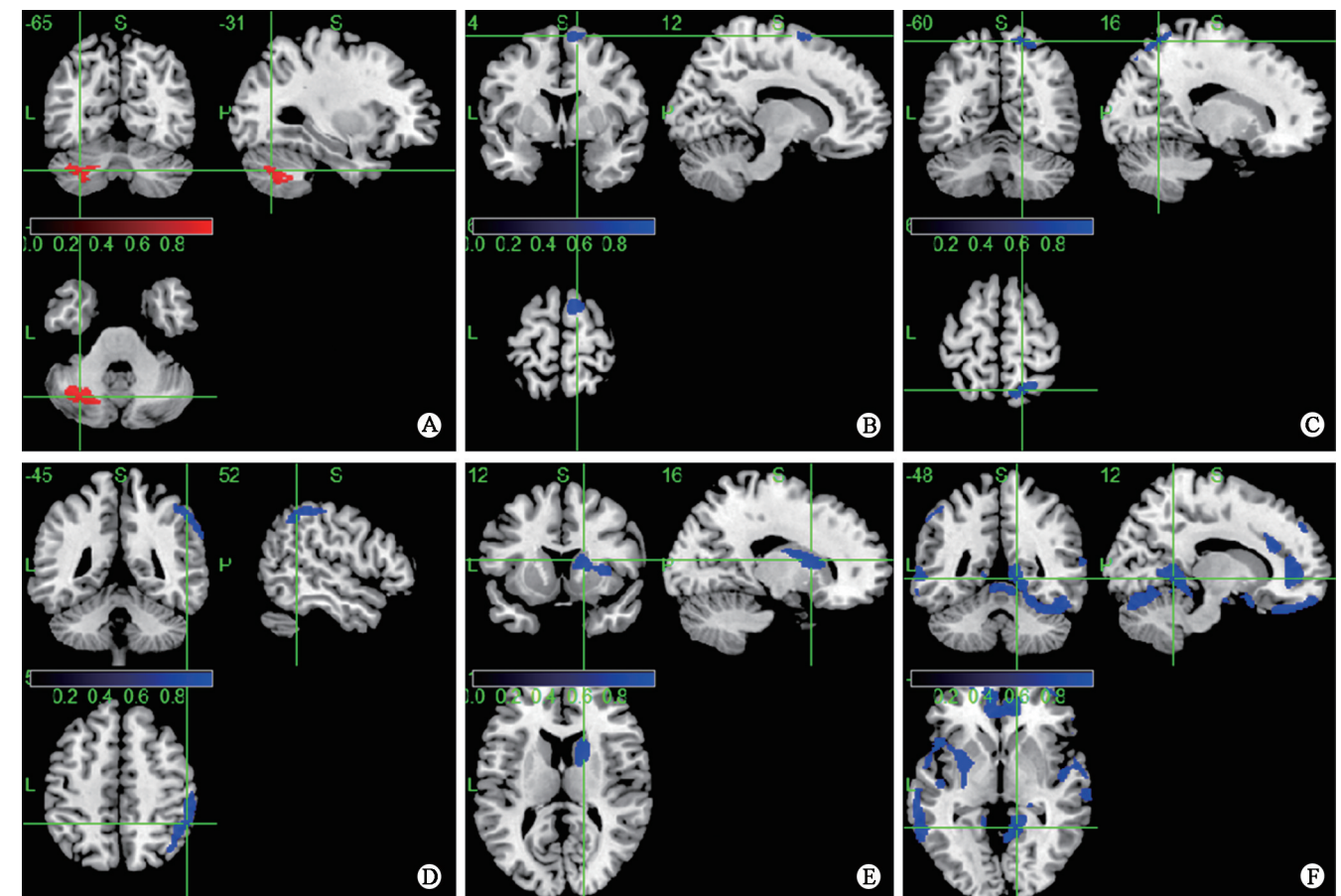
结 果

一、2 组各项功能评分比较

与对照组对比,病例组的 APST 显著增大($P < 0.01$),AART 显著增大($P < 0.01$),mSEBT 显著减小($P < 0.01$),SHD 显著减小($P < 0.01$),详见表 2。而且病例组受试在行 mSEBT 和 SHD 测试时,相比对照组受试,身体晃动幅度较大,动作完成质量较差。

二、2 组 VBM 分析

病例组与对照组相比,标准灰质体积增大的脑区为左侧小脑脚 1 区,标准灰质体积减小的脑区有右侧辅助运动区、右侧顶上回、右侧顶下缘角回、右侧尾状核和右侧海马旁回(见图 1)。表 3 显示了相应团簇的特征(位置、峰值所在 MNI 坐标和大小)。



注:图 A 示左小脑脚 1 区,图 B 示右侧辅助运动区,图 C 示右侧顶上回,图 D 示右侧顶下缘角回,图 E 示右侧尾状核,图 F 示右侧海马旁回

图 1 病例组标准灰质体积改变的脑区

表 2 2 组各项功能指标比较 ($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	APST(mm)	AART(°)	mSEBT(cm)				SHD(cm)
				整体	前向	左后向	右后向	
病例组	18	9.89±1.41 ^a	4.11±1.02 ^a	83.89±3.76 ^a	63.88±2.79 ^a	95.18±4.27 ^a	92.62±4.67 ^a	106.36±5.17 ^a
对照组	18	8.28±1.74	2.50±0.79	94.12±4.20	70.06±2.72	113.54±5.92	98.76±4.97	121.80±5.77

注:与对照组比较, $P<0.01$

表 3 与对照组相比时病例组灰质体积改变的脑区分布特征

脑区	MNI 坐标			<i>t</i> 值	体素大小 (>300)
	X	Y	Z		
左小脑脚 1 区 ^a	-22	-66	-37.5	9.70	395
右侧辅助运动区 ^b	12	4.5	70.5	7.02	303
右侧顶上回 ^b	22.5	-76.5	52.5	10.52	456
右侧顶下缘角回 ^b	54	-31.5	52.5	12.91	579
右侧尾状核 ^b	13.5	7.5	13.5	7.04	618
右侧海马旁回 ^b	21	4.5	-25.5	29.48	1190

注:病例组与对照组比较,^a 灰质体积增加,^b 灰质体积减少

三、病例组标准灰质体积异常的脑区与各项膝关节功能评分的相关性

Pearson 相关分析显示,将 P 设为 0.05 的水平上,mSEBT 与右侧辅助运动区($r=-0.55$)、右侧顶上回($r=-0.54$)、右侧顶下缘角回($r=-0.58$)、右侧尾状核($r=-0.59$)均呈负相关,详见表 4。

表 4 病例组标准灰质体积异常的脑区与膝关节功能评分相关性分析

脑区	AART		mSEBT 整体		SHD	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
左小脑脚 1 区	-0.03	0.93	0.19	0.51	0.17	0.55
右侧辅助运动区	0.31	0.28	-0.55	0.04	-0.39	0.16
右侧顶上回	0.18	0.54	-0.54	0.05	-0.23	0.43
右侧顶下缘角回	0.27	0.35	-0.58	0.03	-0.44	0.11
右侧尾状核	0.07	0.81	-0.59	0.03	-0.25	0.38
右侧海马旁回	0.16	0.60	-0.47	0.09	-0.22	0.45

讨 论

VBM 是一种对全脑高分辨 T1 加权脑磁共振图像数据信息在体素水平上进行分析的技术,通过定量计算脑局部灰质、白质和脑脊液的密度和体积的改变,精确地显示脑组织的形态学改变。本研究首次通过 VBM 的方法评估前交叉韧带断裂后患者脑结构的改变,在控制了性别、主力腿、活动水平等混杂因素后,病例组与健康对照组在 APST、主动位置觉、mSEBT 和 SHD 测试中差异存在显著统计学意义($P<0.01$)。

前交叉韧带中的本体感受器为中枢神经提供有关关节位置觉和运动感觉的信号,并含有与脊髓、脑干和小脑的直接神经连接^[13],小脑脚 1 区域包含皮质脊髓束和皮质延髓束,作用是在大脑和肢体间传递运动信息以保持平衡和协调性,与负性情感、注意、学习、运动和执行功能加工有关^[14]。正常肢体运动时,同侧小脑脚 1 区激活,但当前交叉韧带断裂造成上行传入神经

通路中断时,同侧小脑脚 1 区激活减少,上行传导至大脑皮质的激活也减少,而大脑皮质激活减少造成其对皮质下低级中枢的抑制作用相应减小,形成皮质运动控制策略向皮质下运动控制策略的转移^[15],对侧小脑脚 1 区域灰质体积出现增加说明了这一点。

辅助运动区位于额叶中央前回(初级运动区)的前内侧,刺激该区反应一般为双侧性。辅助运动区的作用是运动的准备和启动初级运动区,在简单运动中激活较少而在复杂运动中激活增加,与运动完成的精确度有关^[16]。正常情况下,一侧大脑皮质控制对侧的下肢活动,但在前交叉韧带断裂患者中,右侧辅助运动区可功能重塑来协助控制受伤的右侧下肢的运动,而左下肢运动时激活则减少^[17]。本研究中,右侧辅助运动区灰质体积减少结合 2 组受试的功能评分比较,说明前交叉韧带断裂患者活动水平下降,运动减少,多依赖健侧下肢且动作趋向于简单化。

顶上回是分辨性触觉和实体感觉皮质中枢,一般只在复杂任务中出现激活,是视空间记忆和加工的重要部位,该部位损伤后出现失用症。顶下缘角回对触觉和视觉信息的整合有特殊的重要性。右顶上回和右顶下缘角回同属于顶叶,这 2 个区域的灰质体积减少,说明前交叉韧带断裂患者复杂运动减少;视空间信息整合能力下降,可能导致患者行走时,处理外界复杂路况信息判断失误而造成跌倒或再次受伤风险提高。

尾状核是锥体外系组成部分,作用是调节肌肉紧张度、控制自主运动和运动反应,并且还参与疼痛、记忆、负面情绪和感觉加工等高级认知功能。尾状核灰质体积的减少间接说明了前交叉韧带断裂患者大脑皮质中枢对运动的控制下降^[18],即神经肌肉控制能力下降。

海马旁回位于枕叶和颞叶下方的内侧,作为海马的主要皮质输入,与认知和情绪有着重要的关系。在学习任务中,海马旁回活性增强,而其结构的损伤可以引起情感和认知行为的异常^[19]。海马是重要的情绪调节中枢,抑郁症患者的海马旁回灰质体积减小^[20]。本研究中,前交叉韧带断裂患者海马旁回灰质体积的减少,提示不应将前交叉韧带断裂仅仅看作运动损伤,在康复过程中,患者的心理状态发生变化,保持良好的心态或许可以提高患者康复训练的学习能力。

大脑运动皮质长时间的激活减少,会造成半永久性的脑结构可塑性改变^[21-22]。本研究结果还显示,前交叉韧带断裂患者的 mSEBT 得分与辅助运动区、顶叶

脑区和尾状核的灰质体积变化呈负相关,说明患者在长时间前交叉韧带断裂状态下,可形成一套应对外界本体感觉和平衡需求的代偿性改变,而 mSEBT 亦可间接地反映出脑结构发生了可塑性改变。

综上所述,本研究通过 VBM 的方法对比了前交叉韧带断裂患者和健康对照人群的脑灰质体积,找出了此类患者发生结构可塑性改变的脑区,并对灰质体积改变脑区与功能进行了相关分析,得出结论:①前交叉韧带断裂患者的神经肌肉控制能力下降,且脑结构发生了可塑性改变;②前交叉韧带断裂患者的运动控制策略由皮质向皮质下运动控制策略转移;③mSEBT 可间接反映前交叉韧带断裂患者脑结构的变化。

但由于设计的局限性,本研究并未对受试的教育程度、运动项目、疼痛情况、抑郁程度等方面进行分析,而上述几方面有可能对部分脑区灰质体积变化产生影响;而韧带断裂时间长短不同以及是否经过神经肌肉康复训练,都有可能影响脑区灰质体积变化。下一步的研究将会采集更大的样本量,根据影响因子、病程长短、不同康复方案等因素分别进行分组分析,获得特定人群、疾病纵向发展的脑区灰质体积变化特征,为制订更为合理的康复措施提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] Sanders TL, Maradit Kremers H, Bryan AJ, et al. Incidence of anterior cruciate ligament tears and reconstruction: a 21-year population-based study[J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44(6): 1502-1507. DOI: 10.1177/0363546516629944.
- [2] 涂俊,徐斌.前交叉韧带损伤早期治疗与延期治疗的并发症分析及临床疗效对比[J]. *中国运动医学杂志*, 2018, 37(7): 558-564. DOI: 10.16038/j.1000-6710.2018.07.002.
- [3] Kapreli E, Athanasopoulos S. The anterior cruciate ligament deficiency as a model of brain plasticity[J]. *Med Hypotheses*, 2006, 67(3): 645-650. DOI: 10.1016/j.mehy.2006.01.063.
- [4] Bonsfills N, Gómez-Barrena E, Raygoza JJ, et al. Loss of neuromuscular control related to motion in the acutely ACL-injured knee: an experimental study[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2008, 104(3): 567-577. DOI: 10.1007/s00421-008-0729-3.
- [5] Courtney C, Rine RM, Kroll P. Central somatosensory changes and altered muscle synergies in subjects with anterior cruciate ligament deficiency[J]. *Gait Posture*, 2005, 22(1): 69-74. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2005.08.006.
- [6] Kapreli E, Athanasopoulos S, Gliatis J, et al. Anterior cruciate ligament deficiency causes brain plasticity: a functional MRI study[J]. *Am J Sports Med*, 2009, 37(12): 2419-2426. DOI: 10.1177/0363546509343201.
- [7] Briggs KK, Lysholm J, Tegner Y, et al. The reliability, validity, and responsiveness of the Lysholm score and Tegner activity scale for anterior cruciate ligament injuries of the knee: 25 years later[J]. *Am J Sports Med*, 2009, 37(5): 890-897. DOI: 10.1177/0363546508330143.
- [8] Lee HM, Cheng CK, Liao JJ. Correlation between proprioception, muscle strength, knee laxity, and dynamic standing balance in pa-

tients with chronic anterior cruciate ligament deficiency[J]. *Knee*, 2009, 16(5): 387-391. DOI: 10.1016/j.knee.2009.01.006.

- [9] Miao X, Huang HS, Hu XQ, et al. The characteristics of EEG power spectra changes after ACL rupture[J]. *PloS One*, 2017, 12(2): e0170455. DOI: 10.1371/journal.pone.0170455.
- [10] Cug M, Wikstrom EA, Golshaei B, et al. The effects of sex, limb dominance, and soccer participation on knee proprioception and dynamic postural control[J]. *J Sport Rehabil*, 2016, 25(1): 31-39. DOI: 10.1123/jsr.2014-0250.
- [11] Gribble PA, Hertel J, Plisky P. Using the star excursion balance test to assess dynamic postural-control deficits and outcomes in lower extremity injury: a literature and systematic review[J]. *J Athl Train*, 2012, 47(3): 339-357. DOI: 10.4085/1062-6050-47.3.08.
- [12] Lehmann T, Paschen L, Baumeister J. Single-leg assessment of postural stability after anterior cruciate ligament injury: a systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Med Open*, 2017, 3(1): 32. DOI: 10.1186/s40798-017-0100-5.
- [13] Park HB, Koh M, Cho SH, et al. Mapping the rat somatosensory pathway from the anterior cruciate ligament nerve endings to the cerebrum[J]. *J Orthop Res*, 2005, 23(6): 1419-1424. DOI: 10.1016/j.orthres.2005.03.017.1100230626.
- [14] 殷稚飞,程清,秦义婷,等.小脑经颅磁刺激调控脑高级功能的研究进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2018, 40(10): 791-794. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2018.10.019.
- [15] Grooms DR, Page SJ, Onate JA. Brain activation for knee movement measured days before second anterior cruciate ligament injury: neuroimaging in musculoskeletal medicine[J]. *J Athl Train*, 2015, 50(10): 1005-1010. DOI: 10.4085/1062-6050-50.10.02.
- [16] Ball T, Schreiber A, Feige B, et al. The role of higher-order motor areas in voluntary movement as revealed by high-resolution EEG and fMRI[J]. *NeuroImage*, 1999, 10(6): 682-694. DOI: 10.1006/nimg.1999.0507.
- [17] Kapreli E, Athanasopoulos S, Gliatis J, et al. Anterior cruciate ligament deficiency causes brain plasticity: a functional MRI study[J]. *Am J Sports Med*, 2009, 37(12): 2419-2426. DOI: 10.1177/0363546509343201.
- [18] Grooms DR, Page SJ, Nichols-Larsen DS, et al. Neuroplasticity associated with anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2017, 47(3): 180-189. DOI: 10.2519/jospt.2017.7003.
- [19] 罗红,余茜.基于静息态 fMRI 技术观察高频重复经颅磁刺激对出血性脑卒中认知功能的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41(4): 279-282. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.04.009.
- [20] 陈旭丹,胡孝朋,陶龙香,等.首发抑郁症患者静息态脑结构网络的变化及其意义[J]. *安徽医科大学学报*, 2016, 51(2): 222-226. DOI: 10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2016.02.016.
- [21] Schubert M, Beck S, Taube W, et al. Balance training and ballistic strength training are associated with task-specific corticospinal adaptations[J]. *Eur J Neurosci*, 2008, 27(8): 2007-2018. DOI: 10.1111/j.1460-9568.2008.06186.x.
- [22] Beck S, Taube W, Gruber M, et al. Task-specific changes in motor evoked potentials of lower limb muscles after different training interventions[J]. *Brain Res*, 2007, 1179(1): 51-60. DOI: 10.1016/j.brainres.2007.08.048.

(修回日期:2020-02-20)

(本文编辑:汪 玲)