

文章编号: 1004-7220(2022)03-0531-07

髋外展肌疲劳对不同性别人群单腿侧跳落地时神经肌肉控制的影响

王雅^{1,2}, 朱婷², 林金鹏², 张楠^{1,2}, 韦红曼², 陈新鹏^{1,2}, 陈斌¹, 翟华^{1,2}

(1.上海市同济大学附属养志康复医院(上海市阳光康复中心),上海 201619;2.上海体育学院运动科学学院,上海 200438)

摘要:目的 比较髋外展肌疲劳对不同性别人群单腿侧跳落地期间的姿势稳定性及其神经肌肉控制的影响。方法 比较 20 名男性和 20 名女性在髋外展肌疲劳干预前后进行单腿侧跳落地期间的压力中心(center of pressure, COP)、地面反作用力(ground reaction force, GRF)、下肢运动学、关节力矩、肌肉活动度等。结果 疲劳后,男性和女性 COP 在冠状面的最大位移和平均速度增加,髋关节外展峰值角度和踝关节外翻峰值角度增加,踝关节内翻峰值力矩增加。触地前 200 ms,男性股直肌、股二头肌、胫前肌、腓骨长肌的激活小于女性;触地后 200 ms,男性股二头肌激活小于女性。结论 髋外展肌疲劳导致冠状面姿势稳定性下降,髋、踝关节冠状面稳定性下降,可能增加关节损伤风险。不同性别人群的姿势调控策略存在差异,提示下肢关节损伤机制的性别差异值得进一步探究。

关键词: 髋外展肌; 疲劳; 落地; 姿势控制

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.023

Effects of Hip Abductor Fatigue on Neuromuscular Control During Single-Leg Side-Jump Landing in Different Gender Groups

WANG Ya^{1,2}, ZHU Ting², LIN Jinpeng², ZHANG Nan^{1,2}, WEI Hongman²,
CHEN Xinpeng^{1,2}, CHEN Bin¹, ZHAI Hua^{1,2}

(1. Shanghai Yangzhi Rehabilitation Hospital (Shanghai Sunshine Rehabilitation Center), Tongji University, Shanghai 201619, China; 2. School of Kinesiology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Objective To compare the effects of hip abductor fatigue on postural stability and neuromuscular control in different gender groups during single-leg side-jump landing. **Methods** Twenty male and twenty female adults were required to execute single-leg side-jump landing before and after hip abductor fatigue protocol. The center of pressure (COP), ground reaction force (GRF), lower extremity kinematics, joint moment, muscle activity were compared. **Results** For both males and females after fatigue, the maximum displacements and average velocities of COP decreased, and the peak angles of hip abduction and ankle eversion increased, and the peak torques of ankle inversion increased. At 200 ms pre-landing, the activation of rectus femoris, biceps femoris, tibialis anterior, peroneus longus were lower in male than that in female. At 200 ms post-landing, the activation of biceps femoris in male was lower than that in female after fatigue. **Conclusions** The postural stability in frontal plane decreased after hip abductor fatigue. The frontal plane control of hip joint and ankle joint was weakened, which might increase the risk of joint injury. There are differences in postural strategies for different genders, indicating that gender difference in the mechanism of lower limb joint injury is worth of further investigation.

Key words: hip abductor; fatigue; landing; postural control

收稿日期: 2021-05-19; 修回日期: 2021-08-02

通信作者: 翟华, 副教授, 硕士生导师, E-mail: 1456041164@qq.com

髌外展肌是髌关节周围的重要肌群,具有维持骨盆侧方稳定的作用,尤其是跑步、跳跃、落地等单腿支撑的动作对侧方稳定性的要求更高^[1]。在姿势平衡任务中,髌外展肌可以固定股骨头在髌臼中的位置,当身体失衡时,可以产生代偿力抵消重力作用,防止骨盆下降和髌关节内收,从而为下肢运动提供近端稳定性^[2-3]。髌外展肌功能不足会导致姿势稳定下降,影响远端关节稳定性,可能增加膝关节和踝关节的损伤风险^[4-5]。

运动性肌肉疲劳是指运动过程中,肌肉收缩产生的力量或收缩能力的暂时性下降^[6]。通过疲劳诱导的肌力下降可以反映肌肉功能不足状态,用于下肢关节损伤风险的研究^[7-9]。疲劳不仅会损害最大收缩任务的表现,还会导致神经肌肉控制减弱,损害姿势控制的表现^[10-11]。神经肌肉调控策略包括预期姿势调整策略(anticipatory postural adjustments, APAs)和补偿姿势调整策略(compensatory postural adjustments, CPAs)^[12-13]。

研究表明,髌外展肌疲劳会影响冠状面姿势稳定性^[7,14]。在功能运动表现中,不同性别间表现出下肢生物力学的差异^[15]。然而,鲜有研究观察髌外展肌疲劳对不同性别人群神经肌肉控制的影响。此外,对于动态姿势控制的研究主要集中于单腿前跳落地或纵跳落地,鲜有关于髌外展肌疲劳对单腿侧跳落地任务姿势控制影响的报道。

1 研究方法

1.1 受试者

通过上海市同济大学附属养志康复医院招募20名男性青年志愿者[年龄(21.43±1.23)岁;身高(174.65±4.12)cm;体重(66.50±11.31)kg]和20名女性青年志愿者[年龄(21.80±1.11)岁;身高(160.15±5.93)cm;体重(50.0±6.7)kg]。所有受试者确认实验前24h内未进行剧烈运动,半年内无运动损伤史,身体状况良好,并签署知情同意书。

1.2 实验流程

① 受试者热身5min并练习单腿侧跳落地动作至少3次,避免学习效应。② 取3次全力单腿侧跳中最大值的75%作为测试距离并标记。③ 根据文献^[16]的建议,标准皮程序后将电极粘帖在所测肌肉的肌腹上。测试前在标准体位下采集每块

肌肉的最大自主等长收缩(maximum voluntary contraction, MVC)肌电信号,用于归一化处理。④ 根据Visual 3D软件的建模要求,安放标志点,定义骨盆、大腿、小腿、足等环节。⑤ 采用8台Vicon高速红外摄像头(100 Hz, Vicon T40, Oxford Metrics公司,英国)、AMTI三维测力台(1 kHz, AMTI OR6, AMTI公司,美国)和无线表面肌电系统(2 kHz, Noraxon公司,美国)同步采集疲劳前后落地期间赤足状态压力中心(center of pressure, COP)、地面反作用力(ground reaction force, GRF)、关节角度、力矩和表面肌电数据,均需成功采集3次。⑥ 进行髌外展肌疲劳干预,干预前后使用MicroFET3测力计测量3次受试者髌外展MVC肌力,疲劳后即刻填写受试者自感疲劳分级表(rating of perceived exertion, RPE)^[7,17]。

1.3 单腿侧跳落地

受试者站立于测试标记点,双手固定在臀部后方以固定上肢及躯干,优势侧下肢作为支撑腿,非优势侧下肢膝关节屈曲,从测试距离处水平向侧方(外侧)跳跃,跳到测力台的中央标记点位置,要求受试者保持落地瞬间的静态姿势,测试期间足跟无位移,头部无明显移动,目视正前方固定位置,完成3次成功的测试,每次成功采集10s,休息30s。

1.4 疲劳干预方案

疲劳方案的干预进行两次,间隔1min,以确保达到髌外展肌的完全疲劳。将弹力带固定在受试者双侧大腿远端,要求受试者将优势腿作为支撑腿,非优势腿做髌外展,干预期间要求躯干保持伸展,防止骨盆旋转,支撑腿和外展腿均保持膝伸展,避免出现代偿。要求髌外展达到30°~45°,频率为60次/min。当受试者竭尽全力连续两次不能完成30°以上外展,同时RPE≥17分时,认为达到疲劳状态,休息1min,随后重复该过程。当受试者再次达到疲劳状态,立即测量受试者优势腿最大外展肌力,确定肌力下降超过20%,可以进行疲劳后测试^[7]。如未达到规定力竭水平,重复上述疲劳过程。

1.5 评价指标

1.5.1 疲劳干预参数 髌外展运动个数、疲劳前后髌外展MVC肌力、疲劳后即刻的RPE值和疲劳干预开始30s和终末30s的臀中肌平均功率频率

(median power frequency, MPF)。

1.5.2 姿势稳定性特征 选取 GRF 在矢状面、冠状面和水平面上的稳定时间^[18];触地后 2 s 的 COP 轨迹长度、COP 椭圆面积、COP 在矢状面和冠状面上的最大位移和平均速度。

1.5.3 运动学和动力学参数 选取从触地到膝关节屈曲到最低时刻(即膝关节最大屈曲角度)连续时间段矢状面和冠状面的髋、膝、踝三维关节峰值角度和关节峰值力矩。根据关节角度曲线和地面反作用力通过逆向动力学分析方法计算净关节力矩。

1.5.4 表面肌电特征 参考既往研究^[19],选取落地触地前 200 ms 和触地后 200 ms 臀中肌、股直肌、股二头肌、胫前肌、腓肠肌外侧头和腓骨长肌的肌电均方根振幅(root mean square, RMS)。

1.6 统计学

利用 SPSS 25.0 软件,使用独立样本 *t* 检验比较男性组和女性组的基线数据;使用双因素(疲劳×性别)重复测量方差分析比较疲劳因素(前、后)和

性别因素(男、女)对于主要参数变量的主效应和交互作用,存在交互时,组内使用配对样本 *t* 检验,组间使用独立样本 *t* 检验进行具体分析。显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 疲劳干预结果

男、女性髋外展分别为(549.3 ± 178.3)、(595.2 ± 152.4)个;男、女性报告的 RPE 分别为 18.8 ± 0.4、18.6 ± 0.5;男、女性髋外展 MVC 肌力分别下降了 29.9%、26.4%。疲劳干预过程中,与开始 30 s 相比,终末 30 s 的男性臀中肌 MPF($P<0.001$)和女性臀中肌 MPF($P<0.001$)均显著降低。上述参数在男性和女性之间均无显著性差异($P>0.05$)。

2.2 姿势稳定性特征

在疲劳干预前后,男、女性 GRF 在矢状面、冠状面和水平面的稳定时间均未显示出显著性的改变(见表 1)。

表 1 疲劳前后不同性别 GRF 稳定时间比较

Tab.1 Comparison of the time to stability of ground reaction force before and after fatigue between different gender groups

参数	男性	女性	<i>P</i>	疲劳前	疲劳后	<i>P</i>
TTS _{AP} /ms	1738.01 ± 20.93	1747.22 ± 21.51	0.761	1742.14 ± 22.55	1743.09 ± 20.42	0.976
TTS _{ML} /ms	1847.39 ± 9.78	1853.33 ± 9.78	0.670	1841.86 ± 9.06	1858.85 ± 7.39	0.068
TTS _V /ms	1155.83 ± 19.82	1178.45 ± 20.33	0.431	1162.41 ± 15.53	1171.87 ± 14.83	0.386

注:TTS 为 GRF 稳定时间;AP、ML、V 分别表示前后向、中外向、竖直向。下同。

在 COP_{AP} 最大位移上发现交互作用,事后检验发现,疲劳前男性 COP_{AP} 最大位移($P=0.008$)显著大于女性;疲劳后男性 COP_{AP} 最大位移($P=0.035$)较疲劳前显著降低。疲劳后 COP_{ML} 的最

大位移($P=0.003$)和平均速度($P=0.036$)显著大于疲劳前;男性 COP 轨迹长度($P=0.021$)和 COP 椭圆面积($P=0.001$)显著大于女性(见表 2)。

表 2 疲劳前后不同性别 COP 特征比较(* $P<0.05$)

Tab.2 Comparison of center of pressure features before and after fatigue between different gender groups

参数	男性	女性	<i>P</i>	疲劳前	疲劳后	<i>P</i>
COP 轨迹长度/cm	42.06 ± 1.34	37.53 ± 1.31	0.021 *	39.25 ± 0.99	40.35 ± 1.03	0.238
COP 椭圆面积/cm ²	34.88 ± 1.61	26.73 ± 1.57	0.001 *	29.82 ± 1.39	31.78 ± 1.37	0.226
COP _{AP} 最大位移/cm	13.95 ± 0.68	11.75 ± 0.68	0.027 *	13.16 ± 0.61	12.54 ± 0.52	0.312
COP _{ML} 最大位移/cm	5.41 ± 0.22	5.28 ± 0.21	0.674	4.94 ± 0.15	5.75 ± 0.23	0.003 *
COP _{AP} 平均速度/(cm·s ⁻¹)	16.04 ± 0.61	14.52 ± 0.58	0.080	15.12 ± 0.43	15.44 ± 0.55	0.553
COP _{ML} 平均速度/(cm·s ⁻¹)	9.98 ± 0.34	9.05 ± 0.34	0.060	9.22 ± 0.29	9.82 ± 0.26	0.036 *

2.3 运动学和动力学参数

髋关节外展峰值角度($P=0.013$)和踝关节外翻峰值角度($P=0.01$)较疲劳前显著增加;男性髋

关节屈曲峰值角度($P=0.024$)显著小于女性,男性髋关节外展峰值角度($P=0.023$)显著大于女性(见表 3)。

表3 疲劳前后不同性别关节峰值角度比较 (* $P < 0.05$)

Tab.3 Comparison of the peak joint angles before and after fatigue between different gender groups

单位: (°)

运动状态	男性	女性	<i>P</i>	疲劳前	疲劳后	<i>P</i>
髋屈曲	25.92±1.59	31.22±1.59	0.024 *	28.10±1.25	29.04±1.11	0.705
髋外展	-16.46±1.21	-12.15±1.33	0.023 *	-13.64±0.88	-14.96±0.98	0.013 *
膝屈曲	-49.01±1.83	-52.65±1.77	0.161	-51.01±1.29	-50.65±1.45	0.732
膝内翻	-2.91±1.49	-6.08±1.45	0.136	-5.12±1.07	-3.87±1.18	0.160
踝跖屈	-0.34±2.81	-0.44±2.81	0.980	-0.35±1.97	-0.44±2.02	0.826
踝外翻	-19.13±1.93	-18.79±1.93	0.903	-18.47±1.38	-19.45±1.37	0.010 *

髋关节伸展峰值力矩 ($P = 0.018$) 较疲劳前显著降低, 踝关节内翻峰值力矩 ($P < 0.001$) 较疲劳前

显著增加; 男性踝关节跖屈峰值力矩 ($P = 0.048$) 显著大于女性 (见表4)。

表4 疲劳前后不同性别关节峰值力矩比较 (* $P < 0.05$)

Tab.4 Comparison of the peak joint torques before and after fatigue between different gender groups

单位: (N·m)·kg⁻¹

运动状态	男性	女性	<i>P</i>	疲劳前	疲劳后	<i>P</i>
髋伸展	-2.11±0.14	-2.11±0.14	0.988	-2.24±0.11	-1.98±0.12	0.018 *
髋外展	-1.10±0.08	-1.18±0.08	0.464	-1.17±0.06	-1.11±0.06	0.162
膝伸展	1.23±0.06	1.25±0.06	0.844	1.24±0.05	1.24±0.04	0.806
膝内翻	-0.43±0.05	-0.34±0.05	0.243	-0.38±0.04	-0.39±0.04	0.690
踝跖屈	-1.05±0.05	-0.90±0.05	0.048 *	-0.97±0.04	-0.98±0.04	0.361
踝内翻	0.40±0.03	0.39±0.03	0.833	0.38±0.02	0.41±0.02	<0.001 *

2.4 表面肌电特征

触地前 200 ms, 疲劳后臀中肌 RMS ($P = 0.047$) 较疲劳前显著降低; 男性股直肌

($P = 0.004$)、股二头肌 ($P = 0.014$)、胫前肌 ($P < 0.001$)、腓骨长肌 ($P = 0.008$) 的 RMS 显著小于女性 (见表5)。

表5 疲劳前后不同性别触地前 200 ms RMS 比较 (* $P < 0.05$)

Tab.5 Comparison of the root mean square at 200 ms pre-landing before and after fatigue between different gender groups

单位: %

肌肉	男性	女性	<i>P</i>	疲劳前	疲劳后	<i>P</i>
臀中肌	65.36±5.96	65.04±6.11	0.970	68.09±4.46	62.3±4.53	0.047 *
股直肌	38.35±4.71	59.37±4.84	0.004 *	50.28±3.78	47.44±3.21	0.143
股二头肌	47.68±7.99	77.78±8.44	0.014 *	64.85±5.92	60.61±5.90	0.052
胫前肌	32.58±3.15	50.73±3.23	<0.001 *	41.58±2.36	41.73±2.34	0.914
腓肠肌外侧头	57.25±5.26	61.63±5.54	0.570	61.44±4.32	57.44±3.67	0.109
腓骨长肌	59.83±4.25	76.57±4.15	0.008 *	67.92±3.05	68.48±3.29	0.803

触地后 200 ms, 臀中肌 ($P = 0.034$) 和胫前肌 ($P = 0.037$) 的 RMS 发现交互作用, 事后检验发现, 疲劳前男性胫前肌 ($P = 0.045$) 的 RMS 显著小于女性; 疲劳后男性臀中肌 ($P = 0.003$) 和胫前肌

($P = 0.05$) 的 RMS 显著增加。此外, 疲劳后腓肠肌外侧头的 RMS ($P = 0.023$) 显著大于疲劳前; 男性股二头肌 ($P = 0.019$) 和腓骨长肌 ($P < 0.001$) 的 RMS 值显著小于女性 (见表6)。

表6 疲劳前后不同性别触地后 200 ms RMS 比较 (* $P < 0.05$)

Tab.6 Comparison of the root mean square at 200 ms post-landing before and after fatigue between different gender groups

单位: %

肌肉	男性	女性	<i>P</i>	疲劳前	疲劳后	<i>P</i>
臀中肌	80.64±6.74	81.14±6.92	0.959	76.26±4.58	85.52±5.83	0.030 *
股直肌	72.90±7.27	89.93±7.47	0.111	78.65±4.97	84.19±6.46	0.268
股二头肌	45.99±7.16	71.38±7.37	0.019 *	60.41±5.18	56.96±5.67	0.333
胫前肌	67.49±4.00	72.82±4.00	0.352	68.67±3.48	71.63±3.57	0.485
腓肠肌外侧头	92.35±8.76	116.58±8.99	0.061	94.55±5.54	114.38±9.10	0.023 *
腓骨长肌	74.55±5.35	103.62±5.07	<0.001 *	87.54±3.55	90.62±4.71	0.434

3 讨论

3.1 疲劳干预

本研究中,男、女性髋外展肌力均下降超过20%^[7],男性和女性报告的RPE均大于17^[17],男、女性疲劳干预终末30 s的臀中肌MPF显著降低^[20],与前人研究结果一致。此外,男性和女性在髋外展运动个数、RPE、疲劳前后MVC差值和MPF上均无显著差异。本文认为,基于此模型可以观察髋外展肌疲劳对不同性别人群姿势稳定性及神经肌肉控制的影响。

3.2 疲劳对姿势稳定性特征的影响

GRF稳定时间反映落地过程中GRF到达稳定状态的时间,可以用于评估疲劳对神经肌肉控制和动态稳定性的影响^[21]。研究发现,疲劳会导致落地过程中的GRF稳定时间显著增加^[18,22]。然而,本文未观察到髋外展肌疲劳后GRF稳定时间在3个平面上的显著变化推测原因是疲劳诱导部位或方式的不同,Brazen等^[22]通过多种组合功能活动诱导整体性疲劳,导致稳定性下降。Kazem等^[18]诱导的是腓骨长肌的局部疲劳,影响踝关节稳定功能。

本文发现,疲劳后男、女性落地期间冠状面COP最大位移及平均速度均显著增加,说明髋外展肌疲劳会导致落地期间的冠状面姿势稳定性下降^[23]。COP在矢状面的摆动主要受到踝关节的调控^[24]。男性COP矢状面最大位移的变化可能反映男性落地期间的踝策略控制,需要结合神经肌肉控制进一步探讨。此外,男性COP绝对位移距离显著大于女性,导致这种差异的机制仍需要进一步探讨。

3.3 疲劳对神经肌肉控制的影响

落地过程中,人体受到的冲击力可能是体重2~11倍,需要有效的神经肌肉控制以缓冲外部撞击,减少不利影响^[25]。触地前阶段肌肉激活水平的变化,可以反映潜在的APAs调控,通过预期性的肌肉激活应对即将到来的外部冲击与干扰^[26]。触地前臀中肌预激活显著减小,结合疲劳后髋外展MVC肌力显著下降,说明疲劳导致肌肉收缩能力降低。男性和女性落地期间的髋关节外展峰值角度较疲劳前显著增加,推测疲劳后髋外展肌收缩能力降低,可能无法有效缓冲疲劳后髋关节受到的外侧冲

击,导致髋关节冠状面稳定性下降。

研究表明,女性优势侧肢体较男性表现出更强的APAs调控^[27]。落地期间女性下肢肌肉预激活更多,推测女性比男性更依赖于APAs调控。结合上述男性COP绝对位移显著大于女性,可以推测男性下肢肌肉预激活更小,故造成更大的姿势摆动。落地期间男性比女性表现出更大的髋关节外展峰值角度,更小的髋关节屈曲峰值角度,推测这是骨盆结构差异导致运动表现的差异^[28]。结合男性疲劳后触地后的臀中肌肌肉激活增加,说明男性髋关节冠状面稳定性受疲劳的影响更大,需要更用力以维持骨盆的侧方稳定。当APAs不足以有效调控姿势干扰时,CPAs发挥作用,通过增加肌肉激活,进而增加肢体僵硬,调整关节运动^[29]。

疲劳后神经肌肉控制减弱会导致对抗冲击的能力减弱^[11]。疲劳后男、女性落地阶段踝关节外翻峰值角度增加,未观察到踝关节外翻肌群激活增加,说明踝关节外翻角度的增加不是肌肉主动收缩产生,而是落地时足底受到外侧冲击增加导致的被动外翻角度增加。肌肉活动是受神经中枢控制,肌肉关节力矩变化反映出神经中枢对神经-肌肉控制的变化^[30]。结合疲劳后踝关节内翻峰值力矩增加,说明疲劳后的肌肉预期调控不足以抵抗外部冲击,通过增加触地的内翻力矩抵抗踝关节受到的外翻冲击,反映疲劳后踝关节冠状面的神经肌肉控制减弱。男性踝关节跖屈峰值力矩显著大于女性,推测男性落地时足底受到更大的背屈冲击,疲劳后男性触地后阶段的胫前肌激活显著增加,结合上述男性COP矢状面最大位移降低,推测男性踝关节受到的冲击更大,需要更强的踝关节调控以维持姿势稳定。

单腿侧跳落地动作是以单腿站立向膝关节外侧平移跳跃落地,维持姿势的平衡,该过程中膝关节保持屈曲外展,屈膝肌群在维持稳定中发挥重要作用^[31]。女性落地期间较男性表现出更大的股二头肌激活,反映女性落地期间更依赖于膝关节的动态控制,腘绳肌群可以缓冲膝关节运动过程中受到的外部冲击,对膝关节的动态控制很重要^[32]。

研究发现,COP摆动增加是姿势稳定性变差的表现,下肢关节峰值角度、峰值力矩增加是关节稳定性下降的表现,说明髋外展肌疲劳导致神经肌肉

控制减弱。在落地表现中,女性更依赖于 APAs 调控,男性肌肉预激活不足可能导致姿势摆动更大;男性需要更强的踝关节调控,可能导致疲劳后 COP 矢状面上的变化;女性落地期间表现出更强的膝关节调控,未发现膝关节运动学的差异。然而大量研究表明,女性在落地阶段更易发生非接触性 ACL 损伤。综上所述,受到髌外展肌疲劳的影响,性别差异可能造成不同的关节损伤风险,关于不同性别间下肢关节的损伤机制值得进一步探究。

4 结论

髌外展肌疲劳导致髌外展肌收缩能力下降,冠状面姿势稳定性下降,髌、踝关节冠状面稳定性下降,神经肌肉控制减弱,可能增加关节损伤风险。不同性别人群的姿势调控策略存在差异,女性更依赖于预期姿势控制。落地期间,男性表现出更强的踝关节控制,女性表现出更强的膝关节控制。不同性别间的神经肌肉控制存在差异,提示下肢关节损伤机制的性别差异值得进一步探究,为相关损伤预防及康复治疗提供新思路。

参考文献:

- [1] GRIMALDI A. Assessing lateral stability of the hip and pelvis [J]. *Man Ther*, 2011, 16(1): 26-32.
- [2] POLKOWSKI GG, Clohisy JC. Hip biomechanics [J]. *Sports Med Arthrosc Rev*, 2010, 18(2): 56-62.
- [3] JENNIFER EE. Gluteus medius activity during 3 variations of isometric single-leg stance [J]. *J Sport Rehabil*, 2005, 14(1): 1-11.
- [4] LEE SP, POWERS CM. Individuals with diminished hip abductor muscle strength exhibit altered ankle biomechanics and neuromuscular activation during unipedal balance tasks [J]. *Gait Posture*, 2014, 39(3): 933-938.
- [5] GLENN EC. The effect of weak hip abductors or external rotators on knee valgus kinematics in healthy subjects: A systematic review [J]. *J Sport Rehabil*, 2012, 21(3): 273-284.
- [6] ENOKA RM, DUCHATEAU J. Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function [J]. *J Physiol*, 2008, 586(1): 11-23.
- [7] GETSER CF, O'CONNOR KM, EARL JE. Effects of isolated hip abductor fatigue on frontal plane knee mechanics [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2010, 42(3): 535-345.
- [8] GAFNER SC, HOEVEL V, PUNT IM, *et al.* Hip-abductor fatigue influences sagittal plane ankle kinematics and shank muscle activity during a single-leg forward jump [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2018, 43: 75-81.
- [9] 夏锐, 张希妮, 张桑, 等. 运动性疲劳的生物力学评价及其与损伤关系研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 127-132.
- [10] XIA R, ZHANG XN, ZHANG S, *et al.* Research progress of biomechanical evaluation on exercise-induced fatigue and its relationship with sport injuries [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 127-132.
- [10] PAILLARD T. Effects of general and local fatigue on postural control: A review [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2012, 36(1): 162-176.
- [11] 王熙, 杨洋, 孙晓乐, 等. 神经肌肉疲劳前后运动鞋对下肢落地冲击的生物力学影响 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(3): 356-363.
- [11] WANG X, YANG Y, SUN XL, *et al.* Biomechanical effects of shoe cushioning on lower extremities during drop landing before and after neuromuscular fatigue [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(3): 356-363.
- [12] XIE L, WANG J. Anticipatory and compensatory postural adjustments in response to loading perturbation of unknown magnitude [J]. *Exp Brain Res*, 2019, 237(1): 173-180.
- [13] 吕汇, 范勇, 冯金升, 等. 运动性肌肉疲劳影响预期姿势调节的研究进展 [J]. *航天医学与医学工程*, 2020, 33(4): 365-369.
- [14] CHRISTOPHER C, JIM E, SANDRA S. Hip-abductor fatigue, frontal-plane landing angle, and excursion during a drop jump [J]. *J Sport Rehabil*, 2005, 14(4): 321-331.
- [15] BRUENING DA, FRIMENKO RE, GOODYEAR CD, *et al.* Sex differences in whole body gait kinematics at preferred speeds [J]. *Gait Posture*, 2015, 41(2): 540-545.
- [16] HERMENS HJ, FRERIKS B, DISSELHORST-KLUG C, *et al.* Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2000, 10(5): 361-374.
- [17] RADZAK KN, STICKLEY CD. Fatigue-induced hip abductor weakness and changes in biomechanical risk factors for running-related injuries [J]. *J Athl Train*, 2020, 55(12): 1270-1276.
- [18] KAZEM M, GHOLAM REZA O, SAEED T, *et al.* Effects of peroneal muscles fatigue on dynamic stability following lateral hop landing: Time to stabilization versus dynamic postural stability index [J]. *J Sport Rehabil*, 2019, 28(1): 17-23.
- [19] SIMPSON JD, STEWART EM, TURNER AJ, *et al.* Neuromuscular control in individuals with chronic ankle

- instability: A comparison of unexpected and expected ankle inversion perturbations during a single leg drop-landing [J]. *Hum Mov Sci*, 2019, 64: 133-141.
- [20] PATREK MF, KERNOZEK TW, WILLSON JD, *et al.* Hip-abductor fatigue and single-leg landing mechanics in women athletes [J]. *J Athl Train*, 2011, 46(1): 31-42.
- [21] WIKSTROM EA, POWERS ME, TILLMAN MD. Dynamic stabilization time after isokinetic and functional fatigue [J]. *J Athl Train*, 2004, 39(3): 247-253.
- [22] BRAZEN DM, TODD MK, AMBEGAONKAR JP, *et al.* The effect of fatigue on landing biomechanics in single-leg drop landings [J]. *Clin J Sport Med*, 2010, 20(4): 286-292.
- [23] LEE SP, POWERS C. Fatigue of the hip abductors results in increased medial-lateral center of pressure excursion and altered peroneus longus activation during a unipedal landing task [J]. *Clin Biomech*, 2013, 28(5): 524-529.
- [24] KIM D, HWANG JM. The center of pressure and ankle muscle co-contraction in response to anterior-posterior perturbations [J]. *PLoS One*, 2018, 13(11): e0207667.
- [25] MCNITT-GRAY JL. Kinematics and impulse characteristics of drop landings from three heights [J]. *Int J Sport Biomech*, 1991, 7(2): 201-224.
- [26] SANTOS MJ, KANEKAR N, ARUIN AS. The role of anticipatory postural adjustments in compensatory control of posture; 2. Biomechanical analysis [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2010, 20(3): 398-405.
- [27] BUSSEY MD, CASTRO MPD, ALDABE D, *et al.* Sex differences in anticipatory postural adjustments during rapid single leg lift [J]. *Hum Mov Sci*, 2018, 57: 417-425.
- [28] KIAPOUR A, JOUKAR A, ELGAFY H, *et al.* Biomechanics of the sacroiliac joint: Anatomy, function, biomechanics, sexual dimorphism, and causes of pain [J]. *Int J Spine Surg*, 2020, 14(Suppl 1): 3-13.
- [29] DOS SANTOS MJ, GORGES AL, RIOS JL. Individuals with chronic ankle instability exhibit decreased postural sway while kicking in a single-leg stance [J]. *Gait Posture*, 2014, 40(1): 231-236.
- [30] 刘宇. 生物力学在运动控制与协调研究中的应用 [J]. *体育科学*, 2010, 30(11): 62-73.
- [31] NEDERGAARD NJ, DALBØ S, PETERSEN SV, *et al.* Biomechanical and neuromuscular comparison of single- and multi-planar jump tests and a side-cutting maneuver: Implications for ACL injury risk assessment [J]. *Knee*, 2020, 27(2): 324-333.
- [32] WITHROW TJ, HUSTON LJ, WOJTYS EM, *et al.* Effect of varying hamstring tension on anterior cruciate ligament strain during *in vitro* impulsive knee flexion and compression loading [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2008, 90(4): 815-823.