

文章编号: 1004-7220(2022)02-0299-06

# 10周北欧腓绳肌运动对膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力的影响

王文锦<sup>1</sup>, 朱仁坤<sup>2</sup>, 马冉冉<sup>3</sup>, 田斐<sup>1</sup>, 朱婷<sup>1</sup>, 赵雅琦<sup>1</sup>, 李霖欣<sup>1</sup>, 王少白<sup>1</sup>

(1.上海体育学院 运动科学学院,运动健身科技省部共建教育部重点实验室,上海 200438;

2.北京体育大学 中国篮球运动学院,北京 100084; 3.山东师范大学 体育学院,济南 250014)

**摘要:**目的 比较10周不同支撑方式的北欧腓绳肌运动对膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力的影响。方法 选取28名高校男子足球运动员,随机分为手支撑组(HS组,  $n=14$ )和非手支撑组(NHS组,  $n=14$ ),进行10周北欧腓绳肌训练,对干预前后的膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力进行测试。结果 10周北欧腓绳肌运动后,HS组、NHS组膝关节离心控制屈曲角度分别显著减小 $8^\circ$ 和 $10^\circ$ ,且NHS组比HS组小 $12^\circ$  ( $P<0.05$ );HS组、NHS组腓绳肌和股四头肌离心运动峰力矩均显著增加,且NHS组腓绳肌离心运动峰力矩在角速度 $60^\circ/\text{s}$ 、 $120^\circ/\text{s}$ 时分别比HS组高16、13  $\text{N}\cdot\text{m}$  ( $P<0.05$ )。结论 非手支撑方式在改善膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力方面均优于手支撑方式。本文建议将非手支撑的北欧腓绳肌运动作为足球运动员日常训练之一,用于预防腓绳肌损伤。

**关键词:** 膝关节; 腓绳肌; 离心控制; 肌力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.02.017

## Effects of 10-Week Nordic Hamstring Training on Knee Eccentric Control Angle and Muscle Strength

WANG Wenjin<sup>1</sup>, ZHU Renkun<sup>2</sup>, MA Ranran<sup>3</sup>, TIAN Fei<sup>1</sup>, ZHU Ting<sup>1</sup>, ZHAO Yaqi<sup>1</sup>, LI Jixin<sup>1</sup>, WANG Shaobai<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, School of Kinesiology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2.China Basketball College, Beijing Sport University, Beijing 100048, China; 3.College of Physical Education, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

**Abstract: Objective** To compare the effects of different support method on eccentric control angle and muscle strength of knee joints in 10-week Nordic hamstring exercise.**Methods** Twenty-eight college male football players were randomly divided into hand support group (HS group,  $n=14$ ) and non-hand support group (NHS group,  $n=14$ ) for 10 weeks. The eccentric control angle and eccentric muscle strength of knee joints were tested before and after the intervention.**Results** After 10 weeks of Nordic hamstring training, the eccentric control flexion angle of knee joint in HS group and NHS group was significantly decreased by  $8^\circ$  and  $10^\circ$ , and the knee joint angle in NHS group was  $12^\circ$  lower than that in HS group ( $P<0.05$ ); the peak torque of hamstring and quadriceps femoris in both HS group and NHS group was significantly increased, and the peak torque of hamstring centrifugal motion at  $60^\circ/\text{s}$  and  $120^\circ/\text{s}$  in NHS group was 16 and 13  $\text{N}\cdot\text{m}$  higher than that in HS group, respectively ( $P<0.05$ ).**Conclusions** NHS group is better than HS group in improving knee flexion angle and centrifugal muscle force. It is suggested that Nordic hamstring training should be taken as one of the daily training tasks for football players to prevent hamstring injury.

**Key words:** knee joint; hamstring; centrifugal control; muscle strength

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-07-01

基金项目: 科技部重点研发计划(2018YFF0300504), 国家自然科学基金项目(81702211)

通信作者: 王少白, 教授, 博士生导师, E-mail: wangs@innotion.biz

腘绳肌由股二头肌、半腱肌和半膜肌组成,具有伸髋关节和屈膝关节功能,对以跑跳为基础的运动项目至关重要<sup>[1]</sup>。腘绳肌损伤是足球、橄榄球和短跑运动中最常见的非接触性损伤之一,占有下肢运动损伤12%<sup>[2-3]</sup>。其中,足球运动员腘绳肌损伤尤为值得关注,占全部运动损伤12%~16%,复发率高达12%~48%,且近30年来损伤率一直没有下降<sup>[4-6]</sup>。腘绳肌损伤不仅影响比赛成绩,威胁职业生涯,而且康复周期长,严重影响生活质量。通过良好的训练有效预防腘绳肌损伤,具有重要的现实意义。

腘绳肌损伤机制主要包括两种:一种发生在奔跑中的末期摆动阶段,即当腘绳肌的离心收缩需求提高以使摆动的肢体减速并准备触地阶段;另一种发生在腘绳肌过度伸展时(膝关节屈曲角度约20°),由于屈髋伸膝使得腘绳肌过度拉长<sup>[7-8]</sup>。离心控制能力是指控制肌肉离心收缩的能力,肌肉离心收缩是肌肉在收缩产生张力的同时被拉长的收缩方式。离心力量和离心控制能力可以通过肌肉离心收缩训练来提高。提高腘绳肌的离心肌力和膝关节的离心控制能力可以减少腘绳肌损伤的风险<sup>[9-10]</sup>。

北欧腘绳肌运动(Nordic hamstring exercise)是由Mjolsnes等<sup>[11]</sup>于2004年提出的一种以膝关节为主导的自重式离心训练,被国际足联医学研究中心(F-MARC)纳入“FIFA11+”综合热身练习。研究表明,通过6~10周北欧腘绳肌运动可有效提高腘绳肌的离心肌力,并显著降低损伤率及复发率<sup>[12-14]</sup>。北欧腘绳肌运动是一种简单易操作且无器械设备需求的搭档练习,训练对象采取跪姿,躯干保持直立,搭档在训练对象脚踝处施加压力,训练对象躯干前倾,最后用手支撑来缓冲,或非手支撑平落在垫子上。研究发现,手支撑方式下躯干前倾角度可能受限<sup>[15]</sup>。而有关北欧腘绳肌运动不同触地方式对膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力影响的研究,目前鲜有报道。

本文通过10周北欧腘绳肌的运动干预,比较手支撑和非手支撑的北欧腘绳肌运动对膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力的影响,为选择更有效预防和减少足球运动员腘绳肌损伤的运动方式提供科学的数据支撑。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

招募28名健康的高校男子足球运动员为实验对象,随机分为手支撑组(HS组)和非手支撑组(NHS组)。其中,剔除由于在训练干预过程中因伤病(伤病原因与干预训练无关)或中断1周以上人员数据,最后共24人符合标准,纳入结果统计(见表1)。所有受试者均被要求在测试前一天不要进行大强度运动,以减少肌肉疲劳对实验的影响。本研究已通过上海体育学院伦理委员会审查批准。所有受试者均自愿参加实验,被告知实验目的、程序和可能存在的风险,阅读并签署书面知情同意书。

表1 受试者基本情况

Tab.1 Basic information of the subjects

组别	人数	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	训练年限
HS组	12	21.7±1.6	178.4±5.2	73.2±8.2	5.2±2.3
NHS组	12	22.3±1.1	176.2±6.0	76.2±9.4	5.7±2.6

### 1.2 实验流程

本研究包括1次前测、10周北欧腘绳肌的运动干预和1次后测。前测和后测分别在干预前后1周,在1天的同一时间进行测量,以尽量减少在不同时刻对测试结果的影响。

北欧腘绳肌运动干预前的准备活动包括:在跑步机上以10 km/h速度跑5 min。休息5 min后,进行北欧腘绳肌运动。所有的热身、训练和测试都安排在实验室进行,室温26℃。所有参与者在运动和测试中都得到同样的指导和口头鼓励。

### 1.3 10周北欧腘绳肌运动的方案

**1.3.1 HS组** 北欧腘绳肌运动是一种搭档练习。训练对象从跪姿开始,躯干保持直立,双手放于躯干两侧。搭档对训练对象的脚踝施加压力,确保在整个运动中与地面接触,训练对象的躯干前倾,最后用手支撑来缓冲[见图1(a)]。

**1.3.2 NHS组** 训练对象从跪姿开始,躯干保持直立,双手环抱于胸前,训练对象的躯干前倾,要求尽可能长时间的保持躯干前倾,直到平落在垫子上[见图1(b)]。HS组和NHS组动作不同,干预方案相同(见表2)。

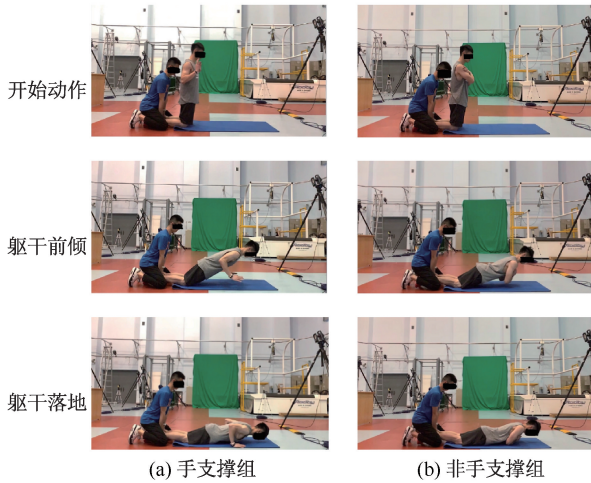


图 1 北欧腓绳肌运动示意图

Fig.1 Schematic diagram of Nordic hamstring exercise

(a) Hand support group, (b) Non-hand support group

表 2 10 周北欧腓绳肌运动干预方案

Tab.2 10-week Nordic hamstring protocol

周数	方案	
	组×次	频率/次
1	2×5	1
2	2×6	2
3	3×5	3
4	3×6	3
5	3×7	3
6	3×8	3
7	3×9	3
8	3×10	3
9	3×11	3
10	3×12	3

## 1.4 实验仪器和实验参数

**1.4.1 Con-Trex 等速肌力测试仪** 德国 Physiomed 公司生产的 Con-Trex 人体肌力评估和训练系统(型号:Con-Trex-Mj)。在每次测试前对仪器各参数进行校准,受试者舒适地坐在测试椅上,髌关节屈约 85°(0°表示完全伸展),测试仪轴心与受试者膝关节股外侧髁对准,使得输出力矩达到最大化。在胸部、骨盆和大腿中部使用固定带固定,以避免躯干和大腿代偿运动。动力臂固定在踝上 5 cm。膝关节运动范围为 15°~90°。

**峰力矩 (peak torque, PT):**在膝关节屈伸运动中,肌肉收缩过程中的最大力矩输出,力矩曲线最高点所代表的力矩值。本实验在等速离心/离心运动模式下,针对优势腿(根据踢球法判定踢球距离

更远的一侧为优势侧)膝关节进行肌力测试。具体测试顺序和内容包括等速离心/离心运动模式下角速度为 60°/s、120°/s 的腓绳肌和股四头肌峰力矩。在每种测试中连续进行 5 次膝关节屈伸,每种测试之间休息 1 min。

**1.4.2 Opti-Knee 红外光学运动捕捉系统** 采用由上海逸动医学科技公司生产的 Opti-Knee 红外光学运动捕捉系统,配套两块 3D 刚体,每块有 4 个反光球,采样频率为 60 Hz<sup>[16]</sup>。Wang 等<sup>[17]</sup>验证了该系统的可靠性。每名受试者在实验前更换短裤,操作人员为其在股骨和胫骨分别佩戴 3D 刚体(真实标记)绑缚组件,通过使用手持数字探测器分别标记 7 个骨性解剖标记点:股骨大转子 (greater trochanter, GT)、股骨内上髁 (medial epicondyle, ME)、股骨外上髁 (lateral epicondyle, LE)、胫骨内侧平台 (medial tibial plateau, MP)、胫骨外侧平台 (lateral tibial plateau, LP)、内踝 (medial malleolus, MM) 和外踝 (lateral malleolus, LM)。该系统通过采集真实标记点与骨性解剖标记点空间位置,建立股骨和胫骨三维坐标系统,从而可测量受试者在北欧腓绳肌运动中膝关节离心控制屈曲角度的变化(见图 2)。本文选取膝关节最小离心控制屈曲角度指标用作统计分析。

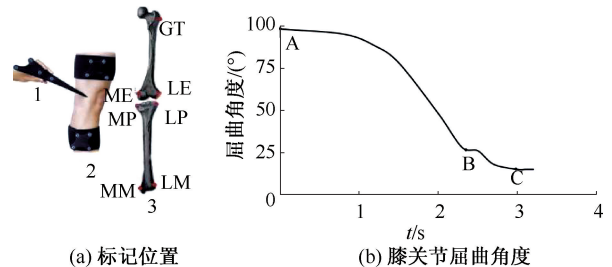


图 2 真实标记和骨性解剖标记位置及膝关节离心控制屈曲角度

Fig.2 Position of real markers bony landmarks and knee eccentric control flexion angle (a) Marker position, (b) Knee flexion angles

注:1-手持数字探测器;2-真实标记;3-骨性解剖标记。A 为开始动作时膝关节屈曲角度;A~B 为上身前倾过程对应膝关节屈曲角度;B 为膝关节离心控制屈曲角度;C 为上身完全落地时膝关节屈曲角度。

## 1.5 统计学分析

采用 SPSS 23.0 进行统计分析。所有数据均用均值 ± 标准差表示。采用单个样本 K-S 检验

(Kolmogorov Smirnov) 检验数据是否符合正态分布。经检验,本研究数据均符合正态分布。采用重复测量方差分析,对干预前后 HS 组和 NHS 组膝关节离心控制屈曲角度,腓绳肌和股四头肌离心运动峰力矩进行分析。显著性水平  $P < 0.05$ 。

## 2 研究结果

### 2.1 腓绳肌和股四头肌离心运动峰力矩

与 10 周北欧腓绳肌运动前相比,运动后 HS 组和 NHS 组腓绳肌的离心运动峰力矩在角速度  $60^\circ/\text{s}$  时分别显著增加  $19.6 \text{ N}\cdot\text{m}$  ( $P < 0.05$ ), HS 组和 NHS 组股四头肌离心运动峰力矩分别显著增加  $6.5 \text{ N}\cdot\text{m}$  ( $P < 0.05$ )。HS 组和 NHS 组腓绳肌离心运动峰力矩在角速度  $120^\circ/\text{s}$  时分别显著增加  $14.4 \text{ N}\cdot\text{m}$  ( $P < 0.05$ ), HS 组和 NHS 组股四头肌峰力矩分别显著增加  $7.5 \text{ N}\cdot\text{m}$  ( $P < 0.05$ )。

NHS 组腓绳肌离心运动峰力矩在  $60^\circ/\text{s}$ 、 $120^\circ/\text{s}$  时分别比 HS 组高  $16$ 、 $13 \text{ N}\cdot\text{m}$  ( $P < 0.05$ ), NHS 组和 HS 组股四头肌离心运动峰力矩无显著性差异(见图 3)。

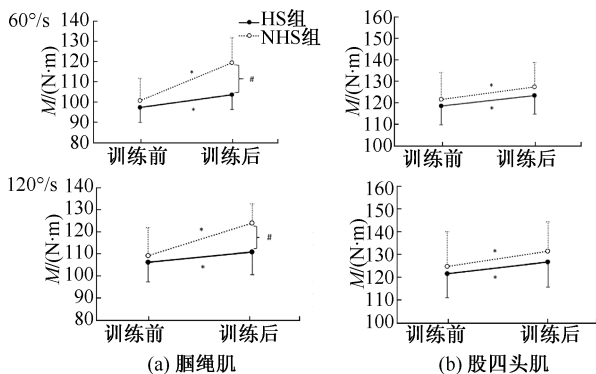


图 3 10 周北欧腓绳肌运动对膝关节离心运动峰力矩的影响

Fig.3 Effects of 10-week nordic hamstring exercise on peak force during eccentric motion mode (a) Hamstring muscles, (b) Quadriceps muscles

注: \* 表示同一组训练前后存在显著性差异, # 表示两组训练后存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。下同。

### 2.2 膝关节离心控制的屈曲角度

与 10 周北欧腓绳肌运动前相比,运动后 HS 组和 NHS 组膝关节离心控制屈曲角度分别显著减小  $8^\circ$  和  $10^\circ$  ( $P < 0.05$ ); NHS 组膝关节离心控制屈曲角度比 HS 组小  $12^\circ$  ( $P < 0.05$ ) (见图 4)。

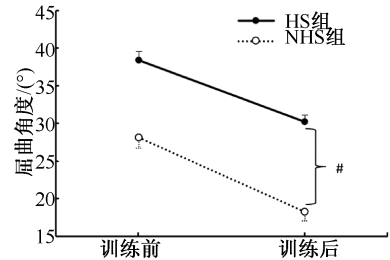


图 4 10 周北欧腓绳肌运动对膝关节离心控制屈曲角度的影响

Fig.4 Effects of 10-week nordic hamstring exercise on knee joint angle

## 3 讨论

本文通过 10 周北欧腓绳肌运动干预,比较手支撑和非手支撑的北欧腓绳肌运动对膝关节离心控制屈曲角度和腓绳肌离心肌力的影响,为选择更加有效预防和减少腓绳肌损伤的运动方式提供科学的数据支撑。研究表明,离心运动可以提高受损组织有氧代谢能力,有利于受损组织再生<sup>[18-21]</sup>。为了使北欧腓绳肌运动对预防腓绳肌损伤更加有效,需了解腓绳肌损伤机制,一是腓绳肌过度伸展(膝关节屈曲角度约  $20^\circ$ ),二是腓绳肌的离心收缩需求提高<sup>[7-8,22]</sup>。由此推测,预防腓绳肌损伤的理想运动应该是可以有效增强膝关节离心控制能力和离心肌力。

本文结果表明,与 10 周北欧腓绳肌运动前相比,运动后 HS 组膝关节离心控制屈曲角度由  $38^\circ$  降低为  $28^\circ$ , NHS 组由  $30^\circ$  降低到  $18^\circ$ ,且 NHS 组显著小于 HS 组。与 HS 组相比, NHS 组腓绳肌最大限度地抵抗躯干向前下落的动作。NHS 组膝关节离心控制屈曲角度更接近预防腓绳肌损伤的理想运动,增加离心阶段腓绳肌的负荷,且躯干位置施加的渐进阻力矩增强了在较长肌肉长度时腓绳肌神经肌肉的激活,这也可能是腓绳肌群最容易受伤的位置<sup>[23-24]</sup>。此外,在为期 10 周的北欧腓绳肌运动结束时, NHS 组受试者在接触地面前(膝关节离心控制屈曲  $20^\circ$  左右)能够短暂制动,增强了膝关节离心控制和腓绳肌承受载荷的能力。

腓绳肌的离心力量下降会增加腓绳肌损伤的风险<sup>[25]</sup>。因此,提高运动员腓绳肌的离心力量可能会降低腓绳肌损伤风险。本文结果表明,10 周北欧腓绳肌运动后,手支撑和非手支撑方式腓绳肌离心运动峰力矩均显著增加,这一结果支持前人研究结



论。Burak 等<sup>[26]</sup>对足球运动员进行 8 周北欧腓绳肌运动后,腓绳肌/股四头肌比值和腓绳肌的离心肌力在角速度为  $60^\circ/\text{s}$ 、 $120^\circ/\text{s}$ 、 $240^\circ/\text{s}$  时都有显著增加。类似地,Petersen 等<sup>[14]</sup>将 942 名足球运动员分为对照组和北欧腓绳肌运动组,结果表明,北欧腓绳肌运动组足球运动员的腓绳肌损伤率降低。另外,Horst 等<sup>[15]</sup>研究也表明,离心训练比向心训练对增强腓绳肌离心运动峰力矩更有效,腓绳肌向心训练虽然可以提高腓绳肌的向心肌力,但对腓绳肌的损伤没有作用。与腓绳肌向心运动相比,北欧腓绳肌运动时股二头肌、半腱肌和股薄肌的肌肉活动明显增强<sup>[27]</sup>。从损伤角度来看,腓绳肌离心力量增加是有益的,通过腓绳肌的离心收缩来抵抗由股四头肌向心收缩产生的力矩。当腓绳肌的离心肌力不能抵抗股四头肌肌力时,损伤几率大大增加<sup>[28]</sup>。另一方面,北欧腓绳肌运动是一种有效的肌肉生长(体积增加)训练方法<sup>[29]</sup>。在这些研究中,受试者大多每周进行 2~3 次北欧腓绳肌运动,并在 4~10 周后腓绳肌的离心肌力增加。该结果可能与神经适应和细胞外基质机构上的重建有关<sup>[30-31]</sup>。此外,本文结果表明,NHS 组比 HS 组腓绳肌的离心肌力更大,非手支撑的北欧腓绳肌运动对提高腓绳肌的离心肌力更加有效。

本文结果表明,10 周北欧腓绳肌运动后,股四头肌的离心力矩也表现出显著增加。有研究发现,主动肌和拮抗肌在肌肉收缩时有交互抑制作用,主动肌的收缩很快时,拮抗肌也会出现同步收缩的现象,拮抗肌的活动就会明显增加<sup>[32]</sup>。腓绳肌的受力越大,肌肉的激活程度也会加大,股四头肌作为对抗肌有所改善,且对训练产生了一定的适应<sup>[33]</sup>。因此,股四头肌离心肌力的变化可能更多地与腓绳肌离心肌力的增强有关。

尽管在预防腓绳肌损伤方面做出大量努力,流行病学数据并未显示其损伤率有明显的降低。Ekstrand 等<sup>[34]</sup>研究表明,23 家欧洲职业俱乐部连续 7 个赛季运动员腓绳肌损伤率没有变化。这可能与大多数团队仍未使用像北欧腓绳肌运动这种具有科学验证的练习<sup>[35]</sup>。本文结果表明,10 周手支撑和非手支撑的北欧腓绳肌运动中没有受试者因为受伤而退出的情况,故北欧腓绳肌运动为预防腓绳肌损伤和伤后康复提供可能的干预方式。

本研究的局限性如下:①只包括 28 名受试者。尽管个体之间存在差异,但受试者是从 53 名运动员中精心挑选出来,年龄、训练年限等相似。②只对干预前后 1 周的膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力进行测试,没有进行第 3 次测试来确定北欧腓绳肌运动对膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力的长期性影响。

## 4 结论

10 周北欧腓绳肌运动可以提高膝关节离心控制屈曲角度和离心肌力,且非手支撑方式优于手支撑方式。本文建议,将非手支撑的北欧腓绳肌运动作为足球运动员日常训练之一,用于预防腓绳肌损伤。

## 参考文献:

- [1] WAN X, LI S, BEST TM, et al. Effects of flexibility and strength training on peak hamstring musculotendinous strains during sprinting [J]. *J Sport Health Sci*, 2021, 10(2): 222-229.
- [2] BOURNE MN, OPAR DA, WILLIAMS MD, et al. Eccentric knee flexor strength and risk of hamstring injuries in rugby union: A prospective study [J]. *Am J Sport Med*, 2015, 43(11): 2663-2670.
- [3] TIAN F, LI N, ZHENG Z, et al. The effects of marathon running on three-dimensional knee kinematics during walking and running in recreational runners [J]. *Gait Posture*, 2020, 75: 72-77.
- [4] BEIJSTERVELDT AM, PORT IG, KRIST MR, et al. Effectiveness of an injury prevention programme for adult male amateur soccer players: A cluster-randomised controlled trial [J]. *Brit J Sport Med*, 2012, 46(16): 1114-1118.
- [5] LIU H, GARRETT WE, MOORMAN CT, et al. Injury rate, mechanism, and risk factors of hamstring strain injuries in sports: A review of the literature [J]. *J Sport Health Sci*, 2012, 1(2): 92-101.
- [6] RAMOS GA, ARLIANI GG, ASTUR DC, et al. Rehabilitation of hamstring muscle injuries: A literature review [J]. *Rev Bras Entomol*, 2017, 52(1): 11-16.
- [7] YU B, QUEEN RM, ABBEY AN, et al. Hamstring muscle kinematics and activation during overground sprinting [J]. *J Biomech*, 2008, 41(15): 3121-3126.
- [8] SCHACHE AG, WRIGLEY TV, BAKER R, et al. Biomechanical response to hamstring muscle strain injury [J]. *Gait Posture*, 2009, 29(2): 332-338.
- [9] OPAR DA, WILLIAMS MD, SHIELD AJ. Hamstring strain injuries: Factors that lead to injury and re-injury [J].

- Sports Med, 2012, 42(3): 209-226.
- [10] 钟运健, 刘宇, 傅维杰, 等. 高速跑时下肢双关节肌做功特性及拉伤风险的生物力学分析[J]. 体育科学, 2014, 34(11): 60-66.
- [11] MJOLSNES R, ARNASON A, OSTHAGEN T, *et al.* A 10-week randomized trial comparing eccentric vs. concentric hamstring strength training in well-trained soccer players [J]. Scand J Med Sci Spor, 2010, 14(5): 311-317.
- [12] REY E, PAZ-DOMINGUEZ A, PORCEL-ALMENDRAL D, *et al.* Effects of a 10-week Nordic hamstring exercise and russian belt training on posterior lower-limb muscle strength in elite junior soccer players [J]. J Strength Cond Res, 2017, 31(5): 1198-1205.
- [13] DELAHUNT E, MCGROARTY M, DE VITO G, *et al.* Nordic hamstring exercise training alters knee joint kinematics and hamstring activation patterns in young men [J]. Eur J Appl Physiol, 2016, 116(4): 663-672.
- [14] PETERSEN J, THORBORG K, NIELSEN MB, *et al.* Preventive effect of eccentric training on acute hamstring injuries in men's soccer: A cluster-randomized controlled trial [J]. Am J Sport Med, 2011, 39(11): 2296-2303.
- [15] HORST N, SMITS DW, PETERSEN J, *et al.* The preventive effect of the nordic hamstring exercise on hamstring injuries in amateur soccer players: A randomized controlled trial [J]. Am J Sports Med, 2015, 48(7): 1316-1323.
- [16] 王文锦, 田斐, 李柠薇, 等. 新型膝关节运动分析系统的研制及临床应用[J]. 中华关节外科杂志, 2020, 14(1): 78-84.
- [17] WANG S, ZENG X, LIANG H, *et al.* Validation of a portable marker-based motion analysis system [J]. J Orthop Surg Res, 2021, 16: 425.
- [18] SEYMORE KD, DOMIRE ZJ, DEVITA P, *et al.* The effect of Nordic hamstring strength training on muscle architecture, stiffness, and strength [J]. Eur J Appl Physiol, 2017, 117(5): 943-953.
- [19] 许智勇, 殷鑫, 黄强年. 离心运动的特征和急性反应[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(16): 153-158.
- [20] 董贵俊, 吕晨曦, 葛新发. 一次和重复大强度离心运动前后大鼠骨骼肌超微结构变化[J]. 中国运动医学杂志, 2013, 32(2): 142-148.
- [21] RIBEIRO-ALVARES JB, MARQUES VB, VAZ MA, *et al.* Four weeks of Nordic hamstring exercise reduce muscle injury risk factors in young adults [J]. J Strength Cond Res, 2017, 32(5): 1254-1262.
- [22] CHUMANOV ES, HEIDERSCHEIT BC, THELEN DG. The effect of speed and influence of individual muscles on hamstring mechanics during the swing phase of sprinting [J]. J Biomech, 2007, 40(16): 3555-3562.
- [23] WAN X, QU F, GARRETT WE, *et al.* The effect of hamstring flexibility on peak hamstring muscle strain in sprinting [J]. J Sport Health Sci, 2017, 6(3): 283-289.
- [24] DITROILO M, DE VITO G, DELAHUNT E. Kinematic and electromyographic analysis of the Nordic hamstring exercise [J]. J Electromyogr Kinesiol, 2013, 23(5): 1111-1118.
- [25] RAHNAMA N, REILLY T, LEES A, *et al.* Muscle fatigue induced by exercise simulating the work rate of competitive soccer [J]. J Sports Sci, 2003, 21(11): 933-942.
- [26] BURAK AZ, KERIM YA, IBIS S, *et al.* The effect of 8-week nordic hamstring exercise on hamstring quadriceps ratio and hamstring muscle strength [J]. World J Edu, 2018, 8(3): 162-169.
- [27] FERNANDEZ-GONZALO R, TESCH PA, LINNEHAN RM, *et al.* Individual muscle use in hamstring exercises by soccer players assessed using functional MRI [J]. Int J Sports Med, 2016, 37(7): 559-564.
- [28] HEIDERSCHEIT BC, SHERRY MA, SILDER A, *et al.* Hamstring strain injuries: Recommendations for diagnosis, rehabilitation, and injury prevention [J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2010, 40(2): 67-81.
- [29] SEYMORE KD, DOMIRE ZJ, DEVITA P, *et al.* The effect of Nordic hamstring strength training on muscle architecture, stiffness, and strength [J]. Eur J Appl Physiol, 2017, 117(5): 943-953.
- [30] HYLDAHL RD, CHEN TC, NOSAKA K. Mechanisms and Mediators of the Skeletal Muscle Repeated Bout Effect [J]. Exerc Sport Sci Rev, 2017, 45(1): 24-33.
- [31] LASTAYO PC, PIEROTTI DJ, PIFER J, *et al.* Eccentric ergometry: Increases in locomotor muscle size and strength at low training intensities [J]. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 2000, 278(5): 1282-1288.
- [32] BARONI BM, RODRIGUES R, FRANKE RA, *et al.* Time course of neuromuscular adaptations to knee extensor eccentric training [J]. Int J Sports Med, 2013, 34(10): 904-911.
- [33] HOLCOMB WR, RUBLEY MD, LEE HJ, *et al.* Effect of hamstring-emphasized resistance training on hamstring: Quadriceps strength ratios [J]. J Strength Cond Res, 2007, 21(1): 41-47.
- [34] EKSTRAND J, HAGGLUND M, WALDEN M. Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer) [J]. Am J Sport Med, 2011, 39(6): 1226-1232.
- [35] BAHR R, THORBORG K, EKSTRAND J. Evidence-based hamstring injury prevention is not adopted by the majority of Champions League or Norwegian Premier League football teams: The Nordic hamstring survey [J]. Br J Sports Med, 2015, 49(22): 1466-1471.