

全身性疲劳对功能性踝关节不稳者平衡能力和跳跃落地时踝关节本体感觉的影响*

刘亚楠¹ 田雪文¹ 宋祺鹏¹ 周志鹏¹ 吴成亮² 王疆娜¹ 孙 威^{1,3}

摘要

目的:通过比较功能性踝关节不稳(functional ankle instability, FAI)者和健康人群在疲劳前后静态、动态平衡能力及跳跃落地时踝关节本体感觉的差异,探讨全身性疲劳对FAI者平衡能力和本体感觉的影响。

方法:单侧FAI者和健康者各31例被纳入研究,并在疲劳前后分别进行了静态、动态平衡测试及跳跃落地时踝关节的本体感觉测试。足底压力中心动摇径、均方根距离、95%包络面积、标准化伸展距离和AUC值等相关指标用于计算与分析。

结果:全身性疲劳前,FAI组的静态、动态平衡能力及踝关节的本体感觉均显著低于健康对照组($P<0.05$)。全身性疲劳后,FAI组和健康对照组的静态、动态平衡能力以及踝关节的本体感觉均显著降低($P<0.05$),且FAI组的动摇径、均方根距离和95%包络面积增加的幅度均显著大于健康对照组($P<0.05$),在后内侧、后外侧的标准化动态伸展距离及AUC值的降低幅度显著大于健康对照组($P<0.05$)。

结论:FAI及健康者在全身性运动疲劳后静态、动态平衡能力以及跳跃落地时踝关节的本体感觉均下降,且FAI者静态、动态平衡能力及本体感觉功能下降程度更大。因此,全身性疲劳可能通过降低FAI者的姿势控制和本体感觉,增加了踝关节反复扭伤的风险。

关键词 全身性疲劳;功能性踝关节不稳;平衡能力;本体感觉

中图分类号:R493,R684 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2023)-12-1669-08

Effects of whole-body fatigue on balance and ankle proprioception during drop landing among individuals with and without functional ankle instability/LIU Yanan, TIAN Xuewen, SONG Qipeng, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2023, 38(12): 1669—1676

Abstract

Objective: To explore the effects of whole-body fatigue on the balance and ankle proprioception during drop landing of individuals with functional ankle instability (FAI) by comparing the differences in balance and proprioception between the FAI group and the control group before and after fatigue.

Method: A total of 31 participants with unilateral FAI and 31 healthy participants were included in this study. A static balance test, dynamic balance test, and ankle proprioception test were conducted before and after fatigue. Sway distance (D) of the center of pressure (COP), root mean square of the COP (RMS), 95% confidence ellipse area of the COP movements (95% AREA), normalized reach distance, and the area under the curve (AUC) were calculated and analyzed.

Result: Before whole-body fatigue, the static balance, dynamic balance, and ankle proprioception during drop landing in FAI group were significantly lower than those in control group. After whole-body fatigue, the static balance, dynamic balance, and ankle proprioception during drop landing in the FAI group and control group

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.12.006

*基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020QC091);湖北省自然科学基金项目(2021CFB422);教育部人文社会科学一般项目(19YJC880083);国家级大学生创新创业计划项目(202210457006)

1 山东体育学院,山东省济南市,250102; 2 武汉体育学院; 3 通讯作者

第一作者简介:刘亚楠,女,硕士研究生; 收稿日期:2022-08-09

decreased significantly ($P<0.05$), and the increase of D, RMS and 95% AREA in FAI group were significantly larger than those in control group ($P<0.05$), and the decrease of normalized reach distance in the postero-medial and posterolateral directions and AUC were significantly larger than those in control group ($P<0.05$).

Conclusion: Whole-body fatigue reduced the static balance, dynamic balance, and ankle proprioception, and the reduction was larger in FAI individuals than in healthy individuals. Therefore, whole-body fatigue may increase the risk of recurrent ankle sprain by reducing posture control and proprioception in FAI individuals.

Author's address Shandong Sport University, Jinan, 250102

Key word whole-body fatigue; functional ankle instability; balance; proprioception

踝关节扭伤是最常见的运动损伤之一,约占比10%—30%^[1],尤其多发在需要执行跳跃、冲刺、变向动作的篮球、足球等运动项目中^[2-3]。患者在初次踝关节扭伤后,仍有高达80%的比率发生踝关节的再次损伤^[4],约有40%的踝关节扭伤患者继而转变为功能性踝关节不稳(functional ankle instability, FAI)^[5]。FAI的症状主要包括疼痛、肿胀和反复扭伤^[6],严重者甚至会导致踝关节骨性关节炎的发生^[7]。

平衡能力是指当人体重心偏离稳定支持面时,能快速通过主动或反射性活动使重心返回稳定支持面的能力^[8],平衡又可分为静态和动态平衡。本体感觉是一种依赖于来自各种受体的传入信息的复杂感觉^[9]。二者在维持身体的姿势稳定中发挥着重要的作用,与运动损伤的发生有着密切的联系。前人的研究表明,平衡能力的下降和本体感觉的缺失是造成FAI者踝关节反复扭伤的重要生物力学因素^[10]。而运动疲劳作为日常体力活动和运动训练中不可避免的生理现象^[11],是降低踝关节运动功能并导致踝关节扭伤的另一个重要因素。第五届国际运动生物化学会议达成共识将运动疲劳定义为“机体生理过程中不能维持其机能在一定水平上和(或)不能维持预期的运动强度”^[12]。已有文献表明疲劳会降低FAI者在运动过程中的本体感觉^[13]、运动控制^[14]、肌肉激活^[15]、姿势控制^[16]及神经肌肉反应^[17],这些改变会导致下肢定位不当,难以对运动变化做出快速的反映,从而使FAI者更容易受伤。

目前的研究多集中于应用等速运动方案诱导的踝关节局部疲劳^[18-22],缺乏全身性疲劳对FAI者平衡能力和本体感觉的影响研究。从二者的区别来看,局部疲劳多为反复进行单关节运动产生,而全身性疲劳涉及全身多个关节和肌群的运动,并产生身体在空间上的位移^[23]。“跑+跳”的全身性疲劳诱导方

案能够更好地模拟踝关节扭伤高发的运动项目^[24],且能够更高效地诱导疲劳状态的产生^[25]。此外,现有的研究集中于应用被动运动阈值检测法和关节位置重现法来测试FAI者疲劳前、后的踝关节本体感觉。然而,踝关节扭伤常见于跳跃落地时的内翻扭伤^[26],与传统的踝关节本体感觉测试方法相比,着陆式踝关节本体感觉测试装置(ankle inversion discrimination apparatus for landing, AIDAL)不仅具有较高的灵敏度和生态效度^[27],而且可以模拟踝关节扭伤的动作,能够更准确地反映踝关节扭伤时的本体感觉。

因此,本研究选取“折返跑+垂直纵跳”的全身性疲劳方案来诱导疲劳的产生,并在疲劳前后测试FAI者的静态、动态平衡能力以及跳跃落地时踝关节的本体感觉,旨在量化全身性疲劳对FAI者平衡能力和跳跃落地时踝关节本体感觉的影响,为比赛和训练中踝关节扭伤的预防和扭伤后的康复治疗提供数据支持。

1 资料与方法

1.1 一般资料

在山东体育学院招募了31例单侧功能性踝关节不稳的大学生作为FAI组,根据FAI组受试者的性别、年龄、身高、体重和优势腿匹配了31例无下肢损伤史的健康大学生作为对照组。两组受试者基本资料各指标差异均不具有显著性。本研究经山东体育学院伦理委员会批准(编号:2020001),所有受试者均在实验前签署一份书面知情同意书。受试者基本信息见表1。

FAI组纳入标准:①年龄18—25岁,男女均可;②过去1年内发生不止1次踝扭伤,并伴有疼痛和肿胀等炎症症状,1天以上不能进行日常活动;③过去

表1 受试者基本资料

($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	性别(例)		年龄 (年)	身高 (cm)	体重 (kg)	患侧(对应侧)(例)		患侧(对应侧) CAIT评分
		男	女				左	右	
FAI组	31	16	15	21.55±1.07	169.53±8.20	64.91±11.93	10	21	16.81±3.75
对照组	31	16	15	21.55±1.29	170.74±9.02	62.94±10.23	10	21	29.52±0.68

1年内单侧踝关节扭伤和/或失去控制和/或不稳定2次或以上;④坎伯兰踝关节不稳定性量表(Cumberland ankle instability tool, CAIT)评分<24分^[28]。

FAI组排除标准:①前抽屉试验和距骨倾斜试验阳性;②双侧功能性踝关节不稳;③其他影响下肢功能的肌肉、关节或神经系统疾病;④视觉、前庭和认知缺陷。

1.2 研究方法

受试者进入山东体育学院生物力学实验室,首先进行身高、体重、腿长等形态学指标测量,并确认FAI组受试者的患侧以及健康对照组的对应侧为测试足。受试者在跑步机上以8km/h的速度热身6min,之后进行3min静力性拉伸,避免受伤,然后按照随机化顺序进行静态平衡能力、动态平衡能力及跳跃落地时踝关节的本体感觉测试。受试者进行折返跑、垂直纵跳的全身性疲劳诱导,产生全身性疲劳后再次进行平衡能力和跳跃落地时踝关节本体感觉的测试,测试的方式、次数与疲劳前一致,但各测试动作之间无休息时间。为了维持疲劳后测试期间的疲劳效应,受试者在每一个测试动作之间重复进行连续3次全力垂直纵跳^[29]。

1.2.1 静态平衡能力测试:受试者以测试足裸足单腿站立在三维测力台(Kistler, 9260AA6, Germany)上,另一侧下肢屈髋和屈膝90°,双手自然垂于体侧^[30]。FAI组患侧足和对照组对应侧足站立测试分为睁眼、闭眼两种模式,在睁眼条件下测试时,需平视前方2.5m处的一个点^[30]。受试者在测力台上尽可能保持不动地站立30s,若测试腿移动或非测试腿触碰到力台,则放弃并重复该次测试。受试者在测试前先进行3次预测试以熟悉实验流程,再休息30s开始正式测试。使用BioWare(Kistler, version 5.4.3.0)软件以1000Hz的频率采集测力台的数据^[31],每种模式采集3次成功测试数据,取其平均值进行分析。每次测试采集时间为30s,两次测试之间休息20s。

1.2.2 动态平衡能力测试:受试者在YBT(Y-Balance Test)测试前再次进行屈膝、深蹲等动作,充分舒展自己的膝关节与踝关节。测试前,测试人员向受试者讲解测试动作并亲自示范,受试者在每个方向做6次练习以熟悉测试流程。测试时,受试者的支撑脚(测试足)裸足站立在中心盘上,脚趾末端不超过起始线,双手置于骨盆两端,另一侧腿向前侧(anterior, ANT)、后内侧(posteromedial, PM)、后外侧(postero-lateral, PL)尽力伸展推动指示块,然后回到起始站立姿势。若受试者在测试过程中出现:①未能在中心盘上保持单腿支撑姿势;②未能保持伸展脚与指示块接触;③伸展脚踩到指示块上;④未能回到起始位置,视为测试无效并重新进行测试^[32]。每个方向准确记录3次有效数据,精确到0.5cm。测试按照测试腿在前侧、后内侧、后外侧的顺序进行,同一方向每次测试之间休息5s,每个方向测试之间休息30s。

为了排除受试者下肢长度差异对测试结果的影响,需要对下肢伸展距离进行标准化处理。用软皮尺测量髌前上棘到内踝最远端的距离作为腿长,精确到0.5cm。分别计算同一方向3次测试伸展距离的平均值^[33],各个方向的标准化伸展距离公式^[32]:

$$\text{各方向标准化伸展距离} = \left(\frac{\text{下肢在各方向伸展距离平均值}}{\text{腿长}} \right) \times 100\%$$

1.2.3 跳跃落地时踝关节本体感觉测试:应用AIDAL^[27]分别对FAI组患侧足和对照组对应侧足进行跳跃落地时踝关节的本体感觉测试。AIDAL包括跳跃平台、着陆支撑平台、着陆测试平台3部分,其中着陆测试平台由4块不同倾斜角度(10°、12°、14°、16°)的楔形斜块组成,按照倾斜角度递增的顺序,将着陆测试平台编号为1、2、3、4。受试者裸足站立在跳跃平台上,双手叉腰放于髌嵴上缘处,头部向前,双眼目视前方。受试者在跳跃前伸出测试足,然后做出颠跳动作,跳跃至测试平台上,非测试足同时落到支撑平台上。受试者在正式测试前,按照着陆测试平台坡度递增的顺序,尝试并记忆着陆测试

平台的角度3次,共计跳跃12次。在正式测试时,着陆测试平台将按照随机数列的顺序随机出现,受试者在跳跃落地后要根据学习的感觉立即对着陆测试平台的内翻角度做出绝对的判断,并用数字1、2、3、4口头报告所处着陆测试平台对应的编号。在此过程中受试者测试足需连续跳跃40次,测试中不可向受试者进行正误反馈。

1.2.4 疲劳诱导与界定:受试者需佩戴Polar心率表对心率进行实时监测,并在纵跳测试垫(Smart-Jump, Australia)上尽最大能力连续完成3次垂直纵跳,取纵跳高度的最大值作为最大垂直纵跳高度。受试者在10m的跑道上完成6次折返跑后立即在纵跳测试垫上完成5次全力垂直纵跳^[25](图1),重复上述折返跑+垂直纵跳的过程。疲劳的判定标准为^[25]:①竭尽全力也无法使连续5次纵跳高度的平均值大于最大纵跳高度的70%;②RPE达到17级(很费力)以上;③心率达到预期最大心率(220-年龄)的85%以上。符合三条中的任意一条,结束疲劳诱导^[34]。在疲劳诱导过程中,会有专人对受试者进行保护,并言语鼓励受试者尽量坚持。

1.3 数据处理

使用BioWare(Kistler, version 5.4.3.0)软件对测力台采集的足底压力中心(center of pressure, COP)等原始坐标进行提取,并对动力学数据进行低通滤波处理,截止频率为10Hz^[31]。提取测力台记录的足底压力中心COP的数据时,去掉前5s和后5s的数据。在COP位移的基础上,计算所有指标来评估静态平衡能力(图2),各指标的计算公式如下:

COP前后方向的最大偏移距离:

$$D_{-y} = Y_{max} - Y_{min}$$

COP左右方向的最大偏移距离:

$$D_{-x} = X_{max} - X_{min}$$

COP均方根振幅:

$$RMS = \frac{1}{N} \sum [RD(n)^2]^{1/2}$$

COP前后方向均方根振幅:

$$RMS_{-AP} = \frac{1}{N} \sum [AP(n)^2]^{1/2}$$

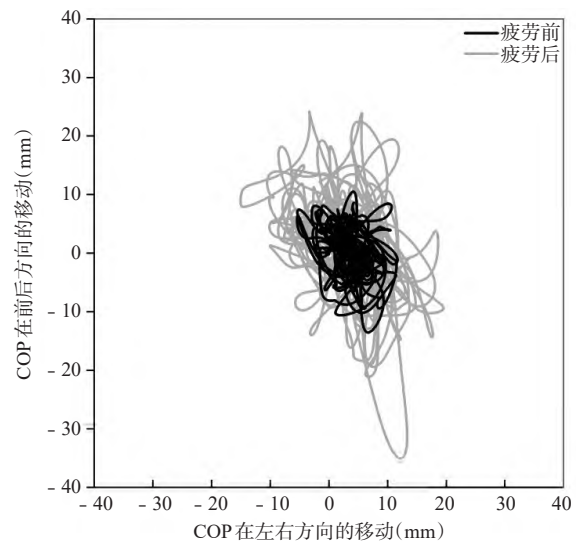
COP左右方向均方根振幅:

$$RMS_{-ML} = \frac{1}{N} \sum [ML(n)^2]^{1/2}$$

COP包络面积:

$$95\% \text{ AREA} = (X_{max} - X_{min}) \times (Y_{max} - Y_{min}) \times \pi$$

图2 某受试者在疲劳前和疲劳后的COP轨迹



将31例FAI组患侧和31例对照组对应侧踝关节内翻表现和相关反应输入SPSS,生成受试者操作曲线(ROC),计算曲线下面积(AUC)作为踝关节本体感觉判断能力得分^[27](图3)。AUC值越接近1.0,表明其踝关节对四种内翻角度的辨别能力越高,即个体的踝关节本体感觉越好;AUC值越接近0.5,表明其踝关节的辨别能力与偶然率一致,即个体的踝关节本体感觉越差。

1.4 统计学分析

应用SPSS 26.0软件对测试数据进行统计分析,各组数据均以均值±标准差表示。对所有因变量进行描述性统计分析。采用Shapiro-Wilk检验数据的正态性。本研究有两组自变量,分别是分组自变量(FAI组、对照组)和疲劳自变量(疲劳前、疲劳后)。使用配对样本t检验比较组内疲劳前后的变化;把疲劳前的测试数据作为协变量,使用协方差分析比较组间在疲劳前后各指标的差值。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

图1 全身性疲劳诱导方案

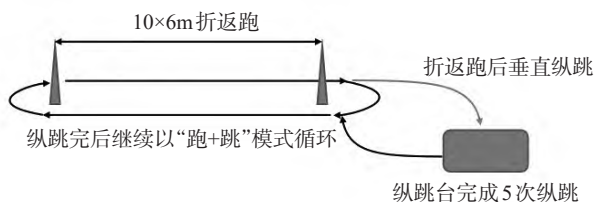
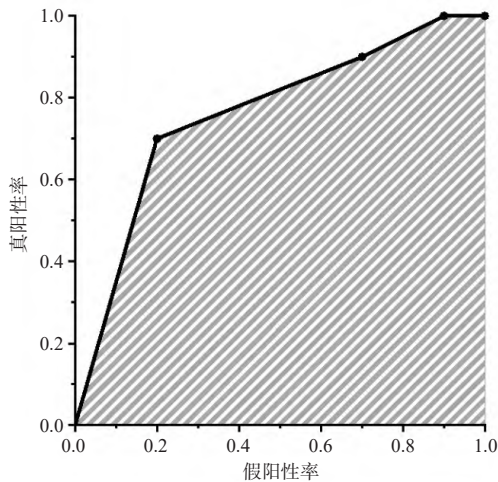


图3 ROC曲线及曲线下面积



2 结果

2.1 静态平衡能力测试结果

在睁眼条件下,FAI组和健康对照组在疲劳诱导后的D-x、D-y、RMS、RMS-ml、RMS-ap、95%AR-EA(各指标 $P < 0.001$)较疲劳诱导前均显著增加。FAI组患侧压力中心的D-x($P < 0.001$)、D-y($P = 0.016$)、RMS($P = 0.008$)、RMS-ml($P = 0.001$)、RMS-ap($P = 0.020$)在疲劳前后的差值均显著大于健康对

照组(表2)。

在闭眼条件下,FAI组和健康对照组在疲劳诱导后的D-x、D-y、RMS、RMS-ml、RMS-ap、95%AR-EA(各指标 $P < 0.001$)较疲劳诱导前均显著增加。FAI组患侧压力中心的D-x($P = 0.036$)、D-y($P = 0.016$)、RMS($P = 0.004$)、RMS-ml($P = 0.003$)、RMS-ap($P = 0.005$)、95%AREA($P = 0.017$)在疲劳前后的差值均显著性大于健康对照组(表3)。

2.2 动态平衡能力测试结果

FAI组和健康对照组在疲劳诱导后的前侧、后内侧、后外侧的标准化伸展距离较疲劳诱导前均显著减小($P < 0.001$)。FAI组在后内侧($P = 0.036$)和后外侧($P = 0.015$)的标准化伸展距离在疲劳前后的差值均显著大于健康对照组(表4)。

2.3 跳跃落地时踝关节本体感觉测试结果

FAI组和健康对照组在疲劳诱导后的AUC值($P < 0.001$)较疲劳诱导前显著减小。FAI组患侧AUC值($P < 0.001$)在疲劳前后的差值显著大于健康对照组(表5)。

3 讨论

本研究结果表明全身性疲劳降低了个体的静态、动态平衡能力以及踝关节的本体感觉,这与前人

表2 疲劳前后两组受试者睁眼在稳定平面上平衡能力的变化

($\bar{x} \pm s$)

	FAI组(n=31)			健康对照组(n=31)		
	疲劳前	疲劳后	差值	疲劳前	疲劳后	差值
D-x(mm)	24.55±5.15	31.79±6.63 ^①	7.24±7.10 ^②	20.53±4.37	23.72±5.90 ^①	3.19±5.00
D-y(mm)	33.65±9.97	50.59±15.12 ^①	16.94±11.09 ^②	26.71±6.76	35.82±12.64 ^①	9.11±8.91
RMS(mm)	5.95±1.18	8.20±2.04 ^①	2.24±1.56 ^②	5.10±0.99	6.23±1.57 ^①	1.13±0.97
RMS-ml(mm)	3.72±0.66	4.63±0.81 ^①	0.91±0.84 ^②	3.11±0.60	3.51±0.77 ^①	0.41±0.49
RMS-ap(mm)	4.62±1.06	6.69±2.07 ^①	2.07±1.50 ^②	4.03±0.86	5.10±1.47 ^①	1.08±0.91
95%AREA(mm ²)	349.24±194.93	921.17±954.51 ^①	571.93±791.88	281.37±125.08	508.55±420.63 ^①	227.18±318.37

注:D-x,动摇径X;D-y,动摇径Y;RMS,均方根距离;RMS-ml,左右方向均方根距离;RMS-ap,前后方向均方根距离;95%AREA,95%包络面积;差值=疲劳后值-疲劳前值。①疲劳前后指标组内差异具有显著性, $P < 0.05$;②疲劳前后指标差值组间差异具有显著性, $P < 0.05$ 。

表3 疲劳前后两组受试者闭眼在稳定平面上平衡能力的变化

($\bar{x} \pm s$)

	FAI组(n=31)			健康对照组(n=31)		
	疲劳前	疲劳后	差值	疲劳前	疲劳后	差值
D-x(mm)	42.43±10.19	51.74±12.26 ^①	9.31±9.98 ^②	35.47±7.41	41.29±9.36 ^①	5.82±6.61
D-y(mm)	71.34±24.17	98.71±29.54 ^①	27.37±23.10 ^②	54.80±18.28	71.24±23.55 ^①	16.44±12.26
RMS(mm)	11.21±2.72	15.16±3.83 ^①	3.96±3.08 ^②	9.40±2.45	11.48±3.06 ^①	2.08±1.42
RMS-ml(mm)	5.94±0.97	7.25±1.30 ^①	1.31±1.13 ^②	5.21±0.97	5.85±1.16 ^①	0.64±0.57
RMS-ap(mm)	9.41±2.77	13.24±3.82 ^①	3.83±2.94 ^②	7.78±2.34	9.83±2.93 ^①	2.05±1.40
95%AREA(mm ²)	1932.82±1576.49	4045.87±2752.09 ^①	2113.05±2258.07 ^②	1177.92±1049.58	2089.42±1641.77 ^①	911.51±825.97

注:D-x,动摇径X;D-y,动摇径Y;RMS,均方根距离;RMS-ml,左右方向均方根距离;RMS-ap,前后方向均方根距离;95%AREA,95%包络面积;差值=疲劳后值-疲劳前值。①疲劳前后指标组内差异具有显著性, $P < 0.05$;②疲劳前后指标差值组间差异具有显著性, $P < 0.05$ 。

表4 疲劳前后两组受试者动态平衡能力的变化

($\bar{x} \pm s$, cm)

指标	FAI组(n=31)			健康对照组(n=31)		
	疲劳前	疲劳后	差值	疲劳前	疲劳后	差值
ANT	64.94±4.43	59.25±4.03 ^①	5.69±2.01	70.36±4.40	64.62±4.21 ^①	5.74±1.61
PM	104.27±7.13	95.90±7.62 ^①	8.37±3.62 ^②	113.20±5.45	106.50±5.85 ^①	6.69±1.97
PL	101.02±7.54	92.53±8.25 ^①	8.49±3.82 ^②	111.54±7.28	105.13±7.37 ^①	6.41±1.42

注: ANT, 前侧方向的标准化伸展距离; PM, 后内侧方向的标准化伸展距离; PL, 后外侧方向的标准化伸展距离; 差值=疲劳后值-疲劳前值。
①疲劳前后指标组内差异具有显著性, $P<0.05$; ②疲劳前后指标差值组间差异具有显著性, $P<0.05$ 。

表5 疲劳前后两组受试者跳跃落地时踝关节本体感觉的变化

($\bar{x} \pm s$)

指标	FAI组(n=31)			健康对照组(n=31)		
	疲劳前	疲劳后	差值	疲劳前	疲劳后	差值
AUC值	0.66±0.10	0.53±0.07 ^①	0.13±0.07 ^②	0.72±0.08	0.65±0.06 ^①	0.07±0.05

注: 差值=疲劳后值-疲劳前值。①疲劳前后指标组内差异具有显著性, $P<0.05$; ②疲劳前后指标差值组间差异具有显著性, $P<0.05$ 。

的研究结果一致^[3,35-36]。疲劳会导致肌肉内代谢物质和炎症物质(例如:乳酸、缓激肽、血清素、钾、花生四烯酸和前列腺素)的浓度增加,这一增加又会反过来对肌梭的放电模式和 α - γ 共激活产生直接影响^[37],从而使个体的本体感觉下降。而平衡的维持需要中枢神经系统对来自视觉、前庭觉和本体感觉的传入信息进行不断处理和整合并发挥其协同作用^[38]。疲劳会影响本体感觉和外部感受信息输入及在中枢神经系统中的整合^[39],从而使人体保持平衡的能力下降。

本研究发现疲劳后FAI组的静态、动态平衡能力和本体感觉的下降程度显著大于健康对照组。前人的研究指出,FAI者的神经肌肉控制缺陷可能是由于关节损伤后肌梭活动减弱所致^[40]。疲劳通过增加肌梭放电阈值来干扰传入反馈,从而改变关节对运动状态的感知,降低疲劳后的平衡能力^[41]。FAI者先前存在的与姿势控制相关的感觉运动障碍,在疲劳的状态下进一步加剧^[42],使FAI者处于持续复发扭伤的高风险中。然而,本研究的结果与Steib^[42]的结果不一致。Steib的研究表明,因疲劳导致的平衡能力和本体感觉的下降在FAI者与健康人之间没有显著性差异。两者结果的不同可能与疲劳的诱导方法有关,与Steib采用的跑步机疲劳诱导方法相比,折返跑和纵跳的全身性疲劳诱导方法更能在FAI者与健康人群之间产生差异。折返跑和纵跳诱导的疲劳不仅可以导致髋关节、膝关节和踝关节在额状面的生物力学变化,还可以引起关节在多个方向的运动,募集更多的肌肉群(包括屈曲、伸展、内收和外展肌群)参与收缩,而跑步机疲劳主要影响个体的屈曲和伸展肌群^[29]。

值得注意的是,疲劳使FAI组在后内侧和后外侧动态平衡的降低程度显著大于健康对照组。然而,在前侧方向上,两组之间标准化伸展距离的减少无显著差异。这一结果可能与FAI者在完成各个方向的动态平衡任务所需的运动策略不同有关,前侧方向仅需要个体完成在矢状面的运动,而后内侧和后外侧方向的伸展还需要个体完成在矢状面和额状面的运动^[32]。疲劳后的FAI个体可能更难完成在多个平面运动时保持平衡的任务,从而导致踝关节在完成“侧向后退”动作时更容易损伤。因此,当FAI者在疲劳后执行动态平衡任务时,必须注意扭伤的发生,尤其是涉及多个运动平面时。建议经常参加体育运动的FAI者可以增加踝关节多方向动态稳定训练,特别是后内侧和后外侧极限稳定控制训练,以预防疲劳引起的踝关节扭伤。

全身性疲劳对FAI者跳跃落地时踝关节本体感觉的影响,较少被关注。本研究发现,FAI者在疲劳后跳跃落地时踝关节本体感觉AUC值的降低显著大于健康人群,表明疲劳对FAI者本体感觉的影响程度更大。根据本体感觉的外周机制,FAI人群在踝关节反复扭伤后,外周本体感受器遭受破坏,上行传导的本体感受信息质量下降,影响机体对平衡的控制能力,而运动控制能力的下降可进一步导致损伤的发生,从而形成反复损伤的恶性循环^[5]。疲劳降低踝关节本体感觉的可能原因有以下两个:首先,疲劳会降低关节周围软组织的张力^[43],导致踝关节松弛。其次,疲劳会导致踝关节周围的肌肉内受体的感觉信息传递异常^[44]。因此,疲劳加剧了FAI者本体感觉的损伤程度,使FAI者难以对即将跳跃落

地的平面角度做出快速、正确的判断,导致肌肉收缩不当,从而造成踝关节的反复扭伤。

综上所述,FAI及健康运动者在全身性运动疲劳后平衡能力和踝关节的本体感觉均降低。与健康人群相比,FAI者在全身性运动疲劳后静态平衡能力、后向动态平衡能力,以及跳跃落地时踝关节本体感觉的下降程度更大,可能导致踝关节反复扭伤的风险增加。本研究提示具有FAI的患者在运动与训练中应尽可能控制和减轻疲劳程度,并加强平衡和本体感觉训练,预防再损伤。

参考文献

- [1] Kemler E, van de Port I, Backx F, et al. A systematic review on the treatment of acute ankle sprain: brace versus other functional treatment types[J]. *Sports Medicine*, 2011, 41(3):185—197.
- [2] Li F, Knjaz D, Rupčić T. Influence of fatigue on some kinematic parameters of basketball passing[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(2):700.
- [3] Pau M, Ibba G, Attene G. Fatigue-induced balance impairment in young soccer players[J]. *Journal of Athletic Training*, 2014, 49(4):454—461.
- [4] Yeung MS, Chan KM, So CH, et al. An epidemiological survey on ankle sprain[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 1994, 28(2):112—116.
- [5] Freeman MA, Dean MR, Hanham IW. The etiology and prevention of functional instability of the foot[J]. *Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, 1965, 47(4):678.
- [6] Huang PY, Jankaew A, Lin CF. Effects of plyometric and balance training on neuromuscular control of recreational athletes with functional ankle instability: a randomized controlled laboratory study[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(10):5269.
- [7] Herzog MM, Kerr ZY, Marshall SW, et al. Epidemiology of Ankle sprains and chronic ankle instability[J]. *Journal of Athletic Training*, 2019, 54(6):603—610.
- [8] 恽晓平. 康复评定学[M]. 北京:华夏出版社, 2004.
- [9] Docherty CL, Arnold BL, Hurwitz S. Contralateral force sense deficits are related to the presence of functional ankle instability[J]. *Journal of Orthopaedic Research*, 2006, 24(7):1412—1419.
- [10] Alghadir A, Iqbal Z, Iqbal A, et al. Effect of chronic ankle sprain on pain, range of motion, proprioception, and balance among athletes[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(15):5318.
- [11] Allen DG, Westerblad H. Role of phosphate and calcium stores in muscle fatigue[J]. *The Journal of Physiology*, 2001, 536(3):657—665.
- [12] 曲绵域, 等. 实用运动医学[M]. 北京:北京大学医学出版社, 2003.
- [13] Wright CJ, Arnold BL. Fatigue's effect on eversion force sense in individuals with and without functional ankle instability[J]. *Journal of Sport Rehabilitation*, 2012, 21(2):127—136.
- [14] Lee M, Youm C, Son M, et al. Effects of chronic ankle instability and induced mediolateral muscular fatigue of the ankle on competitive taekwondo athletes[J]. *Journal of Physical Therapy Science*, 2017, 29(8):1329—1335.
- [15] Webster KA, Pietrosimone BG, Gribble PA. Muscle activation during landing before and after fatigue in individuals with or without chronic ankle instability[J]. *Journal of Athletic Training*, 2016, 51(8):629—636.
- [16] Steib S, Zech A, Hentschke C, et al. Fatigue-induced alterations of static and dynamic postural control in athletes with a history of ankle sprain[J]. *Journal of Athletic Training*, 2013, 48(2):203—208.
- [17] Flevas DA, Bernard M, Ristanis S, et al. Peroneal electromechanical delay and fatigue in patients with chronic ankle instability[J]. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 2017, 25(6):1903—1907.
- [18] Ghram A, Young JD, Soori R, et al. Unilateral knee and ankle joint fatigue induce similar impairment to bipedal balance in judo athletes[J]. *Journal of Human Kinetics*, 2019, 66(1):7—18.
- [19] Jahjah A, Seidenspinner D, Schüttler K, et al. The effect of ankle tape on joint position sense after local muscle fatigue: a randomized controlled trial[J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2018, 19(1):8.
- [20] Yaggie JA, McGregor SJ. Effects of isokinetic ankle fatigue on the maintenance of balance and postural limits[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2002, 83(2):224—228.
- [21] Soleimanifar M, Salavati M, Akhbari B, et al. The interaction between the location of lower extremity muscle fatigue and visual condition on unipedal postural stability[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2012, 112(10):3495—3502.
- [22] Bisson EJ, Remaud A, Boyas S, et al. Effects of fatiguing isometric and isokinetic ankle exercises on postural control while standing on firm and compliant surfaces[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2012, 9:39.
- [23] Lyu H, Fan Y, Hao Z, et al. Effect of local and general

- fatiguing exercises on disturbed and static postural control[J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2021, 56:102487.
- [24] Tsai LC, Sigward SM, Pollard CD, et al. Effects of fatigue and recovery on knee mechanics during side-step cutting[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2009, 41(10):1952—1957.
- [25] 张希妮, 傅维杰, 夏锐, 等. 不同疲劳诱导方案对落地时下肢关节力学、刚度和能量吸收的影响[J]. *体育科学*, 2017, 37(11):48—55.
- [26] Weil LS, Moore JW, Kratzer CD, et al. A biomechanical study of lateral ankle sprains in basketball[J]. *Journal of The American Podiatry Association*, 1979, 69(11):687.
- [27] Han J, Yang Z, Adams R, et al. Ankle inversion proprioception measured during landing in individuals with and without chronic ankle instability[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2021, 24(7):665—669.
- [28] Coughlan G, Caulfield B. A 4-week neuromuscular training program and gait patterns at the ankle joint[J]. *Journal of Athletic Training*, 2007, 42(1):51—59.
- [29] Quammen D, Cortes N, Van Lunen BL, et al. Two different fatigue protocols and lower extremity motion patterns during a stop-jump task[J]. *Journal of Athletic Training*, 2012, 47(1):32—41.
- [30] Sun W, Wang L, Zhang C, et al. Detraining effects of regular Tai Chi exercise on postural control ability in older women: a randomized controlled trial[J]. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 2018, 16(2):55—61.
- [31] Zech A, Steib S, Hentschke C, et al. Effects of localized and general fatigue on static and dynamic postural control in male team handball athletes[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2012, 26(4):1162—1168.
- [32] Johnston W, Dolan K, Reid N, et al. Investigating the effects of maximal anaerobic fatigue on dynamic postural control using the Y-Balance Test[J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2018, 21(1):103—108.
- [33] Shaffer SW, Teyhen DS, Lorenson CL, et al. Y-balance test: a reliability study involving multiple raters[J]. *Military Medicine*, 2013, 178(11):1264—1270.
- [34] 周志鹏, 曲峰, 刘鹏, 等. 不同方向单腿跳跃落地及运动疲劳对非接触性前交叉韧带损伤风险的影响[J]. *中国体育科技*, 2017, 53(1):111—117.
- [35] Forestier N, Teasdale N, Nougier V. Alteration of the position sense at the ankle induced by muscular fatigue in humans[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2002, 34(1):117—122.
- [36] Gribble PA, Robinson RH, Hertel J, et al. The effects of gender and fatigue on dynamic postural control[J]. *Journal of Sport Rehabilitation*, 2009, 18(2):240—257.
- [37] Djupsjobacka M, Johansson H, Bergenheim M. Influences on the gamma-muscle-spindle system from muscle afferents stimulated by increased intramuscular concentrations of arachidonic acid[J]. *Brain Research*, 1994, 663(2):293—302.
- [38] Nashner LM. Adapting reflexes controlling the human posture[J]. *Experimental Brain Research*, 1976, 26(1):59—72.
- [39] Leper R, Bigard AX, Diard JP, et al. Posture control after prolonged exercise[J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1997, 76(1):55—61.
- [40] Khin-Myo-Hla, Ishii T, Sakane M, et al. Effect of anesthesia of the sinus tarsi on peroneal reaction time in patients with functional instability of the ankle[J]. *Foot & Ankle International*, 1999, 20(9):554—559.
- [41] Gribble PA, Hertel J. Effect of hip and ankle muscle fatigue on unipedal postural control[J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2004, 14(6):641—646.
- [42] Steib S, Hentschke C, Welsch G, et al. Effects of fatiguing treadmill running on sensorimotor control in athletes with and without functional ankle instability[J]. *Clinical Biomechanics*, 2013, 28(7):790—795.
- [43] Nicholettos A, Barcellona MG, Morrissey MC. The immediate effects of open kinetic chain knee extensor exercise at different loads on knee anterior laxity in the uninjured[J]. *The Knee*, 2013, 20(6):500—504.
- [44] Hiemstra LA, Lo IK, Fowler PJ. Effect of fatigue on knee proprioception: implications for dynamic stabilization[J]. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 2001, 31(10):598.