



# 不同步行和跑步速度对后足角度和足偏角的影响

赵滢, 陆阿明\*

**摘要:** 通过进行 zebris 步态测试和后足角度拍摄,采集和分析速度变化对步行和跑步时后足角度和足偏角的影响,从而科学指导广大健身爱好者进行合理的步行和跑步运动,预防运动损伤。实验结果显示:(1)相较于自身步行偏好速度,采用实验步行设定速度时左右足后足角度均显著增大,左右足足偏角均显著减小(1.33 m/s 例外);(2)实验步行设定速度之间,相较于 1.33 m/s 速度步行,以 1.56 m/s 和 1.78 m/s 步行时左足后足角度显著增大,以 1.56 m/s 步行时右足足偏角显著减小;(3)相较于自身跑步偏好速度,当以慢于自身跑步偏好速度跑步时,左右足后足角度和足偏角均无显著性差异,而当以快于自身跑步偏好速度跑步时,左右足的足偏角显著减小,后足角度无显著性差异;(4)快于自身跑步偏好速度时比慢于自身跑步速度时左右足的足偏角显著减小(以 3.61 m/s 跑步时比 1.78 m/s 跑步时左足后足角度增大);(5)快于自身跑步偏好速度时,以 3.61 m/s 跑步时比 2.78 m/s 跑步时左右足足偏角显著减小。实验结果表明:(1)相较于其他实验设定速度,以自身偏好速度步行时,后足角度较小,足偏角较大,可以有效预防运动损伤;(2)从后足角度和足偏角考虑,当步行速度较快时,保持步长,适当减小足偏角可以减少踝关节损伤。

**关键词:** 步行;跑步;速度;后足角度;足偏角

中图分类号:G804.5 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2017)06-0093-08

DOI:10.12064/ssr.20170614

## Effect of Different Walking and Running Speed on Rear Foot Angle and Foot Progression Angle

ZHAO Ying, LU A-ming

(Soochow University, Soochow 215000, China)

**Abstract:** The influence of walking and running speed on rear foot angle and foot progression angle is collected and analyzed by Zebris gait tests and digital photographs in order to scientifically instruct a vast number of fitness enthusiasts to walk and run rationally and prevent sports injury. The result of the study shows that:(1) Compared to preferred walking speed, the left and right rear foot angle significantly increased and the left and right foot progression angle obviously reduced when walking at a set speed(except 1.33m/s);(2) While walking with the set speed, compared to 1.33m/s, the left rear foot angle significantly increased when walking at 1.56m/s and 1.78m/s, and right foot progression angle significantly reduced when walking at 1.56m/s;(3) Compared to preferred running speed, there was no significant difference in rear foot angle and foot progression angle when running at the speed slower than the preferred running speed. However, left and right foot progression angle significantly reduced and no significant difference in rear foot angle when running at the speed faster than the preferred running speed;(4) Compared to the running speed slower than the preferred speed, left and right foot progression angle significantly reduced when running at a faster speed (the rear foot angle of the left foot increased when running at the speed of 3.61m/s than running at

收稿日期:2017-09-04

基金项目:2017年度苏州市体育局体育科研局管课题(TY2017-103),2017年度江苏省研究生科研创新计划(KYCX17\_2021),江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)。

第一作者简介:赵滢,女,在读硕士研究生。主要研究方向:运动生物力学。E-mail:312879036@qq.com。

\* 通讯作者简介:陆阿明,男,教授,博士,博士研究生导师。主要研究方向:运动生物力学、体育用品器械开发。E-mail:Luaming@suda.edu.cn。

作者单位:苏州大学体育学院,江苏苏州 215021。



1.78m/s); (5) Compared to 2.78m/s, left and right foot progression angle significantly reduced when running at 3.61m/s. In conclusion, Compared to other experimental setting speed, rear foot angle is smaller and foot progression angle is greater at the preferred walking speed. This can effectively prevent injuries. In terms of rear foot angle and foot progression angle, it is best to keep step length and decrease foot progression angle properly when walking at a fast speed. In this way, ankle injury can be prevented.

**Key Words:** walking; running; speed; rear foot angle; foot progression angle

2007年美国运动医学学会建议健康成年人每周需要有5 d完成至少30 min的中等强度有氧运动,累积持续10 min以上<sup>[1]</sup>。2008年美国卫生及公共服务部修改了这个指南,指出健康成年人每周至少进行150 min有氧活动,持续时间在10 min以上,分布在整一周<sup>[2]</sup>。步行和跑步是大众健身最简单和最常见的运动方式之一。步行被认为是近乎完美的运动方式<sup>[3]</sup>,在欧盟国家甚至将步行列为最受欢迎的体育运动<sup>[4]</sup>。相较于其他活动,无论男性还是女性,在工作之外每周都花费更多时间在步行运动上。虽然遵守运动计划的人不足50%,但是步行比其他运动的遵守计划率更高<sup>[5-7]</sup>。对于大多数中年和超重人群,1.39 m/s的步行速度已经达到了久坐成人中等强度的运动要求<sup>[8]</sup>。在美国,每年大约有3 600万人经常性地参加跑步运动;在欧洲,娱乐性跑步爱好者人数占总人口的36%。已有研究证明,健身走和跑步都可以提升健康水平,改善生活质量<sup>[9-11]</sup>。步行和跑步具有相应的下肢生物力学特征,因此,步行和跑步运动也与下肢骨骼肌肉的慢性损伤联系在一起。

足内旋(Pronation)指在步行和跑步时脚部自然向内旋转的过程。在步行和跑步的大多数情况下,脚后跟外侧首先着地,随着重心的向前推移,脚后跟向内侧倾倒,在离地时产生一个自然向上翻转的动作,这个向内侧翻转的动作就叫做足内旋,足内旋产生于脚踝下面的距下关节。但当足内旋角度超过一定范围的时候,就变成了足过度内旋,在着地时足部的内侧接触面积和压力增大。足过度内旋也称之为足外翻,可以预测下肢非正常生物力学特征(前足和胫骨内翻),常表现为过度或者长时间的跟骨外翻、距骨内收和跖屈。弗拉基米尔等人将着地阶段某一时相时平分小腿和平分跟骨两直线之间的夹角定义为足后部角<sup>[12]</sup>,又可称为后足角度<sup>[13]</sup>,本实验采取的是着地阶段测试小腿与地面垂直时的后足角度,这是判定足过度内旋的重要指标<sup>[14-16]</sup>,也是描述后足额状面结构特征和距下关节、距骨在踝关节运动情况的一个重要指标。Resende RA等人通过研究走路时不

对称的足内旋角度,发现不对称的足内旋角度会导致下肢的生物力学特征变化,与损伤的发生密切相关<sup>[17]</sup>。有研究证明,足过度内旋者中腱处的脉搏指数和阻力指数在受试者单腿站立和双腿直立时都升高<sup>[14]</sup>,因此足过度内旋是肌腱损伤的重要内因之一。除此之外,足过度内旋也与胫骨内侧压力综合症以及髌骨关节疼痛症密切相关<sup>[18]</sup>。足偏角是指平地行走或跑步时足中心线与同侧前进方向中线所构成的角度,由大腿骨颈部的前屈和小腿胫骨扭曲使下肢关节外旋造成的,一般认为约15°为正常足偏角度,左右足分别计算。足偏角作为步态分析中的一个重要指标,已被广泛应用于判断足外翻和足内翻步态,从而与下肢损伤相联系。大量研究显示内侧膝关节骨性关节炎与膝关节内侧负荷密切相关<sup>[19,20]</sup>,因此足偏角也是影响内侧膝关节骨性关节炎的因素之一。但很少有研究将这两个指标联系在一起,两个指标之间的相互关系也有待于进一步探讨研究。

综上所述,后足角度和足偏角与下肢运动损伤密切相关,故研究后足角度和足偏角对预防运动损伤具有一定科学意义。此外在日常生活中,人们会根据活动的性质和可利用的活动空间来改变速度,以完成不同的身体活动,因此本研究拟通过比较不同步行和跑步速度时的后足角度和足偏角变化,探讨后足角度和足偏角之间的关系,科学指导广大健身爱好者进行合理的步行和跑步运动,以预防运动损伤的发生。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

12名年轻健康男性研究生自愿参与本实验,在过去6个月没有下肢踝关节、膝关节等损伤史,所有受试者的具体情况如表1所示。

表1 受试者基本情况一览表

Table I Basic Information of the Subjects

N	年龄/岁	身高/cm	体重/kg
12	24.42±0.90	177.00±6.42	71.02±12.73



## 1.1 测试仪器

### 1.1.1 Zebris 步态分析跑台

采用德国生产的 Zebris 步态分析跑台,对受试者每个不同速度下步行和跑步时的足偏角指标进行采集。

### 1.1.2 Mega 高速摄像机

采用 Mega 高速摄像机采集所需动作视频,相机采样频率设置为 100 帧/秒,运用 Mega Speed 软件截取 3 个完整步行和跑步步态,并用自行编程的 BayerImageProcess 软件计算测试小腿与地面垂直时的后足角度指标。

### 1.1.3 常速摄像机

将一般电脑自带的前置摄像头摆放在 Zebris 跑台的侧面,拍摄整个实验过程中受试者下肢的右面观,寻找与 Mega Speed 高速摄像截取的 3 个完整步行和跑步步态相对应的这一段录像,然后从侧面录像中确定测试小腿与地面垂直时刻。

### 1.1.4 同步常速摄像机和 Mega 高速摄像机

将一个触发器连接在 Mega Speed 高速摄像机上,当按下红色按钮时 Mega Speed 高速摄像机开始拍摄,黄色灯管发亮,常速摄像机将拍摄到灯管发亮那一时刻,此时以后拍摄到的第一个步态就是 Mega Speed 高速摄像拍摄的第一个步态,由此两个录像同步。

## 1.2 数据处理和评价指标

### 1.2.1 数据处理

(1)数据处理采用自我编程的 BayerImageProcess 软件对后足角度录像进行解析。

(2)后足角度定义为步行或跑步时测试腿的小腿部分与地面垂直时,平分小腿和平分跟骨的两线之间的夹角,此角度为受试者后足额状面上的姿势,如图 1 和图 2 所示<sup>[14, 16]</sup>。

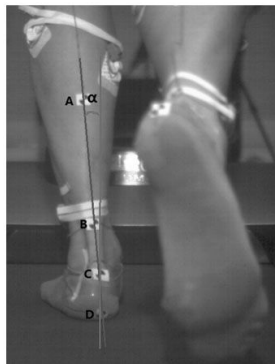
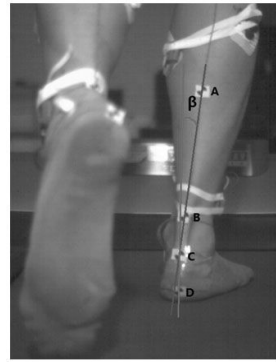


图 1 左足后足角度示意图  
Figure 1 Rear Foot Angle of the Left Foot

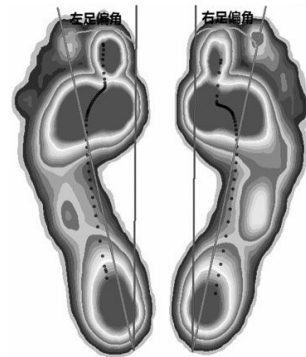


注:A 点与 B 点的连线为平分小腿的直线(蓝线),C 点与 D 点的连线为平分跟骨的直线(红线),蓝线与红线之间的夹角即为后足角度,左足的后足角度设为  $\alpha$  值,右足的后足角度设为  $\beta$  值。

图 2 右足后足角度示意图

Figure 2 Rear Foot Angle of the Right Foot

(3)足偏角定义为足部的矢量(从踝关节中心到第二跖骨)偏离前进方向的的角度<sup>[21]</sup>,此角度为受试者水平面上的角度,如图 3 所示,一般足偏角大于  $15^\circ$  定义为足外翻,足偏角小于  $15^\circ$  定义为足内翻,足偏角等于  $15^\circ$  定义为中立位<sup>[22]</sup>。



注:红线表示踝关节中心到第二跖骨的连线,蓝线表示前进方向,红线与蓝线的夹角即为足偏角

图 3 足偏角示意图

Figure 3 Foot Progression Angle

(4)自身偏好速度定义为受试者在进行步行和跑步步态测试时,自身选取的平时最常采用的步行和跑步速度。本实验中 12 名受试者步行自身偏好速度为  $(0.81 \pm 0.33)$  m/s 即  $(2.93 \pm 1.19)$  km/h,跑步自身偏好速度为  $(1.91 \pm 0.21)$  m/s 即  $(6.88 \pm 0.75)$  km/h。

(5)实验设定速度:步行时采取 1.33 m/s(4.8 km/h)、1.56 m/s(5.6 km/h)和 1.78 m/s(6.4 km/h),跑步时采取 1.78 m/s(6.4 km/h)、2.78 m/s(10 km/h)和 3.61 m/s(13 km/h)。

### 1.3.2 评价指标

(1)标准化后的后足角度:受试者自然站立,重心移动到支撑腿时,对测试腿的小腿部分与地面垂



直时的后足角度进行标准化,单位为:度( $^{\circ}$ ),该实验将足内旋时后足角度设为正值,相反,足外旋时后足角度设为负值。

(2)标准化的后足偏角:对受试者自然站立在跑台上的足偏角进行标准化,单位为:度( $^{\circ}$ )。

#### 1.4 测试方案

步态和后足角度测试:在实验开始前,测试者将高速摄像机摆放在跑台的正后方,使受试者下肢刚好在拍摄图像的正中间,然后让受试者脱鞋,穿着袜子对下肢后部相应位置进行“+”字标记。

(1)热身后,12名受试者首先自我调节跑台速度,找到自身步行偏好速度,对该速度进行90s适应后再进行30s正式步态测试和录像,测试者记录此时的步行速度。休息60s后再次自我调节跑台速度,找到自身跑步偏好速度,对该速度进行90s适应后再进行30s正式步态测试和录像。实验结束计算可得12名受试者自身步行偏好速度为 $(0.81 \pm 0.33)$  m/s 即 $(2.93 \pm 1.19)$  km/h,自身跑步偏好速度为 $(1.91 \pm 0.21)$  m/s 即 $(6.88 \pm 0.75)$  km/h。查阅相关文献后得知当步行速度 $<1$  m/s时属于慢速步行<sup>[23]</sup>,因此自身偏好步行速度属于较慢的步行速度。据此,实验步行设定速度选取的是比自身步行偏好速度快的3个步行速度,即1.33 m/s、1.56 m/s和1.78 m/s<sup>[24]</sup>。而自身跑步偏好速度为 $(1.91 \pm 0.21)$  m/s 即 $(6.88 \pm 0.75)$  km/h,实验跑步设定速度选取了1个慢于自身跑步偏好速度的实验跑步设定速度,即1.78 m/s<sup>[25,26]</sup>和2个快于自身跑步偏好速度2.78 m/s和3.61 m/s<sup>[25,26]</sup>。(2)步行测试:热身后,受试者分别以1.33 m/s、1.56 m/s和1.78 m/s<sup>[24]</sup>的速度在跑台上匀速步行,每种速度在90s适应后再进行30s正式步态测试和录像,每种速度之间休息60s。(3)跑步测试:热身后,受试者分别以1.78 m/s、2.78 m/s和3.61 m/s<sup>[25,26]</sup>的速度在跑台上匀速跑动,每种速度在90s适应后再进行30s正式步态测试和录像,每种速度之间休息60s。

#### 1.5 统计学处理

运用SPSS17.0软件对实验数据进行统计处理和分析。选取不同步行和跑步速度下3个完整步态后足角度的平均值和30s步态测试的足偏角平均值,计算受试者后足角度和足偏角的平均值和标准差。采用两速度之间的配对t检验分析观察不同步行和跑步速度下后足角度和足偏角之间的差异。采用Pearson相关性分析对后足角度和足偏角之间进行相关性分析。显著性水平设定为 $P < 0.05$ , $P < 0.01$

为非常显著, $P < 0.001$ 为极其显著。

## 2 研究结果

### 2.1 后足角度和足偏角的相关性

步行时左足和右足的后足角度和足偏角的相关性见表2,结果显示,步行时右足的后足角度和足偏角呈显著负相关( $r = -0.294$ , $P < 0.05$ ),左足的后足角度和足偏角无相关性( $P > 0.05$ )。

表2 步行时后足角度与足偏角的相关性

Table II Correlation between Rear Foot Angle and Foot Progression Angle when Walking

	后足角度	足偏角	r	P
左足	$0.51 \pm 1.49$	$-0.59 \pm 1.61$	-0.204	0.164
右足	$0.37 \pm 1.12$	$-0.60 \pm 2.08$	-0.294	0.042*

注:\*表示后足角度与足偏角具有显著性相关。

跑步时左足和右足的后足角度和足偏角的相关性见表3,结果显示,跑步时左右足的后足角度和足偏角没有明显的相关关系( $P > 0.05$ )。

表3 跑步时后足角度与足偏角的相关性

Table III Correlation between Rear Foot Angle and Foot Progression Angle when Running

	后足角度	足偏角	r	P
左足	$-0.72 \pm 1.74$	$-0.08 \pm 3.64$	0.077	0.560
右足	$-1.04 \pm 1.49$	$-0.24 \pm 4.08$	0.221	0.090

从步行和跑步测试中可知,左右足的后足角度和足偏角的相关性并不普遍存在,并且步行时右足的足偏角和后足角度的负相关性不是特别显著,还需要进一步论证,排除实验的偶然性。因此后足角度和足偏角在此实验中具有独立性,接下来需要分别探讨不同步行和跑步速度对后足角度和足偏角的影响。

### 2.2 不同步行速度下的后足角度和足偏角变化

表4是不同步行速度之间后足角度和足偏角的配对t检验的结果,结果显示:(1)相较于自身偏好速度,以1.33 m/s速度步行时,左足的后足角度显著增大( $P < 0.01$ ),右足的后足角度显著增大和足偏角显著减小( $P < 0.05$ );(2)相较于自身偏好速度,以1.56 m/s速度步行时,左足的后足角度显著增大( $P < 0.001$ )、足偏角显著减小( $P < 0.05$ ),右足的后足角度显著增大和足偏角显著减小( $P < 0.01$ );(3)相较于1.33 m/s速度,以1.56 m/s速度步行时,左足的后足角度显著增大和右足的足偏角显著减小( $P < 0.05$ );(4)相较于自身偏好速度,以1.78 m/s速度步行时,右足的后足角度显著增大( $P < 0.05$ ),左足的后足角度增加更加显著,左右足的足偏角减少更加显著



( $P < 0.01$ ); (5) 相较于 1.33 m/s 速度, 以 1.78 m/s 速度步行时, 左足的后足角度显著增加( $P < 0.05$ )。

表 4 不同步行速度下标准化后足角度和足偏角(°)  
Table IV Standard Rear Foot Angle and Foot Progression Angle at the Different Speed of Walking(°)

	偏好速度	1.33m/s	1.56m/s	1.78m/s
左 后足角度	-0.48±0.91	0.32±1.42**	1.04±1.33***	1.18±1.73***
足 足偏角	0.48±1.97	-0.51±1.29	-1.17±1.04*	-1.17±1.55**
右 后足角度	-0.55±1.28	0.54±0.75*	0.77±0.93**	0.73±1.03*
足 足偏角	1.21±1.79	-0.85±1.71*	-1.37±1.93***	-1.39±1.91**

注:\*表示走路偏好速度相比, $P < 0.05$ ,\*\*表示 $P < 0.01$ ,\*\*\*表示 $P < 0.001$ 。#表示与1.33m/s走路速度相比, $P < 0.05$ ,##表示 $P < 0.01$ ,###表示 $P < 0.001$ 。

### 2.3 不同跑步速度下的后足角度和足偏角变化

表 5 是不同跑步速度之间后足角度和足偏角的配对 t 检验的结果,结果显示:(1)相较于自身偏好速度,以 2.78 m/s 速度跑步时,左右足的足偏角显著减小( $P < 0.05$ ),相较于 1.78 m/s 速度,以 2.78 m/s 速度跑步时,左右足的足偏角减小更加显著( $P < 0.01$ );(2)相较于自身偏好速度,以 3.61 m/s 速度跑步时,左右足的足偏角显著减小( $P < 0.01$ );(3)相较于 1.78 m/s 速度,以 3.61 m/s 速度跑步时,左足的后足角度显著增大( $P < 0.05$ ),左足的足偏角显著减小( $P < 0.01$ ),右足的足偏角减小更加显著( $P < 0.001$ );(4)相较于 2.78 m/s 速度,以 3.61 m/s 速度跑步时,左右足的足偏角显著减小( $P < 0.01$ )。

表 5 不同跑步速度下标准化后足角度和足偏角(°)  
Table V Standard Rear Foot Angle and Foot Progression Angle at the Different Speed of Running(°)

	偏好速度	1.78m/s	2.78m/s	3.61m/s
左 后足角度	-0.90±1.89	-1.19±1.56	-0.45±1.86	-0.23±1.85 <sup>▲</sup>
足 足偏角	1.02±3.16	1.30±3.54	-0.57±2.85 <sup>▲▲</sup>	-2.56±2.49 <sup>***▲▲▲</sup>
右 后足角度	-1.16±1.66	-1.24±1.50	-0.83±1.39	-0.92±1.66
足 足偏角	0.33±4.04	0.89±4.29	-0.80±3.00 <sup>▲▲</sup>	-2.38±3.47 <sup>***▲▲▲▲</sup>

注:\*表示与跑步偏好速度相比, $P < 0.05$ ,\*\*表示 $P < 0.01$ ,\*\*\*表示 $P < 0.001$ ,▲表示与1.78m/s跑步速度相比, $P < 0.05$ ,▲▲表示 $P < 0.01$ ,▲▲▲表示 $P < 0.001$ 。★表示与2.78m/s跑步速度相比, $P < 0.05$ ,★★表示 $P < 0.01$ ,★★★表示 $P < 0.001$ 。

## 3 讨论

相较于其他实验设定速度,以自身偏好速度步行时,后足角度最小,足偏角最大。而不同跑步速度

之间后足角度的差异性没有那么明显,足偏角差异明显。从实验数据可知,当以较慢速度跑步时足偏角相比站立时是增大的,此时不需要很大的前进推动力,只有采取较快跑步速度、需要较大的前进推动力时足偏角才明显减小,因此步行和跑步时的后足角度和足偏角随着速度的变化特征不同。步行和跑步时的 COM 移动模式有差异<sup>[27, 28]</sup>、步态周期划分明显不同<sup>[29]</sup>且跑步会产生更大的地面反作用力,两者的肌肉活动状况也不同<sup>[30, 31]</sup>。Pink 早在 1994 年就提出跑步的动力并不主要来自踝关节运动,而是来自质量弹簧机制,跑步速度的增加并不影响踝关节的运动<sup>[32, 33]</sup>。因此,以上差异可能是导致步行与跑步结果不一致的部分原因。相关研究指出,跑步比步行时的步宽更窄<sup>[34]</sup>,因此更易导致股骨内收内旋、胫骨内翻,从而导致足跟与地面接触时后足外翻内旋<sup>[29]</sup>,所产生的后足角度峰值也更大<sup>[35]</sup>,其与本实验结果不符,考虑可能原因是本实验的后足角度选取的是小腿与地面垂直时刻的值而不是着地时刻的后足角度值。

### 3.1 自身偏好速度对后足角度和足偏角的影响

因为每个人身体条件不同,对速度的敏感度和可接受度也不同,不同速度会对人体的下肢生物力学产生不同的影响。从实验数据可知不管是步行还是跑步,当快于自身偏好速度时指标的变化明显,而足过度内旋是肌腱损伤<sup>[44]</sup>、胫骨内侧压力综合症以及髌骨关节疼痛症的发病原因之一<sup>[18]</sup>,而足外翻可以减少膝关节内收力矩峰值<sup>[22]</sup>,因此该实验结果说明受试者以自身偏好速度步行时也许自身会产生一种保护机制来预防运动损伤。这与一些研究步行自身偏好速度的实验结果一致,Middleton 等人通过实验证明以自身偏好速度步行时可以减少老年人跌倒的概率<sup>[36]</sup>,同时 DM Russell 等人认为当受试者以自身偏好速度步行时膝关节活动的动态稳定性最好<sup>[37]</sup>,这可能是由于自身偏好速度是中枢神经系统、感觉系统、外周神经系统、骨骼肌系统、代谢系统共同选择的一个最佳速度,因此可以减少运动损伤的发生率。这个结果提示,步行速度提高时,有意识地增加足偏角可以减小后足角度,从而有助于减小踝关节的左右移动,减少踝关节损伤,但这需要进一步的研究。

### 3.2 不同步行速度对后足角度的影响

已知足内旋产生于脚踝下面的距下关节,距下关节是一个特殊的关节,是 3 个基本面共同作用的,距下关节与足部和踝部功能有关,距下关节包括了



内翻和外翻、内收和外展、背屈和跖屈,而足内外旋是距下关节 3 个平面的共同运动<sup>[38]</sup>。足内旋是一个闭合动力链,包括了跟骨的外翻、踝内收和跖屈以及胫骨内旋。足外旋也是一个闭合动力链,包括了跟骨的内翻、踝外翻和背屈以及胫骨外旋<sup>[39]</sup>。足内旋伴随着跟骨的外翻,膝关节的外翻<sup>[40]</sup>,而跟骨、膝关节外翻会使足偏角增大,因此步行时后足角度与足偏角呈负相关。此外,胫骨内旋的同时伴随着膝关节的内旋和内收,而膝关节的内旋和内收同时伴随着髌关节的内旋和内收。已有研究证明,随着步行速度的增加,步频、步长、步幅、地面反作用力的第一峰值力和足尖离地时膝关节角度显著性递增,而步态周期时间、单步时间、单脚支撑、双脚支撑时间和足尖离地时膝关节角度都显著性递减<sup>[41]</sup>。Jennifer L. Lelas 等人也对下肢各个关节角度在矢状面上的变化进行实验研究,结果发现当步行速度增加时,踝关节背屈的峰值力矩增加,但增加幅度逐渐减小,踝关节、膝关节和髌关节峰值矢状面上运动的力矩和功率增大,但是在支撑阶段中期踝关节的背屈峰值与步行速度呈负相关<sup>[42]</sup>。同时有研究指出,有限的踝关节背屈角度会导致距下关节内旋<sup>[43]</sup>、膝关节外翻<sup>[44]</sup>,并且当步行速度增加时,支撑早期的膝关节内收力矩增加<sup>[22]</sup>,因此,步行速度增加时,膝关节内收外翻,从而导致后足角度增加。目前研究步行速度对额状面的关节运动的文献较少,而足内旋涉及 3 个运动平面,因此有关机制还需要进一步探讨分析。

### 3.3 不同步行速度对足偏角的影响

足偏角是足部偏离前进方向的角度,有研究报道步行速度增加时膝关节伸展角度和踝关节跖屈角度与速度呈正相关,膝关节屈曲角度和踝关节背屈角度呈负相关<sup>[42]</sup>,而受限的背屈角度会导致膝关节外翻<sup>[44]</sup>,这也许是足偏角减小的原因之一。已有研究证明,足偏角增加时可以通过压力中心和地面反作用力的横向移动调整膝关节负荷,减少额状面上的地面反作用力,从而使膝关节内收力矩冲量减小<sup>[45]</sup>,并且支撑后期的膝关节屈曲角度、内收力矩的第二个峰值也减小,而支撑早期的膝关节第一个内收力矩峰值和膝关节伸展力矩峰值增大。然而,足偏角减小可以通过移动膝关节中心和跟骨的旋转改变压力中心<sup>[46]</sup>,从而减小站立早期的膝关节内收力矩第一个峰值和膝关节伸展力矩峰值,但是膝关节内收力矩的冲量增大<sup>[45]</sup>。SoobiaSaad Khan 等人发现随着步行速度增加,膝关节内收第一峰值力矩增大,第二峰值力矩和内收力矩冲量减小<sup>[22]</sup>。本实验中,足偏角随

步行速度的增加而减小,与以上文献的实验结果一致。

Hsuan-Lun Lu 等人观察不同速度步行时步态各个指标的变化情况后,随着步行速度加快,步频、步长、单腿站立时间和 COM 垂直偏移均会增大,但是双腿站立时间、COM 内外偏移和 COM 线性偏移会减小<sup>[47]</sup>。同时,大量研究表明,下肢不同肌肉的活性随步行速度的不同而有差异<sup>[48,49]</sup>,因此 COM 位移和下肢肌肉活性是否影响后足角度和足偏角也需要进一步探讨研究。

## 4 结论

步行速度会影响后足角度和足偏角,而跑步速度对后足角度和足偏角的影响不一致,因此更应该关注走路时后足角度和足偏角可能引发的损伤。从后足角度分析,步行时不宜采取过快的速度,最好采取自身偏好速度步行,可以有效预防运动损伤。因为在步行锻炼运动中,随着速度的增加,足偏角会减小,增加向前的推动力,这会导致踝关节的动作模式发生改变,对踝关节产生不良的影响,继而影响膝关节。因此若快速步行,应该注意动作模式的改变,尽量不减小足偏角,保持步长,增加步频。值得一提的是,本研究着重关注的是后足角度和足偏角异常可能会引发的运动损伤,并不包括下肢所有的运动损伤。

## 参考文献:

- [1] W. L. H., I. M. L., R. R., Pate RR PK, et al. Physical Activity and Public Health[J]. *Circulation*, 2007,116(9): 1081.
- [2] Pate R. R., Yancey A. K., Kraus W. E. The 2008 Physical Activity Guidelines for Americans: implications for clinical and public health practice[J]. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 2010, 4(3):209-217.
- [3] Hardman A. E., Morris J. N. Walking to health[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 1998, 32(2):184.
- [4] Daniel V. D. A., Maria, Graça P, et al. Physical activity levels and body weight in a nationally representative sample in the European Union[J]. *Public Health Nutrition*, 1999, 2(1a):105-114.
- [5] Martin J. E., Dubbert P. M. Adherence to exercise[J]. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 1985, 13(1):137-167.
- [6] Perri M. G., Martin A. D., Leermakers E. A., et al. Effects of group- versus home-based exercise in the treatment of obesity[J]. *Journal of Consulting & Clinical Psychology*, 1997, 65(2):278-285.
- [7] Siegel P. Z., Brackbill R. M., Heath G. W. The epidemi-



- ology of walking for exercise: implications for promoting activity among sedentary groups[J]. *American Journal of Public Health*, 1995, 85(5):706-710.
- [8] Murtagh E. M., Boreham C. A. G., Murphy M. H. Speed and Exercise Intensity of Recreational Walkers[J]. *Preventive Medicine*, 2002, 35(4):397-400.
- [9] Lee P. H., Chuang Y. H., Chen S. R., Fet al. Perspectives of brisk walking among middle-aged and older persons in community: A qualitative study[J]. *Collegian*, 2015.
- [10] Kearney T. M., Murphy M. H., Davison G. W., et al. Accumulated brisk walking reduces arterial stiffness in overweight adults: evidence from a randomized control trial[J]. *Journal of the American Society of Hypertension*, 2014, 8(2):117-126.
- [11] Williams P. T., Franklin B. A. Reduced Incidence of Cardiac Arrhythmias in Walkers and Runners[J]. *Plos One*, 2013, 8(6):e65302.
- [12] 弗拉基米尔,扎齐奥尔斯基,陆爱云.运动生物力学:运动成绩的提高与运动损伤的预防第9卷[M]北京:人民体育出版社,2004.
- [13] 蔡宇辉,侯曼,郑秀媛,等.用3维重构技术分析足部骨组织的外翻特性[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*, 2005,41(5):541-543.
- [14] Karzis K., Kalogeris M., Mandalidis D., et al. The effect of foot overpronation on Achilles tendon blood supply in healthy male subjects[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2016.
- [15] Rao S., Riskowski J. L., Hannan M. T. Musculoskeletal conditions of the foot and ankle: assessments and treatment options[J]. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 2012, 26(3):345-368.
- [16] Monaghan G. M., Lewis C. L., Hsu W. H., et al. Forefoot angle determines duration and amplitude of pronation during walking[J]. *Gait & Posture*, 2013, 38(1):8-13.
- [17] Resende R. A., Deluzio K. J., Kirkwood R. N., et al. Increased unilateral foot pronation affects lower limbs and pelvic biomechanics during walking[J]. *Gait & Posture*, 2015, 41(2):395-401.
- [18] Barton C. J., Levinger P., Crossley K. M., et al. The relationship between rearfoot, tibial and hip kinematics in individuals with patellofemoral pain syndrome[J]. *Clinical Biomechanics*, 2012, 27(7):702-705.
- [19] Bennell K. L., Bowles K. A., Wang Y., et al. Higher dynamic medial knee load predicts greater cartilage loss over 12 months in medial knee osteoarthritis[J]. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 2011, 70(10):1770.
- [20] Miyazaki T., Wada M., Kawahara H., et al. Dynamic load at baseline can predict radiographic disease progression in medial compartment knee osteoarthritis[J]. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 2002, 61(7):617-622.
- [21] Shull P. B., Silder A., Shultz R., et al. Six-week gait retraining program reduces knee adduction moment, reduces pain, and improves function for individuals with medial compartment knee osteoarthritis[J]. *Journal of Orthopaedic Research Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 2014,32(2):351-2.
- [22] Khan S. S., Khan S. J., Usman J. Effects of toe-out and toe-in gait with varying walking speeds on knee joint mechanics and lower limb energetics[J]. *Gait & Posture*, 2017, 53:185.
- [23] Adachi T., Kono Y., Iwatsu K., et al. Duration of moderate to vigorous daily activity is negatively associated with slow walking speed independently from step counts in elderly women aged 75 years or over: A cross-sectional study[J]. *Archives of gerontology and geriatrics*, 2017, 74:94-99.
- [24] 王欢,江崇民,刘欣,等.中国人步行能耗以及步行锻炼建议[J].*体育科学*,2013,33(11):89-93.
- [25] Tsuji K., Ishida H., Oba K., et al. Activity of lower limb muscles during treadmill running at different velocities [J]. *Journal of Physical Therapy Science*, 2015, 27(2):353-356.
- [26] 夏永明,赵自强,谈诚,等.不同重力环境下足底受力的步态差异分析[J].*中国康复医学杂志*,2013,28(3):215-219.
- [27] Gordon K. E., Ferris D. P., Kuo A. D. Metabolic and mechanical energy costs of reducing vertical center of mass movement during gait[J]. *Archives of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2009, 90(1):136-144.
- [28] Farley C. T., González O. Leg stiffness and stride frequency in human running[J]. *Journal of Biomechanics*, 1996, 29(2):181-186.
- [29] Rd L. E., Balan Sackiriyas K. S., Swen R. W. A comparison of the spatiotemporal parameters, kinematics, and biomechanics between shod, unshod, and minimally supported running as compared to walking[J]. *Physical Therapy in Sport Official Journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine*, 2011, 12(4):151-163.
- [30] Farley C. T., Ferris D. P. Biomechanics of walking and running: center of mass movements to muscle action[J]. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 1998, 26(1):253-285.
- [31] Nilsson J., Thorstensson A. Ground reaction forces at different speeds of human walking and running[J]. *Acta Physiologica Scandinavica*, 2010, 136(2):217-227.



- [32] Pink M., Perry J., Houglum P. A., et al. Lower extremity range of motion in the recreational sport runner[J]. *Am. J. Sports Med.*, 1994, 22(4):541-549.
- [33] Bramble D. M., Lieberman D. E. Endurance running and the evolution of Homo[J]. *Nature*, 2004, 432(7015):345-352.
- [34] Dugan S. A., Bhat K. P. Biomechanics and analysis of running gait[J]. *Physical Medicine & Rehabilitation Clinics of North America*, 2005, 16(3):603-621.
- [35] Ferber R., Hume P., Osis S. T., et al. Changes in Foot Pronation from a Walk to a Run[J]. *The Meeting of the American College of Sports Medicine*, 2015.
- [36] Middleton A., Fulk G. D., Herter T. M., et al. Self-Selected and Maximal Walking Speeds Provide Greater Insight Into Fall Status Than Walking Speed Reserve Among Community-Dwelling Older Adults[J]. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2016, 95(7):1.
- [37] Russell D. M., Haworth J. L. Walking at the preferred stride frequency maximizes local dynamic stability of knee motion[J]. *Journal of Biomechanics*, 2014, 47(1):102-108.
- [38] Engsberg J. R., Grimston S. K., Wackwitz J. H. Predicting talocalcaneal joint orientations from talocalcaneal/talocrural joint orientations[J]. *Journal of Orthopaedic Research Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 1988, 6(5):749-757.
- [39] Sell K. E., Verity T. M., Worrell T. W., et al. Two measurement techniques for assessing subtalar joint position: a reliability study[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 1994, 19(3):162-167.
- [40] Rabin A., Kozol Z. Measures of range of motion and strength among healthy women with differing quality of lower extremity movement during the lateral step-down test[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 2010, 40(12):792-800.
- [41] 瞿晓娜,张腾宇,王喜太,等.行走速度对步态参数影响的实验研究[J].*中国康复医学杂志*,2012,27(3):257-259.
- [42] Lelas J. L., Merriman G. J., Riley P. O., et al. Predicting peak kinematic and kinetic parameters from gait speed [J]. *Gait & Posture*, 2003, 17(2):106-112.
- [43] Gross M. T. Lower quarter screening for skeletal malalignment-suggestions for orthotics and footwear[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 1995, 21(6):389-405.
- [44] Sigward S. M., Ota S., Powers C. M. Predictors of frontal plane knee excursion during a drop land in young female soccer players[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 2008, 38(38):661-677.
- [45] Simic M., Wrigley T. V., Hinman R. S., et al. Altering foot progression angle in people with medial knee osteoarthritis: the effects of varying toe-in and toe-out angles are mediated by pain and malalignment[J]. *Osteoarthritis & Cartilage*, 2013, 21(9):1272.
- [46] Shull P. B., Shultz R., Silder A., et al. Toe-in gait reduces the first peak knee adduction moment in patients with medial compartment knee osteoarthritis [J]. *Journal of Biomechanics*, 2013, 46(1):122-128.
- [47] HL L., MY K., CF C., et al. Effects of gait speed on the body's center of mass motion relative to the center of pressure during over-ground walking[J]. *Human movement science*, 2017, 54:354.
- [48] Russell D. M., Apatoczky D. T. Walking at the preferred stride frequency minimizes muscle activity[J]. *Gait & Posture*, 2016, 45:181-186.
- [49] Khademi-Kalantari K., Rahimi F., Hosseini S. M., et al. Lower limb muscular activity during walking at different speeds: Over-ground versus treadmill walking: A voluntary response evaluation[J]. *Journal of Bodywork & Movement Therapies*, 2016.

(责任编辑:何聪)