

文章编号:1004-7220(2015)02-0159-08

穿不同鞋与裸足对羽毛球蹬地动作 下肢及跖趾关节运动协调特征的影响

傅维杰, 魏勇*, 刘宇

(上海体育学院 运动健身科技省部共建教育部重点实验室, 上海 200438)

摘要: **目的** 探讨穿着不同鞋和裸足对羽毛球典型蹬跨步动作蹬地时腿下肢和跖趾关节运动协调的影响,为羽毛球运动的科学训练和专用鞋的选择及研发提供理论基础。**方法** 选取优秀男子羽毛球运动员作为研究对象,穿着某品牌羽毛球成品鞋、某款羽毛球样品鞋和裸足作为不同鞋条件,并以羽毛球典型蹬跨步作为测试动作。利用Vicon运动捕捉系统和高速摄像仪同步采集下肢蹬地过程中髋、膝、踝和跖趾关节的运动学及协调特征。**结果** (1) 在蹬地阶段,穿着两款羽毛球专项鞋时下肢各关节的运动学表现并无显著性差异,但相比裸足,两款鞋均在一定程度上增加踝、跖趾关节的角速度,并显著减低各关节角速度到达峰值的时间;(2) 下肢运动协调特征方面,3种足鞋条件均表现为在相近时间内下肢髋、膝、踝和跖趾关节由近及远依次加速蹬伸。**结论** 穿着运动鞋具备更好的蹬伸动力来源,能增加蹬伸的速度和效果,有利于提高运动表现;羽毛球蹬伸动作协调性的表现形式倾向于顺序性与同步性的合理组合,建议应针对性地加强踝、跖趾等末端关节的速度和力量训练。

关键词: 穿鞋; 裸足; 羽毛球; 蹬地步法; 下肢; 跖趾关节; 运动协调

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2015.02.159

Effects of footwear and barefoot on movement coordination of lower extremities and metatarsophalangeal joints during push-off in badminton footwork

FU Wei-jie, WEI Yong, LIU Yu (Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: **Objective** To explore the influence of footwear and barefoot on movement coordination of the lower extremities and metatarsophalangeal (MP) joints during push-off phase in typical lunge footwork of badminton, so as to provide theoretical basis for scientific training of badminton, as well as choice and development of badminton shoes. **Methods** Male badminton elites were recruited and required to perform the typical push-off footwork in playing badminton under two shod conditions (commercial badminton footwear and a prototype) and the barefoot condition. A Vicon motion capture system and a high-speed video camera were simultaneously employed to collect the kinematics and coordination characteristics of the hip, knee, ankle and MP joints during the push-off stage of the lunge step. **Results** (1) No substantial difference was found in joint kinematics of the lower extremities during push-off stage for wearing two types of badminton shoes adopted in this study. Compared with barefoot, wearing badminton shoes could increase the angular velocity of ankle and MP joints to some extent and sig-

收稿日期:2014-04-21; 修回日期:2014-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(11302131,11372194),教育部博士点基金项目(20123156120003),上海市科学技术委员会青年科技启明星计划项目(06QA14046),上海市教育委员会科研创新项目(14YZ125),国家体育总局奥运科研攻关项目(2013A124)。

通信作者:刘宇,教授,博士研究生导师, Tel: (021)51253571; E-mail: yuliu@sus.edu.cn。

*为共同第一作者

nificantly decrease the time of peak angular velocity occurrence in each joint; (2) With respect to characteristics of movement coordination, the hip, knee, ankle and MP joints were accelerating successively in a proximal-to-distal way during push-off under three foot-shoe conditions. **Conclusions** Footwear can provide the dynamic source during push-off, and contribute to improve the velocity and effects of push-off in order to enhance performance. The movement coordination of the lower extremities during push-off in the lunge step is more inclined to be a rational combination of sequence and synchronization. Consequently, more attention should be paid to the speed/strength training of the ankle and MP joints.

Key words: Footwear; Barefoot; Badminton; Push-off footwork; Lower extremity; Metatarsophalangeal joint; Movement coordination

蹬伸动作是体育运动中存在的不能再分解的重要基本动作之一,也是构成羽毛球各种步法的重要组成部分^[1-3]。从运动步法角度来看,羽毛球运动员在场上下肢动作有急停、急起、回动、起跳、快速跑/跳等,其中绝大部分都涉及下肢的蹬伸基本动作^[3]。因此,以何种合理的关节角度、速度和适当的环节相对位置进行蹬地,将与羽毛球运动成绩直接相关。而这种运动协调特征的组合又与身体各环节运用力学原理、协同统一爆发用力、充分发挥肌肉力量的动力学特征及其神经肌肉调节密切相关^[4]。针对羽毛球运动蹬地动作的下肢运动学特征及其可能的影响因素进行研究,可以明确羽毛球运动蹬地动作的结构特征,以期进一步通过科学训练和适当干预器具(如运动鞋等^[5])提高运动成绩。

另一方面,“足-鞋”力学系统对于下肢生物力学特征影响的研究由来已久,目前多集中于足跟的缓冲避震、全掌的防滑稳定、前足的能量回归等特性^[6],而针对某一专项鞋(如羽毛球鞋)在特定专项动作过程中的生物力学研究在国内并不多见。与此同时,现阶段裸足作为另一种特殊的“鞋”条件,越来越受到研究者的重视,特别是考虑到还原未加约束的足本身在运动和训练过程中的作用,而由此所衍生出的各种仿裸足的运动鞋(minimal shoes),其目的就是为了模拟裸足走、跑时足部的运动特征变化^[7]。

从运动力学角度而言,急速蹬离地面的足屈曲运动,动作最后发生的关节必定是在跖趾关节^[8]。近期的研究表明,跖趾关节在足部运动中同样发挥着重要作用,跖趾关节屈曲特征的改变能够对人体跑、跳支撑后期的蹬离效果产生重要影响^[9-10]。因此,本课题组采用从静止开始的羽毛球典型步法蹬跨步为研究动作,探讨急速蹬地过程中蹬地下肢髋、膝、踝以及跖趾关节的运动协调特征,并进一步比较

着鞋条件和裸足对上述特征的影响,为羽毛球运动的科学训练和专用鞋的选择及研发提供理论基础。

1 方法

1.1 研究对象

上海体育学院羽毛球队优秀男性队员8名[年龄:(19.9 ± 1.9)岁;身高:(177.5 ± 4.4)cm;体重:(72.3 ± 8.9)kg;训练年限:(9.3 ± 3.9)年],其中一级运动员2人,二级运动员6人。所有受试运动员都经过足部病史询问和体格检查,确定其足部无外翻等足部疾病以及任何足部损伤,足部解剖结构和机能一切正常,身体状况以及运动能力均良好,近期无大运动量运动史。

1.2 测试方法

1.2.1 实验用鞋 鞋条件共3种:①测试鞋Y:某品牌市售SHB-99型男式羽毛球鞋,大底采用耐磨的生胶材料,中底为gLite®低密度聚酯材料,质量为330.1g,大小为美国标准尺码9号;②测试鞋N:美国某运动科学研究室提供的针对亚洲人群足型的新款羽毛球样品鞋,大底采用橡胶材料,中底为高强度EVA发泡材料,质量为337.4g,大小为美国标准尺码9号(见图1);③裸足。

1.2.2 测试仪器 (1)人体运动捕捉系统:采用英国产Vicon红外高速运动捕捉系统和MX13型号的8台摄像头,采样频率为300Hz,利用Workstation 5.1软件对信号进行实时监控和采集。采用直径为14mm的红外反光标志球,定义骨盆、大腿、小腿、前足和后足5个环节,以及由相邻环节组成的髋、膝、踝、跖趾4个关节。(2)高速摄像机:美国IDT公司生产的高速摄像机MotionPro X-4,最高采样频率可达5kHz。本实验所选用的采样频率为300Hz,主要用于记录羽毛球运动员蹬地时足部的急速起蹬,



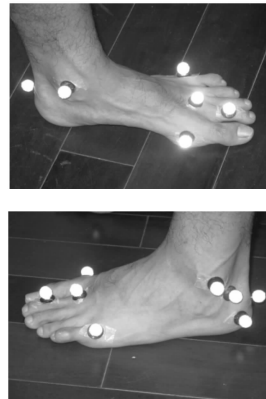
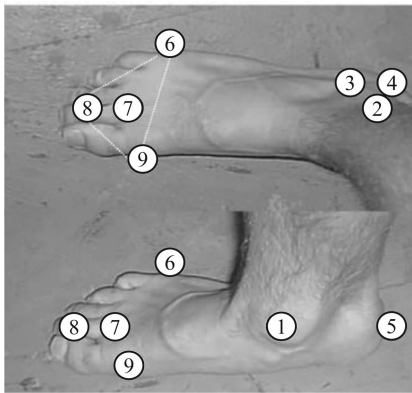
(a) Y 鞋



(b) N 鞋

图1 测试用鞋

Fig.1 Experimental shoes (a) Type Y shoes, (b) Type N shoes



1—内踝, 2—外踝, 3—跟骨近端, 4—跟骨远端, 5—跟骨后侧, 6—第5跖骨头, 7—第2跖骨头, 8—第2趾骨, 9—第1跖骨头

图2 足部反光球位置示意图^[12]

Fig.2 Schematic of marker placement on the foot

反光球3、4、5号则定义为后足(rear foot), 这两者可以确定跖趾关节的运动。为了更好地描述前后足在跖趾关节的运动, 其关节坐标系如图3所示, 其中Z轴与跖趾关节轴一致, 连接第1和第5跖骨头的线段, 即图2中6和9号反光球的连线; X与Z轴垂直, 当足平站在地面时则呈水平; Y轴则垂直于足的中立位。

1.3.3 数据采集 选用的步法为前场蹬跨步, 主要测试主动蹬地足(见图4)。受试者在测试人员的指示下静止站立于空间中央, 并进行静态拍摄。待一切准备就绪, 测试人员发出指令后, 受试者尽

为各参数比较提供直观的图像辅助。

1.3 测试步骤

1.3.1 基本资料采集及准备活动 实验开始前由实验人员测量受试者的身高、体重, 询问既往病史、运动史以及检查足部结果和功能是否正常。符合条件者被告知整个实验的目的、流程、注意事项等, 并熟悉测试场地、设备等。随后, 受试者更换实验用紧身衣, 并自行进行热身活动5 min, 防止在实验过程中受伤。

1.3.2 反光球位置确定 为了采集全身各主要关节的运动学特征, 按照Vicon提供的反光球粘贴位置要求进行粘贴^[11]。裸足时足部反光球的粘贴及命名参照Oleson等^[12]方法(见图2); 着鞋时反光球粘贴通过触觉体表标志来确定, 尽量与裸足一致。

跖趾关节的界定参照Oleson等^[12]方法。从图2可知, 反光球6、8、9号定义为前足(fore foot), 而

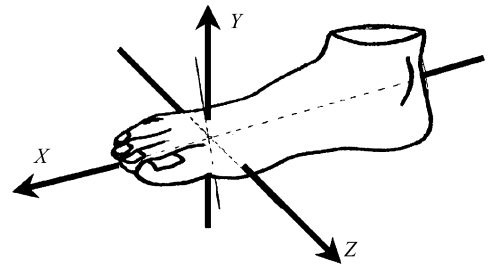


图3 跖趾关节局部坐标系^[12]

Fig.3 Local coordinate system of the metatarsophalangeal joints

最大力主动蹬测力台并伴另一侧腿同时一步迈向右前方接网前球^[13](见图5)。要求受试者在做每个

动作时一定要尽最大可能一步完成以保证为极限动作。同时,着地必须为足跟—足尖型。共采集3次有效动作,保证其连贯流畅且尽可能保持比赛中风格。此外,不同足鞋条件的测试顺序随机,并选用羽毛球运动中最常见的木地板作为其运动表面。

1.4 参数选择及界定

本研究旨在测试同一种羽毛球典型步法情况下着两种不同运动鞋和裸足时蹬地过程下肢环节协调

性情况。为便于分析,对蹬地过程中的足跟离地瞬间和蹬伸期(始于足跟离地瞬间,止于足趾离地瞬间)进行分析^[14]。其中,所选用的关节为髋、膝、踝和跖趾关节。所选用的运动学参数包括:①足跟离地瞬间各关节角度、角速度;②足跟离地瞬间脚后跟垂直和水平方向速度;③蹬伸期所用的时间;④蹬伸期各关节最大角度、最小角度和角度变化量;⑤蹬伸期各关节最大角速度及其发生时间。

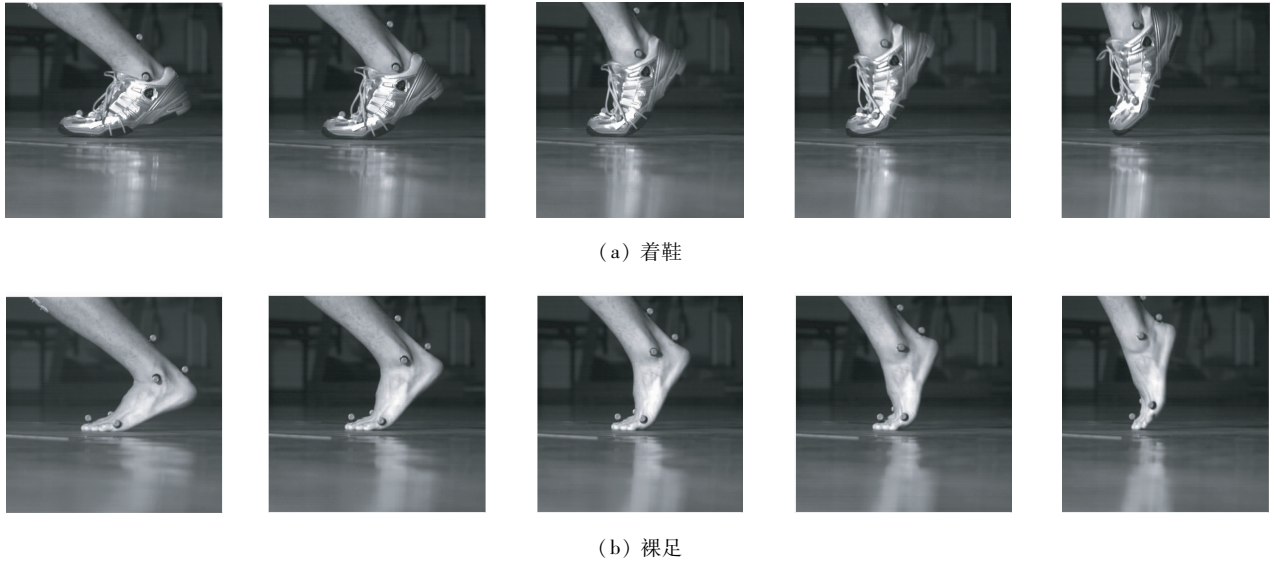


图4 不同条件下足蹬离地面的高速摄像图

Fig. 4 High-speed images during push-off under different conditions (a) Wearing shoes, (b) Bare foot



图5 羽毛球典型步法“蹬跨步”蹬离地面过程图

Fig. 5 The push-off phase in typical lunge footwork of badminton

1.5 数据统计

数据均以均数±标准差表示,并采用SPSS 11.0软件进行统计,采用单因素方差分析比较裸足和着不同鞋对各参数的影响,显著性水平设为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 足跟离地瞬间的运动学结果

穿着不同运动鞋及裸足在羽毛球运动员做蹬地

动作时足跟离地瞬间各运动学参数的结果见表 1, 其中 X、Y、Z 轴的方向分别为水平向前、水平向左和垂直向上。

足跟离地瞬间, 髌、膝、踝和跖趾关节角度在裸足条件下均大于穿鞋时; 而在穿着 Y 和 N 运动鞋时, 各关节角度都很接近, 且不存在显著性差异。除踝关节角度在穿着 Y 鞋和裸足之间无明显差异外, 其余各关节角度穿鞋与裸足之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

忽略穿鞋与否, 足跟离地瞬间髌、膝、踝关节各角速度都为负值, 而跖趾关节则只有裸足条件下为负值。跖趾关节的角速度明显小于其余各关节, 而

针对髌、膝、踝关节, 其角速度关系大致呈膝 > 踝 > 髌的状况。不同鞋之间进行比较, 只有踝关节在裸足和穿着 Y 鞋之间存在显著性差异。但是值得注意的是, 角速度的标准差在各关节和鞋足条件下都较大。

足跟离地瞬间, 脚后跟 3 个轴的线速度在裸足时都很小; Z 轴(垂直方向)速度无论穿鞋与否也偏小, 但水平两个方向的速度在穿鞋时均较大, 尤其是 Y 轴速度。统计学检验显示, 水平两个方向上着两种运动鞋与裸足之间存在非常显著差异 ($P < 0.01$); 而垂直方向上只有裸足和穿 N 鞋时存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

表 1 不同鞋与裸足条件下足跟离地瞬间的运动学参数比较

Tab. 1 Comparison of kinematic parameters at the moment of heel lifting under barefoot and shod condition

参数	Y 鞋(y)	N 鞋(n)	裸足(b)	P 值		
				y-n	y-b	b-n
$\theta_{hip}/(^{\circ})$	126.48 ± 18.43 *	129.26 ± 21.11 *	149.74 ± 17.53	0.773	0.024	0.044
$\theta_{knee}/(^{\circ})$	130.76 ± 14.71 *	127.00 ± 19.29 **	151.83 ± 8.25	0.617	0.010	0.003
$\theta_{ankle}/(^{\circ})$	105.99 ± 9.71	98.71 ± 12.17 *	110.58 ± 8.80	0.173	0.384	0.032
$\theta_{MP}/(^{\circ})$	158.91 ± 6.01 **#	163.92 ± 3.50 **	170.31 ± 3.76	0.045	0.000	0.013
$\omega_{hip}/[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	-56.22 ± 138.83	-2.70 ± 132.67	-44.29 ± 43.55	0.357	0.836	0.472
$\omega_{knee}/[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	-126.45 ± 55.28	-75.56 ± 50.38	-76.11 ± 54.40	0.070	0.073	0.984
$\omega_{ankle}/[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	-84.28 ± 35.68 *	-76.80 ± 52.06	-39.17 ± 36.49	0.726	0.044	0.088
$\omega_{MP}/[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	14.75 ± 65.83	0.84 ± 26.36	-1.62 ± 30.60	0.547	0.493	0.915
$v_x/(m \cdot s^{-1})$	0.11 ± 0.07 **	0.13 ± 0.04 **	0.01 ± 0.07	0.579	0.004	0.001
$v_y/(m \cdot s^{-1})$	0.46 ± 0.29 **	0.60 ± 0.03 **	0.04 ± 0.09	0.118	0.000	0.000
$v_z/(m \cdot s^{-1})$	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.00 *	0.03 ± 0.03	0.096	0.560	0.029

注: θ_{hip} 、 θ_{knee} 、 θ_{ankle} 、 θ_{MP} 分别为髌、膝、踝、跖趾关节角度, ω_{hip} 、 ω_{knee} 、 ω_{ankle} 、 ω_{MP} 分别为髌、膝、踝、跖趾关节角速度, v_x 、 v_y 、 v_z 分别为脚后跟 X、Y、Z 轴速度; * 和 ** 分别代表与裸足存在显著性和非常显著性差异, # 代表与 N 鞋存在显著性差异

2.2 蹬伸阶段的运动学结果

不同鞋-足条件下羽毛球运动员蹬伸时的各运动学参数结果见表 2。跖趾关节角度变化在穿 Y 鞋和裸足时接近, 都大于穿 N 鞋时, 但无统计学意义。髌、膝和踝关节变化穿鞋与裸足并无统计学差异。但在踝关节处, 穿 N 鞋的角度变化最大, Y 鞋最小, 且两种鞋之间存在非常显著性差异 ($P < 0.01$)。

裸足时蹬伸期时间远大于穿两种运动鞋时, 且都存在显著性差异, 而两种运动鞋之间无明显变化。

蹬伸阶段, 髌、膝、踝关节处的最大角速度在忽略穿鞋与否时都表现为髌 < 膝 < 踝的趋势, 且尽管

髌和膝关节都为穿 Y 鞋时的值最大, 但无统计学意义。与此同时, 穿 Y 鞋时踝关节最大角速度的标准差明显偏大, 提示在这个关节个体差异明显, 如果样本量足够大的话, 不排除穿 Y 鞋时最大角速度在髌、膝、踝各关节均大于穿 N 鞋和裸足的可能。跖趾关节的最大角速度裸足时明显小于穿运动鞋, 且与穿 N 鞋之间存在显著差异 ($P < 0.05$); 尽管与 Y 鞋之间无显著性差异, 结合标准差较大的现象, 提示这两者之间差异也可能很明显, 而两种运动鞋之间则无明显变化。

最大角速度出现的时间无论在哪个关节都表现

表2 不同鞋与裸足条件下蹬伸阶段的运动学参数比较

Tab.2 Comparison of kinematic parameters during push-off under barefoot and shod condition

参数	Y 鞋(y)	N 鞋(n)	裸足(b)	P 值		
				y-n	y-b	b-n
$\Delta\theta_{\text{hip}}/(\text{°})$	54.55 ± 13.09	53.17 ± 17.57	41.77 ± 10.16	0.845	0.081	0.117
$\Delta\theta_{\text{knee}}/(\text{°})$	52.27 ± 31.32	55.13 ± 11.86	46.79 ± 10.31	0.780	0.593	0.419
$\Delta\theta_{\text{ankle}}/(\text{°})$	37.38 ± 10.63 [#]	54.15 ± 15.15	44.69 ± 6.70	0.008	0.212	0.111
$\Delta\theta_{\text{MP}}/(\text{°})$	33.11 ± 27.35	18.69 ± 7.08	34.07 ± 30.09	0.226	0.939	0.232
t/s	0.50 ± 0.09 ^{**}	0.51 ± 0.15 ^{**}	0.73 ± 0.14	0.833	0.002	0.003
$\omega_{\text{hip_max}}/[(\text{°}) \cdot \text{s}^{-1}]$	308.54 ± 116.42	283.48 ± 90.98	255.69 ± 78.12	0.609	0.286	0.571
$\omega_{\text{knee_max}}/[(\text{°}) \cdot \text{s}^{-1}]$	530.83 ± 104.08	445.73 ± 75.78	461.91 ± 74.34	0.061	0.123	0.710
$\omega_{\text{ankle_max}}/[(\text{°}) \cdot \text{s}^{-1}]$	670.79 ± 348.20	586.10 ± 172.70	725.02 ± 142.73	0.486	0.655	0.258
$\omega_{\text{MP_max}}/[(\text{°}) \cdot \text{s}^{-1}]$	446.62 ± 457.72	586.19 ± 629.40 [*]	147.08 ± 591.96	0.625	0.065	0.026
$t_{\text{hip_max}}/s$	0.39 ± 0.18 [*]	0.44 ± 0.23 [*]	0.66 ± 0.15	0.627	0.011	0.032
$t_{\text{knee_max}}/s$	0.47 ± 0.08 ^{**}	0.48 ± 0.15 ^{**}	0.70 ± 0.14	0.861	0.001	0.002
$t_{\text{ankle_max}}/s$	0.49 ± 0.09 ^{**}	0.50 ± 0.15 ^{**}	0.72 ± 0.14	0.954	0.002	0.002
$t_{\text{MP_max}}/s$	0.48 ± 0.10 [*]	0.48 ± 0.18 [*]	0.70 ± 0.15	0.987	0.013	0.013

注: $\Delta\theta_{\text{hip}}$ 、 $\Delta\theta_{\text{knee}}$ 、 $\Delta\theta_{\text{ankle}}$ 、 $\Delta\theta_{\text{MP}}$ 髋、膝、踝、跖趾关节角度变化量,t为蹬伸期时间, $\omega_{\text{hip_max}}$ 、 $\omega_{\text{knee_max}}$ 、 $\omega_{\text{ankle_max}}$ 、 $\omega_{\text{MP_max}}$ 分别为髋、膝、踝、跖趾关节最大角速度,分别为 $t_{\text{hip_max}}$ 、 $t_{\text{knee_max}}$ 、 $t_{\text{ankle_max}}$ 、 $t_{\text{MP_max}}$ 髋、膝、踝、跖趾关节最大角速度时间;*和**分别代表与裸足存在显著性和非常显著性差异,#代表与N鞋存在显著性差异

为裸足明显大于穿鞋($P < 0.05$);而穿不同鞋则无明显变化。除髋关节各值略小外,其余关节在3种足鞋条件下均呈现最大角速度出现的时间相似。

3 讨论

运动协调特征是指人体按照技术动作的空间、时间、节奏等要素要求,各器官系统、各运动单位协调一致地完成动作^[15]。Hudson等^[16-17]提出较为成熟的运动协调性理论,把运动协调性描述为链条模式——运动目标轻或是开放运动链时动作协调性应表现为环节运动的顺序性;运动目标重或是封闭链则应表现为环节的同步性,且动作协调性在链条上的位置受动作的速度和准确度的影响,动作速度重要则人体环节运动的协调性就趋近于顺序性,准确度重要则趋近于同步性^[18]。即人体环节运动协调性的两种主要形式为:①顺序性,环节的运动由近端到远端角速度依次达到峰值^[19];②同步性,各环节的运动角速度同时达到峰值^[20]。

Aragon-Vargas等^[21]把动作协调性定义为适时的肌肉活动使人体各环节产生适时的运动,并阐释爆发力动作协调性3个层面的任务:①以最佳的肌

节长度、肌节收缩速度、收缩顺序使人体各环节达到较高的角速度;②以人体各环节的最佳运动使人体重心达到最大垂直加速度;③使人体重心在起跳时处于最佳初始位置。综上所述,一方面,可从人体内部相应肌群的协调配合来解释动作协调性的原因^[16-17,21-23];另一方面,可从人体肢体的外部运动来判断动作的协调性特征^[18]。在同种足鞋条件下蹬伸阶段各关节到达的时间除髋关节略小外,其余关节该值几乎相同。其中,裸足条件下其时间范围为0.70~0.72s,间隔约为20ms;而两种穿鞋情况下膝、踝和跖趾关节的值也几乎相同,范围在0.47~0.49s,间隔同样约为20ms,与裸足一样各关节呈现高度同步性。这一结果证明羽毛球运动完全符合下肢环节协调的同步性理论。通过比较裸足和穿鞋后发现,到达最大角速度的时间裸足远大于穿鞋时,说明运动鞋能够有效促进下肢各关节的蹬伸,进一步提高步法速度。此外,无论是髋、膝、踝还是跖趾关节,穿着两款羽毛球专项鞋时各关节到达最大角速度的时间均无显著性差异,提示在下肢运动协调的时间特征方面,两款鞋的表现近似。

当需要克服大阻力或需要表现出大的运动速度

时,运动链中各关节的肌肉虽然同时用力,但其中大关节总是首先产生活动,并依据关节的大小表现出一定的先后顺序,此为关节活动顺序性原理^[15]。对于羽毛球的蹬跨步而言,鉴于羽毛球运动的快速特性,即羽毛球运动同时也要强调步法速度,故也应该具有一定的顺序性。尽管各关节蹬伸最大角速度时间差别微小,但在3种足鞋条件下仍都表现为髌<膝<踝和跖趾,即髌、膝、踝、跖趾4关节依次加速蹬伸。这种顺序性在着鞋方式方面无任何差异。综上所述,本研究认为尽管羽毛球蹬地动作协调性的表现形式似乎应该是以同步性为主,但仍很可能是顺序性与同步性的合理组合,这一结论与李世明等^[24]研究结果相同。至于顺序性和同步性各自比重的大小,仍需采用更为先进的设备仪器并增大样本含量进行进一步的研究。

此外,蹬伸阶段髌、膝、踝关节的最大角速度在忽略穿鞋与否时都呈现髌<膝<踝趋势,且穿Y鞋时踝关节最大角速度的标准差明显偏大,提示在踝关节个体差异明显;而在跖趾关节,最大角速度裸足时与穿N鞋相比显著减小,且与Y鞋相比虽无显著性差异,但 P 值接近0.05($P=0.065$),结合标准差较大的现象,提示这两者之间的显著性差异可能存在,故仍可在一定程度上认为:穿着运动鞋有利于提高跖趾关节在蹬伸阶段的速度表现。而进一步比较两款羽毛球专项鞋却并没有发现两者在各关节最大角速度方面的差异,提示蹬地时两款鞋在下肢运动协调的空间特征上表现近似。此外,结合足跟离地瞬间髌、膝、踝、跖趾关节角速度绝对值大致呈膝>踝>髌>跖趾关节的状况,上述结果说明在羽毛球运动步法中膝和踝的蹬伸作用非常重要,这与康子英等^[25]对排球运动员上步纵跳的研究结果一致。而鉴于在穿鞋过程中跖趾关节的角速度也达到较大水平,故也不能忽略其末端关节的作用。考虑到人体下肢踝、跖趾关节为小关节,所配置的肌肉大多是细长束,结合运动生物力学原理,认为在人体运动中不仅要强调大关节应首先产生活动,也要重视小关节活动的重要性,并加强针对踝和跖趾关节的训练。

4 结语

本研究所采用的两款羽毛球专项鞋在蹬地阶段

下肢各关节的运动学表现相近,且相比裸足,两款鞋均在一定程度上增加踝、跖趾关节的角速度及到达峰值的时间,提示穿着运动鞋具备更好的蹬伸动力来源,能增加蹬伸的速度和效果,有利于提高运动表现。就下肢运动协调特征而言,3种足鞋条件均表现为在相近的时间内髌、膝、踝和跖趾关节依次加速蹬伸,且踝和跖趾等末端小关节的蹬伸角速度达到最高水平,提示羽毛球蹬伸动作协调性的表现形式倾向于顺序性与同步性的合理组合,并应针对性地加强踝和跖趾等末端小关节的力量和速度训练。

参考文献:

- [1] 陈文基. 扁平足弓和正常足弓走与跑之生物力学研究 [D]. 台湾: 国立体育学院硕士学位论文论, 2003.
- [2] 徐立峰. 9-18岁儿童少年立定跳远动作技能的运动学研究 [D]. 苏州: 苏州大学硕士学位论文论, 2006.
- [3] 魏勇, 刘宇, 傅维杰. 羽毛球运动步法分类及使用频率 [J]. 上海体育学院学报, 2008, 32(5): 54-56.
- [4] 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.
- [5] 傅维杰, 刘宇, 魏书涛. 篮球鞋对主动与被动落地时冲击力特征和肌肉活化的影响 [J]. 医用生物力学, 2012, 27(3): 317-323.
Fu WJ, Liu Y, Wei S. Influence of basketball shoes on impact force and muscle activation during active and passive landing [J]. J Med Biomech, 2012, 27(3): 317-323.
- [6] 宋雅伟, 滕津汝, 张曦元. 不同硬度鞋底对下肢步行运动学的影响 [J]. 医用生物力学, 2013, 28(4): 388-396.
Song YW, Teng JR, Zhang X. Effects of soles with different hardness on human lower extremity kinematics during walking [J]. J Med Biomech, 2013, 28(4): 388-396.
- [7] 傅维杰, 李路, 刘宇. 跖趾关节运动功能的研究进展及其在体育科学领域中的应用 [J]. 体育科学, 2013, 33(9): 91-96.
- [8] Stefanyshyn DJ, Nigg BM. Influence of midsole bending stiffness on joint energy and jump height performance [J]. Med Sci Sports Exerc, 2000, 32(2): 471-476.
- [9] Krell J, Stefanyshyn DJ. The relationship between extension of the metatarsophalangeal joint and sprint time for 100 m Olympic athletes [J]. J Sports Sci, 2006, 24(2): 175-180.
- [10] Willwacher S, Konig M, Potthast W, et al. Does specific footwear facilitate energy storage and return at the metatarsophalangeal joint in running? [J]. J Appl Biomech, 2013, 29(5): 583-592.

- [11] 傅维杰, 刘宇, 李路. 运动鞋对人体落地冲击和下肢软组织振动的影响 [J]. 体育科学, 2013, 33(7): 45-52.
- [12] Oleson M, Adler D, Goldsmith P. A comparison of forefoot stiffness in running and running shoe bending stiffness [J]. J Biomech, 2005, 38(9): 1886-1894.
- [13] 傅维杰, 刘宇, 李路. 基于足底压力的羽毛球运动足部受力特征研究 [J]. 天津体育学院学报, 2012, 27(6): 511-514.
- [14] 魏勇. 运动鞋对羽毛球典型步法中跖趾关节和后足稳定性的影响 [J]. 体育科学, 2009, 29(10): 89-97.
- [15] 李世明. 对优秀男排运动员沙地扣球起跳阶段的运动生物力学研究 [D]. 北京: 北京体育大学博士学位论文, 2000.
- [16] Hudson JL. Utilization of stored elastic energy with respect to jumping ability and coordination [J]. Med Sci Sports Exerc, 1981, 13(2): 97.
- [17] Hudson JL. Coordination of segments in the vertical jump [J]. Med Sci Sports Exerc, 1986, 18(2): 242-251.
- [18] 李世明, 刘学贞. 沙滩排球扣球起跳动作协调性特征的运动生物力学研究 [J]. 西安体育学院学报, 2002, 19(1): 62-65.
- [19] Hamilton N, Luttgens K, Weimar W. Scientific basis of human motion [M]. USA: Saunders, 2002.
- [20] Hamill J, Knutzen KM. Biomechanical basis of human movement [M]. USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
- [21] Argon-Vargas L, Gross M. Kinesiological factors in vertical jump performance: Differences within individuals [J]. J Appl Biomech, 1997, 13(1): 24-44.
- [22] Bobbert MF, Huijing PA, van Ingen Schenau GJ. Drop jumping I: The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping [J]. Med Sci Sports Exerc, 1987, 19(4): 332-328.
- [23] Bobbert MF, Huijing PA, van Ingen Schenau GJ. Drop jumping II: The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping [J]. Med Sci Sports Exerc, 1987, 19(4): 339-346.
- [24] 李世明, 刘学贞. 纵跳理论研究进展 [J]. 北京体育大学学报, 2004, 27(1): 65-68.
- [25] 康子英, 赵科研. 排球运动员上步纵跳的运动学分析 [J]. 鞍山师范学院学报, 2005, 7(4): 77-79.

(上接第 158 页)

- [5] Meyer U, Buchter A, Nazer N, *et al.* Design and performance of a bioreactor system for mechanically promoted three-dimensional tissue engineering [J]. Br J Oral Maxillofac Surg, 2006, 44(2): 134-140.
- [6] Hamilton DW, Maul TM, Vorp DA. Characterization of the response of bone marrow-derived progenitor cells to cyclic strain: Implications for vascular tissue-engineering applications [J]. Tissue Eng, 2004, 10(3-4): 361-369.
- [7] Zhang P, Wu Y, Jiang Z, *et al.* Osteogenic response of mesenchymal stem cells to continuous mechanical strain is dependent on ERK1/2-Runx2 signaling [J]. Int J Mol Med, 2012, 29(6): 1083-1089.
- [8] Yang RS, Lin WL, Chen YZ, *et al.* Regulation by ultrasound treatment on the integrin expression and differentiation of osteoblasts [J]. Bone, 2005, 36(2): 276-283.
- [9] Kanno T, Takahashi T, Tsujisawa T, *et al.* Mechanical stress-mediated Runx2 activation is dependent on Ras/ERK1/2 MAPK signaling in osteoblasts [J]. J Cell Biochem, 2007, 101(5): 1266-1277.
- [10] Teixeira CC, Liu Y, Thant LM, *et al.* FoxO1, a novel regulator of osteoblast differentiation and skeletogenesis [J]. J Biol Chem, 2010, 285(40): 31055-31065.
- [11] Owen TA, Aronow M, Shalhoub V, *et al.* Progressive development of the rat osteoblast phenotype in vitro: Reciprocal relationships in expression of genes associated with osteoblast proliferation and differentiation during formation of the bone extracellular matrix [J]. J Cell Physiol, 1990, 143(3): 420-430.
- [12] Dalle Carbonare L, Innamorati G, Valenti MT. Transcription factor Runx2 and its application to bone tissue engineering [J]. Stem Cell Rev, 2012, 8(3): 891-897.
- [13] Turner CH. Bone strength: Current concepts [J]. Ann N Y Acad Sci, 2006, 1068: 429-446.
- [14] Ziros PG, Basdra EK, Papavassiliou AG. Runx2: Of bone and stretch [J]. Int J Biochem Cell Biol, 2008, 40(9): 1659-1663.