

文章编号:1004-7220(2015)06-0528-07

鞋帮高度对跳跃动作踝关节矢状面运动学及动力学特征的影响

傅维杰¹, 何俊良^{2*}, 王熙¹, 刘宇¹

(1. 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; 2. 上海体育科学研究所, 上海 200030)

摘要: **目的** 探讨穿着高、低帮篮球鞋对跳跃动作踝关节矢状面运动学、动力学以及运动表现的影响。**方法** 利用 Vicon 运动捕捉系统和 Kistler 三维测力台同步采集 12 名受试者穿着高、低帮篮球鞋进行双腿落地反跳 (drop jump, DJ) 和单腿跨步跳 (lay-up jump, LJ) 过程中踝关节矢状面屈伸最小/最大角度、力矩、功率、刚度、跳跃高度以及背屈活动度等参数指标。**结果** (1) 穿着高帮鞋能够显著减小踝关节的背屈角度 ($P < 0.05$)。在 DJ 和 LJ 过程中, 两款鞋的跳跃高度、踝关节触地角度、最小/最大角度、活动度均无显著性差异; (2) 在 DJ 过程中, 穿着两款鞋的踝关节屈伸动力学特征无显著差异; 但在 LJ 过程中, 穿着高帮鞋的跖屈力矩和功率峰值均显著小于低帮鞋 ($P < 0.05$)。**结论** 穿着高帮鞋虽然没有限制跳跃情况下踝关节的屈伸表现, 但会影响踝关节矢状面的部分动力学特征, 建议鞋帮高度的选择和设计能够在护踝的基础上充分发挥踝关节在矢状面的力学作用, 从而实现运动表现的最优化。

关键词: 鞋帮高度; 踝关节; 运动学; 动力学; 跳跃动作

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2015.06.528

Effects of shoe collar height on kinematics and kinetics of ankle joint in sagittal plane under different jumping maneuvers

FU Wei-jie¹, HE Jun-liang^{2*}, WANG Xi¹, LIU Yu¹ (1. Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. Shanghai Research Institute of Sports Science, Shanghai 200030, China)

Abstract: **Objective** To study the effects by wearing high-top and low-top basketball shoes on kinematics, kinetics and sports performance of ankle joint in sagittal plane under different jumping maneuvers. **Methods** Twelve subjects were required to wear high-top and low-top basketball shoes to perform drop jumps (DJ) and lay-up jumps (LJ), and the parameters such as minimum/maximum joint angle, torque, power, stiffness, jumping height and dorsiflexion angle during their jumping maneuvers were simultaneously collected by the Vicon motion capture system and Kistler force plates. **Results** (1) The dorsiflexion angle of ankle joint was significantly decreased when wearing high-top basketball shoe ($P < 0.05$). During DJ and LJ, no significant differences were found in jumping height, touch-down ankle angle, minimum/maximum ankle angle, and ankle range of motion (ROM) in the two shod conditions. (2) There were no significant differences in flexion/extension torque and power of ankle joint in the two shod conditions during DJ. However, during LJ, the peak value of plantarflexion torque and power from wearing high-top shoes was significantly smaller than that with low-top shoes ($P < 0.05$). **Conclusions** Wearing high-top shoes do not restrict the performance of ankle plantarflexion and dorsiflexion under actual jumping situa-

收稿日期:2015-05-26; 修回日期:2015-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(11302131, 11372194, 81572213), 教育部博士点基金资助项目(20123156120003), 上海市教育委员会科研创新项目(14YZ125)。

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

tion. However, the kinetics of ankle joint in sagittal plane under different jumping maneuvers can be partly restricted. The selection and design of shoe collar height should be carefully considered to improve the mechanical effect of ankle joint in sagittal plane and optimize sports performance along with considering ankle protection.

Key words: Shoe collar height; Ankle joint; Kinematics; Kinetics; Jumping maneuver

跳跃动作,包括单腿和双腿跳,是篮球运动最基本的动作形式之一^[1]。无论是进攻还是防守,运动员都需要在急停、急起和高速移动过程中完成一系列的起跳和落地动作^[2]。大量的跳/着地动作结合高强度对抗,势必会造成篮球运动员足踝损伤的高发生率^[3-4]。因此,相应运动防护装备的出现,如高帮篮球鞋,其最初的目的就是为了能够减少篮球运动中的踝关节扭伤^[5]。

现阶段针对高帮鞋的研究绝大部分集中于踝关节额状面的运动^[6-7]。高帮鞋会影响踝外翻肌群的时域特征,增加其在落地时对于限制踝关节额状面活动的效果^[8]。然而就跳跃动作而言,无论是单腿还是双腿跳,都是表现为矢状面的运动形式,而高帮的结构和设计在实际使用过程中是否会影响踝关节在矢状面的屈伸以及随后的运动表现,还有待于进一步的考察。有研究认为,高帮鞋和踝护具能够在一定程度上限制踝关节的屈伸和矢状面动力学表现,但所选用的动作均为落地和切向步,且对是否能影响运动表现并未达成共识^[9-13]。

本课题组以篮球运动中常见的两种跳跃方式——双腿落地反跳(double-leg drop jump, DJ)和单腿跨步跳(single-leg lay-up jump, LJ)为研究动作,探讨穿着高、低帮篮球鞋对蹬地过程中踝关节矢状面的运动学(关节角度、角度变化量等)、动力学(关节力矩、关节功率、关节刚度)以及运动表现(跳跃高度)的影响,分析高、低帮鞋与踝关节矢状面生物力学特征的关系,以为为篮球鞋的研发提供理论支持。

1 研究方法

1.1 研究对象

上海体育学院体教训练学院篮球专项男性运动员12名,年龄(23.7 ± 0.6)岁,身高(180.0 ± 4.6)cm,体重(73.6 ± 6.9)kg,其中1级运动员3人,2级运动员9人。所有受试运动员都经过足部病史询问和体格检查,确定其足部无拇外翻等足部疾病,下肢和足部半年内无明显损伤,足部解剖结构和机能一切正常,身体技能和运动能力良好,24 h

内未从事剧烈运动。

1.2 测试仪器

1.2.1 可调节高度平台 由实验团队自主设计,并由某运动器材厂加工制作的平台(长×宽×高:60 cm×80 cm×70 cm)。可调节的高度范围为20~65 cm,后方有多孔的插销,高度间隔为5 cm。

1.2.2 运动学采集系统 Vicon红外高速运动捕捉系统(T40,英国)和16台摄像头,采样频率为120 Hz,利用Nexus 1.52软件对信号进行实时监控和采集。

1.2.3 三维测力台 Kistler三维测力台(9287B,瑞士),尺寸为90 cm×60 cm×10 cm(长×宽×高),内置信号放大器,最大侧向力和垂直力分别可达10、20 kN。采样频率为1.2 kHz。测力台和Vicon通过模数转换(A/D Converter)终端盒进行系统的同步。

1.3 测试方法

1.3.1 实验用鞋 高帮和低帮两款专项篮球鞋由美国某运动科学研究室提供,鞋帮高度相差7 cm(从低帮鞋的最低处测量^[12]),质量相差22 g;除此之外,鞋底花纹、鞋垫、中底和外观设计均一致(见图1)。鞋码为美国标准尺码9(US 9)或9.5码(US 9.5)(受试者根据自身鞋码挑选)。此外,为尽量避免鞋带和鞋袜所带来的影响,系鞋带的方式均采用传统交叉式并把鞋系紧,并穿着同一款篮球袜。

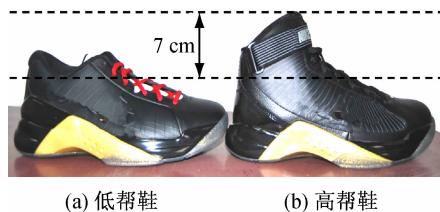


图1 测试用鞋

Fig. 1 Experimental shoes (a) Low-top shoe, (b) High-top shoe

1.3.2 反光球位置确定 采用直径为14 mm的红外反光标志球,粘贴位置为踝外侧点、踝内侧点、足

尖点、第1跖趾关节点、第5跖趾关节点、足跟点、膝外侧点、膝内侧点、小腿跟踪点),定义小腿和足等环节,以及由相邻环节组成的踝关节。

1.3.3 数据采集 实验由踝关节背屈活动度测试和跳跃动作的踝关节矢状面生物力学测试两部分组成。

(1) 踝背屈活动度测试:受试者随机穿着高帮或低帮鞋,手持垂直杆,自然站立,双足分开与肩同宽。在接收到实验人员开始口令后,屈膝缓慢下蹲,直至无法继续下蹲为止(见图2)。根据 Bennell 等^[14]的研究,采用受试者主观感觉无法下蹲或者可见的足跟抬起,判断为踝背屈活动度测试结束。整个过程中,受试者采用标志杆保持躯干正直,以避免身体前倾所产生的代偿影响。

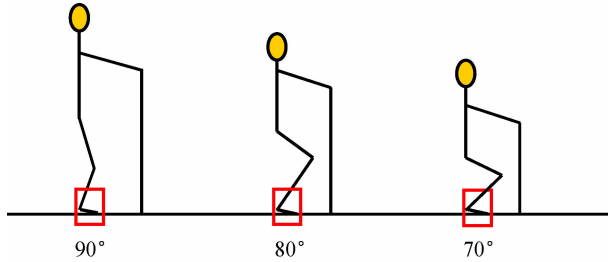
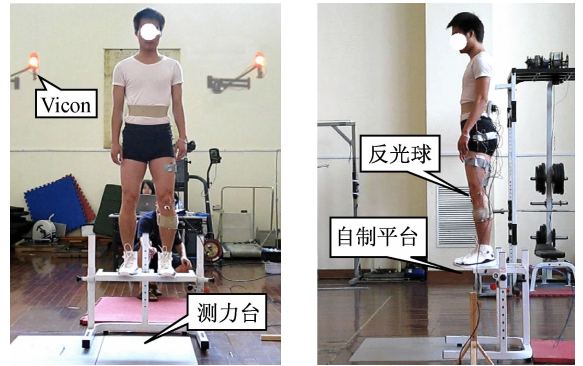


图2 踝关节背屈活动度测试方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of method for measuring ankle dorsiflexion

(2) 踝关节矢状面生物力学测试:在正式测试前要求受试者充分熟悉落地动作。DJ 要求受试者双脚站立于平台水平面,距离地面 60 cm,脚距与肩同宽。同步信号开始后,两脚脚尖缓慢由平台边缘向测力台下滑,尽量确保无垂直初速下落,着地后迅速尽力向上垂直跳起(无摆臂)^[15]。而 LJ 则要求受试者自己根据个人动作习惯测量步点。当 Vicon 测试人员发出指令后,受试者助跑后单腿跨步蹬踏于测力台上,并尽最大努力完成起跳,同时保证其连贯流畅且尽可能保持比赛中风格(见图3)。

动作数据采集从受试者惯用腿接触测力台前开始(touch-down)至离开测力台(toe-off)并腾空结束为止。每组动作完成3次,每次间隔时间为2 min,每组间隔时间为5 min,总测试时间控制在1.5~2 h,尽量避免诸如体力状态和动作熟悉程度等因素对结果的影响^[16]。此外,不同鞋条件的测试顺序随机,并选用篮球运动中最常见的木地板作为其运动表面。



(a) 正面观

(b) 侧面观

图3 测试现场仪器架设和受试者

Fig.3 Experimental setup and subject at test site (a) Front view, (b) Side view

1.4 数据处理和评价参数

1.4.1 数据处理 采用 Visual 3D™ 三维步态分析软件(C-Motion 公司,美国)。针对所获取的 Vicon 运动学数据以及 Kistler 测力台三维力数据,进行运动学数据的处理和逆向动力学的计算分析。其中,运动学数据采用 Butter-worth 二阶双向低通滤波器滤波,截止频率为 7 Hz^[17],动力学数据则基于多刚体动力学的逆向动力学模型进行计算^[18]。

1.4.2 评价参数 分别对矢状面的运动学和动力学特征进行评价。

(1) 矢状面运动学特征:踝关节触地瞬间角度(θ_0),踝关节最小角度 θ_{\min} ,最大角度 θ_{\max} ,关节活动度 θ_{ROM} , $\theta_{\text{ROM}} = \theta_{\max} - \theta_{\min}$,着地缓冲过程中踝关节角度变化量 $\Delta\theta$, $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_{\min}$;跳跃动作蹬伸期占整个触地期时间百分比 t ;跳跃高度 h ,采用离地时腾空时间计算, $h = (T/2)^2 / (2g)$, T 为腾空时间, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。DJ 和 LJ 都需要受试者触及测力台后垂直向上起跳,并尽量落于测力台同样位置,尽可能满足采用腾空时间以计算高度的前提^[19]。

(2) 矢状面动力学特征:经体重标准化后的踝关节最大力矩 M_{\max} 、最大功率 P_{\max} 、关节刚度 k 。其中, $P = M\omega$, ω 为角速度^[20]; $k = \Delta M / \Delta\theta$, ΔM 为缓冲过程中关节力矩的变化量, $\Delta\theta$ 为缓冲过程中关节角度变化量^[21]。

1.5 统计学分析

数据用 SPSS 17.0 软件进行统计,采用配对样本 t 检验比较穿着高、低帮篮球鞋对各运动学和动力学参数的影响,显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 研究结果

2.1 踝关节矢状面运动学

2.1.1 运动表现 无论是DJ还是LJ,两款鞋的跳跃高度并无差异。此外,两款鞋在不同动作中蹬伸时间占整个触地时间的百分比也并未出现显著性差异(见表1)。

2.1.2 踝关节角度 在踝背屈活动度测试中,相比低帮鞋,穿着高帮鞋能够显著减小踝关节的背屈角

度约 5° ($P < 0.05$)。但在DJ和LJ动作中,无论是触地角度、最小角度、最大角度、关节活动度等,高、低帮鞋之间均没有显著性差异(见表1)。其中,DJ时两款篮球鞋踝关节角度曲线整体均呈“U”型,即触地后踝关节快速背屈直至最大,随后开始跖屈直至蹬离地面;而LJ时两款鞋踝关节角度曲线均呈反“S”型,即先出现触地后第1个跖屈波峰,随后背屈直至最大,之后踝关节跖屈直至蹬离地面(见图4)。

表1 不同动作形式下鞋帮高度对下肢踝关节矢状面运动学表现的影响 ($n = 12, \bar{x} \pm sd$)

Tab.1 Effect of shoe collar height on sagittal plane ankle kinematics during different types of maneuvers

动作	鞋类	$\theta_0 / (^\circ)$	$\theta_{\min} / (^\circ)$	$\theta_{\max} / (^\circ)$	$\theta_{ROM} / (^\circ)$	$\Delta\theta / (^\circ)$	$t / \%$	h / cm
踝背屈	高帮	—	85.0 ± 8.9	112.8 ± 3.5	27.0 ± 6.7	—	—	—
	低帮	—	$77.1 \pm 7.3^*$	108.9 ± 4.8	$32.2 \pm 6.6^*$	—	—	—
DJ	高帮	125.6 ± 9.2	90.8 ± 11.2	140.7 ± 8.7	50.0 ± 9.3	34.7 ± 7.9	51.7 ± 22.1	0.34 ± 0.05
	低帮	125.8 ± 6.1	88.1 ± 7.5	140.3 ± 8.1	52.1 ± 8.0	37.7 ± 7.9	54.6 ± 22.1	0.34 ± 0.05
LJ	高帮	117.8 ± 5.4	104.3 ± 7.2	136.2 ± 10.3	31.8 ± 8.1	13.6 ± 5.8	35.7 ± 5.5	0.38 ± 0.05
	低帮	116.0 ± 6.0	103.6 ± 5.7	134.1 ± 10.6	30.6 ± 6.7	12.4 ± 4.5	30.6 ± 5.0	0.41 ± 0.04

注: * 同一动作条件下,与高帮鞋相比, $P < 0.05$

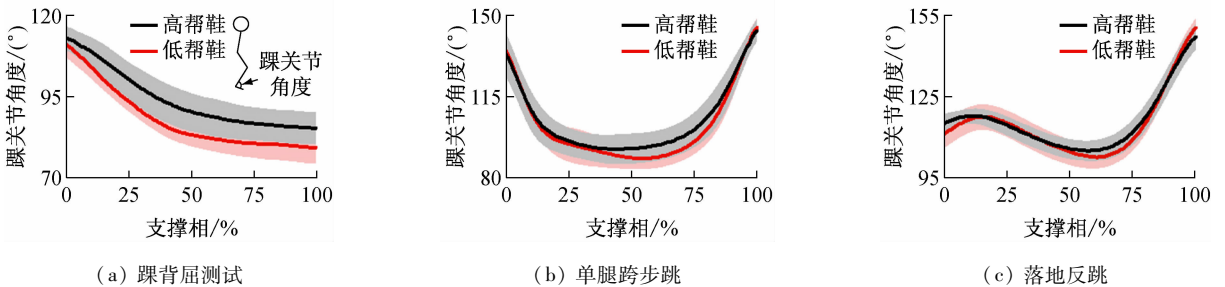


图4 不同跳跃动作着地阶段鞋帮高度对踝关节矢状面屈伸角度的影响

Fig.4 Effects of shoe collar height on ankle joint in sagittal plane during stance phase under different jumping maneuvers

(a) Ankle ROM tests, (b) Drop jump, (c) Lay-up jump

2.2 踝关节矢状面动力学

2.2.1 力矩 DJ和LJ着地过程中踝关节伸屈力矩的变化如图5所示,其中正值代表踝背屈,负值代表踝跖屈。通过对比曲线发现,在DJ过程中,穿着高、低帮鞋踝关节变化基本一致,均以跖屈力矩为主,并在支撑期的中后期达到最大值,且两款鞋并无显著差异(见表2);在LJ过程中,支撑初期踝关节表现为跖屈,并产生较小的背屈力矩,其作用是为了防止前脚掌过快触地、出现快速拍打地面的现象^[22];进入支撑中后期,踝关节处产生跖屈力矩并达到峰值。穿着高帮鞋的跖屈力矩峰值显著小于低帮鞋($P < 0.05$,见表2)。

2.2.2 功率 在DJ动作中,踝关节功率在背屈时表现为负(做负功),在跖屈时则表现为正(做正功),但无论是背屈还是跖屈,穿着两款鞋并无显著差异;但在LJ动作中,踝关节功率主要来自跖屈(做正功),并在离地前达到最大值(见图6)。与力矩的表现相似,此时穿着高帮鞋的跖屈功率峰值显著小于低帮鞋($P < 0.05$,见表2)。

2.2.3 刚度 踝关节刚度是借用材料力学的概念,用以反映踝关节抵抗形变(关节角度发生改变)的能力^[23]。结果发现,两种跳跃动作存在明显差异,但穿着高、低帮鞋对其并无显著影响(见表2)。

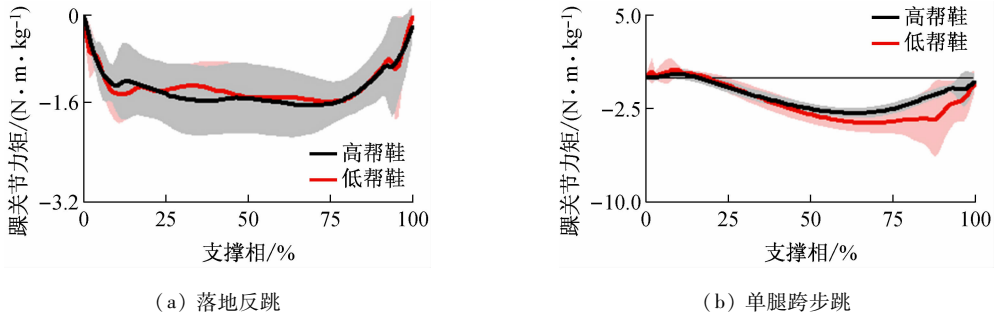


图5 不同跳跃动作着地阶段鞋帮高度对踝关节屈伸力矩影响

Fig.5 Effects of shoe collar height on ankle joint torque during stance phase under different jumping maneuvers

(a) Drop jump, (b) Lay-up jump

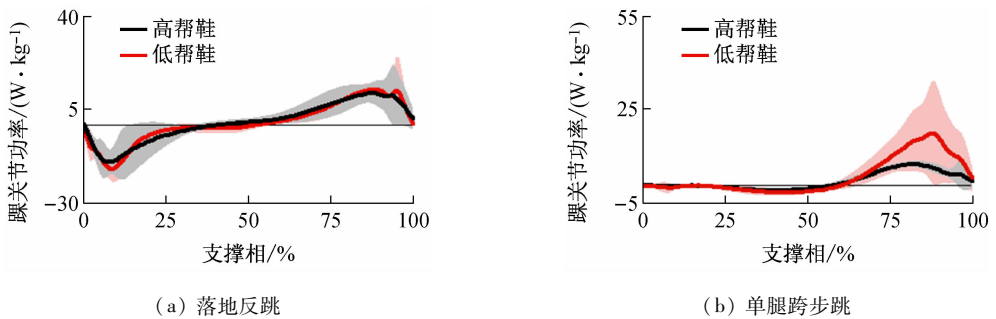


图6 不同跳跃动作着地阶段鞋帮高度对踝关节屈伸功率影响

Fig.6 Effects of shoe collar height on ankle joint power in sagittal plane during stance phase under different jumping maneuvers

(a) Drop jump, (b) Lay-up jump

表2 不同跳跃动作下鞋帮高度对踝关节矢状面动力学表现(经体重标准化后)的影响($n=12, \bar{x} \pm sd$)

Tab.2 Effects of shoe collar height on ankle kinetics in sagittal plane (normalized by body weight) under different jumping maneuvers

动作	鞋类	$M_{\max}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1})$	$P_{\max}/(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$	$k/[\text{N} \cdot \text{m} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]$
DJ	高帮	-1.50 ± 0.65	9.93 ± 3.85	0.045 ± 0.025
	低帮	-1.37 ± 0.61	9.52 ± 3.55	0.035 ± 0.014
LJ	高帮	-3.14 ± 0.65	13.10 ± 4.4	0.265 ± 0.191
	低帮	$-4.19 \pm 0.83^*$	$19.20 \pm 7.0^*$	0.313 ± 0.255

注: * 同一动作条件下,与高帮鞋相比, $P < 0.05$

3 讨论

以往研究多数集中在高帮鞋能否改变踝关节额状面的内翻表现,即是否能够预防损伤,而忽略跳跃运动过程中鞋帮高度对矢状面踝关节生物力学及运动表现的影响。本文通过选取 DJ 和 LJ 两种篮球运动中常见的跳跃方式,比较穿着高、低帮篮球鞋对踝关节矢状面力学特征的差异。研究发现,虽然在两种跳跃动作过程中高、低帮篮球鞋不对跳跃高度产生直接影响,但鞋帮高度仍然部分改变踝关节矢状面的背屈运动学和跳跃过程中蹬伸力矩、功率特征,

进而对足踝-鞋系统在矢状面的力学作用产生影响。

在踝背屈测试中,相比低帮鞋,穿着高帮鞋能显著减小踝关节矢状面的背屈活动度($P < 0.05$),该结果与前人研究结果类似。Rowson 等^[24]发现,与低帮鞋相比,穿高帮鞋能显著减小踝关节单纯背屈时的峰值角度($P < 0.05$),降低由此产生的跟腱负荷,并认为踝关节背屈角度减小是由于高帮的设计以及材料的弹性用于抵抗鞋形变所造成。值得注意的是,在 DJ 和 LJ 动作中,无论是触地瞬间角度、最小/最大角度、关节活动度及蹬伸时间百分比等,高、低帮鞋之间均没有产生显著性差异。上述结果提

示,本研究所采用的高帮鞋并未限制实际跳跃情况下踝关节的屈伸表现。由此推测,相比准静态的踝背屈测试动作,虽然在跳跃动作中踝关节活动度表现为更大,特别是DJ时踝关节活动度超过了 50° ,但主要是以跖屈为主,而踝关节最小角度接近于 90° ,即很少有背屈角度产生,故鞋帮高度在很大程度上无法产生蹬伸过程中对于踝背屈的限制,这也解释了为何在进行单腿上篮起跳和跳深动作时,穿着高、低帮鞋踝关节屈伸的运动学特征并不存在差异。

现阶段针对高低帮篮球鞋与踝关节功能的研究主要集中于能否通过高帮鞋增加足内外翻的稳定性,从而预防踝关节损伤。Brizula等^[25]发现,在跳跃落地中采用高帮鞋能显著减小触地初期踝关节内外翻角度和整个触地过程中踝关节额状面的活动度;Ricard等^[7]通过诱导踝关节内翻的翻板实验发现,穿着高帮鞋能有效减少踝内翻的角度和角速度,有助于预防踝关节扭伤的发生。然而,目前鲜有关于高帮鞋能否影响踝关节矢状面运动的研究报道。Greene等^[26]通过研究篮球常见侧切着地动作发现,相比低帮鞋,虽然穿着高帮鞋没有显著影响踝关节的屈伸运动学,但穿着护踝却能够明显减小着地阶段踝关节屈伸的关节活动度;Venesky等^[27]认为,护踝能有效稳定踝关节的内外翻,进而产生约束踝关节矢状面运动的可能,而穿着高帮鞋在侧切动作中限制踝关节内翻的作用相比护踝要弱,导致其对踝矢状面运动的影响不显著。从本研究的数据也可以侧面反映上述观点:穿着高帮鞋确实能够减小踝关节矢状面在踝背屈测试中的关节活动度,但该限制不足以在着地和蹬地过程中产生影响。上述研究表明,在设计高帮鞋的过程中,若只一味考虑增加踝关节内外翻的稳定性,可能会影响踝关节在矢状面的屈伸表现,故关键在于度的把握。

另一方面,在LJ过程中,穿着高帮鞋的跖屈力矩、功率峰值较低帮鞋显著减小($P < 0.05$),但腾空的高度两款鞋并无显著差异。Boyer等^[28]研究表明,穿着不同侧向稳定的运动鞋会影响踝关节蹬伸时跖屈力矩和功率的表现,同时这种针对踝关节发力的影响可能与侧向稳定的程度有关,主要取决于此时踝关节周围肌肉激活的净贡献。本研究发现,穿着高帮鞋会减小踝跖屈力矩及随后功率,该结果从一定程度上反映出蹬伸时小腿三头肌等主动肌激

活的减小和(或)胫骨前肌等拮抗肌激活的相应增加^[29],特别是在肢体执行最大用力,如快速跑、跳等动作中,这种主动肌和拮抗肌的协调表现地更为明显^[30]。同时,在大部分跑、跳类动作中,运动表现主要取决于下肢髋、膝、踝等关节总的输出功率和做功大小,而非单一踝关节的贡献^[31],故踝关节蹬伸功率的增加却没有最终导致跳跃高度的显著提升。

综上所述,单纯从改变鞋帮高度来实现预防踝关节扭伤,会部分影响运动员踝功能在矢状面的表现。因此,在鞋的设计与研发时需适当考虑鞋帮高度对踝关节屈伸的作用,使运动员在有效预防踝关节扭伤同时,能实现运动表现的最优化。此外,从方法学角度考虑,现阶段通过传统的逆向动力学模型计算对外界因素(如鞋、护具等)所产生约束关系的足踝动力学特征会存在一定的局限,后续研究可考虑根据实际情况,通过合理改进逆向动力学模型来尝试解决此类问题。

4 结论

本研究得出结论如下:

(1) 在踝背屈测试中,相比低帮鞋,穿着高帮鞋能显著减小踝关节矢状面的活动度;但在单腿或双腿跳动作中,鞋帮高度并未对踝关节矢状面的运动学特征(触地瞬间角度、最小/最大角度、关节活动度及蹬伸时间百分比等)产生影响,提示所采用的高帮鞋并没有限制实际跳跃情况下踝关节的屈伸表现。

(2) 不同的鞋帮高度虽没有显著改变跳跃表现,但穿着高帮鞋在一定程度上减小了LJ蹬伸过程中踝关节的跖屈力矩和功率峰值,提示鞋帮高度能够影响踝关节矢状面的部分动力学特征。建议鞋帮高度的选择和设计能够在护踝的基础上充分发挥踝关节在矢状面的力学作用,进而实现运动表现的最优化。

参考文献:

- [1] McClay IS, Robinson JR, Andriacchi TP, et al. A kinematic profile of skills in professional basketball players [J]. J Appl Biomech, 1994, 10(3): 205-221.
- [2] Ben Abdelkrim N, El Fazaa S, El Ati J. Time-motion analysis and physiological data of elite under-19-year-old basketball players during competition [J]. Br J Sports

- Med, 2007, 41(2): 69-75.
- [3] McKay GD, Goldie PA, Payne WR, *et al.* Ankle injuries in basketball: Injury rate and risk factors [J]. *Br J Sports Med*, 2001, 35(2): 103-108.
- [4] Leanderson J, Nemeth G, Eriksson E. Ankle injuries in basketball players [J]. *Knee Surg Sport Tr A*, 1993, 1(3-4): 200-202.
- [5] Robinson JR, Frederick EC, Cooper LB. Systematic ankle stabilization and the effect on performance [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1986, 18(6): 625-628.
- [6] Ottaviani RA, Ashton-Miller JA, Kothari SU, *et al.* Basketball shoe height and the maximal muscular resistance to applied ankle inversion and eversion moments [J]. *Am J Sports Med*, 1995, 23(4): 418-423.
- [7] Ricard MD, Schulties SS, Saret JJ. Effects of high-top and low-top shoes on ankle inversion [J]. *J Athl Train*, 2000, 35(1): 38-43.
- [8] 侯建甫, 魏春生, 傅维杰, 等. 高、低帮篮球鞋对落地时踝关节稳定及肌肉功能影响的研究 [J]. *体育科学*, 2011, 31(5): 49-54.
- [9] McCaw ST, Cerullo JF. Prophylactic ankle stabilizers affect ankle joint kinematics Prophylactic ankle stabilizers [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1999, 31(5): 702-707.
- [10] Siegler S, Liu W, Sennett B, *et al.* The three-dimensional passive support characteristics of ankle braces [J]. *J Orthop Sport Phys Ther*, 1997, 26(6): 299-309.
- [11] Gardner JK, McCaw ST, Laudner KG, *et al.* Effect of ankle braces on lower extremity joint energetics in single-leg landings [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(6): 1116-1122.
- [12] Lam GW, Park EJ, Lee KK, *et al.* Shoe collar height effect on athletic performance, ankle joint kinematics and kinetics during unanticipated maximum-effort side-cutting performance [J]. *J Sport Sci*, 2015, 33(16): 1738-1749.
- [13] Burks RT, Bean BG, Marcus R, *et al.* Analysis of athletic performance with prophylactic ankle devices [J]. *Am J Sports Med*, 1991, 19(2): 104-106.
- [14] Bennell KL, Talbot RC, Wajswelner H, *et al.* Intra-rater and inter-rater reliability of a weight-bearing lunge measure of ankle dorsiflexion [J]. *Aust J Physiother*, 1998, 44(3): 175-180.
- [15] 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 ST. Influence of basketball shoes on impact force and muscle activation during active and passive landing [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(3): 317-323.
- [16] Nigg BM, Anton M. Energy aspects for elastic and viscous shoe soles and playing surfaces [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1995, 27(1): 92-97.
- [17] Horita T, Komi PV, Nicol C, *et al.* Interaction between pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: Implications to performance [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2002, 88(1-2): 76-84.
- [18] Winter DA. *Biomechanics and motor control of human movement* [M]. Waterloo: John Wiley, 2009.
- [19] Bosco C, Luhtanen P, Komi PV. A simple method for measurement of mechanical power in jumping [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1983, 50(2): 273-282.
- [20] Yeow CH, Lee PV, Goh JC. Effect of landing height on frontal plane kinematics, kinetics and energy dissipation at lower extremity joints [J]. *J Biomech*, 2009, 42(12): 1967-1973.
- [21] Farley CT, Houdijk HH, Van Strien C, *et al.* Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses [J]. *J Appl Physiol*, 1998, 85(3): 1044-1055.
- [22] 孟庆华, 鲍春雨, 陈超, 等. 男性青年踝关节外侧副韧带损伤后行走步态分析 [J]. *医用生物力学*, 2014, 29(4): 65-71.
- Meng QH, Bao CY, Chen C, *et al.* Gait analysis on young male with collateral ligament injury of ankle joint [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(4): 65-71.
- [23] Butler RJ, Crowell HP, Davis IM. Lower extremity stiffness: Implications for performance and injury [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2003, 18(6): 511-517.
- [24] Rowson S, McNally C, Duma SM. Can footwear affect achilles tendon loading? [J]. *Clin J Sport Med*, 2010, 20(5): 344-349.
- [25] Brizuela G, Llana S, Ferrandis R, *et al.* The influence of basketball shoes with increased ankle support on shock attenuation and performance in running and jumping [J]. *J Sport Sci*, 1997, 15(5): 505-515.
- [26] Greene AJ, Stuelcken MC, Smith RM, *et al.* The effect of external ankle support on the kinematics and kinetics of the lower limb during a side step cutting task in netballers [J]. *BMC Sports Sci Med Rehabil*, 2014, 6: 42.
- [27] Venesky K, Docherty CL, Dapena J, *et al.* Prophylactic ankle braces and knee varus-valgus and internal-external rotation torque [J]. *J Athl Train*, 2006, 41(3): 239-244.
- [28] Boyer KA, Andriacchi TP. Changes in running kinematics and kinetics in response to a rockered shoe intervention [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2009, 24(10): 872-876.
- [29] Herzog W, Longino D, Clark A. The role of muscles in joint adaptation and degeneration [J]. *Langenbeck Arch Surg*, 2003, 388(5): 305-315.
- [30] 魏勇, 刘宇. 肌肉共同收缩研究进展 [J]. *中国体育科技*, 2009, 45(5): 54-59.
- [31] 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.