



## 高水平短跑运动员跳深动作表现分析:下肢关节生物力学视角

臧宇<sup>1</sup>, 许贻林<sup>2</sup>, 项晓琰<sup>3</sup>, 翟一飞<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 王然<sup>3\*</sup>

(1. 南京大学 体育部, 江苏 南京 210093; 2. 江苏省体育科学研究所 运动生物力学实验室, 江苏 南京 210033; 3. 上海体育学院 竞技运动学院, 上海 200438)

**摘要:**目的:对比跳深(drop jump, DJ)动作中髌、膝、踝关节之间在生物力学指标上的差异,探究下肢关节生物力学指标与跳深动作表现指标之间的关系,明确影响跳深动作表现指标的下肢关节生物力学因素。方法:招募16名运动等级为一级及以上的男子短跑运动员完成0.45 m落地高度跳深动作测试并同步采集三维运动学和动力学数据。结果:1)高水平男子短跑运动员跳深动作中髌、膝和踝关节在力矩、负功率、正功率、负功、正功以及刚度(stiffness)指标上的差异均具有统计学意义( $P<0.001$ );2)踝关节跖屈力矩和膝关节刚度对地面接触时间的影响(调整 $R^2=0.801$ ,  $P=0.011$ )、膝关节正功对腾空高度的影响(调整 $R^2=0.677$ ,  $P<0.001$ )、踝关节正功率对平均功率输出的影响(调整 $R^2=0.554$ ,  $P<0.001$ )、膝关节刚度和踝关节正功率对反应力量指数的影响(调整 $R^2=0.842$ ,  $P=0.004$ )均具有统计学意义。结论:高水平男子短跑运动员在完成跳深动作时,膝关节刚度主要影响跳深动作离心阶段动作时间,而踝关节跖屈力矩和正功率主要影响跳深动作向心阶段动作时间,进而导致跳深动作完成时间和反应力量的差异;膝关节正功和踝关节正功率作为主要功率来源可调控跳深动作的腾空高度和力学功率输出。

**关键词:**拉长-缩短周期;关节刚度;关节力矩;反应力量;超等长;短跑

**中图分类号:**G804.63

**文献标识码:**A

人体在完成大多数爆发性用力动作时一般会先通过反向动作快速拉长目标肌肉后再进行肌肉的向心收缩(Komi, 1984; Norman et al., 1979),这种肌肉离心收缩与向心收缩之间的快速耦合被称为拉长-缩短周期(stretch-shortening cycle, SSC)。跳深(drop jump, DJ)是最常用的SSC功能测试动作之一,可用于评定特定落地高度下的神经肌肉控制机制以及肌肉与关节的生物力学特性(Horita et al., 2002; Komi et al., 1997; Leukel et al., 2008)。尽管研究者针对跳深动作表现与运动表现的关联性进行了一定的研究,并发现地面接触时间、腾空高度、反应力量指数和力学功率输出等常见的跳深动作表现指标与力量水平、跳跃能力和速度能力等均呈显著正相关关系(Birchmeier et al., 2019; Douglas et al., 2020; Healy et al., 2018),但从生物力学角度分析影响跳深动作表现因素的研究相对较少。

刚度(stiffness)被认为是影响跳深动作表现的重要生物力学因素(刘宇等, 2008),且下肢刚度(leg stiffness)与地面接触时间密切相关(Arampatzis et al., 2001a; Douglas et al., 2018)。这可能是由于在跳深动作足与地面接触前的落地阶段,神经系统可通过肌肉预激活的方式调节肌肉-肌腱复合体的刚度,从而影响落地后离心缓冲阶

段的下肢关节刚度以及动作时间(Santello, 2005)。有研究表明,跳深动作膝关节刚度指标受足与地面接触前股内侧肌-股二头肌以及股直肌-股二头肌共激活水平的影响(Di Giminiani et al., 2020)。然而,目前尚无跳深动作下肢关节刚度和地面接触时间之间关联性的直接证据。

除关节刚度外,关节力矩和功率等下肢关节生物力学指标也可能是影响跳深动作表现的重要因素。Horita等(2002)报道,跳深动作膝关节正功率与起跳速度和地面接触时间分别存在显著的高度正相关和中度负相关关系,而踝关节正功率与起跳速度和地面接触时间的相关性则相对较低。Moran等(2007)发现,跳深动作的髌、膝、踝关节力矩和正负功以及腾空高度均显著大于下蹲跳和静蹲跳,但并未分析动作表现指标的差异是否由下肢关节生物力学指标的差异所引起。此外,Barker等(2018)报

收稿日期:2022-06-30; 修订日期:2022-12-20

基金项目:上海市科委“青年科技英才扬帆计划”项目(19YF1445800);  
上海市科委“地方院校能力建设计划”项目(21010503500)。

第一作者简介:臧宇(1987-),男,讲师,硕士,主要研究方向为运动训练学, E-mail: zangyu100@nju.edu.cn。

\*通信作者简介:王然(1987-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为体能训练, E-mail: wangran@sus.edu.cn。

道,尽管下蹲跳动作的最大功率和离心做功与反应力量指数均存在较高的正相关关系,但最大功率和离心做功对跳深动作腾空高度和地面接触时间的影响不尽相同,最大功率与腾空高度存在较高的正相关关系,而离心做功与地面接触时间存在较高的负相关关系,因此,最大功率和离心做功通过不同的方式来对反应力量指数产生影响。由此可见,跳跃动作离心阶段和向心阶段的生物力学指标可能分别通过影响地面接触时间和腾空高度指标来调节反应力量指数;但是,髌、膝和踝关节生物力学指标如何通过影响跳深动作地面接触时间和腾空高度来调节反应力量指数目前尚不明确。另外,现有研究对跳深动作过程中下肢髌、膝和踝关节生物力学指标之间的差异仍然存在一定的分歧(Ahn et al., 2022; Peng et al., 2019; Smith et al., 2011)。综上所述,尽管已有研究从生物力学角度对跳深动作表现进行了一定的分析,但是基于下肢关节生物力学视角的跳深动作表现研究尚有限。

因此,本研究以高水平男子短跑运动员为研究对象,旨在:1)对比跳深动作中髌、膝、踝关节之间在生物力学指标上的差异;2)探究下肢关节生物力学指标与跳深动作表现指标的关系,明确影响跳深动作表现指标的下肢关节生物力学因素。本研究不仅有助于进一步认识跳深动作的神经肌肉控制机制以及下肢关节生物力学功能,也可为高水平运动员提升下肢SSC功能提供训练参考。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

16名高水平男子短跑运动员[年龄:( $20.31 \pm 2.02$ )岁;身高:( $1.83 \pm 0.05$ )m;体质量:( $70.63 \pm 7.52$ )kg;BMI:( $21.00 \pm 1.15$ )kg/m<sup>2</sup>]自愿参与本研究。研究对象纳入标准:运动专项为田径径赛100 m、200 m或400 m的男子运动员且运动等级为一级运动员及以上。排除标准:测试前1个月内发生过影响正常训练或比赛的运动损伤或有下肢手术史。测试人员在实验数据采集前已向受试者陈述研究目的、实验流程和测试要求等。

### 1.2 研究方法

运动员到达测试地点后先进行10 min的准备活动并熟悉测试动作,随后完成0.45 m落地高度的跳深动作(Di Giminiani et al., 2020; Peng et al., 2019),采用三维运动学和动力学方法同步采集跳深动作中髌、膝和踝关节生物力学指标和动作表现指标。

#### 1.2.1 数据采集方法

使用红外三维动作捕捉系统(Miquis M3, Qualisys, 瑞典)采集运动员在跳深动作过程中上肢、躯干、骨盆和下肢的运动学信号,采集频率为200 Hz。依据标定的解剖系统技术(calibrated anatomical systems technique, CAST)反光球粘贴方案,36个反光球被分别粘贴在运动员上肢、

躯干、骨盆和下肢的骨性标志点;4块分别由4个反光球组成的反光球组被固定在运动员的左、右侧大腿和小腿外侧中段位置(Cappozzo et al., 1995)。使用2块三维测力台(9281EA, Kister, 瑞士)采集跳深动作的地面反作用力信号,采集频率为1 000 Hz。在测试开始前,运动员双手叉腰站在跳深架上。当测试人员发出“开始”口令后,运动员抬起优势侧腿使其悬空,随后身体自然前倾并自由下落,落地后以最大努力完成起跳动作。每名运动员每个落地高度下至少采集3次有效动作,即离开跳深架时身体重心无明显向上和向前移动,双脚同时着地后以最大努力向上起跳,且在整个动作过程中保持双手叉腰,腾空阶段保持髌、膝关节自然伸展。

#### 1.2.2 关节生物力学指标计算方法

利用Visual 3D软件(v6.01.36, C-motion, 美国)建立上肢、躯干、骨盆和下肢骨骼模型并对跳深动作测试的原始运动学和地面反作用力信号进行四阶递归巴特沃斯低通滤波处理,滤波频率为15 Hz(Kipp et al., 2018; Kotsifaki et al., 2021)。根据滤波后的运动学和地面反作用力信号计算跳深动作下肢关节生物力学指标和动作表现指标。

先采用逆向动力学方法计算优势侧髌、膝和踝关节的矢状面力矩和功率(Winter, 2009),随后使用Matlab编程软件(R2018b, MathWorks, 美国)通过对髌、膝和踝关节功率在时间上的积分计算跳深动作髌、膝和踝关节的负功(离心阶段)和正功(向心阶段)。本研究将运动员优势侧下肢定义为习惯性完成单腿起跳侧的下肢(Yu et al., 2006)。此外,本研究还分别计算了跳深动作离心阶段(从足着地到最大膝关节屈角时刻)髌、膝和踝关节的刚度。关节刚度计算公式如下:关节刚度计算公式如下:关节刚度= $\frac{\Delta M_{joint}}{\Delta \theta_{joint}}$  [Nm/(°)],其中 $\Delta M_{joint}$ 表示跳深动作离心阶段关节力矩的变化量, $\Delta \theta_{joint}$ 表示跳深动作离心阶段关节角度的变化量(Hamill et al., 2014)。为了消除体质量对跳深动作下肢关节动力学指标的影响,使用运动员的体质量分别对关节力矩、功率、功和刚度指标进行标准化处理。

#### 1.2.3 动作表现指标计算方法

本研究根据垂直方向地面反作用力划分跳深动作的阶段。选取着地后垂直方向地面反作用力首次超过10 N时定义为足首次着地时刻,着地后首次低于10 N时定义为足离地时刻,起跳腾空后垂直方向地面反作用力再次超过10 N时定义为足再次着地时刻(Healy et al., 2018)。将足首次着地时刻到足离地时刻这一时间段定义为地面接触阶段( $T_c$ ),足离地时刻到足再次着地时刻这一时间段定义为腾空阶段( $T_f$ )。腾空高度( $H_f$ )= $\frac{1}{2} g \left( \frac{T_f}{2} \right)^2$  (m),表示为腾空阶段身体重心在垂直方向的位移;反应力量指数= $\frac{H_f}{T_c}$  (m/s)(Barker et al., 2018; Healy et al., 2018; Montal-

vo et al., 2021); 平均功率输出  $= \frac{g^2 \times T_f \times T_t}{4T_c}$  (W/Kg), 其中  $T_t$  为地面接触时间和腾空时间之和(Bosco et al., 1983)。

#### 1.2.4 数据统计方法

采用 SPSS 统计学分析软件 (Version 22.0, IBM, 美国) 进行统计学分析, 显著性水平定义为  $P < 0.05$ 。首先, 采用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene's 检验分析实验数据的正态分布和方差齐性。随后, 采用单因素方差分析检验跳深动作髌、膝和踝关节之间在力矩、功率、功和刚度等下肢关节生物力学指标上的差异。最后, 采用 Pearson 相关分析检验跳深动作髌、膝和踝关节的力矩、功率、功和刚度等下肢关节生物力学指标与地面接触时间、腾空高度、反应力量指数和平均功率输出等跳深动作表现指标的相关性, 若存在显著相关关系, 则进一步采用逐步多元回归分析检验跳深动作下肢关节生物力学指标对跳深动作表现指标的影响, 并使用调整  $R^2$  评价跳深动作下肢关节生物力学指标对跳深动作表现指标变异性的解释程度 (Guadagnin et al., 2019; McErlain-Naylor et al., 2014)。

## 2 研究结果

### 2.1 跳深动作中髌、膝、踝关节之间在生物力学指标上的差异

跳深动作中下肢关节生物力学数据详见表 1。单因素方差分析结果表明, 髌、膝和踝关节在力矩 ( $F=8.775$ ,  $P=0.001$ )、负功率 ( $F=30.068$ ,  $P<0.001$ )、正功率 ( $F=30.383$ ,  $P<0.001$ )、负功 ( $F=61.159$ ,  $P<0.001$ )、正功 ( $F=12.600$ ,  $P<0.001$ ) 以及刚度 ( $F=15.014$ ,  $P<0.001$ ) 指标上的差异均具有统计学意义。Bonferroni 检验表明, 膝关节力矩大于踝关节力矩 ( $P<0.001$ ), 膝关节负功率大于髌关节 ( $P<0.001$ ) 和踝关节 ( $P<0.001$ ) 负功率, 膝关节 ( $P<0.001$ ) 和

踝关节 ( $P<0.001$ ) 正功率大于髌关节正功率, 膝关节负功大于髌关节 ( $P<0.001$ ) 和踝关节 ( $P<0.001$ ) 负功, 膝关节 ( $P<0.001$ ) 和踝关节 ( $P=0.010$ ) 正功大于髌关节正功, 髌关节刚度则大于膝关节 ( $P<0.001$ ) 和踝关节 ( $P<0.001$ ) 刚度, 上述差异均具有统计学意义。

表 1 跳深动作中下肢关节生物力学数据

Table 1 Biomechanical Data of Lower-Limb Joints in Drop Jump

指标	髌关节	膝关节	踝关节
力矩/(Nm·kg <sup>-1</sup> )	-2.31±0.33	2.56±0.51 <sup>&amp;</sup>	-1.97±0.35
负功率/(W·kg <sup>-1</sup> )	-9.83±2.63	-25.43±7.07 <sup>*&amp;</sup>	-14.79±6.67
正功率/(W·kg <sup>-1</sup> )	7.15±2.04	12.61±3.73 <sup>*</sup>	15.23±2.95 <sup>*</sup>
负功/(J·kg <sup>-1</sup> )	-0.58±0.22	-1.66±0.40 <sup>*&amp;</sup>	-0.67±0.27
正功/(J·kg <sup>-1</sup> )	0.75±0.31	1.35±0.46 <sup>*</sup>	1.13±0.18 <sup>*</sup>
刚度/[Nm·(°) <sup>-1</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	0.08±0.02 <sup>*&amp;</sup>	0.05±0.01	0.05±0.02

注: 力矩分别代表髌关节和膝关节伸力矩以及踝关节跖屈力矩; \*代表与髌关节相比差异具有统计学意义; #代表与膝关节相比差异具有统计学意义; &代表与踝关节相比差异具有统计学意义。

### 2.2 跳深动作下肢关节生物力学指标对地面接触时间的影响

Pearson 相关分析结果表明, 踝关节跖屈力矩 ( $r=0.842$ ,  $P<0.001$ ) 和负功率 ( $r=0.532$ ,  $P=0.034$ ) 以及髌关节正功率 ( $r=0.544$ ,  $P=0.029$ ) 和正功 ( $r=0.794$ ,  $P<0.001$ ) 与地面接触时间均存在正相关关系, 而踝关节正功率 ( $r=-0.660$ ,  $P=0.005$ ) 和正功 ( $r=-0.565$ ,  $P=0.023$ )、膝关节刚度 ( $r=-0.799$ ,  $P<0.001$ ) 以及髌关节伸力矩 ( $r=-0.602$ ,  $P=0.014$ )、负功 ( $r=-0.777$ ,  $P<0.001$ ) 和刚度 ( $r=-0.702$ ,  $P=0.002$ ) 与地面接触时间均存在负相关关系, 上述相关关系均具有统计学意义。逐步回归分析表明, 膝关节刚度 (图 1A) 和踝关节跖屈力矩 (图 1B) 对地面接触时间的影响具有统计学意义 (调整  $R^2=0.801$ ,  $P=0.011$ , 表 2)。

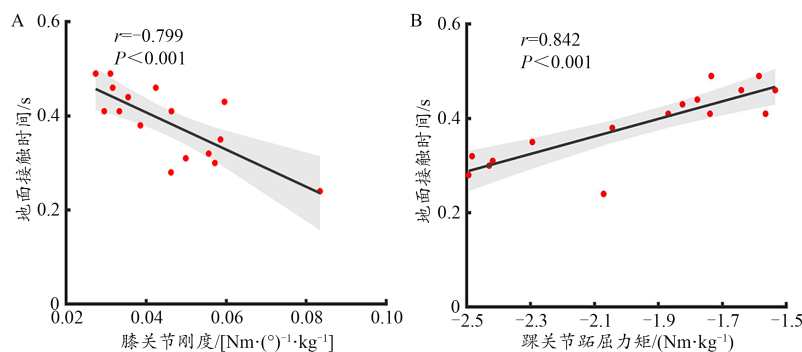


图 1 跳深动作地面接触时间与膝关节刚度(A)和踝关节跖屈力矩(B)散点图

Figure 1. Scatter Plot of Knee Stiffness and Ground Contact Time in Drop Jump (A), and Scatter Plot of Ankle Planter Flexion Torque and Ground Contact Time in Drop Jump (B)

### 2.3 跳深动作下肢关节生物力学指标对腾空高度的影响

Pearson 相关分析结果表明, 膝关节正功率 ( $r=0.613$ ,  $P=0.012$ ) 和正功 ( $r=0.836$ ,  $P<0.001$ ) 以及踝关节负功率 ( $r=0.506$ ,  $P=0.046$ ) 与腾空高度存在正相关关系, 而膝关

节负功 ( $r=-0.626$ ,  $P=0.009$ ) 与腾空高度存在负相关关系, 上述相关关系均具有统计学意义。逐步回归分析表明, 膝关节正功 (图 2) 对腾空高度的影响具有统计学意义 (调整  $R^2=0.677$ ,  $P<0.001$ , 表 3)。



表 2 跳深动作地面接触时间预测指标的逐步回归结果  
Table 2 Stepwise Regression of Predictors of Ground Contact Time in Drop Jump

预测指标	$R^2$	$R^2$ 变化量	调整 $R^2$	调整 $R^2$ 变化量	标准估计误差
踝关节跖屈力矩	0.709	0.709	0.689	0.689	0.043
膝关节刚度	0.827	0.118	0.801	0.112	0.035

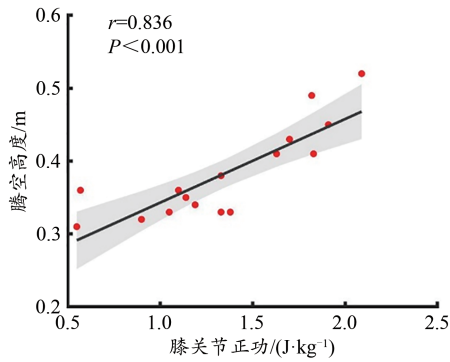


图 2 跳深动作腾空高度与膝关节正功散点图  
Figure 2. Scatter Plot of Jump Height and Knee Positive Work in Drop Jump

表 3 跳深动作腾空高度预测指标的逐步回归结果  
Table 3 Stepwise Regression Predictor of Jump Height in Drop Jump

预测指标	$R^2$	$R^2$ 变化量	调整 $R^2$	调整 $R^2$ 变化量	标准估计误差
膝关节正功	0.698	0.698	0.677	0.677	0.036

2.4 跳深动作下肢关节生物力学指标对反应力量指数的影响  
Pearson 相关分析结果表明,踝关节正功率( $r=0.769$ ,

$P<0.001$ )和正功( $r=0.711$ , $P=0.002$ )、髌关节负功( $r=0.691$ , $P=0.003$ )以及髌( $r=0.723$ , $P=0.002$ )和膝( $r=0.855$ , $P<0.001$ )关节刚度与反应力量指数均存在正相关关系,而踝关节跖屈力矩( $r=-0.746$ , $P=0.001$ )以及髌关节正功( $r=-0.738$ , $P=0.001$ )与反应力量指数均存在负相关关系,上述相关关系均具有统计学意义。逐步回归分析表明,膝关节刚度(图 3A)和踝关节正功率(图 3B)对反应力量指数的影响具有统计学意义(调整  $R^2=0.842$ , $P=0.004$ ,表 4)。

2.5 跳深动作下肢关节生物力学指标对平均功率输出的影响  
Pearson 相关分析结果表明,膝关节伸力矩( $r=0.746$ , $P=0.001$ )和正功率( $r=0.729$ , $P=0.001$ )、踝关节正功率( $r=0.764$ , $P=0.001$ )和正功( $r=0.847$ , $P<0.001$ )以及髌( $r=0.688$ , $P=0.003$ )和膝( $r=0.732$ , $P=0.001$ )关节刚度与平均功率输出存在正相关关系,而踝关节跖屈力矩与平均功率输出存在负相关关系( $r=-0.520$ , $P=0.039$ ),上述相关关系均具有统计学意义。逐步回归分析表明,踝关节正功率(图 4)对平均功率输出指标的影响具有统计学意义(调整  $R^2=0.554$ , $P=0.001$ ,表 5)。

### 3 分析讨论

上述研究结果表明:1)高水平男子短跑运动员在跳深动作中髌、膝和踝关节在力矩、负功率、正功率、负功、正功和刚度等指标上的差异均具有统计学意义;2)下肢关节生物力学指标与跳深动作表现指标密切相关,具体表现为踝关节跖屈力矩和膝关节刚度对地面接触时间的影响、膝关节正功对腾空高度的影响、膝关节刚度和踝关节正功率对反应力量指数的影响、踝关节正功率对平均功率输出的影响均具有统计学意义。

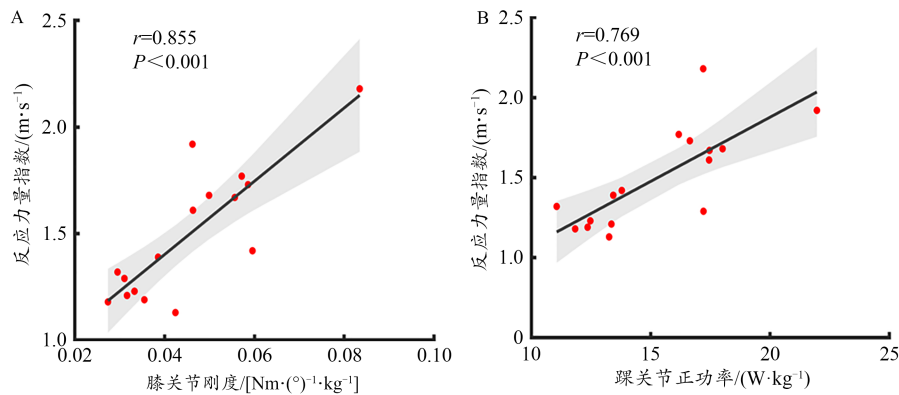


图 3 跳深动作反应力量指数与膝关节刚度(A)和踝关节正功率(B)散点图  
Figure 3. Scatter Plot of Knee Stiffness and Reactive Strength Index in Drop Jump (A), and Scatter Plot of Ankle Positive Power and Reactive Strength Index in Drop Jump (B)

3.1 跳深动作髌、膝、踝关节之间在生物力学指标上的差异

尽管有部分研究曾对跳深动作中髌、膝和踝关节之间

在生物力学指标上的差异进行过分析,但目前尚无明确结论。在关节力矩方面,本研究发现跳深动作中膝关节力矩要明显大于踝关节力矩,这一结果与 Bobbert 等(1988)

和 Moran 等 (2007) 的研究结果较为一致; 而 Smith 等 (2011) 则报道美国男子大学生运动员在完成跳深动作过程中的髌关节伸力矩明显大于膝和踝关节伸力矩。在关节功率方面, 本研究发现跳深动作中膝关节负功率显著大于髌关节和踝关节负功率, 膝关节和踝关节正功率显著大于髌关节正功率, 这些结果与 Bobbert 等 (1988) 和 Peng 等 (2019) 的研究结果均存在一定的差异。Bobbert 等 (1988) 的研究表明男子专业排球运动员在完成跳深动作过程中离心阶段踝关节功率要高于髌关节和膝关节功率, 而 Peng 等 (2019) 则发现男子大学生排球运动员在完成跳深动作过程中的髌关节离心功率要大于膝关节和踝关节离心功率。这些差异可能源于运动项目和运动水平等研究对象特异性和特定肌肉力量水平等因素对垂直跳跃动作过程中髌、膝和踝关节生物力学指标的影响 (Ahn et al., 2022; Vanezis et al., 2005)。因此, 未来针对跳深动作下肢关节生物力学的研究应该考虑运动员所从事的运动项目及其运动水平等因素的影响。

表 4 跳深动作反应力量指数预测指标的逐步回归结果  
Table 4 Stepwise Regression of Predictors of Reactive Strength Index in Drop Jump

预测指标	$R^2$	$R^2$ 变化量	调整 $R^2$	调整 $R^2$ 变化量	标准估计误差
膝关节刚度	0.731	0.731	0.712	0.712	0.165
踝关节正功率	0.863	0.132	0.842	0.130	0.123

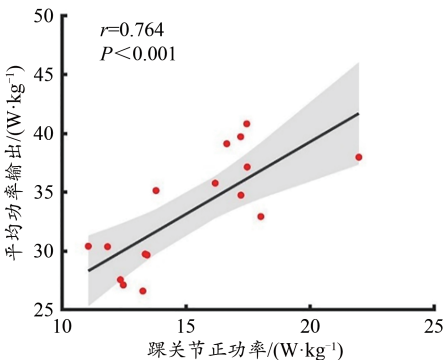


图 4 跳深动作平均功率输出与踝关节正功率散点图  
Figure 4. Scatter Plot of Average Power Output and Ankle Positive Power in Drop Jump

表 5 跳深动作平均功率输出预测指标的逐步回归结果  
Table 5 Stepwise Regression of Predictor of Average Power Output in Drop Jump

预测指标	$R^2$	$R^2$ 变化量	调整 $R^2$	调整 $R^2$ 变化量	标准估计误差
踝关节正功率	0.584	0.584	0.554	0.554	3.17

3.2 跳深动作地面接触时间的下肢关节生物力学影响因素  
地面接触时间的长短决定了跳跃动作的速度, 是衡量

跳跃运动表现的重要指标 (Domire et al., 2015), 甚至有研究认为地面接触时间在跳深动作表现评价中的重要性超过腾空高度 (Walsh et al., 2004)。本研究发现, 踝关节跖屈力矩和膝关节刚度可以解释跳深动作地面接触时间 80.1% 的变异性, 这与已有研究结果类似 (Arampatzi et al., 2001a; Douglas et al., 2018)。下肢刚度主要影响离心阶段下肢肌肉弹性势能的储存, 更大的下肢刚度有助于更快地吸收落地冲击并产生更大的垂直方向地面反作用力, 从而缩短足与地面的接触时间 (Brazier et al., 2019)。有研究认为, 神经系统在足与地面接触前利用肌肉预激活的方式影响下肢肌肉-肌腱复合体的刚度, 提前为落地后离心缓冲做准备 (Santello, 2005)。Di Giminiani 等 (2020) 进一步发现, 膝关节刚度指标受足与地面接触前股内侧肌-股二头肌以及股直肌-股二头肌共激活水平的影响。结合电-力延迟 (electromechanical-delay) 的影响可以推断, 神经系统可能通过调节膝关节屈-伸肌群的共激活水平来控制跳深动作离心阶段的膝关节刚度, 进而影响跳深动作的地面接触时间。Oh 等 (2022) 通过对健康男性的膝关节离心力量进行分组研究发现, 膝关节离心力量较大的组在完成跳深动作时的地面接触时间和膝关节刚度指标均要优于膝关节离心力量较小的组。提示, 膝关节刚度可能是影响跳深动作地面接触时间指标的重要因素。然而, 该研究没有分析膝关节刚度和地面接触时间指标的关联性, 无法提供膝关节刚度对跳深动作地面接触时间指标影响的直接证据, 而本研究的结果则是对这一方面的有力补充。

在将跳深动作地面接触时间划分为离心阶段时间和向心阶段时间后, 本研究结果表明, 膝关节刚度与离心阶段时间相关性更高 ( $r=-0.840, P<0.001$ ), 而踝关节跖屈力矩则与向心阶段时间相关性更高 ( $r=0.841, P<0.001$ )。提示, 更大的膝关节刚度和踝关节跖屈力矩分别伴随着更短的跳深动作离心和向心阶段时间, 可能有助于缩短跳深动作的地面接触时间。在一项最新的研究中, Zushi 等 (2022) 发现, 连续反弹跳动作 (rebound jump) 中踝关节跖屈力矩可以显著地预测快速反弹跳动作地面接触时间指标, 这与本研究的结果较为一致。Marshall 等 (2013) 通过比较反弹型跳深 (bounce drop jump) 与下蹲型跳深 (countermovement drop jump) 动作表现的下肢关节生物力学指标发现, 反弹型跳深动作与下蹲型跳深动作相比具有更短的离心和向心阶段时间以及更大的踝关节跖屈力矩。尽管这一研究没有直接分析踝关节跖屈力矩与地面接触时间的相关性, 但两种跳深动作在地面接触时间和踝关节跖屈力矩之间的差异提示, 踝关节跖屈力矩可能会影响跳深动作地面接触时间。在执行快速拉长-缩短周期类动作后期, 更大的踝关节跖屈力矩有助于踝关节更快完成跖屈动作, 从而缩短向心阶段时间。本研究发

现,膝关节和踝关节分别在跳深动作的离心和向心阶段扮演着不同角色,膝关节肌群主要负责控制身体重心的减速运动,而踝关节肌群主要负责身体重心的加速运动。

### 3.3 跳深动作腾空高度的下肢关节生物力学影响因素

本研究发现,膝关节正功可以解释跳深动作腾空高度67.7%的变异性。功受做功速率和时间的影 响;在完成跳深等垂直跳跃动作过程中,较高的力学功率输出是产生较大身体重心垂直位移的重要力学条件(Dowling et al., 1993)。在跳深动作足与地面接触后,更大的膝关节刚度导致更快的身体重心上升速率,因此在管理跳深动作的功率来源过程中扮演着重要的角色。(Horita et al., 2002; Komi et al., 1997)。在跳深动作的向心阶段,膝关节伸肌群通过产生较大的膝关节正功率和正功来增加腾空高度。通过比较髌、膝和踝关节的正功发现,膝关节正功要大于髌和踝关节正功。结合膝关节正功与跳深动作腾空高度指标的显著正相关关系可以推断,下肢关节正功(特别是膝关节正功)可能是影响跳深动作腾空高度的重要因素。

关节功率和功代表肌肉和韧带等组织产生和吸收能量的速率、量和时序(Müller et al., 2018)。由于韧带等被动组织在正常关节活动范围内对关节功率和功的贡献相对较小,因此,关节功率和功主要取决于肌纤维快速收缩做功的能力(van der Kruk et al., 2018)。McErlain-Naylor等(2014)报道,下蹲跳动作膝关节正功率可以解释腾空高度44%的变异性。其他研究也发现,跳深动作膝关节正功率与起跳速度存在显著的正相关关系。提示,更大的膝关节正功率可通过提高跳深动作起跳速度而实现更高的腾空高度(Horita et al., 2002)。从功-能量-功率关联性的角度,更高的正功率暗示更大的正功,从而实现更大的身体动能和身体重心在足离地时刻的腾空速度,最终实现更高的腾空高度(McErlain-Naylor et al., 2014)。此外,最近一项基于神经肌肉系统模拟的研究发现,比目鱼肌、腓肠肌、股内侧肌、股外侧肌和股中间肌的肌力是影响下蹲跳动作身体重心加速度的主要因素(Kipp et al., 2018)。提示,膝关节伸肌群(股内侧肌、股外侧肌和股中间肌)的力量水平可能是影响跳深动作速度(或高度)的重要因素。同样,Nagano等(2001)通过调整髌、膝和踝关节伸肌群的最大等长收缩力、收缩速度和激活水平等神经肌肉参数来模拟力量训练对垂直纵跳动作腾空高度指标的影响时发现,提高膝关节伸肌群的神经肌肉参数可使腾空高度增加9.61 cm,明显大于调整髌关节伸肌群和踝关节跖屈肌群神经肌肉参数后腾空高度的增加(分别为1.68 cm和3.15 cm)。另外,也有研究发现,膝关节最大等速肌力与垂直跳跃高度存在高度正相关关系(Fischer et al., 2017)。

### 3.4 跳深动作反应力量指数的下肢关节生物力学影响因素

反应力量指数是腾空高度与地面接触时间的比值,适

用于评价需要运动员以较快动作速度实现较高腾空高度的运动项目(Barker et al., 2018; Jarvis et al., 2021)。本研究发现,膝关节刚度和踝关节正功率可以解释跳深动作反应力量指数84.2%的变异性。进一步分析发现,膝关节刚度和踝关节正功率分别与跳深动作离心阶段和向心阶段动作时间存在显著的相关性,而与跳深动作腾空高度均没有显著的相关性。因此,膝关节刚度和踝关节正功率对跳深动作反应力量指数的影响主要体现在缩短跳深动作地面接触时间上。

Douglas等(2018)发现,高水平短跑运动员跳深动作的反应力量指数显著大于非短跑运动员,且主要原因在于前者完成跳深动作时的地面接触时间更短。人体可通过调节下肢肌肉和关节的刚度改变跳深动作地面接触时间,进而影响反应力量指数。关节刚度代表肌肉收缩产生关节力矩抵抗关节旋转运动的能力(Hamill et al., 2014)。前期研究发现,跳深动作垂直刚度(vertical stiffness)、下肢刚度与反应力量指数存在显著相关关系(Douglas et al., 2018, 2020; Kipp et al., 2018),但关注下肢关节刚度对跳深动作反应力量指数影响的研究仍很缺乏。Arampatzis等(2001a, 2001b)报道,跳深动作中膝和踝关节刚度与地面接触时间存在显著的负相关关系,这表明下肢关节刚度可能也是影响反应力量指数的重要因素。Kalkhoven等(2018)的研究发现更大的股直肌刚度伴随着更高的反应力量指数,进一步表明股直肌刚度是影响跳深动作反应力量指数的重要因素。然而,该项研究没有直接分析股直肌刚度和膝关节刚度之间的关系,因此无法量化股直肌刚度对膝关节刚度的影响。

在关节功率与动作时间方面,本研究发现,踝关节正功率与跳深动作向心阶段时间存在显著负相关关系,更大的踝关节正功率可通过缩短向心阶段时间提高反应力量指数。这一发现与Zushi等(2022)的研究结果较为一致。尽管Zushi等(2022)没有具体分析快速反弹跳动作过程中踝关节正功率与离心和向心阶段时间之间的关联性,但该研究发现快速反弹跳动作过程中踝关节正功率与动作地面接触时间存在高度的负相关关系。研究发现,踝关节跖屈肌群肌肉-肌腱复合体在经历快速的牵拉后可以储存更多的弹性势能,而且在动作向心阶段充分利用所储存的弹性势能以提高肌肉力的输出(Van Ingen Schenau et al., 1985),从而缩短地面接触时间(Zushi et al., 2022)。就峰值功率而言,踝关节正功率与膝关节相当,且均显著大于髌关节;从关节功率-时间曲线可以看出,踝关节正功率峰值出现的时间与髌和膝关节相比更接近垂直跳跃动作向心阶段末期(Jacobs et al., 1996; Kotsifaki et al., 2021),即踝关节跖屈肌群在跳跃动作地面支撑阶段末期快速向心收缩完成快速蹬伸动作。基于上述分析,我们认为,跳深动作离心阶段的膝关节刚度和



向心阶段的踝关节正功率分别通过调节离心阶段和向心阶段的动作时间影响反应力量指数。

### 3.5 跳深动作平均功率输出的下肢关节生物力学影响因素

力学功率输出的大小也是许多运动项目常用的运动表现评价指标(Morin et al., 2019)。本研究发现, 踝关节正功率明显大于髌关节正功率, 且可以解释平均功率输出 55.4% 的变异性。已有研究同样表明, 跳深动作和单腿垂直跳跃动作的踝关节正功率显著大于髌关节和膝关节正功率(Kotsifaki et al., 2021; Peng et al., 2019)。Arampatzis 等(2001a)通过调整跳深动作地面接触时间研究膝关节和踝关节正功率对跳深动作最大功率输出的影响时发现, 在地面接触时间相对较短的情况下踝关节正功率对跳深动作最大功率输出的贡献明显大于膝关节正功率。

导致上述结果的原因可能与相关肌群的形态学因素有关。踝关节跖屈肌群的肌肉-肌腱复合体由较短的肌纤维和较长的肌腱组成, 这一形态学特点有助于其保持准等长收缩状态(quasi-isometric contraction), 提高拉长-缩短周期中的弹性结构利用率和力生成速率, 进而在能量消耗较少的情况下实现较大的力学功率输出(Douglas et al., 2018; Ishikawa et al., 2003; Monte et al., 2020)。一项针对跑步动作的研究也发现, 跑步速度的增加会使弹性势能能对腓肠肌内侧头肌肉-肌腱复合体产生正功率的贡献大于股外侧肌(Monte et al., 2020)。另外, Earp 等(2010)报道, 腓肠肌外侧头的肌肉厚度和羽状角可以显著预测跳深动作的绝对和相对功率输出。作为重要的肌肉形态学指标, 肌肉厚度对高收缩速度下的力的生成能力尤为重要, 而羽状角的大小则直接决定了肌肉的生理横断面积, 这两项指标均是影响肌肉功率输出的重要因素(Secomb et al., 2015)。综合上述研究, 踝关节跖屈肌群的形态学因素可以影响肌肉功率输出, 从而增加跳跃和冲刺跑等拉长-缩短周期类动作的力学功率输出。未来的研究可探索踝关节跖屈肌群形态学指标对跳跃动作平均功率输出的影响, 为高水平运动员下肢爆发力训练提供新视角。

## 4 结论与建议

高水平男子短跑运动员跳深动作中髌、膝和踝关节在力矩、负功率、正功率、负功、正功和刚度等方面存在明显差异, 这些下肢关节生物力学指标与跳深动作表现指标密切相关。其中, 膝关节刚度主要通过调节离心阶段时间影响跳深动作的地面接触时间和反应力量指数, 而踝关节跖屈力矩和正功率主要通过调节向心阶段时间影响跳深动作的地面接触时间和反应力量指数, 膝关节正功和踝关节正功率分别是影响腾空高度和平均功率输出的主要生物力学因素。基于上述发现, 为了缩短跳深动作完成时间、提高跳深动作速率, 需要有针对性地进行膝关

节屈-伸肌群共激活训练以及踝关节伸肌群的快速收缩能力训练; 提升膝关节伸肌群的最大力量和快速力量可能是提高垂直跳跃腾空高度、改善下肢爆发力的有效方式; 对于那些以快速拉长-缩短周期类动作作为主要动作模式的运动员来说, 通过超等长训练和离心超负荷训练可以提高在较短的地面接触时间内吸收和利用垂直地面反作用力的能力, 进而改善反应力量水平和专项运动表现。

### 参考文献:

- 刘宇, 魏勇, 2008. 运动科学领域的下肢刚度研究[J]. 上海体育学院学报, 32(5): 31-35, 82.
- AHN N, KIM H, KRZYSZKOWSKI J, et al., 2022. Joint-level determinants of the dynamic strength index: Implications for testing and monitoring[J]. Sports Biomech: 1-11.
- ARAMPATZIS A, SCHADE F, WALSH M, et al., 2001. Influence of leg stiffness and its effect on myodynamic jumping performance[J]. J Electromyography, 11(5): 355-364.
- ARAMPATZIS A, BRÜGGEMANN G P, KLAPSING G M, 2001. Leg stiffness and mechanical energetic processes during jumping on a sprung surface[J]. Med Sci Sports Exer, 33(6): 923-931.
- BARKER L A, HARRY J R, MERCER J A, 2018. Relationships between countermovement jump ground reaction forces and jump height, reactive strength index, and jump time[J]. J Strength Cond Res, 32(1): 248-254.
- BIRCHMEIER T, LISEE C, GEERS B, et al., 2019. Reactive strength index and knee extension strength characteristics are predictive of single-leg hop performance after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. J Strength Cond Res, 33(5): 1201-1207.
- BOBBERT M F, VAN INGEN SCHENAU G J, 1988. Coordination in vertical jumping[J]. J Biomech, 21(3): 249-262.
- BOSCO C, LUHTANEN P, KOMI P V, 1983. A simple method for measurement of mechanical power in jumping[J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 50(2): 273-282.
- BRAZIER J, MALONEY S, BISHOP C, et al., 2019. Lower extremity stiffness: Considerations for testing, performance enhancement, and injury risk[J]. J Strength Cond Res, 33(4): 1156-1166.
- CAPPOZZO A, CATANI F, DELLA CROCE U, et al., 1995. Position and orientation in space of bones during movement: Anatomical frame definition and determination[J]. Clin Biomech, 10(4): 171-178.
- DI GIMINIANI R, GIOVANNELLI A, CAPUANO L, et al., 2020. Neuromuscular strategies in stretch-shortening exercises with increasing drop heights: The role of muscle coactivation in leg stiffness and power propulsion[J]. Int J Environ Res Public Health, 17(22): 8647.
- DOMIRE Z J, CHALLIS J H, 2015. Maximum height and minimum time vertical jumping[J]. J Biomech, 48(11): 2865-2870.
- DOUGLAS J, PEARSON S, ROSS A, et al., 2018. Kinetic determinants of reactive strength in highly trained sprint athletes[J]. J Strength Cond Res, 32(6): 1562-1570.
- DOUGLAS J, PEARSON S, ROSS A, et al., 2020. Reactive and eccentric strength contribute to stiffness regulation during maximum velocity sprinting in team sport athletes and highly trained sprinters[J].

- J Sports Sci, 38(1): 29-37.
- DOWLING J J, VAMOS L, 1993. Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance [J]. J Appl Biomech, 9(2): 95-110.
- EARP J E, KRAEMER W J, NEWTON R U, et al., 2010. Lower-body muscle structure and its role in jump performance during squat, countermovement, and depth drop jumps [J]. J Stren Cond Res, 24(3): 722-729.
- FISCHER F, BLANK C, DÜNNWALD T, et al., 2017. Isokinetic extension strength is associated with single-leg vertical jump height [J]. Orth J Sports Med, 5(11): 2325967117736766.
- GUADAGNIN E C, PRIARIO L A, CARPES F P, et al., 2019. Correlation between lower limb isometric strength and muscle structure with normal and challenged gait performance in older adults [J]. Gait Posture, 73: 101-107.
- HAMILL J, GRUBER A H, DERRICK T R, 2014. Lower extremity joint stiffness characteristics during running with different footfall patterns [J]. Eur J Sport Sci, 14(2): 130-136.
- HEALY R, KENNY I C, HARRISON A J, 2018. Reactive strength index: A poor indicator of reactive strength? [J]. Int J Sports Physiol Perform, 13(6): 802-809.
- HORITA T, KOMI P, NICOL C, et al., 2002. 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, 88(1): 76-84.
- ISHIKAWA M, FINNI T, KOMI P, 2003. Behaviour of vastus lateralis muscle-tendon during high intensity SSC exercises *in vivo* [J]. Acta Physiol Scand, 178(3): 205-213.
- JACOBS R, BOBBERT M F, VAN INGEN SCHENAU G J, 1996. Mechanical output from individual muscles during explosive leg extensions: The role of biarticular muscles [J]. J Biomech, 29(4): 513-523.
- JARVIS P, TURNER A, READ P, et al., 2021. Reactive strength index and its associations with measures of physical and sports performance: A systematic review with meta-analysis [J]. Sports Med, 1-30.
- KALKHOVEN J T, WATSFORD M L, 2018. The relationship between mechanical stiffness and athletic performance markers in sub-elite footballers [J]. J Sports Sci, 36(9): 1022-1029.
- KIPP K, KIELY M T, GIORDANELLI M D, et al., 2018. Biomechanical determinants of the reactive strength index during drop jumps [J]. Int J Sports Physiol Perform, 13(1): 44-49.
- KOMI P V, GOLLHOFFER A, 1997. Stretch reflexes can have an important role in force enhancement during SSC exercise [J]. J Appl Biomech, 13(4): 451-460.
- KOTSIFAKI A, KORAKAKIS V, GRAHAM-SMITH P, et al., 2021. Vertical and horizontal hop performance: Contributions of the hip, knee, and ankle [J]. Sports Health, 13(2): 128-135.
- LEUKEL C, GOLLHOFFER A, KELLER M, et al., 2008. Phase-and task-specific modulation of soleus H-reflexes during drop-jumps and landings [J]. Exp Brain Res, 190(1): 71-79.
- MARSHALL B M, MORAN K A, 2013. Which drop jump technique is most effective at enhancing countermovement jump ability, "countermovement" drop jump or "bounce" drop jump? [J]. J Sports Sci, 31(12): 1368-1374.
- MCERLAIN-NAYLOR S, KING M, PAIN M T G, 2014. Determinants of countermovement jump performance: A kinetic and kinematic analysis [J]. J Sports Sci, 32(19): 1805-1812.
- MONTALVO S, GONZALEZ M P, DIETZE-HERMOSA M S, et al., 2021. Common vertical jump and reactive strength index measuring devices: A validity and reliability analysis [J]. J Stren Cond Res, 35(5): 1234-1243.
- MONTE A, BALTOPOULOS V, MAGANARIS C N, et al., 2020. Gastrocnemius medialis and vastus lateralis *in vivo* muscle-tendon behavior during running at increasing speeds [J]. Scand J Med Sci Sports, 30(7): 1163-1176.
- MORAN K A, WALLACE E S, 2007. Eccentric loading and range of knee joint motion effects on performance enhancement in vertical jumping [J]. Human Mov Sci, 26(6): 824-840.
- MORIN J B, JIMÉNEZ-REYES P, BRUGHELLI M, et al., 2019. When jump height is not a good indicator of lower limb maximal power output: Theoretical demonstration, experimental evidence and practical solutions [J]. Sports Med, 49(7): 999-1006.
- MÜLLER B, WOLF S I, BRÜGGEMANN GP, et al., 2018. Handbook of human motion [M]. Switzerland: Springer.
- NAGANO A, GERRITSEN K G, 2001. Effects of neuromuscular strength training on vertical jumping performance: A computer simulation study [J]. J Appl Biomech, 17(2): 113-128.
- NORMAN R W, KOMI P V, 1979. Electromechanical delay in skeletal muscle under normal movement conditions [J]. Acta Physiol Scand, 106(3): 241-248.
- OH J, LEE H D, 2022. Influence of eccentric strength of knee extensor muscles on biomechanical factors of a vertical drop jump [J]. J Electrom Kinesiol, 64: 102648.
- PENG H T, SONG C Y, WALLACE B J, et al., 2019. Effects of relative drop heights of drop jump biomechanics in male volleyball players [J]. Int J Sports Med, 40(13): 863-870.
- SANTELLLO M, 2005. Review of motor control mechanisms underlying impact absorption from falls [J]. Gait Posture, 21(1): 85-94.
- SECOMB J L, LUNDGREN L E, FARLEY O R, et al., 2015. Relationships between lower-body muscle structure and lower-body strength, power, and muscle-tendon complex stiffness [J]. J Stren Cond Res, 29(8): 2221-2228.
- SMITH J P, KERNOZEK T W, KLINE D E, et al., 2011. Kinematic and kinetic variations among three depth jump conditions in male NCAA division III athletes [J]. J Stren Cond Res, 25: 94-102.
- VANEZIS A, LEES A, 2005. A biomechanical analysis of good and poor performers of the vertical jump [J]. Ergonomics, 48: 1594-1603.
- VAN DER KRUK E, VAN DER HELM F, VEEGER H, et al., 2018. Power in sports: A literature review on the application, assumptions, and terminology of mechanical power in sport research [J]. J Biomech, 79: 1-14.
- VAN INGEN SCHENAU G J, BOBBERT M F, HUIJING P A, et al., 1985. The instantaneous torque-angular velocity relation in plantar flexion during jumping [J]. Med Sci Sports Exer, 17: 422-426.
- WALSH M, ARAMPATZIS A, SCHADE F, et al., 2004. The effect of drop jump starting height and contact time on power, work performed, and moment of force [J]. J Stren Cond Res, 18(3): 561-566.
- WINTER D A, 2009. Biomechanics and motor control of human movement [M]. New York: Wiley: 176-199.



YU B, LIN C F, GARRETT W E, 2006. Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task[J]. Clin Biomech, 21(3): 297-305.

ZUSHI A, YOSHIDA T, ZUSHI K, et al., 2022. Characteristics of three lower limb joint kinetics affecting rebound jump performance[J]. PLoS One, 17: e0268339.

## An Analysis of Drop Jump Performance of High-Level Sprinters: From the Lower-Limb Joint Biomechanics Perspective

ZANG Yu<sup>1</sup>, XU Yilin<sup>2</sup>, XIANG Xiaoyan<sup>3</sup>, ZHAI Yifei<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, WANG Ran<sup>3\*</sup>

1. Department of Physical Education, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Sports Biomechanics Laboratory, Jiangsu Research Institute of Sports Science, Nanjing 210033, China;

3. School of Athletic Performance, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China

**Abstract:** OBJECTIVES: The purpose of the study is to compare the differences in biomechanical indices of hip, knee, and ankle joints, to explore the relationship between lower-limb joint biomechanical indices and the performance index of drop jump and to determine the lower-limb joints biomechanical factors that affect the performance index of drop jump. METHODS: Sixteen high-level male sprinters were recruited and took a drop jump test at the height of 0.45 m, and their 3-dimensional kinematic and kinetic data were synchronously collected. RESULTS: (1) In drop jump, the differences of high-level male sprinters' hip, knee and ankle joints in torque, negative power, positive power, negative work, positive work and stiffness indices were all statistically significant ( $P < 0.001$ ). (2) The effects of ankle planter flexion torque and knee stiffness on ground contact time (Adjusted  $R^2 = 0.801$ ,  $P = 0.011$ ), the effect of knee positive work on jump height (Adjusted  $R^2 = 0.677$ ,  $P < 0.001$ ), the effect of ankle positive power on average power output (Adjusted  $R^2 = 0.554$ ,  $P = 0.001$ ), and the effects of knee stiffness and ankle positive power on reactive strength index (RSI) (Adjusted  $R^2 = 0.842$ ,  $P = 0.004$ ) were all statistically significant. CONCLUSIONS: In drop jumps of high-level male sprinters, knee stiffness primarily correlated to the time of the eccentric phase, whereas ankle plantar flexion torque and positive power primarily correlated to the time of the concentric phase, thus leading to the differences in drop jump completion time and reactive strength. Knee positive work and ankle positive power were the main power source to regulate the jump height and mechanical power output in drop jump.

**Keywords:** stretch-shortening cycle; joint stiffness; joint torque; reactive strength; plyometrics; sprint

(上接第40页)

related to higher physical health level; 3) daily total MVPA time and low physical health level of older women showed a non-linear relationship with an approximate L-shaped curve. Conclusions: There was a significant "dose-response" associations of PA, SB with physical health in older women. Regardless of intensity, physical health benefits can be gained by engaging in a certain amount of PA. MVPA is high-efficiency in promoting physical health in older women, and engaging in 30 minutes of MVPA per day is most effective to achieve physical health benefits. Older women are suggested to avoid prolonged SB, health benefits can be gained by engaging in a certain amount of MVPA regardless of the duration of SB.

**Keywords:** older women; physical activity; sedentary behavior; physical health