

影响男子排球运动员扣球起跳动作效果的 动力学研究

贾 谊¹, 郭俊芬², 杨 程¹

(1. 中北大学 体育学院, 太原 030051; 2. 山西省实验小学, 太原 030002)

摘要: 目的: 研究男子排球运动员扣球起跳蹬地动作过程中, 人体下肢的相关力学参数特征。对象: 男子大学生排球运动员 10 名。方法: 使用高速人体动作捕捉系统及三维测力台, 对相关运动学和动力学参数进行采集。结果: ①起跳过程中, 地面反作用力峰值和均值均为优势腿大于非优势腿; ②非优势腿地面反作用力峰值与重心最大高度呈高度负相关 ($r=-0.961$, $P=0.002<0.05$); ③双脚同时着地过程中, 优势腿地面反作用力冲量明显大于非优势腿, 两脚地面反作用力冲量差与重心最大高度呈显著负相关 ($r=-0.531$, $P=0.034<0.05$)。结论: ①在后排起跳过程中, 优势腿与非优势腿表现出不同的用力形式; ②应当通过适当控制非优势腿在着地初期的制动作用, 并在双脚最后用力阶段有意识地提高非优势腿的参与程度, 以提高人体的起跳高度; ③排球运动员髌腱炎的发病可能与踝关节绕矢状轴力矩和膝关节绕垂直轴力矩较大有关。

关键词: 扣球; 起跳; 动力学; 排球; 地面反作用力

中图分类号: G804.6

文献标志码: A

文章编号: 1008-3596 (2017) 05-0064-07

纵跳是人体下肢常见的运动形式之一。纵跳高度一直被认为是评价人体下肢爆发力的重要指标^[1-3], 不少学者认为, 纵跳高度与人体下肢肌力呈高度相关, 并建立了相应的预测公式^[4-5]。同时, 纵跳高度还和其他一些力学指标, 如冲量^[6]、净冲量^[7]、地面的材质^[8]以及上肢的摆动幅度^[9]等密切相关。上述研究均是在没有助跑的情况下进行的, 动作形式以蹲跳 (squat jump, SJ) 和下蹲跳 (counter movement jump, CMJ) 为主, 而在日常活动中, 除蹲跳和下蹲跳以外, 人体还有多种其他起跳方式, 助跑起跳就是最常见的一种。这种起跳动作既不像传统的实验室内所做的蹲跳、下蹲跳动作由双腿同步起跳完成, 也不像跳高、跳远起跳动作那样依靠起跳腿与摆动腿的配合完成, 而是由两腿依次着地并同时起跳离地完成, 因此也被称为非对称性起跳。

很多体育项目, 如排球、羽毛球、篮球等中的起跳动作都属于非对称性起跳动作。有学者对美国国家女子排球队的日常训练进行过统计, 在长达 4 h 的训练期间, 起跳的次数在 300—500 次, 而其中绝大部分动作为非对称性起跳动作^[10]。另有研究表明, 非对称性起跳高度是排球、篮球、足球、羽毛球等运动项目中夺取制空权和获得进攻优势的主要决定因素^[11]。P F Vint 等人 (1996) 的研究结果表明, 在排球扣球中, 运动员左右腿蹬地的力量是存在差异的^[12]。而这一差异有可能是影响人体起跳高度的决定因素之一。因此, 对排球运动员的扣球起跳这种非对称性起跳动作当中人体下肢的动力学相关特性进行研究, 可以帮助了解人体进行此类动作的动力学机制, 有助于提高起跳效果和防止运动损伤。

收稿日期: 2017-04-29

基金项目: 山西省软科学研究项目 (2016041037-3); 山西省体育局科研课题 (15TY115)

作者简介: 贾 谊 (1980—), 男, 山西孟县人, 副教授, 博士, 研究方向为动作技术分析与诊断。

1 研究方法

1.1 研究对象

选取 10 名男子大学生排球运动员作为受试者 (年龄 21.2 ± 0.79 岁; 身高 188.7 ± 4.7 cm; 体重 83.8 ± 8.1 kg)。所有受试者在实验之前均身体健康且无下肢关节损伤史 (表 1)。

表 1 受试者基本情况表

运动员	身高/cm	体重/kg	年龄
1	194	95	21
2	187	87.5	20
3	193	90	21
4	180	69	21
5	187	87	22
6	186	82	22
7	186	77.5	21
8	196	92	22
9	188	75	20
10	190	83	22

1.2 实验方案

本研究使用 12 台红外高速摄像机 (T40-S, Vicon Peak, Oxford, UK) 对受试者的运动学参数进行采集, 采集频率为 200 Hz。采用 4 块三维测力台 (每块测力台大小为 400×600 cm, 美国 AMTI 公司生产) 记录起跳时地面反作用力参数, 采样频率 1 000 Hz。红外采集系统与三维测力台的坐标系坐标原点设为同一点, 以助跑前进方向为 X 轴正方向, 受试者左手指向方向为 Y 轴正方向, 垂直地面向上为 Z 轴正方向。



图 1 测试现场

受试者采取 4 步助跑起跳方式进行测试, 优势腿均为左腿。助跑起点距离测力台坐标原点 5 m, 并以双脚均落在测力台测试区域内记为有效测试。测力台中心与球网的水平距离为 1 m,

球网高度 2.43 m, 每位受试者尽个人最大能力完成扣球动作, 要求落地后身体不得触碰球网。每位受试者需完成三次有效测试, 取其中起跳高度最大的一次进行分析。

1.3 数据分析

首先通过 Nexus 2.5 软件将采集到的运动学与动力学原始数据进行预处理。使用巴特沃斯数字滤波器对原始数据进行滤波, 运动学与动力学参数的截断频率均为 20 Hz。将预处理后的数据以 *.MAT 格式导出, 并利用 MATLAB 7.0 软件进行相关的计算和处理, 得到研究所需的运动学与动力学数据。

1.4 数据统计

利用 SPSS 19.0 统计软件, 对得到的运动学与动力学参数进行统计学分析。

1.5 数据标准化处理

以右脚着地时刻至双脚离地时刻作为起跳时间, 并将此时间间隔作为 100% 起跳周期, 对时间参数进行标准化处理。同时, 以地面反作用力/受试者体重 (N/kg) 的方法对得到的力学参数进行标准化处理, 以去除不同受试者体重对力学参数造成的影响。

2 研究结果

2.1 地面反作用力

地面反作用力峰值 (GRF_{max}) 是指在整个起跳过程中, 人体所受地面反作用力的最大值。在一定程度上反映了人体整体所受外界环境载荷的程度。从本次研究的结果来看, 从右脚最后一次着地到双脚离地期间, 所有受试者左腿地面反作用力峰值在 X、Y 和 Z 轴方向的均值分别为 3.1 ± 2.9 N/kg、 11.2 ± 3.7 N/kg 和 25.1 ± 5.5 N/kg, 右腿分别为 -1.2 ± 1.0 N/kg、 4.9 ± 3.0 N/kg 和 14.5 ± 2.18 N/kg。左右腿相比较, 除 X 方向外 ($P=0.418>0.05$), Y 方向 ($P=0.000<0.05$) 和 Z 方向 ($P=0.000<0.05$) 左腿显著大于右腿。

表 2 左右腿地面反作用力峰值

指标	左腿	右腿	P 值
力作用时间/s	0.20 ± 0.02	0.37 ± 0.05	0.000
作用力峰值/(N/kg)	F_x 3.1 ± 2.9	3.8 ± 3.4	0.418
	F_y 11.2 ± 3.7	5.6 ± 1.3	0.000
	F_z 25.1 ± 5.5	15.7 ± 2.5	0.000

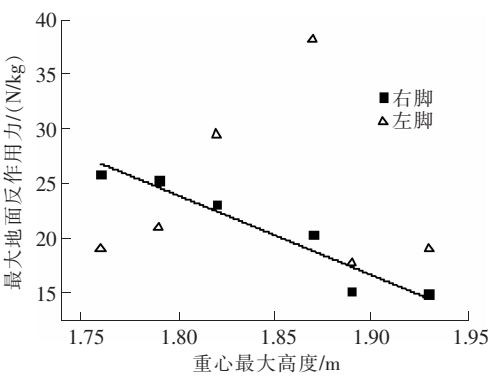


图 2 地面反作用力与重心最大高度的相关性

为消除体重对地面反作用力测量的影响，用地面反作用力与体重的比值作为标准化数据进行比较分析。根据公式： $V_t^2 - V_0^2 = 2aS$ ，通过离地瞬间重心的垂直速度计算获得重心最大高度，其中， a 取 9.8 m/s^2 。左、右腿最大地面反作用力与最大起跳高度进行相关性分析的结果表明：右

脚相对力最大值与起跳高度呈显著负相关 ($r = -0.961$, $P = 0.002 < 0.05$)，而左腿没有相关性 ($r = 0.039$, $P = 0.941 > 0.05$)。

地面反作用力均值 (GRF_{avg}) 是指从脚着地时刻至脚离地时刻，人体下肢所受力的平均值。从测试结果来看，所有受试者左腿 GRF_{avg} 在 X、Y 和 Z 轴方向的均值分别为 $-1.2 \pm 1.0\text{ N/kg}$ 、 $4.9 \pm 3.0\text{ N/kg}$ 和 $14.5 \pm 2.18\text{ N/kg}$ ，右腿三个方向的均值分别为 $-1.7 \pm 1.0\text{ N/kg}$ 、 $1.6 \pm 1.7\text{ N/kg}$ 和 $10.6 \pm 1.66\text{ N/kg}$ 。左右腿相比较，X、Y、Z 方向均呈显著性差异，表现出左腿用力显著大于右腿的特征。

表 3 左右腿地面反作用力均值 N/kg

方向	左腿	右腿	P 值
F _x	-1.2 ± 1.0	-1.7 ± 1.0	0.000
F _y	4.9 ± 3.0	1.6 ± 1.7	0.000
F _z	14.5 ± 2.18	10.6 ± 1.66	0.000

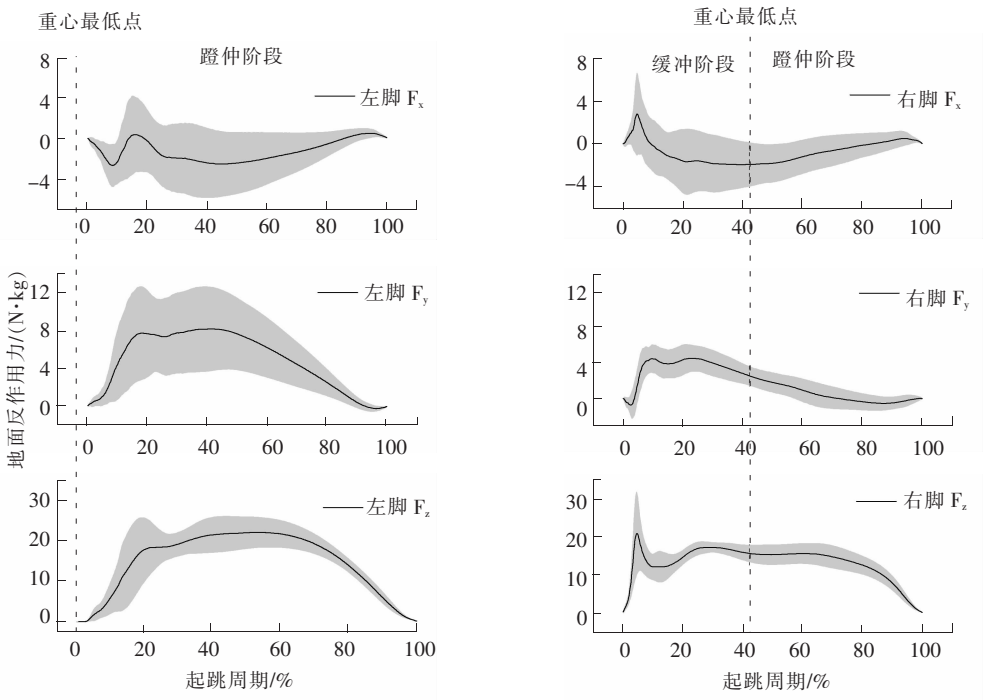


图 3 起跳过程中人体左右侧下肢受力情况

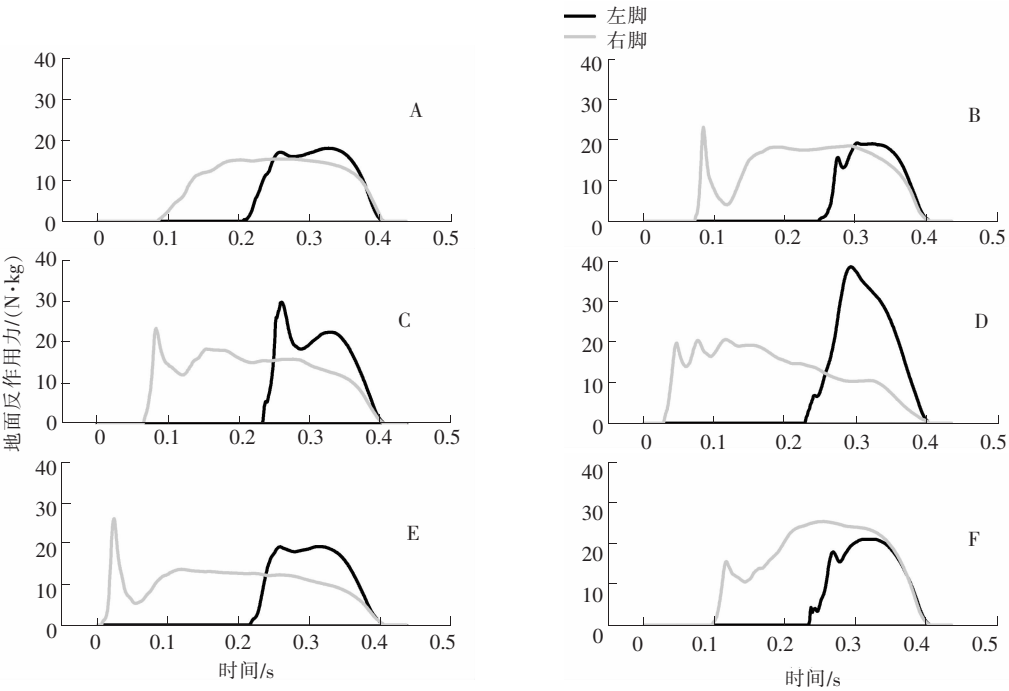
2.2 对两侧下肢冲量差值的分析

冲量是力—时间曲线下包络的面积，即力对时间的积分，它可以反映出力在一定时间范围内对人体作用的累积效果。多项研究结果表明，利用冲量参数来评估人体起跳效果具有一定的可靠性和准确性^[6,13-14] C T Hsieh 等人 (2010) 在对女

子排球运动员的助跑起跳动作进行研究后发现，虽然不同助跑方式下运动员垂直方向冲量没有显著性差异，但在前进方向，四步助跑的冲量明显高于二步助跑，而二步助跑的着地时间则明显大于四步助跑。人体在双脚同时蹬伸起跳过程中，经常会由于两侧肢体用力不均匀而降低起跳效果，

而两侧下肢起跳过程中的冲量差可以在一定程度对上述效果进行评价。本次研究中, 受试者两脚同时蹬伸时期, 左右两侧下肢的地面反作用力冲量分别为 $360 \pm 46 \text{ N} \cdot \text{s}$ 和 $243 \pm 60 \text{ N} \cdot \text{s}$, 表现出

右侧大于左侧的特征, 平均差值为 $129 \text{ N} \cdot \text{s}$ 。从图 3 可以直观地反映出在整个用力阶段两侧下肢力的累积效果。由于右脚着地时间明显大于左脚, 导致其力的作用时间延长, 冲量增加。



注: A—F 表示运动员序号。

图 4 不同运动员地面反作用力随时间变化趋势

从图 4 可以看出, 不同运动员表现出不同的力曲线特征, 而这一特征也在一定程度上影响了其起跳的效果。对冲量差与起跳重心最大高度的相关性分析结果表明, 两脚同时蹬伸时期, 左右两侧肢体的地面反作用力冲量之差与重心最大高度呈显著负相关 ($r = -0.531, P = 0.034 < 0.05$), 即两侧肢体冲量差越小, 起跳最大高度越高 (图 5)。

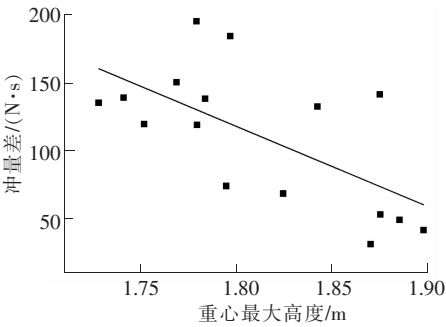


图 5 左右下肢地面反作用力冲量差与重心最大高度的相关性

2.3 起跳过程中下肢关节力矩比较

在起跳过程中, 下肢各关节力矩可以反映出下肢蹬伸阶段人体各肌群力的分配情况。

表 4 蹬伸阶段髋、膝、踝关节力矩情况 Nm

力矩方向	下肢名称	髋关节	膝关节	踝关节
X 轴	左腿	69±11	53±13	19±4
	右腿	103±28	60±5	21±1
Y 轴	左腿	121±58	95±11	178±36
	右腿	112±12	83±06	162±32
Z 轴	左腿	276±24	374±42	106±14
	右腿	259±10	339±19	106±16

通过表 4 数据可以看出, 在整个起跳蹬伸阶段, 绕 Z 轴 (垂直轴) 方向以膝关节力矩最大, 左右腿分别为 $374 \pm 42 \text{ Nm}$ 和 $339 \pm 19 \text{ Nm}$, 其次为髋关节 ($276 \pm 24 \text{ Nm}$ 、 $259 \pm 10 \text{ Nm}$), 踝关节最小。绕 Y 轴 (额状轴) 方向, 则表现出踝关节>髋关节>膝关节的特征。绕 X 轴 (矢

状轴)方向,则为髌关节>膝关节>踝关节。通过以上对比可以看出,踝关节在绕Y轴方向起主要作用,是控制身体前倾的主要关节;膝关节在Z轴起主要作用,是控制身体由侧对球网向正对球网扭转的主要关节;而髌关节在X轴方向起主要作用,是控制身体侧倾的主要关节。这一结果说明,下肢各关节肌群在蹬伸过程中表现出显著的分工不同和相互协作的特点。

3 分析与讨论

与排球拦网动作的非助跑起跳不同,本次研究中所有受试者都采用右脚先于左脚的助跑着地技术,两脚蹬地时间存在显著差异。这一过程体现了非对称性助跑起跳动作中,能量由右脚逐渐过渡到左脚的过程。K D Coutts (1982)^[15]在对86名排球运动员的起跳动作进行研究后发现,与双脚同时起跳不同,非对称性助跑起跳动作在助跑末期的水平速度较低,且双脚同时起跳时的平均GRF更高。Saunders等人(1973)^[16]在对助跑速度与起跳高度的关系进行研究后指出,双脚起跳的最佳助跑速度应保持在个人最大跑动速度的50%—60%,而非越快越好,这与本研究的结果相吻合。从本次研究的结果来看,受试者的起跳蹬伸时间约为0.35 s,明显长于跳远0.099—0.146 s的起跳时间^[17],魏琳洁等人(2015)^[18]对高校高水平男子排球运动员的起跳动作进行研究后发现,过短的起跳时间会削弱双臂的摆动幅度。

本次研究发现,右腿 GRF_{max} 与起跳高度呈高度负相关,表明右腿在着地最大用力的同时,会对起跳效果带来不利影响。Yu B (1999)^[19]和S J Allen等人(2013)^[20]在对三级跳远起跳动作进行分析后发现,水平速度的损失率与垂直起跳速度呈高度正相关,说明下肢的制动是将水平速度转换为垂直速度的关键。在排球扣球起跳过程中,虽然在蹬伸阶段是双脚同时用力起跳,但如果右脚提前发生制动动作,则会影响到运动员最后的起跳高度。本研究中可以明显发现,在双脚同时用力蹬伸阶段,除X方向的 GRF_{max} 外,不论是最大力值还是平均地面反作用力,左脚均大于右脚,左脚 F_y 值约为右脚的两倍(图2),说明左腿在双侧下肢同时用力起跳过程中起主要作用。说明在助跑起跳的前进方向,大部分受试者采取了以左脚为主要制动脚的起跳策略。这说明

右脚不宜过早地参与到制动起跳中,而应将水平速度保持到左脚着地后再进行制动。这也可能与人体利用不同的着地方式来适应相对应程度的负荷有关^[21]。另外,从X轴方向的总体受力情况看,右脚大于左脚,说明在起跳过程中,右脚主要是维持身体在X轴方向的稳定性,以保证身体重心在X轴方向的动量损失最小。

人体起跳过程中地面反作用力的量可以反映出此力对人体作用的累积效果。由于在扣球起跳过程中,与优势腿相比,非优势腿的着地时间往往更长,因此,单比较两腿所受总冲量很有可能造成对非优势腿冲量总值的高估,而选择以优势腿着地时刻作为冲量计算的初始时刻则更为合理。从本次研究的结果可以看出,与CMJ或SJ的对称性起跳动作不同,在非对称性起跳动作的双脚同时用力蹬伸阶段,优势侧大于非优势侧,呈现出双脚用力明显不均匀的特征。而这也直接影响到运动员最后的起跳效果。由双脚冲量差与起跳最大高度的相关性分析结果可知,双脚冲量差越小则起跳高度越高。这种差异性很有可能是在起跳蹬伸阶段,人体重心集中于优势腿一侧的结果造成的。因此,在排球扣球起跳动作过程中,为获得更大的起跳高度,运动员应在保持重心平稳过渡的同时,尽量保证双脚的用力均衡。

从下肢各关节合力矩的情况来看,膝关节合力矩最大,在扣球起跳过程中对提升重心高度起主要作用,这与Kuo Chuan Huang等人^[22]的研究结果一致。而踝关节则主要起制动作用,是将水平速度转化为垂直速度的关键。Richards等人^[23]在分析排球运动员损伤原因时发现,排球运动员起跳过程中踝关节的跖屈力矩约为其他关节的2倍。这是导致排球运动员髌腱炎高发的重要原因之一,也与本研究的结果在一定程度上具有一致性。另外一项研究也发现^[24],围绕踝关节在矢状面内的力矩和围绕膝关节在水平面内的力矩与排球运动员髌腱炎的高发率有一定的相关性。在排球运动的起跳动作中,经常会遇到为防止运动员身体接触球网而迫使运动员由正向球网前进方向突然制动,同时完成接近90°转身动作并起跳,以完成后续的扣球或拦网动作,这一类似于背越式跳高的起跳动作,使得人体膝关节在垂直轴方向受到一个极大的扭矩(本研究结果为左腿 374 ± 42 Nm、右腿 339 ± 19 Nm),而在排球比赛和训练过程中,这一动作又是极为频繁

的。因此, 这很有可能是造成运动员髌腱炎高发的又一主要原因。

4 结论

(1) 在排球扣球的起跳蹬地过程中, 非优势腿不宜过早参与制动起跳, 而应将水平速度保持到优势腿着地后再制动。非优势腿主要起维持身体平衡的作用。

(2) 起跳蹬地过程中, 双下肢地面反作用力的冲量差与起跳最大高度显著相关, 应尽量保证双下肢蹬伸发力的同步性, 以增强起跳效果。

(3) 排球运动员髌腱炎的发病可能与较高的踝关节绕矢状轴力矩以及膝关节绕垂直轴力矩有关。

参考文献:

- [1] Moir G, Button C, Glaister M, et al. Influence of familiarization on the reliability of vertical jump and acceleration sprinting performance in physically active men[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2004, 18(2): 276-280.
- [2] Carlock J M, Smith S L, Hartman M J, et al. The relationship between vertical jump power estimates and weightlifting ability: a field-test approach[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2004, 18(3): 534-539.
- [3] Nuzzo J, McBride J, Cormie P, et al. Relationship between countermovement jump performance and multi-joint isometric and dynamic tests of strength[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2008, 22(3): 699-707.
- [4] Harman E, Rosenstein M, Frykman P, et al. Estimation of human power output from vertical jump. [J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 1991, 5(3): 116-120.
- [5] Sayers S, Harackiewicz D, Harman E, et al. Cross-validation of three jump power equations[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1999, 31(4): 572-577.
- [6] Street G, Mcmillan S, Board W, et al. Sources of Error in Determining Countermovement Jump Height with the Impulse Method[J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 2001, 17(1): 43-54.
- [7] McBride J, Kirby T, Haines T, et al. Relationship Between Relative Net Vertical Impulse and Jump Height in Jump Squats Performed to Various Squat Depths and with Various Loads[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2010, 5(4): 484-496.
- [8] Giatsis G, Kollias I, Panoutsakopoulos V, et al. Biomechanical Differences in Elite Beach-Volleyball Players in Vertical Squat Jump on Rigid and Sand Surface[J]. *Sports Biomechanics*, 2004, 3(1): 145-158.
- [9] Vaverka F, Jandačka D, Zahradnik D, et al. Effect of an Arm Swing on Countermovement Vertical Jump Performance in Elite Volleyball Players[J]. *Journal of Human Kinetics*, 2016, 53(1): 41-50.
- [10] Cronin J, Bressel E, Fkinn L. Augmented feedback reduces ground reaction forces in the landing phase of the volleyball spike jump[J]. *Journal of Sport Rehabilitation*, 2008, 17(17): 148-159.
- [11] Forthomme B, Croisier J, Ciccarone G, et al. Factors correlated with volleyball spike velocity[J]. *American Journal of Sports Medicine*, 2005, 33(10): 1513-1519.
- [12] Vint P, Hinrichs R. Differences Between One-Foot and Two-Foot Vertical Jump Performances [J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 1996, 12(3): 338-358.
- [13] Hatze H. Validity and reliability of methods for testing vertical jumping performance[J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 1998(14): 127-140.
- [14] Kibele A. Possibilities and limitations in the biomechanical analysis of countermovement jumps: A methodological study[J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 1998, 14(1): 105-117.
- [15] Coutts K. Kinetic differences of two volleyball jumping techniques[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1982, 14(1): 57-59.
- [16] Saunders H. A cinematographical study of the relationship between speed of movement and available force. *Earth & Planetary Science Letters*, 1973, 20(2): 250-265
- [17] 金嘉纳, 王士林. 跳远起跳时间的研究(摘要)[J]. *北京体育大学学报*, 1981(4): 33-34.
- [18] 魏琳洁, 万绪鹏. 高校排球男子高水平运动员强攻起跳的运动力学分析[J]. *首都体育学院学报*, 2015, 27(4): 377-379.
- [19] Yu B. Horizontal-to-vertical velocity conversion in the triple jump[J]. *Journal of Sports Sciences*, 1999, 17(3): 221-229.
- [20] Allen S, King M. Trade-offs between horizontal and vertical velocities during triple jumping and the effect on phase distances[J]. *Journal of Bio-*

mechanics,2013,46(5):979-983.

[21] 张枝梅.不同方向的“起跳—着地”对下肢关节影响的生物力学分析[J].首都体育学院学报,2016,28(3):283-288.

[22] Huang K C, Hu L H, Huang C, et al. Kinetic and kinematic differences of two volleyball spiking jumps[C]// 20 International Symposium on Biomechanics in Sports, Caceres, Spain, 2002; 148-151.

[23] Richards D, Ajemian S, Wiley J P, et al. Relation Between Ankle Joint Dynamics and Patellar Tendinopathy in Elite Volleyball Players[J]. Clinical Journal of Sport Medicine, 2002,12(5):266-272.

[24] Sorenson S, Arya S, Souza R, et al. Knee Extensor Dynamics in the Volleyball Approach Jump: The Influence of Patellar Tendinopathy[J]. Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy, 2010,40(9):568-576.

Kinetic Analysis of the Effect of Volleyball Spike Jump for Male Athletes

JIA Yi¹, GUO Jun-fen², YANG Cheng¹

(1. School of Physical Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Shanxi Experimental Primary School, Taiyuan 030002, China)

Abstract: *Objective:* To study the characteristics of the related mechanical parameters of the lower limbs of the male volleyball players during thrust against the ground in spike jump. *Object:* Ten male collegiate volleyball players. *Methods:* The kinematic and kinetic parameters are collected by using the high-speed body movement capture system and the three-dimensional dynamometer. *Results:* ①During the takeoff, the peak and mean of ground reaction of the dominant leg are both larger than the non-dominant leg. ②The peak value of the ground reaction of the non-dominant leg is negatively correlated with the maximum height of the gravity center ($r=-0.961, P=0.002<0.05$). ③ When feet landing at the same time, leg ground reaction force impulse of the dominant leg is significantly greater than the non-dominant leg. And there is a significant negative correlation between the impulse difference of two feet ground reaction and the maximum height of the gravity center ($r=-0.531, P=0.034<0.05$). *Conclusion:* ① In the process of backcourt take-off, the dominant leg and non-dominant leg have a different force form; ② Players should appropriately control the initial braking effect of the non-dominant leg and in the final stage of foot pushing, the participation of the non-dominant leg should be consciously promoted in order to improve the body's take-off height. ③ The incidence of patellar tendonitis of volleyball players may be associated with ankle joint sagittal axis torque and torque around vertical axis of knee joint.

Key words: spike; takeoff; kinetics; volleyball; ground reaction force