

排球运动员动静态平衡能力偏侧性研究

付光亮¹, 鲍春雨^{1,2}, 孟庆华^{3,4,5}, 周鲁星², 孙嘉伟¹, 张楠^{2,5}

(1. 天津体育学院运动训练学院, 301617 天津; 2. 天津体育学院社会体育学院, 301617 天津;
3. 天津体育学院运动健康学院, 301617 天津; 4. 天津体育学院体育经济与管理学院, 301617 天津;
5. 天津市运动损伤与康复虚拟仿真实验教学中心, 301617 天津)

摘要:目的 分析排球运动员优势腿和非优势腿单脚站立和单腿下落的生物力学特征,探究优势腿和非优势腿动静态平衡能力的差异性,为排球运动员姿势控制训练方案设计提供理论方向。方法 选取20名排球运动员优势腿和非优势腿进行30 s睁眼、闭眼单脚站立和40 cm跳箱单腿下落稳定性测试,比较静态站立足底压力中心(center of pressure, COP)参数、触地瞬间关节角度和关节运动幅度、稳定性指数、载荷率、峰值地面反作用力和到达峰值地面反作用力时间的差异。结果 (1)静态平衡能力:睁眼单脚站立非优势腿和优势腿COP指标无显著性差异($P > 0.05$);闭眼单脚站立时,优势腿COP前后方向最大偏移距离和COP前后方向的平均速度与非优势腿相比具有显著性差异($P < 0.05$)。 (2)动态平衡能力:由非优势腿和优势腿单腿落地时GRF所计算的前后稳定性指数、左右稳定性指数、垂直稳定性指数和动态稳定时间具有显著性差异($P < 0.05$);落地缓冲过程中,非优势腿的膝关节、踝关节活动度与优势腿相比具有显著性差异($P < 0.05$);计算优势腿和非优势腿单腿落地时载荷率具有显著性差异($P < 0.05$),载荷率对称性指数显示存在偏侧性。结论 排球运动员优势腿和非优势腿之间的平衡能力存在偏侧性。在静态平衡能力方面,睁眼状态下,双下肢的静态平衡能力相似,而闭眼状态下,优势腿在矢状面的静态平衡能力更好,非优势腿的视觉补偿较多。在动态平衡能力方面,非优势腿优于优势腿,双下肢之间存在偏侧性。在排球运动员体能训练计划中应重点关注并加强非优势腿的闭眼静态平衡能力和优势腿的动态姿势控制训练,从而降低落地损伤的风险和提升单腿支撑发力动作的运动表现。

关键词:排球运动员;动静态平衡能力;偏侧性;运动损伤

中图分类号:G804.63

文献标志码:A

文章编号:1000-4939(2025)05-1182-09

Study of lateralization in dynamic and static balance abilities of volleyball players

FU Guangliang¹, BAO Chunyu^{1,2}, MENG Qinghua^{3,4,5}, ZHOU Luxing², SUN Jiawei¹, ZHANG Nan^{2,5}

(1. School of Sports Training, Tianjin University of Sport, 301617 Tianjin, China; 2. School of Social Sports, Tianjin University of Sport, 301617 Tianjin, China; 3. School of Sports Health, Tianjin University of Sport, 301617 Tianjin, China;

收稿日期:2025-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11372223;11102135);天津市自然科学基金项目(No. 17JCZDJC36000;18JCZDJC35900);国家体育总局科研项目(No. 22KJJCX077;2022pqky-01;24ZDKJCX11);天津市体育局科研项目(No. 22BZ02;24BZ02)

通信作者:鲍春雨,教授。E-mail:chunyubao730102@163.com

引用格式:付光亮,鲍春雨,孟庆华,等.排球运动员动静态平衡能力偏侧性研究[J].应用力学学报,2025,43(5):1182-1190.

FU Guangliang, BAO Chunyu, MENG Qinghua, et al. Study of lateralization in dynamic and static balance abilities of volleyball players[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 43(5):1182-1190.

4. School of Sports Economics and Management, Tianjin University of Sport, 301617 Tianjin, China;

5. Tianjin Virtual Simulation Teaching Center for Sports Injury and Rehabilitation, 301617 Tianjin, China)

Abstract: Objective To analyze the biomechanical characteristics of single-leg stance and single-leg landing in the dominant and non-dominant legs of volleyball players and explore the differences in static and dynamic balance abilities between the two legs so as to provide theoretical guidance for the design of posture control training programs for volleyball players. **Methods** Twenty volleyball players were selected to perform 30-second single-leg stance tests (with eyes open and closed) and 40 cm box jump single-leg landing stability tests using both the dominant and non-dominant legs. The study compared the differences in center of pressure (COP) parameters during static stance, joint angles and range of motion at the moment of ground contact during landing, stability index, loading rate, peak ground reaction force (GRF), and the time to reach peak ground reaction force. **Results** (1) Static balance ability: No significant differences were observed in COP parameters between the dominant and non-dominant legs during single-leg stance with the eyes open ($P > 0.05$). However, during single-leg stance with the eyes closed, the maximum displacement and average velocity of COP in the anterior-posterior direction of the dominant leg showed significant differences compared to the non-dominant leg ($P < 0.05$). (2) Dynamic balance ability: Significant differences were found between the dominant and non-dominant legs in the anterior-posterior stability index, lateral stability index, vertical stability index, and dynamic stability time calculated from GRF during single-leg landing ($P < 0.05$). During the landing cushioning phase, significant differences in knee and ankle joint mobility were observed between the non-dominant and dominant legs ($P < 0.05$). Additionally, the loading rate during single-leg landing showed significant differences between the two legs ($P < 0.05$), and the loading rate symmetry index indicated lateralization. **Conclusion** There is lateralization in the balance abilities between the dominant and non-dominant legs of volleyball players. In terms of static balance ability, the two legs exhibit similar performance under eyes-open conditions. However, under eyes-closed conditions, the dominant leg demonstrates better static balance in the sagittal plane, while the non-dominant leg relies more on visual compensation. In terms of dynamic balance ability, the non-dominant leg performs better than the dominant leg, indicating lateralization between the two legs. In designing physical training programs for volleyball players, special attention should be paid to enhancing the static balance ability of the non-dominant leg under eyes-closed conditions and improving the dynamic posture control of the dominant leg. This will help reduce the risk of landing injuries and improve the performance of single-leg support and force application movements.

Key words: volleyball player; static and dynamic balance ability; lateralization; sports-induced injury

在各种涉及跳跃落地的球类运动中,单腿平衡能力对运动技能的发展非常重要^[1-2],尤其是排球运动员这类高重心球员^[3]。优越的单腿平衡能力能够帮助排球运动员在执行单腿跳跃、侧支撑跳跃、垫步扣球等技术动作时保持身体的稳定和精确控制^[4]。同时,良好的动态单腿平衡能力能够减少排球运动员落地时的下肢损伤^[5]。但目前针对于平衡能力的研究中,通常假设下肢是对称的,只观察一侧的数据指标来评价平衡能力;或者只选取其优势腿的稳定性作为评价基础^[6-7],但这与实际运动并不相符。在比赛中,运动员往往使用一侧腿来执行复杂和力量型动作,而另一侧腿用于支撑和平衡,这称为偏侧性^[8]。偏侧性由神经生理学家 BROWN 等^[9]首次提出,已被证明是影响损伤发生率的因素之一^[10-11],且这种下肢的功能分化和姿势差异对于个体的运动表现产生显著影响。但是目前对于排球运动员下肢平

衡能力的偏侧效应却未得到重视,其优势腿和非优势腿是否存在差异鲜有报道。

基于此,本研究对排球运动员优势腿与非优势腿在单腿站立和单腿下落过程中的运动学、动力学、负载率、稳定性指数等指标进行了比较分析。通过评估双下肢在单腿动静态平衡任务中的差异性,旨在为提升运动表现与损伤预防提供参考数据。

1 研究方法

1.1 研究对象

本研究于2024年5—8月在天津市招募排球运动员参与本实验研究。采用G*Power3.1软件估算样本量,选择较大效应量0.6、显著性水平0.05、检验效能0.8^[12],计算出总样本量为13,考虑到可能

的样本流失,最终选择了20名受试者,其中,一级、二级运动员各10名。运动员在过去6个月内下肢没有任何损伤,且无神经系统或慢性非传染性疾病。本研究已获得天津体育学院伦理会批准(TJUS2023-050)。

1.2 实验流程

1.2.1 静态平衡测试

使用三维测力系统对运动员进行30 s单脚睁眼站立和闭眼站立测试进行数据采集,采样频率为1 000 Hz,使用Bioware软件对采集到的足底压力中心(center of pressure, COP)进行提取,并对数据进行低通滤波处理,截止频率为10 Hz。使用COP位移量化身体摇摆来评估静态平衡。测试时,要求受试者将目光集中在距离身体前方4 m的固定点,双手置于腰间,非测试腿小腿与测试腿垂直,大腿与测试腿平行,单腿站立30 s。在此过程中,测试腿不允许发生任何位置的移动。两条腿交替进行,次数为3次,间歇时间为1 min^[13],每名受试者的起始腿随机确定,见图1(a)。

1.2.2 动态平衡测试

使用三维测力系统和三维运动捕捉系统对运动员在40 cm跳箱单腿下落时的数据进行采集,采样

频率分别为1 000 Hz和200 Hz。运动员按要求站在跳箱上,测试腿抬离跳箱表面并置于跳箱边缘,身体重心逐渐往前移动,当身体重心投影离开跳箱时,身体以自由落体方式下落,然后以单腿姿势降落在测力台中央,且下落瞬间无垂直初速度^[14]。落地后,测试腿自然屈膝进行缓冲,并保持缓冲姿势,非落地腿自然向后弯曲至90°。

测试失败标准^[15]:①落地后支撑腿在10 s内发生位置移动;②落地后躯干出现异常前倾或晃动;③非落地腿接触落地腿或跳箱;④运动员着陆后出现明显的调整动作(如突然停顿或快速摆动)。优势腿和非优势腿的落地标准相同,测试时双腿交替进行,每腿进行3次测试,间隔时间为1 min,见图1(b)。

本研究选择的40 cm的跳箱高度参考了其他项目运动员在进行动态单脚下落平衡能力偏侧性测试时的跳箱高度,如网球^[13]、健美操^[16]和足球运动员^[17]。此高度选择有助于进行跨项目的对比分析。同时,有研究统计了排球运动员在比赛中的跳跃高度,范围为35~50 cm^[18]。因此,选择40 cm作为跳箱高度,既符合排球运动员的实际跳跃高度,也能准确模拟运动员在比赛中的运动状态,从而为动态平衡能力的测试提供合适的实验条件。

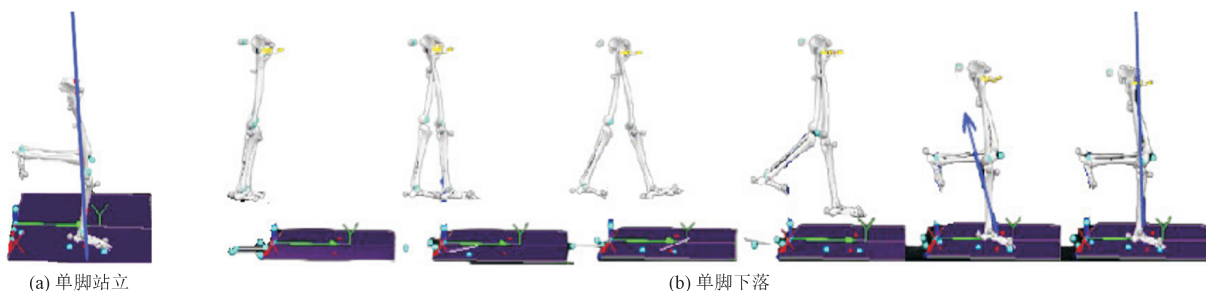


图1 平衡能力测试动作演示

Fig. 1 Demonstration of the balance ability test

本研究采用之前研究中常用的踢球法判断优势腿。测试前,受试者被要求使用左右腿尽全力踢球3次,踢球距离最远的那条腿被定义为优势腿^[13,19]。

1.3 数据处理

1.3.1 静态平衡能力

经Bioware软件导出的 x 轴、 y 轴数值分别代表COP在左右(medial-lateral, ML)和前后(anterior-posterior, AP)位移,对COP数据进行计算。具体指标主要有:COP前后方向最大偏移距离(K_y)、COP左右方向最大偏移距离(K_x)、COP前后方向的平均速度(K_v)、COP左右方向的平均速度(K_u)、95% COP

摇摆面积(K_p)^[20]。相关计算公式为

$$K_y = y_a - y_b \quad (1)$$

$$K_x = x_a - x_b \quad (2)$$

$$K_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_{i+1} - y_i|}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

$$K_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_{i+1} - x_i|}{t_{i+1} - t_i} \quad (4)$$

$$K_p = (x_a - x_b) \times (y_a - y_b) \times \pi \quad (5)$$

式中: K_y 、 K_x 为AP(前后方向)COP范围、ML(左右方向)COP范围; y_a 、 y_b 分别为AP的最大值、最小值; x_a 、 x_b 分别为ML的最大值、最小值; K_v 和 K_u 分别表示COP在AP与ML方向的平均速度,计算方法是把相邻2个时刻的位置差除以时间差,取绝对

值,再对全部 N 个点取平均值; K_p 为 95% 椭圆面积。

图 2 为某一名运动员在实验测试过程中的 COP 运动轨迹。从图中可以直观地看到,该运动员在站立保持平衡时,压力中心点随时间不断变化,在前后 (AP) 和左右 (ML) 2 个方向都有连续的波动。

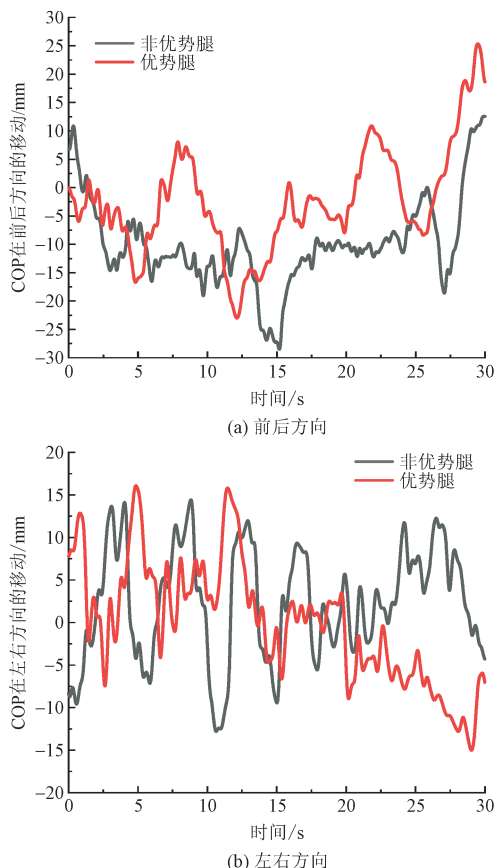


图 2 某运动员睁眼单腿站立 COP 位移轨迹
Fig. 2 COP displacement trajectory of an athlete standing on one leg with his eyes open

1.3.2 动态平衡能力

1) 触地时刻的关节角度:落地瞬间下肢三关节在三维平面内的角度。落地瞬间:垂直地面反作用力 (vertical ground reaction force, VGRF) 首次大于 10 N。

2) 关节活动幅度:从落地瞬间到落地后的 10 s 内下肢三关节的关节活动范围。

3) 稳定性指数

稳定性指数使用初始地面接触后前 3 s GRF 计算 ($VGRF \geq 10$ N)^[9,21],可分为前后稳定性指数 (anterior-posterior stability index, K_s)、左右稳定性指数 (medial-lateral stability index, K_l)、垂直稳定性指数 (vertical stability index, K_i)。

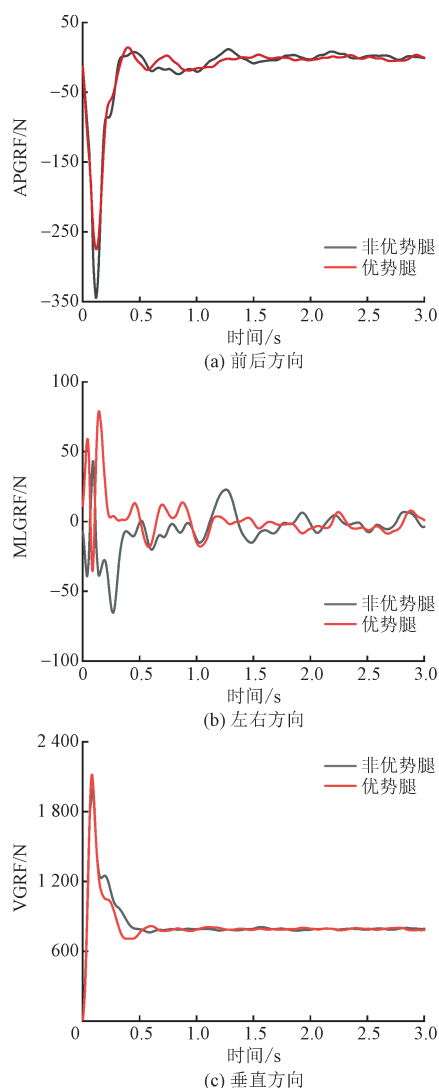
$$K_s = \sqrt{\frac{\sum (0 - F_a)^2}{N}} \div W \quad (6)$$

$$K_l = \sqrt{\frac{\sum (0 - F_m)^2}{N}} \div W \quad (7)$$

$$K_i = \sqrt{\frac{\sum (W - F_v)^2}{N}} \div W \quad (8)$$

式中, K_s 为前后稳定性指数; K_l 为左右稳定性指数; K_i 为垂直稳定性指数; F_a 、 F_m 、 F_v 分别表示前后、左右、垂直方向的地面反作用力; N 为采样点数; W 为体重。

图 3 为某一名运动员在单腿落地过程中地面反作用力的变化曲线。可以看到,随着落地瞬间冲击,3 个方向的力均出现明显波动,反映了下肢对冲击的缓冲与稳定调节过程。



注:前后方向正值代表 GRF 方向向前,负值代表 GRF 方向向后;左右方向正值代表 GRF 方向向右,负值代表 GRF 方向向左;垂直方向正值代表 GRF 方向向上。

图 3 某运动员单腿落地前后方向地面反作用力 (anterior-posterior ground reaction force, APGRF)、左右方向地面反作用力 (medio-lateral ground reaction

force, MLGRF)、VGRF 的变化

Fig. 3 Changes in APGRF, MLGRF, and VGRF of an athlete landing on one leg

4) 受试者落地垂直地面反作用力峰值和到达垂直地面反作用力峰值的时间。其中,垂直地面反作用力峰值进行了标准化处理,以体质量百分比表示^[10]。

5) 载荷率 (loading rate, LR)

$$K_r = \frac{F_p}{t_p} \quad (9)$$

式中: K_r 为载荷率; F_p 为垂直地面反作用力峰值; t_p 为到达垂直地面反作用力峰值所需的时间。

6) 对称指数 (absolute symmetry index, ASI)

$$K_a = \left| \frac{(L_d - L_n)}{0.5 \times (L_d + L_n)} \right| \times 100\% \quad (10)$$

式中: L_d 、 L_n 分别代表优势腿和非优势腿的垂直地面反作用力峰值; K_a 为对称指数。当 $K_a = 0$, 表示下肢两侧对称; 当 $0 < K_a \leq 10\%$, 表示下肢两侧比较对

称; 当 $K_a > 10\%$, 表示下肢不对称。

1.4 统计分析

使用 SPSS 26.0 统计学软件分析处理数据, Shapiro-Wilk 检验验证了数据分布的正态性, 对于符合正态分布的, 对测试指标进行配对 t 检验进行分析; 对于不符合正态分布的, 采用非参数检验。检验水准 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 静态平衡能力测试效果

在静态平衡能力测试中, 优势腿和非优势腿 K_y 、 K_x 、 K_v 、 K_u 、 K_p 指标均没有显著性差异 ($P > 0.05$), 见表 1。

表 1 非优势腿和优势腿单脚平衡站立 COP 指标对比

Tab. 1 Comparison of COP indexes of single-legged balanced standing between non-dominant leg and dominant leg

指标	睁眼			闭眼		
	非优势腿	优势腿	P	非优势腿	优势腿	P
K_y/mm	30.07 ± 4.06	31.09 ± 5.41	0.091	74.52 ± 9.39	64.25 ± 10.64	0.000
K_x/mm	29.61 ± 6.83	30.07 ± 6.19	0.611	68.35 ± 8.29	66.25 ± 8.84	0.184
$K_v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	44.29 ± 7.66	44.19 ± 8.76	0.960	57.35 ± 6.35	65.23 ± 8.69	0.000 5
$K_u/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	44.37 ± 8.19	47.03 ± 7.09	0.148	70.24 ± 6.35	72.05 ± 8.06	0.358
K_p/cm^2	10.65 ± 2.23	10.41 ± 2.55	0.195	15.62 ± 5.3	16.35 ± 3.9	0.279

2.2 动态平衡能力测试结果

2.2.1 单腿落地运动学特征

非优势腿和优势腿在触地瞬间的关节角度无显

著性差异, 见表 2。关节活动度方面, 在矢状面内非优势腿的膝关节、踝关节活动度显著大于优势腿; 在额状面内优势腿膝关节活动度显著大于非优势腿, 见图 4。

表 2 非优势腿和优势腿触地瞬间的关节角度对比

Tab. 2 Comparison of joint angles between the non-dominant leg and the dominant leg at the moment of touching the ground

部位	指标	非优势腿关节角度/(°)	优势腿关节角度/(°)	P
踝关节	背屈(+)/跖屈(-)	-20.23 ± 5.6	-22.21 ± 4.5	0.343
	内翻(+)/外翻(-)	-0.82 ± 2.3	-1.1 ± 3.2	0.738
	内旋(+)/外旋(-)	4.35 ± 5.27	3.62 ± 4.52	0.822
膝关节	屈曲(+)/伸展(-)	19.52 ± 4.63	18.32 ± 5.39	0.161
	内收(+)/外展(-)	-0.75 ± 2.62	-1.12 ± 2.93	0.515
	内旋(+)/外旋(-)	-3.41 ± 6.81	-2.6 ± 5.9	0.592
髋关节	屈曲(+)/伸展(-)	33.52 ± 11.45	30.68 ± 10.38	0.281
	内收(+)/外展(-)	-7.61 ± 3.92	-6.92 ± 3.85	0.671
	内旋(+)/外旋(-)	-3.93 ± 8.69	-4.31 ± 7.29	0.819

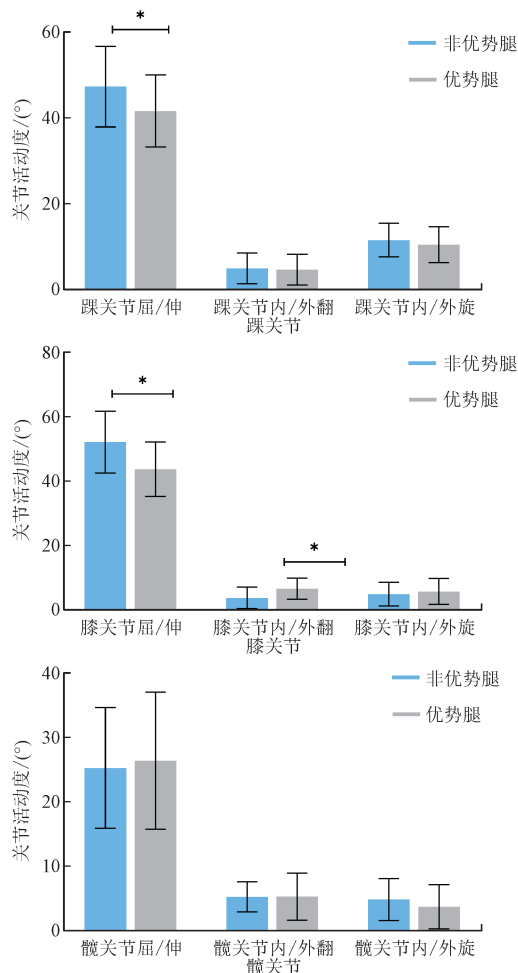


图4 非优势腿和优势腿落地缓冲过程中关节活动度对比

Fig.4 Comparison of range of motion between non-dominant leg and dominant leg during landing cushioning

2.2.2 单腿落地动力学特征

由表3可以看出,非优势腿和优势腿的 F_p 无显著性差异; t_p 和 K_a 具有显著性差异,见表3。 K_i 值为 18.31 ± 6.45 ,大于10%。

表3 非优势腿和优势腿单腿落地动力学特征指标对比

Tab.3 Comparison of the dynamic characteristics of single-leg landing between non-dominant leg and dominant leg

指标	非优势腿	优势腿	P
F_p	2.12 ± 0.21	2.31 ± 0.31	0.231
t_p	96.36 ± 7.42	89.55 ± 7.66	0.03
$K_a / (kg \cdot s^{-1})$	62.64 ± 9.32	69.18 ± 7.33	0.042

2.2.3 单腿落地稳定性指标

在动态平衡能力测试中,非优势腿的 K_s 、 K_l 、 K_i 均显著小于优势腿,见图5。

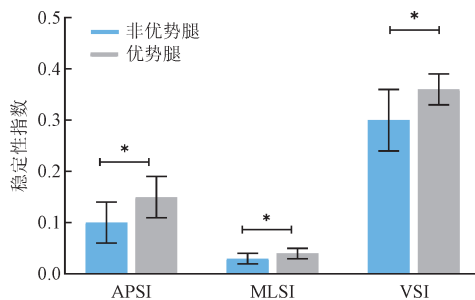


图5 非优势腿和优势腿稳定性指数指标对比

Fig.5 Comparison of stability indexes between non-dominant leg and dominant leg

3 讨论与分析

在本研究中,判断优势腿和非优势腿的方法是根据踢足球时常用的腿,或踢的更远的那条腿来确定。这种方法已在多个运动项目中使用,包括足球^[17]、网球^[13]、自由式滑雪^[7]、竞技健美操^[16]等,而不仅仅是依据运动员从事的特定项目来进行分类。因此,本研究也采用相同的方法来判断排球运动员的优势腿。研究发现,静态平衡测试中,睁眼时,优势腿和非优势腿的平衡表现结果相同,但闭眼时,优势腿的平衡能力明显更强。这表明视觉在平衡控制中起着重要作用^[20]。动态平衡测试中,非优势腿在各个方向的稳定性和恢复能力较强,说明其在着陆时具备更好的生物力学适应能力和神经肌肉控制能力,尤其表现在高强度运动中。

3.1 静态平衡能力

在排球比赛中,良好的静态平衡能力能够帮助运动员从静止状态平稳过渡到动态运动。研究显示,睁眼和闭眼时的不同表现,突出了视觉在保持平衡中的关键作用。KOZINC^[13]的研究表明,平衡控制涉及多个系统:神经肌肉系统控制身体姿势;前庭和本体感觉系统提供身体位置感;视觉系统提供位置信息^[22]。在这些系统中,视觉对姿势控制至关重要。当其他感觉受到影响时,视觉补偿会发挥重要作用。闭眼测试中,优势腿和非优势腿的 K_v 和 K_u 数据说明,双腿在前后方向上的姿势控制能力不同。已有研究提出,当身体平衡受到干扰时,肌肉和本体感觉组成的动态抑制系统可以帮助维持稳定^[23]。肌力研究显示,优势腿肌肉力量通常大于非优势腿^[17]。排球运动员在比赛和训练时常做前后方向的移动和跳跃,因此,优势腿承担更多负荷,促进了

肌肉的进一步发展,从而提高了平衡控制能力。在日常训练中,运动员应注重非优势腿的强化,以弥补视觉信息缺失对平衡的影响,从而在复杂的比赛环境中提高稳定性和反应能力。

3.2 动态平衡能力

在排球运动中,跳跃着陆要求下肢具备更强的稳定性,尤其是在击球或拦网后着陆过程中,运动员需要迅速恢复平衡并缓冲冲击。单腿着地是模拟排球运动中落地的常见方式,由于其较高的复杂性^[24],经常用于实验室测试。测试中,运动员落地后对重心的控制可直接反映其受伤风险。 K_s 、 K_l 、 K_r 分别衡量身体重心在各个方向上的减速能力^[23]。数据表明,非优势腿在各个方向上的稳定性优于优势腿,显示其在着陆过程中的生物力学适应能力,特别是在高强度运动中,非优势腿通过训练和适应,能够更有效的控制落地。同时 ZAHRADNIK 等^[25]研究也发现,运动员在单侧跳跃着陆时,优势腿的膝关节和踝关节的晃动频率较高,表现出明显的偏侧性。

进一步分析表明,在着陆的初期,优势腿和非优势腿在三维方向上差异不显著,说明运动员在此阶段采取了相似的落地策略。偏侧性主要出现在后续的缓冲阶段。通过比较双腿在矢状面内的关节活动度,发现非优势腿在缓冲过程膝、踝关节的活动度较大。研究指出,“软着陆”^[16]是一种降低运动损伤风险的有效策略,非优势腿在着陆时的损伤风险较低。 K_r 是作为衡量运动员吸收地面反作用力的能力,是评估落地缓冲模式的重要指标^[17]。研究发现,优势腿的 K_r 和 K_s 表明,双下肢在长期训练中未能均衡承受冲击力。 K_r 与 K_p 以及 t_p 紧密相关。尽管 F_p 在双腿间没有明显不同,优势腿的 t_p 却显著小于非优势腿,表明优势腿在对落地冲击的反应更快。根据运动学数据结果,推测优势腿和非优势腿在着陆时采取了不同的策略。优势腿主要依赖刚性组织(如韧带、关节)进行缓冲,这虽然能快速完成着陆,但也可能带来韧带损伤等过度冲击相关伤害。相比之下,非优势腿通过更协调的方式分担冲击力,尤其是通过髌、膝关节的肌肉群。研究表明,下肢关节的缓冲能力和平衡能力的差异,反映了神经肌肉控制的差异^[26-27]。神经系统通过调节肌肉活动,帮助运动员有效吸收冲击并保持平衡^[28]。在非优势腿着陆时,神经系统通过优化控制策略,使相关肌群协调工作,分散地面反作用力,从而减轻关节和韧带的压力。

与此相比,优势腿的神经肌肉控制可能较不灵活,特别是在面临较大冲击时。

此外,运动学指标的差异不仅体现在矢状面,额状面也显示出差异。研究发现,优势腿在着陆过程中膝关节的内外翻角度显著大于非优势腿。膝关节不稳是前交叉韧带损伤的危险因素^[11,29],特别是运动员需要快速适应复杂的运动任务时。面对较高的 K_r ,优势腿未能通过踝、膝、髌在矢状面内有效缓冲,反而通过增加额状面内的关节活动幅度来进行过度补偿^[30]。这种补偿机制可能导致 ACL 等韧带的过度牵拉,从而增加损伤风险。根据本研究结果可以推测,非优势腿较高的稳定性可能与其更高效的肌肉协同模式和神经控制策略密切相关。通过较早启动并更协调地工作,非优势腿能更好地分担冲击力,减轻着陆负荷。未来的肌电图研究^[31]将有助于更直观的了解非优势腿如何协调肌肉群来降低冲击负荷,并为排球运动员偏侧性和损伤防护提供更有力的数据支持。

本研究存在的局限性:①在测试数据中缺乏表面肌电数据,无法从神经肌肉控制角度更加直观准确的了解排球运动员动静态平衡能力的偏侧性;②在动态平衡能力测试中本研究只调查了与前向跳跃着陆相关的动态稳定性。尽管这可能是实际比赛中最常见的情况,但它并不是唯一的单腿落地方式,在后续的研究测试多个跳跃着陆方向,如侧向和斜向;③运动疲劳和脑力疲劳同样会影响优势腿和非优势腿在动静态平衡任务中运动表现,从而会影响偏侧性的结果,在后续的研究中应将此因素考虑进行考虑。

4 结 论

排球运动员在动静态平衡能力上表现出一定的偏侧性。在静态平衡方面,睁眼时双腿的平衡能力相似;而在闭眼状态下,优势腿在矢状面内的静态平衡表现优于非优势腿,且非优势腿依赖更多视觉补偿。在动态平衡方面,非优势腿的表现优于优势腿,显示出明显的偏侧性。因此,未来的训练计划应侧重提升非优势腿的闭眼静态平衡能力和优势腿的动态平衡能力,从而改善运动表现并降低受伤风险。

参考文献:

- [1] 梁志强,江勇,教富佳,等.靶向性调控胫骨前肌对静态平衡的

- 影响——基于经颅直流电刺激的干预[J]. 应用力学学报, 2023, 40(1): 225-233.
- LIANG Zhiqiang, JIANG Yong, JIAO Fujia, et al. Effect of targeted modulation of the anterior tibialis muscle via transcranial direct current stimulation on static balance[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(1): 225-233 (in Chinese).
- [2] 刘涛, 杨永泰. 不同站姿足底压力分布与足弓结构特征的相关性[J]. 医用生物力学, 2023, 38(6): 1093-1099.
- LIU Tao, YANG Yongtai. Correlation between plantar pressure distributions and arch structural features in different standing positions[J]. Journal of medical biomechanics, 2023, 38(6): 1093-1099 (in Chinese).
- [3] 王骏昇, 荣湘江, 尹军, 等. 不同水平排球运动员平衡功能与认知功能的相关性研究[J]. 中国康复医学杂志, 2018, 33(9): 1043-1049.
- WANG Junsheng, RONG Xiangjiang, YIN Jun, et al. Correlation analysis between balance function and cognitive function of volleyball players in different levels[J]. Chinese journal of rehabilitation medicine, 2018, 33(9): 1043-1049 (in Chinese).
- [4] BISHOP C, TURNER A, READ P. Effects of inter-limb asymmetries on physical and sports performance: a systematic review[J]. Journal of sports sciences, 2018, 36(10): 1135-1144.
- [5] 李旭鸿, 范年春, 韩斌, 等. 排球运动员落地技术特征研究[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(3): 279-283, 312.
- LI Xuhong, FAN Nianchun, HAN Bin, et al. The characteristics of landing techniques of volleyball players[J]. Chinese journal of sports medicine, 2015, 34(3): 279-283, 312 (in Chinese).
- [6] LEPORACE G, PEREIRA G R, NADAL J, et al. Differences in time-frequency representation of lower limbs myoelectric activity during single and double leg landing in male athletes[J]. Journal of electromyography and kinesiology, 2011, 21(3): 506-511.
- [7] 崔鑫泽, 王新. 自由式滑雪运动员优势腿与非优势腿下落时力学参数对比[J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 413-414.
- CUI Xinze, WANG Xin. Comparison of mechanical parameters of dominant and non-dominant legs of freestyle skiers when they fall[J]. Journal of medical biomechanics, 2021, 36(S1): 413-414 (in Chinese).
- [8] SADEGHI H, ALLARD P, PRINCE F, et al. Symmetry and limb dominance in able-bodied gait: a review[J]. Gait & posture, 2000, 12(1): 34-45.
- [9] BROWN C N, KO J, ROSEN A B, et al. Individuals with both perceived ankle instability and mechanical laxity demonstrate dynamic postural stability deficits[J]. Clinical biomechanics, 2015, 30(10): 1170-1174.
- [10] 毛晓锬, 张秋霞, 王国栋, 等. 优势侧和非优势侧跑步支撑期的生物力学偏侧性研究[J]. 首都体育学院学报, 2017, 29(1): 91-96.
- MAO Xiaokun, ZHANG Qiuxia, WANG Guodong, et al. Biomechanical laterality effect between the dominant and non-dominant during running support phase[J]. Journal of Capital University of Physical Education and Sports, 2017, 29(1): 91-96 (in Chinese).
- [11] PROMSRI A, LONGO A, HAID T, et al. Leg dominance as a risk factor for Lower-Limb injuries in downhill skiers—a pilot study into possible mechanisms[J]. International journal of environmental research and public health, 2019, 16(18): 3399.
- [12] 刘林, 马勇, 蒯世杰, 等. 跆拳道运动员前横踢动作优势侧和非优势侧的生物力学偏侧性研究[J]. 武汉体育学院学报, 2023, 57(1): 73-81.
- LIU Lin, MA Yong, LIN Shijie, et al. Biomechanics research on laterality effect between dominant and non-dominant during front cross kick in taekwondo[J]. Journal of Wuhan Sports University, 2023, 57(1): 73-81 (in Chinese).
- [13] KOZINC Ž, ŠARABON N. The effects of leg preference and leg dominance on static and dynamic balance performance in highly-trained tennis players[J]. PLoS one, 2021, 16(11): e0259854.
- [14] 张美珍, 郭浩, 刘卉, 等. 不同运动性疲劳方案对足球专项大学生躯干和下肢运动学特征的影响[J]. 中国体育科技, 2022, 58(8): 32-40.
- ZHANG Meizhen, GUO Hao, LIU Hui, et al. Effect of different fatigue protocols on trunk and lower extremity kinematics for collegiate soccer players[J]. China sport science and technology, 2022, 58(8): 32-40 (in Chinese).
- [15] HOUJ Q, NITSCHKE M A, YI L Y, et al. Effects of transcranial direct current stimulation over the primary motor cortex in improving postural stability in healthy young adults[J]. Biology, 2022, 11(9): 1370.
- [16] 王莉莉, BIN WAN PA W A M, 王宇轩, 等. 高校竞技健美操运动员落地偏侧性和稳定性的生物力学研究[J]. 中国运动医学杂志, 2024, 43(4): 266-274.
- WANG Lili, BIN WAN PA W A M, WANG Yuxuan, et al. Biomechanical study of laterality and stability during double-leg landing of college competitive aerobics athletes[J]. Chinese journal of sports medicine, 2024, 43(4): 266-274 (in Chinese).
- [17] 刘海瑞, 傅维杰, 伍颢, 等. 单腿落地时优势腿与非优势腿的生物力学偏侧性研究[J]. 体育科学, 2014, 34(8): 70-76.
- LIU Hairui, FU Weijie, WU Xie, et al. Biomechanics research on laterality effect between dominant and non-dominant leg during single leg landing[J]. China sport science, 2014, 34(8): 70-76 (in Chinese).
- [18] DEBIEN P B, MANCINI M, COIMBRA D R, et al. Monitoring training load, recovery, and performance of Brazilian professional volleyball players during a season[J]. International journal of sports physiology and performance, 2018, 13(9): 1182-1189.
- [19] PAPPAS E, CARPES F P. Lower extremity kinematic asymmetry in male and female athletes performing jump-landing tasks[J]. Journal of science and medicine in sport, 2012, 15(1): 87-92.
- [20] 王文文, 张万琴, 吕娇娇, 等. 高精度经颅直流电刺激对慢性踝关节不稳人群平衡功能、肌力及本体感觉的影响[J]. 应用力学学报, 2025, 42(3): 694-703.
- WANG Wenwen, ZHANG Wanqin, LÜ Jiaojiao, et al. Effects of high-definition transcranial direct current stimulation on balance function, muscle strength and proprioception in patients with chron-

- ic ankle instability [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(3): 694-703 (in Chinese).
- [21] FRANSZ D P, HUURNINK A, DE BOODE V A, et al. Time to stabilization in single leg drop jump landings: an examination of calculation methods and assessment of differences in sample rate, filter settings and trial length on outcome values [J]. Gait & posture, 2015, 41(1): 63-69.
- [22] 付光亮, 孟庆华, 鲍春雨. 功能性踝关节不稳者本体感觉力学差异及平衡训练干预效果 [J]. 应用力学学报, 2021, 38(6): 2426-2431.
FU Guangliang, MENG Qinghua, BAO Chunyu. Differences in proprioceptive mechanics and the intervention effect of balance training in functional ankle arthropods [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(6): 2426-2431 (in Chinese).
- [23] 张帆, 王竹影, 吴志建, 等. 踝关节稳定程度差异对侧跳落地缓冲模式影响的研究 [J]. 中国体育科技, 2020, 56(2): 46-63.
ZHANG Fan, WANG Zhuying, WU Zhijian, et al. Influence of ankle stability difference on landing buffer mode of side hop [J]. China sport science and technology, 2020, 56(2): 46-63 (in Chinese).
- [24] 殷冉. 三种方向起跳对人体着地时下肢肌肉、关节的影响差异研究 [J]. 基因组学与应用生物学, 2019, 38(8): 3719-3725.
YIN Ran. Study on the different effects of take-off in three directions on muscles and joints of lower limb when human landing [J]. Genomics and applied biology, 2019, 38(8): 3719-3725 (in Chinese).
- [25] ZAHRADNIK D, JANDACKA D, UCHYTIL J, et al. Lower extremity mechanics during landing after a volleyball block as a risk factor for anterior cruciate ligament injury [J]. Physical therapy in sport, 2015, 16(1): 53-58.
- [26] 于越, 刘冬森, 阮槟, 等. 平衡训练对慢性踝关节不稳疗效的研究进展 [J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(12): 1374-1383.
- YU Yue, LIU Dongsun, RUAN Bin, et al. Advance in balance training for chronic ankle instability: a systematic review [J]. Chinese journal of rehabilitation theory and practice, 2019, 25(12): 1374-1383 (in Chinese).
- [27] 魏智丰, 王子朴, 杜承润, 等. 平衡能力训练在下肢运动损伤预防及康复中的应用研究 [J]. 中国体育科技, 2022, 58(10): 9-13.
WEI Zhifeng, WANG Zipu, DU Chengrun, et al. Study on application of balance training in the prevention and rehabilitation of lower limbs sports injury [J]. China sport science and technology, 2022, 58(10): 9-13 (in Chinese).
- [28] 臧宇, 许贻林, 项晓琰, 等. 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 [J]. 体育科学, 2023, 43(1): 41-49.
ZANG Yu, XU Yilin, XIANG Xiaoyan, et al. An analysis of drop jump performance of High-Level sprinters: from the lower-limb joint biomechanics perspective [J]. China sport science, 2023, 43(1): 41-49 (in Chinese).
- [29] LAUGHLIN W A, WEINHANDL J T, KERNOZEK T W, et al. The effects of single-leg landing technique on ACL loading [J]. Journal of biomechanics, 2011, 44(10): 1845-1851.
- [30] MUNSCH A E, EVANS-PICKETT A, DAVIS-WILSON H, et al. Limb underloading in walking transmits less dynamic knee joint contact forces after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. Medicine & science in sports & exercise, 2025, 57(4): 849-856.
- [31] 刘鑫玥, 霍洪峰. 不同类型和负荷双任务对健康人动态姿势控制的影响 [J]. 医用生物力学, 2023, 38(4): 791-796.
LIU Xinyue, HUO Hongfeng. Effects of dual tasks with different types and loads on dynamic postural control in healthy adults [J]. Journal of medical biomechanics, 2023, 38(4): 791-796 (in Chinese).

(编辑 张璐)