



## 越野滑雪运动员下肢双侧力亏损研究 Research on Bilateral Deficit in Lower Limbs of Cross-Country Skiers

束洋<sup>1</sup>, 李海鹏<sup>1</sup>, 梁志强<sup>2</sup>, 尚磊<sup>3</sup>, 陈辉<sup>4</sup>, 付乐<sup>5</sup>, 陈小平<sup>1\*</sup>  
SHU Yang<sup>1</sup>, LI Haipeng<sup>1</sup>, LIANG Zhiqiang<sup>2</sup>, SHANG Lei<sup>3</sup>, CHEN Hui<sup>4</sup>,  
FU Le<sup>5</sup>, CHEN Xiaoping<sup>1\*</sup>

**摘要:**目的:分析越野滑雪项目双侧力亏损现象,探究双侧力亏损与竞技能力的关系,并为训练提供建议。方法:对10名越野滑雪运动员多次比赛的FIS积分进行排名,并对运动员专项运动水平进行排序。随后将其分为双侧、优势侧与非优势侧3组并分别进行等长大腿中段拉(isometric mid-thigh pull, IMTP)测试、反向跳(countermovement jump, CMJ)测试、跳深(drop jump, DJ)测试,分析不同指标结果以及双侧力亏损与专项运动水平之间的相关性。结果:IMTP测试中,运动员专项运动水平越高,峰值压力双侧力亏损越低;CMJ与DJ测试中,纵跳高度双侧力亏损也随着专项运动水平的提升而下降。结论:专项运动水平与双侧力亏损之间存在负相关,双侧力亏损可以作为潜在指标分析运动员专项能力;同时可以通过单双侧相结合的力量训练降低双侧力亏损。

**关键词:** 双侧力亏损; 双侧力增益; 越野滑雪

**Abstract:** Objective: To investigate the relationship between the bilateral deficit and competitive ability as well as to provide suggestions for training by analyzing the phenomenon of bilateral deficit in cross-country skiing. Methods: The FIS points of 10 cross-country skiers in multiple competitions and their skiing performance were ranked. Then they were divided into three groups: Bilateral, dominant, and non-dominant, and were tested by isometric mid-thigh pull (IMTP), countermovement jump (CMJ) test, and drop jump (DJ) test respectively to analyze the results of different indexes and the correlation between bilateral deficit and specific sports performance. Results: In the IMTP test, the better the athlete's specific sport performance, the lower the bilateral deficit in the peak pressure. In the CMJ and DJ tests, the bilateral deficit in the vertical jump significantly decreased with the increase in skiing performance. Conclusions: Bilateral deficit is negatively associated with skiing performance, and bilateral deficit can be used as a potential index to analyze the special ability of cross-country skiers and can be reduced by combining unilateral and bilateral strength training.

**Keywords:** bilateral deficit; bilateral facilitation; cross-country skiing

**中图分类号:** G863.13 **文献标识码:** A

### 基金项目:

国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2018YFF0300901); 国家自然科学基金项目(19BTY099)

### 第一作者简介:

束洋(1991-),男,博士,主要研究方向为运动生物力学,E-mail:shuyang@ciss.cn。

### \*通信作者简介:

陈小平(1956-),男,教授,博士,主要研究方向为运动训练,E-mail:chenxiaoping@ciss.cn。

### 作者单位:

1. 国家体育总局体育科学研究所, 北京 100061;
  2. 上海体育学院, 上海 200438;
  3. 北京体育大学, 北京 100084;
  4. 重庆第二师范学院, 重庆 400065;
  5. 南京体育学院, 江苏 南京 210046
1. China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China;
  2. Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China;
  3. Beijing Sport University, Beijing 100084, China;
  4. Chongqing University of Education, Chongqing 400065, China;
  5. Nanjing Sport Institute, Nanjing 210046, China.

双侧力亏损(bilateral deficit, BLD)作为一种机体神经系统抑制现象,用于描述双侧肢体共同收缩发力与单侧单独收缩发力之间的肌肉力量差异(冯兆儒, 2020),单侧力量之和大于双侧同时发力之和的现象则可称为双侧力亏损。其生成的机制尚未明确,一般认为受心理、运动形式、生理和神经因素4个方面影响(汪洋, 2016; Aune et al., 2013)。基于同源肢体之间在中枢神经中的关系,双侧力亏损主要由神经肌肉系统的限制造成(Howard et al., 1991)。

双侧力亏损是一项普遍存在于各种项目中的现象,在很大程度上,其对于运动表现的影响还无法准确判断(Hoffman et al., 2007; Škarabot et al., 2016)。当前双侧力亏损的研究主要集中在夏季项目,但鲜见对冬季项目的研究。越野滑雪(cross-country skiing)作为一项重要的冬季项目,运动员经常依据比赛地形和复杂环境进行多种技术转换

(蔡旭旦等, 2021; 焦怡然等, 2021; 袁献双等, 2021; Andersson et al., 2010)。越野滑雪自由式比赛中通常采用抛镐技术(Gear2)、一步一撑(Gear3)和两步一撑(Gear4)(包蕾等, 2021; 李秋捷等, 2021; Kvamme et al., 2005), 较多依赖不对称力量, 通过交替下肢的蹬动力使运动员快速前进, 动作完成需要运动员先后完成两侧蹬动, 运动模式类似于反向跳(countermovement jump, CMJ)。因此 CMJ 可以作为越野滑雪项目评价双侧力亏损的重要指标。然而, 因滑雪路程延长, 运动员运动中需要使用更大的力量来前进, 也使等长大腿中段拉(isometric mid-thigh pull, IMTP)成为测量越野滑雪运动员滑行能力的又一重要方法。

本研究以越野滑雪项目为研究对象, 采用 IMTP 测试对下肢等长运动的爆发力以及最大力量双侧力亏损表现进行静态评价(路恒等, 2022)。同时, CMJ 以及跳深(drop jump, DJ)均可以观察到双侧力亏损现象(Železnik et al., 2022), 因此采用这 2 种纵跳方式对双侧下肢力亏损进行动态研究。通过对下肢双侧和单侧最大力量及爆发力测试, 探讨不同水平越野滑雪运动员的双侧力亏损现象及其影响因素, 并为运动员的训练提出相关性建议。

## 1 实验方法

### 1.1 测试对象

测试对象为 10 名越野滑雪国家集训队高水平男子运动员, 运动员技术等级均为一级运动员及以上。运动员平均身高为(177.7±5.6)cm, 体质量为(67.8±5.2)kg, 平均体脂百分比为 11.3%±1.5%。受试者测试前 2 天内没有进行大强度训练, 测试期间身体健康, 测试前告知其测试内容, 并签署知情同意书。FIS 积分系统是国际滑雪联合会针对滑雪项目系列赛采用的评分标准, 通过对比赛积分(对比第一名比赛用时)与比赛罚分(场地标准)相加, 以世界越野滑雪运动员第一名为“0 分”标准进行评分, FIS 积分可以用来评价运动员专项运动表现能力。根据国际滑雪联合会规则, 运动员比赛用时越短, FIS 积分越低。根据测试时间, 分别选取运动员 2021 年 6—8 月 6 次 FIS 短距离和 9 次长距离积分中位数进行个人成绩排名(表 1)。

### 1.2 测试方法

由于左右腿对比无明显差异, 但优势侧力值显著高于非优势侧(Dos'Santos et al., 2017), 因此本研究将以优势侧与非优势侧进行对比。首先通过询问受试者下肢运动习惯, 将比赛中的发力腿认定为优势腿。受试者热身 15 min 后随机进行 3 种测试: 1) IMTP; 2) CMJ; 3) DJ。每种测试包含双侧、优势侧和非优势侧 3 组, 每组完成 3 次, 组间休息 30 s。测试仪器采用双侧测力台(Kistler, FD4000, 1 000 Hz)进行下肢左右侧垂直方向力值采集。受试者首

先安静站于测力台上, 记录测力台压力为身体重力, 并据此对之后测量的力值数据进行标准化记录。

表 1 2021 年 6—8 月越野滑雪运动员 FIS 积分排名  
Table 1 FIS Points Ranking of Cross-Country Skiers  
from June to August, 2021

姓名	短距离积分	长距离积分	平均积分	积分排名
×强	127.9	93.8	110.8	1
马×	227.3	198.2	212.8	2
哈××	275.3	185.4	230.3	3
古×××	231.8	264.6	248.2	4
乌××	264.6	260.1	262.4	5
×龙	246.0	294.2	270.1	6
马××	245.9	314.3	280.1	7
陈××	260.5	312.1	286.3	8
蔡××	266.4	319.5	293.0	9
赵×	270.2	458.6	364.4	10

#### 1.2.1 IMTP 测试

双侧组中, 受试者平稳站立于测力台上 5 s, 测力台测量静态压力。随后受试者双手正握杠铃杆并稳定站立后, 快速用力蹬测力台, 用最短时间达到最大拉力, 全力保持 5 s(图 1)。测试需符合 IMTP 测试“力-时间曲线”结果标准(路恒等, 2022)。右侧组需要受试者右腿单腿站立, 对侧腿左腿抬起保持屈膝 90°完成以上测试。左侧组则需要受试者左腿单腿站立, 而右腿抬起保持屈膝 90°完成测试。

#### 1.2.2 CMJ 测试

双侧组中, 受试者双手掐腰, 两脚分开站立在测力台上, 先向下屈蹲 90°后用力向上跳起, 落地时双脚需完全落在测力台上。CMJ 测试过程分为起跳、腾空和落地阶段, 并通过测力台记录受试者垂直地面反作用力、功率及速度数据。右侧组需要受试者右腿单腿站立在测力台上, 左腿全程屈膝不接触地面, 右腿跳起后并单脚落在测力台上。左侧组则需要受试者左腿单腿站立, 右腿全程不接触地面。

#### 1.2.3 DJ 测试

双侧组中, 受试者双手掐腰, 从 45 cm 高跳箱上直腿自由下落, 双脚落地在测力台上, 随即快速反弹, 尽最大能力垂直跳起到最大高度, 最终落在测力台上。通过测力台记录受试者垂直地面反作用力、功率及速度数据。DJ 测试分为 3 个阶段: 1) 落地; 2) 腾空; 3) 再次落地(图 2)。左侧组需要受试者左脚落在测力台上, 左脚单脚再次起跳至再次落在测力台上。右侧组则需要受试者右脚全程接触地面。

### 1.3 统计方法

所有数据指标由测试系统进行自动化标准化处理后导出, 双侧力亏损计算统一使用公式(1)计算 BI 系数:

$$BI = \left( \frac{\text{双侧}}{\text{左侧} + \text{右侧}} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

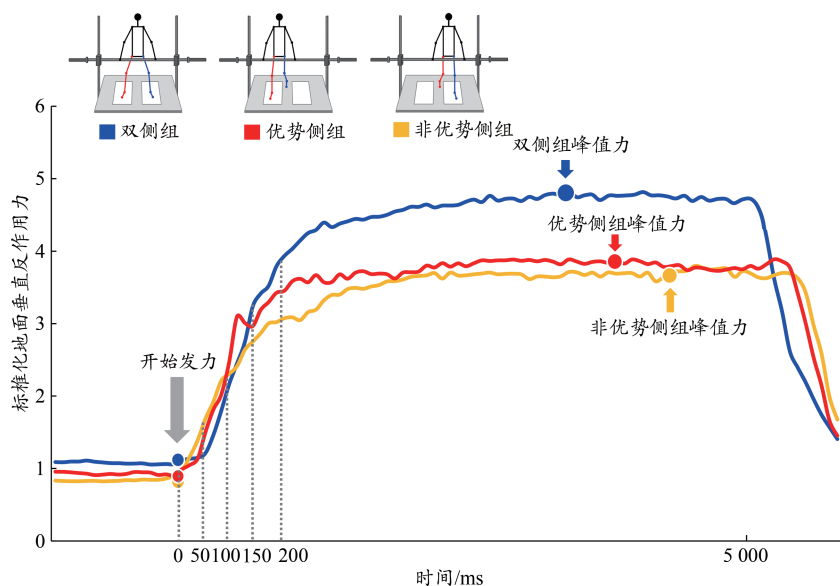


图1 不同组别IMTP测试地面反作用力示意图

Figure 1. Ground Reaction Force in Different Groups of IMTP Test

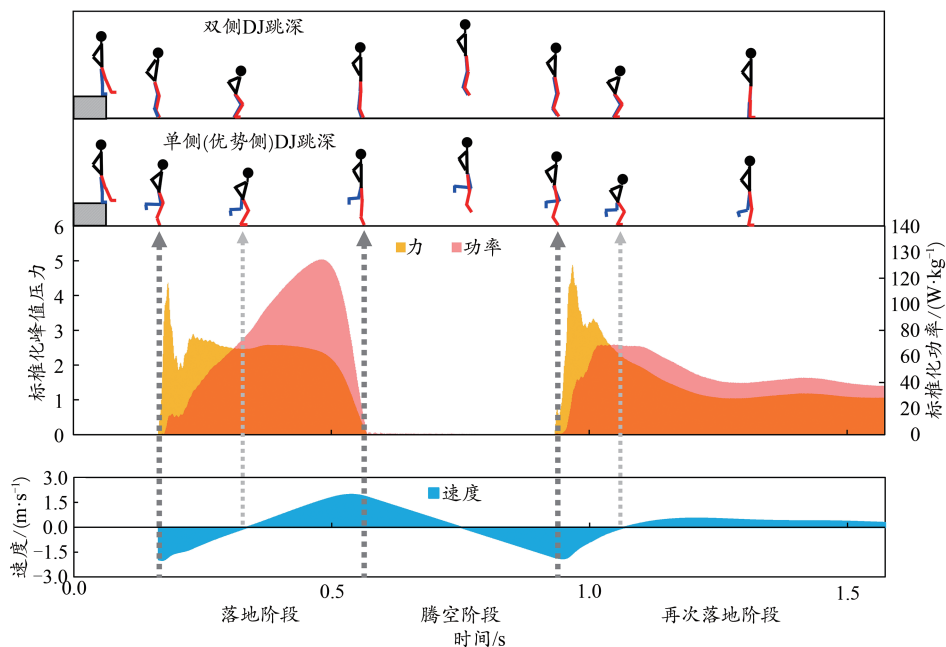


图2 DJ测试的压力、功率和速度随时间曲线的阶段特征

Figure 2. Force-, Power- and Velocity-Time Curve Phase Characteristics of DJ Test

BI系数范围受到测试方法、受试人群、有无训练经验等因素的影响,一般处于-5~-25%即为双侧力亏损(Häkkinen et al., 1997; Howard et al., 1991; Kuruganti et al., 2006)。

采用SPSS 26.0进行分析,统计数据采用平均值±标准差( $M \pm SD$ )表示。结果均进行参数检验。在IMTP测试中,采用单因素及多因素重复测量方差分析比较不同时间点指标,对于主效应和交互作用的显著性采用Bonferroni进行检验,当交互作用显著时进行Post-hoc检验;对于双侧组、优势侧组与非优势侧组之间的差异性采用单因素方差分析检验,显著性为 $P < 0.05$ ;不同指标结果

的相关性采用Pearson相关分析(数据正态或近似正态分布)或Spearman相关分析(数据严重偏态分布)。如果符合线性相关( $P < 0.05$ )进一步进行线性回归分析,显著性为 $P < 0.05$ ,并报告 $r^2$ 。

## 2 测试结果

### 2.1 IMTP测试

通过双因素重复测量方差分析0~200 ms力值变化情况(图3),经过球形检验并校正后,发现不同侧的测试与时间无交互作用( $F = 2.412, P = 0.075$ )。同时,单双侧姿

态对于力值的主效应无统计学意义 ( $F=1.809, P=0.182$ ), 说明单双侧力值的总体均数无显著性差异。而力值则随着时间变化而显著上升 ( $F=51.332, P<0.001$ ), 受试者持续发力直至达到峰值压力。通过单因素方差分析对比 3 组标准化峰值压力可以看出, 3 组间无显著性差异 ( $F=0.383, P=0.684$ ), 不同侧站姿对测试结果无显著性影响。

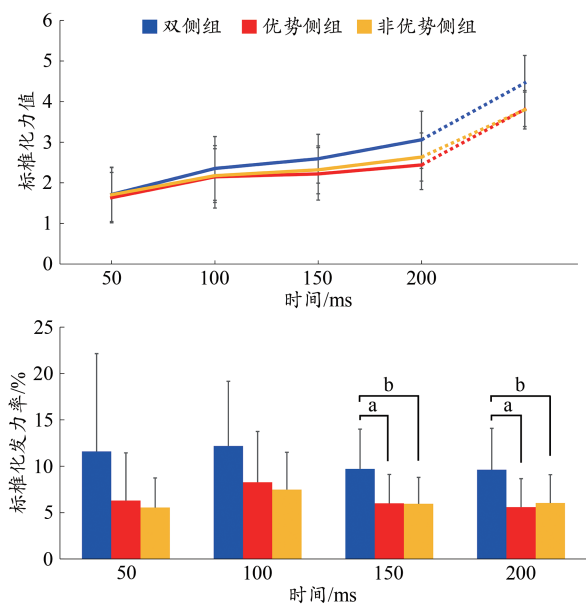


图3 不同组别 IMTP 测试不同时间结果对比

Figure 3. Comparison of IMTP Tests Results in Different Groups at Different Times

注: a 表示双侧组与优势侧组存在显著性差异 ( $P<0.05$ ), b 表示双侧组与非优势侧组存在显著性差异 ( $P<0.05$ ); 下同。

发力率经过双因素重复测量方差分析, 经球形检验校正后 ( $P<0.05$ ), 发现时间与单双侧之间的交互效应无统计学意义 ( $F=1.821, P=0.420$ ), 不同时间之间也没有统计学意义 ( $F=3.617, P=0.065$ ), 但不同组间存在统计学意义 ( $F=7.038, P=0.003$ ), 进一步分析可以得出, 在 150 ms 与 200 ms 时双侧组与优势侧组、非优势侧组存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

IMTP 峰值压力 BI 系数为  $-43.30\% \pm 21.61\%$ 。通过单因素重复方差分析 (表 2), 发现 50~200 ms 的力值与发力率 BI 系数均没有统计学意义 ( $P>0.05$ ), BI 系数并不会随着时间的变化而变化。另一方面, 对每项指标 BI 系数与 FIS 积分排名相关性进一步分析发现, 标准化峰值压力 BI 系数与 FIS 积分呈负相关 ( $P=0.038$ ), 线性回归分析峰值压力 BI 系数与 FIS 积分关系得出 (图 4), 两者具有良好的线性相关性 ( $F=6.143, P<0.05, r^2=0.434$ ), FIS 积分排名越靠前, BI 系数越接近 0%, 双侧力亏损现象越弱。

## 2.2 CMJ 测试

双侧组所有指标显著高于优势侧组和非优势侧组 ( $P<0.05$ ), 但优势侧组与非优势侧组之间无显著差异 ( $P>0.05$ ; 表 3)。

表 2 IMTP 测试力值与发力率双侧力亏损

Table 2 Bilateral Deficit of Force and Rate of Force Development in the IMTP Test

	力值	发力率
50 ms/%	$-46.39 \pm 22.30$	$11.40 \pm 86.77$
100 ms/%	$-42.77 \pm 22.90$	$-4.34 \pm 79.08$
150 ms/%	$-40.74 \pm 18.68$	$-8.31 \pm 57.04$
200 ms/%	$-38.87 \pm 13.27$	$-12.99 \pm 34.98$
F	2.744	1.547
P	0.095	0.231

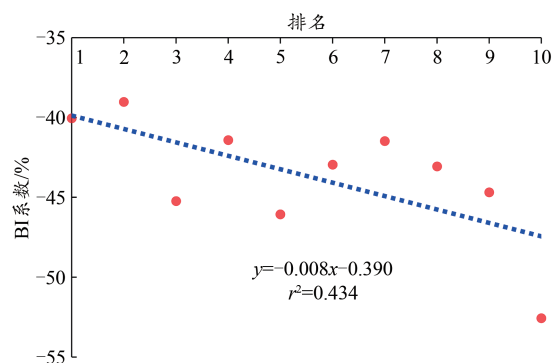


图 4 标准化峰值压力 BI 系数与 FIS 积分线性回归分析  
Figure 4. Linear Regression Analysis of Normalized Peak Pressure BI and FIS Points

表 3 不同组别 CMJ 测试结果

Table 3 Results of CMJ Tests between Different Groups

组别	双侧	优势侧	非优势侧
纵跳高度/cm	$43.92 \pm 5.87^{a,b}$	$23.58 \pm 2.51^a$	$22.81 \pm 3.20^b$
峰值功率/( $W \cdot kg^{-1}$ )	$55.09 \pm 6.34^{a,b}$	$33.15 \pm 3.57^a$	$32.25 \pm 3.75^b$
起跳最大速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	$2.89 \pm 0.24^{a,b}$	$2.15 \pm 0.18^a$	$2.12 \pm 0.19^b$
起跳最大力值	$2.33 \pm 0.32^{a,b}$	$1.88 \pm 0.17^a$	$1.83 \pm 0.14^b$
落地最大力值	$8.85 \pm 2.60^{a,b}$	$5.79 \pm 1.74^a$	$4.81 \pm 0.85^b$

不同组别指标结果与 FIS 积分相关性分析结果显示, 所有结果均没有显示相关性, CMJ 不受 FIS 积分影响。通过相关性检验发现 (表 4), FIS 积分排名与纵跳高度、起跳最大力值 BI 系数具有负相关性。线性回归分析进一步发现 (图 5), FIS 积分排名与纵跳高度 BI 系数间存在良好的线性关系 ( $F=9.679, P=0.005$ ), 与起跳最大力值 BI 系数也存在线性关系 ( $F=6.611, P=0.018$ )。尽管两者的  $r^2$  较小 (0.326, 0.248), 但仍表明随着排名靠前, 纵跳高度与起跳最大力值 BI 系数不断接近 0%, 甚至出现双侧力增益 (BI 系数  $>0\%$ )。

## 2.3 DJ 测试

双侧组所有指标显著高于优势侧和非优势侧 ( $P<0.05$ ), 但优势侧与非优势侧之间无显著差异 ( $P>0.05$ ; 表 5)。

通过分析不同指标与 FIS 积分排名相关性发现 (表 6), 双侧组起跳最大速度与 FIS 积分有显著负相关, 随着排名靠前, 速度显著增大 ( $P<0.05$ )。优势侧与非优

势侧组峰值功率与 FIS 积分呈现正相关,随着排名靠前,峰值功率下降( $P<0.05$ );同时,非优势侧落地与起跳最

大力值与 FIS 积分呈显著正相关性,随着排名靠前,最大力值降低( $P<0.05$ )。

表4 CMJ测试结果BI系数与FIS积分排名相关性分析  
Table 4 Correlation Analysis between BI of CMJ Test Results and the FIS Points

	纵跳高度	峰值功率	起跳最大速度	起跳最大力值	落地最大力值
BI/%	-5.1±9.6	-15.0±12.8	-32.0±4.9	-37.3±7.0	-15.9±20.3
相关系数	-0.571	-0.399	-0.301	-0.498	-0.170
P	0.005*	0.066	0.174	0.018*	0.450

注:\*表示结果与 FIS 积分排名具有显著相关性,  $P<0.05$ ;下同。

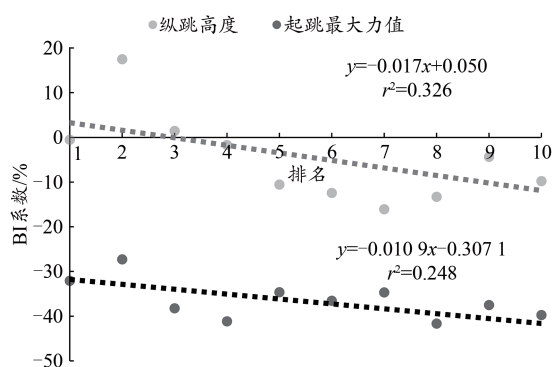


图5 CMJ测试纵跳高度、起跳最大力值BI系数与FIS积分线性回归分析

Figure 5. Linear Regression Analysis of FIS Points and the BI of Vertical Height, Peak Take-off Force of CMJ Test

表5 不同组别DJ测试结果

Table 5 Results of DJ Tests between Different Groups

测试指标	双侧	优势侧	非优势侧
纵跳高度/cm	39.31±5.66 <sup>a,b</sup>	22.30±4.36 <sup>a</sup>	20.69±2.89 <sup>b</sup>
峰值功率/(W·kg <sup>-1</sup> )	135.44±32.52 <sup>a,b</sup>	87.95±18.57 <sup>a</sup>	83.17±13.09 <sup>b</sup>
落地最大速度/(m·s <sup>-1</sup> )	2.87±0.19 <sup>a,b</sup>	2.22±0.20 <sup>a</sup>	2.15±0.14 <sup>b</sup>
起跳最大速度/(m·s <sup>-1</sup> )	2.50±0.26 <sup>a,b</sup>	1.96±0.33 <sup>a</sup>	1.88±0.22 <sup>b</sup>
落地最大力值	6.14±2.33 <sup>a,b</sup>	4.65±1.17 <sup>a</sup>	4.22±0.69 <sup>b</sup>
起跳最大力值	3.64±0.96 <sup>a,b</sup>	2.85±0.55 <sup>a</sup>	2.77±0.60 <sup>b</sup>
再次落地最大力值	8.94±3.74 <sup>a,b</sup>	5.62±1.60 <sup>a</sup>	4.73±1.19 <sup>b</sup>

表6 DJ测试结果与FIS积分排名相关性分析

Table 6 Correlation Analysis between the DJ Results and the FIS Points

测试项目	双侧		优势侧		非优势侧	
	相关系数	P	相关系数	P	相关系数	P
纵跳高度	-0.070	0.771	0.381	0.098	0.260	0.268
峰值功率	0.217	0.358	0.542	0.014*	0.674	0.001*
落地最大速度	-0.083	0.728	0.363	0.115	0.231	0.327
起跳最大速度	-0.646	0.002*	0.329	0.156	0.207	0.380
落地最大力值	0.177	0.456	-0.141	0.552	0.454	0.045*
起跳最大力值	0.330	0.156	0.290	0.215	0.565	0.009*
再次落地最大力值	-0.129	0.587	-0.028	0.907	-0.152	0.521

根据DJ测试各指标BI系数与FIS积分相关性分析发现(表7),纵跳高度、落地最大速度与起跳最大速度BI系数与FIS积分呈现负相关:DJ纵跳高度BI系数和FIS积分排名呈线性关系( $F=6.518, P=0.026$ ),落地最大速度BI系数与FIS积分排名呈线性关系( $F=4.596, P=0.046$ ),起跳最大速度BI系数与FIS积分排名呈线性关系( $F=13.752, P=0.002$ ),且随着FIS积分排名靠前,3个指标BI系数越接近0%(图6)。

表7 DJ测试结果BI系数与FIS积分排名相关性分析

Table 7 Correlation Analysis between BI of DJ Test Results and the FIS Points

	BI/%	相关系数	P
纵跳高度	-7.6±13.2	-0.548	0.026*
峰值功率	-20.4±15.4	-0.301	0.197
落地最大速度	-34.2±4.2	-0.451	0.048*
起跳最大速度	-34.0±10.1	-0.658	0.002*
落地最大力值	-35.2±15.8	0.095	0.700
起跳最大力值	-35.5±9.1	-0.011	0.963
2次落地最大力值	-14.7±23.1	-0.037	0.877

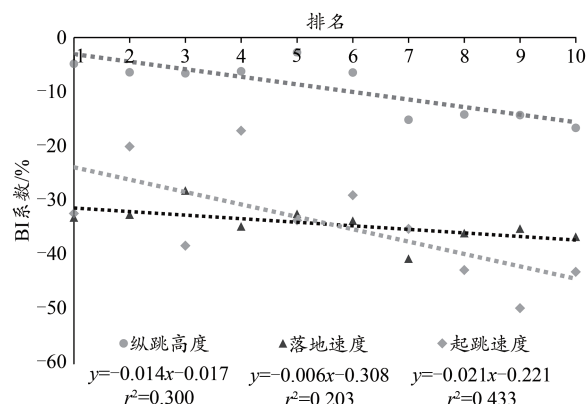


图6 DJ纵跳高度、落地速度、起跳速度BI系数与FIS积分线性回归分析

Figure 6. Linear Regression Analysis of FIS Points and the BI of Vertical Height, Landing Velocity, and Take-off Velocity of DJ Test

### 3 研究讨论

#### 3.1 不同测试对双侧力亏损影响

本研究中,IMTP 测试产生了较高的双侧力亏损,双侧发力相比于单侧发力较小。这是由于相比于单边运动,执行双边运动时对单侧肢体肌肉的神经驱动减少(Howard et al., 1991; Vandervoort et al., 1984; Van Dieën et al., 2003)。等长收缩因为运动机制的部分受限,适用于研究可能的潜在机制(Jakobi et al., 2001),并且不会受到由于运动产生的相关影响。当前对于等长收缩的双侧力亏损研究的结论差异较大,髌、膝关节联合等长伸展显示出不同水平的双侧力亏损(Donath et al., 2014; MacDonald et al., 2014)。IMTP 测试作为多关节运动,相比于单关节运动会显示出更大程度的双侧力亏损。同时受到稳定性影响,下肢膝关节和踝关节需要产生更大力量维持平衡,所以会产生更大程度的双侧力亏损。

IMTP 测试中,在开始发力阶段,即 100 ms 之前,单双侧之间并没有显著性差异,而 100 ms 之后,双侧发力率显著高于优势侧与非优势侧,这也与过往研究结果相同,即 100 ms 是单侧发力结果产生差异性的时间点(Dos'Santos et al., 2017)。同时,FIS 积分与峰值压力 BI 系数具有线性关系,随着 FIS 积分靠前,受试者专项能力提升,峰值压力双侧力亏损下降。IMTP 测试相比于纵跳测试,峰值压力更能体现下肢力量与专项能力的相关性,这也可以说明专项能力越强,可能造成的最大力量越高,双侧力亏损现象越低。Secher 等(1975)对赛艇运动员进行测试,发现经过下肢伸展训练的受试者不一定会出现双侧力亏损现象,同时双侧力亏损程度排序依次为:俱乐部级>国家级>国际级,国际精英运动员甚至没有发现双侧力亏损现象(Nijem et al., 2014)。因此,随着运动能力提升,双侧力亏损出现下降的趋势。

动态运动的双侧力亏损产生机制与等长或等速运动不大相同。Van Soest 等(1985)的研究表明,纵跳过程中,双侧纵跳的髌、膝、踝关节的峰值力矩小于单侧纵跳。即使单、双侧纵跳中关节伸展的运动范围相同,也仍然会有部分伸肌在双侧纵跳中达到更高的缩短速度,并且由于力-速度关系,与单侧纵跳相比,这些肌肉在进行双侧纵跳时往往会产生更少的力量和运动能力(Bobbert et al., 2006)。本研究中,CMJ 表现出双侧力亏损,是由于在双侧运动过程中,单腿的肌肉激活程度达不到单独运动所产生的肌肉激活(Secher et al., 1978; Vandervoort et al., 1984)。在对纵跳的研究中发现,单腿纵跳的表现与双腿纵跳的表现某些方面有所不同:单腿纵跳阶段更长,但纵跳高度显著小于双腿纵跳(约为 58.1%~58.5%)(Bosco et al., 1980; Vansoest et al., 1985),垂直地面反作用力更小(Challis, 1998),并且单腿纵跳时膝关节的最小角度更大(Vansoest et al., 1985)。

DJ 以较高肌肉力量-速度为特征进行短周期活动,被认为是衡量下肢快速拉长-缩短模式能力,以及下肢肌肉负荷耐受性的指标(Viitasalo et al., 1998)。同时 DJ 也是反应下肢弹性刚度的指标(Flanagan et al., 2007)。下肢弹性刚度的增加可以减少 DJ 等运动的地面接触时间,并且更大的刚度能够产生更好的踝关节性能(Stefanyshyn et al., 1998)。肌肉必须具有较高的刚度才能有效地利用弹性势能。本研究与其他 DJ 双侧力亏损研究得出相似结果,Pain 等(2014)观察到 DJ 测试中落地峰值压力与峰值功率呈现双侧力亏损。

#### 3.2 不同测试与专项运动水平的相关性分析

FIS 积分作为本研究中评价越野滑雪运动员专项运动水平的依据,可以表现为越野滑雪运动员的专项能力。本研究发现了 IMTP、CMJ 和 DJ 测试与专项运动水平的相关性。IMTP 测试中,峰值压力与专项运动水平具有相关性,随着运动能力提升,即 FIS 积分排名靠前时,纵跳高度与起跳最大力值双侧力亏损显著下降。CMJ 测试中,纵跳高度与起跳最大力值与专项运动水平具有相关性,随着专项运动能力提升双侧力亏损显著下降,部分运动员纵跳高度甚至出现双侧力增益。同样,在 DJ 测试中,纵跳高度、落地及起跳最大速度双侧力亏损也随着专项运动水平的提升而显著下降。双侧力亏损现象说明了双侧运动无法最大程度激活肌肉力量,而专项运动水平越高,双侧力亏损现象越不明显。Howard 等(1991)研究发现,没有训练经验的人群呈现双侧力亏损,自行车运动员则未呈现这种现象,举重运动员甚至出现双侧力增益,这表明长期进行双侧训练将减少双侧力亏损现象,这与受试者感知能力有关(Jakobi et al., 2001)。Secher(1975)和 Nijem 等(2014)研究表明运动等级越高,运动员双侧力亏损现象越少,甚至没有出现。这也说明运动员运动能力越强,耐力素质越高,双侧力亏损越小(Pain, 2014)。

DJ 运动是一种拉长-缩短模式的运动。受试者从高处落下会导致伸膝肌群快速伸展,重力势能变化会导致弹性势能累积,随后通过收缩肌肉提供用于起跳的能量。然而如果运动速度较慢,则会导致离心阶段累积的弹性势能部分耗散,造成纵跳高度下降(Anderson et al., 1993; Bobbert et al., 1996)。本研究中,虽然 FIS 积分更低的运动员单侧与地面接触时爆发力更大,峰值功率更高,但是双侧起跳速度却更低,因此不同专项运动水平运动员纵跳高度间并没有相关性。虽然从 DJ 运动发现了部分指标具有关联,但是这也可能是因为耐力性项目运动员不熟悉跳深测试方法而导致的差异(Pain, 2014)。研究表明,DJ 测试对于专项运动水平的相关性较为敏感,其次为 IMTP 测试与 CMJ 测试。

#### 3.3 优势侧与非优势侧影响分析

越野滑雪双杖推撑技术中,运动员会使用不对称的

能力进行蹬动,特别是优势侧的蹬动与撑杆,而非优势侧则较少使用力量,长期单侧使用G4技术可能会造成肌肉力量失衡。越野滑雪传统式比赛中,40%以上通常采用同推技术(double poling, DP)(Marsland et al., 2018; Takeda et al., 2019),传统式比赛需要对称使用身体进行移动,包括其他交替滑行技术。为了获得最佳表现,需要对称使用左右两侧肢体(Bjorklund et al., 2017)。因此,擅长传统式技术的越野滑雪运动员损伤率低于自由式技术运动员(Bahr et al., 2004)。虽然大多数精英越野滑雪运动员在中低运动强度下都能毫无困难地使用两侧,但随着运动强度增加,运动员往往表现出更大的偏侧性。

各项测试结果中,优势侧与非优势侧之间并无显著性差异,可能说明越野滑雪运动员优势侧与非优势侧之间并无统计学差异。但通过对运动员的前期调查可以发现,10名受试者中8名优势腿为右腿,而2名为左腿。有研究表明,上肢的优势侧与非优势侧的差异性较为明显(Jakobiet al., 2001),而下肢优势侧与非优势侧的协调性没有显著差异(Promsri et al., 2018)。同时,当前研究对于不同惯用侧与双侧力亏损之间的关系也存在分歧(Armstrong et al., 1999; Cornwell et al., 2012; Crosby et al., 1994),因此下肢优势侧与非优势侧的关联还需进一步研究。

#### 3.4 越野滑雪训练建议

目前对于力量测试中的双侧力亏损系数与运动表现的关系尚无明确结论,但不少项目表明运动员需要较低水平的双侧力亏损。根据训练特异性原则,双侧力亏损会随着训练后骨骼肌力量的变化而发生改变,具有一定的可塑性(Hawley, 2002)。双侧抗阻训练会增加双侧力量,但对单侧力量提升不明显,从而降低双侧力亏损BI系数。Nijem等(2014)的研究表明,匀速高强度的双侧训练会减少,消除双侧力亏损,甚至造成双侧力增益。同时双侧力亏损现象较为严重的人群,其亏损程度会随着训练增加显著下降(Janzen et al., 2006; Ramirez-Campillo et al., 2015)。这是由于双侧抗阻训练可以增加双侧运动时大脑皮质激活程度,并在左右大脑招募更多大脑区域并产生更高的神经激活程度(Grady, 2012; Noble et al., 2014),并降低皮质抑制(Post et al., 2007),从而形成通过直接皮质脊髓束触发的肌肉输出增加(Aune et al., 2013)。

单侧训练相较双侧训练更具有特异性。单侧力量训练不仅可以提升单侧的力量水平(Nijem et al., 2014),还可以提高双侧运动的力量素质(Appleby et al., 2019)。同时单侧训练可以增强双侧训练无法发展的协调稳定性和无法刺激到的稳定肌群。大多数运动项目中需要快速肌肉力量,减少双侧力亏损的同时可以减少运动损伤。虽然单、双侧训练均会提升运动员运动能力,但单侧训练对稳定性要求更高,且可能增加双侧力亏损现象(Jakobi

et al., 2001)。进一步研究发现,非优势侧的单边抗阻训练会降低双侧力亏损,而优势侧的单边抗阻训练则会增大双侧力亏损(Taniguchi, 1998)。

虽然单侧与双侧力量训练均能够提升肌肉力量,显著改善耐力表现,但是双侧抗阻训练对双侧力亏损的影响远大于单侧抗阻训练(Janzen et al., 2006),单侧与双侧训练的结合似乎更有利于提升机体运动能力(Brown et al., 2014)。越野滑雪更应该进行单双侧训练,从而提升运动能力,减少双侧力亏损现象。当前针对下肢的双侧训练包括:深蹲、举重、卧推等,而单侧训练则限制为单腿发力,可以采用后脚抬高分腿蹲(单腿保加利亚深蹲)、单臂哑铃卧推等(李丹阳等, 2021; Nijem et al., 2014)。在训练实践中可以通过复合式训练均衡发展并增强单侧与双侧爆发力,减小单一训练的缺陷。同时需要注重训练的肢体顺序以及负荷,从而更高效地促进下肢爆发力发展(林奕贯等, 2022)。除了单双侧力量训练,平衡训练也可降低双侧力亏损现象。平衡训练通过增加大脑皮质下结构(即基底神经节和小脑)的适应(Puttemans et al., 2005; Taube, 2012),造成大脑激活从皮质区域到皮质下区域的转变,从而绕过双侧运动期间运动皮质的半球间抑制,造成双侧力亏损降低(Beurskens et al., 2015)。

#### 4 研究结论

本研究通过对越野滑雪运动员实施最大力量以及纵跳测试,发现越野滑雪运动员专项运动水平与各项测试结果无明显差异,但IMTP、CMJ、DJ测试均显示较为明显的双侧力亏损现象,同时双侧力亏损BI系数随着专项运动水平提升而降低,双侧力亏损现象可能作为分析专项运动水平的潜在指标,优秀运动员会具有较低的双侧力亏损。同时,IMTP、CMJ和DJ测试可以作为双侧力亏损的测试方式,测试结果较为显著,但DJ测试的选择则需要考虑受试者熟悉程度的差异。针对运动员存在的双侧力亏损现象,可以通过单双侧训练相结合的方式来提升下肢力量并减少该现象的出现。

#### 参考文献:

- 包蕾,李秋捷,刘卉,2021.我国男子越野滑雪运动员双杖推进技术的协调性特征分析[J].北京体育大学学报,44(12):45-55.
- 蔡旭旦,毛丽娟,张蓓,等,2021.跨项目运动员越野滑雪长期训练运动能力变化:基于运动机能监控的研究[J].体育科学,41(8):3-13.
- 冯兆儒,2020.急性振动热身对青年男性下肢力量和双侧力比值的影响[D].北京:北京体育大学.
- 焦怡然,刘卉,李翰君,2021.越野滑雪运动经济性影响因素研究综述[J].中国体育科技,57(10):20-25.
- 李丹阳,程序,阙怡琳,等,2021.肢体间不对称对运动表现的影响及干预手段[J].武汉体育学院学报,55(8):94-100.
- 李秋捷,包蕾,朱晓兰,2021.我国男子越野滑雪运动员长距离传

- 统式上坡双杖推进技术的生物力学分析[J]. 医用生物力学, 36(4): 553-559.
- 林奕贯, 叶卫兵, 2022. 单侧训练对下肢爆发力的影响及其神经机制研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 41(5): 383-397.
- 路恒, 许贻林, 王然, 2022. 等长大腿中部拉测试在下肢肌肉力量诊断中的应用[J]. 成都体育学院学报, 48(1): 129-135.
- 汪洋, 2016. 不同力量练习对下肢双侧力亏损的影响[D]. 北京: 北京体育大学.
- 袁献双, 刘卉, 张力文, 等, 2021. 地形对我国越野滑雪运动员传统式比赛成绩的影响[J]. 医用生物力学, 36(S1): 379.
- ANDERSON F C, PANDY M G, 1993. Storage and utilization of elastic strain energy during jumping[J]. *J Biomech*, 26(12): 1413-1427.
- ANDERSSON E, SUPEJ M, SANDBAKK Ø, et al., 2010. Analysis of sprint cross-country skiing using a differential global navigation satellite system[J]. *Eur J Appl Physiol*, 110(3): 585-595.
- APPLEBY B B, CORMACK S J, NEWTON R U, 2019. Specificity and transfer of lower-body strength: Influence of bilateral or unilateral lower-body resistance training[J]. *J Strength Cond Res*, 33(2): 318-326.
- ARMSTRONG C A, OLDHAM J A, 1999. A comparison of dominant and non-dominant hand strengths[J]. *J Hand Surg-Br Eur Vol*, 24(4): 421-425.
- AUNE T K, AUNE M A, ETTEMA G, et al., 2013. Comparison of bilateral force deficit in proximal and distal joints in upper extremities[J]. *Hum Mov Sci*, 32(3): 436-444.
- BAHR R, ANDERSEN S O, LØKEN S, et al., 2004. Low back pain among endurance athletes with and without specific back loading: A cross-sectional survey of cross-country skiers, rowers, orienteers, and nonathletic controls[J]. *Spine*, 29(4): 449-454.
- BEURSKENS R, GOLLHOFER A, MUEHLBAUER T, et al., 2015. Effects of heavy-resistance strength and balance training on unilateral and bilateral leg strength performance in old adults[J]. *PLoS One*, 10(2): e0118535.
- BJORKLUND G, ALRICSSON M, SVANTESSON U, 2017. Using bilateral functional and anthropometric tests to define symmetry in cross-country skiers[J]. *J Hum Kinet*, 60(1): 9-18.
- BOBBERT M F, DE GRAAF W W, JONK J N, et al., 2006. Explanation of the bilateral deficit in human vertical squat jumping[J]. *J Appl Physiol*, 100(2): 493-499.
- BOBBERT M F, GERRITSEN K G M, LITJENS M C A, et al., 1996. Why is countermovement jump height greater than squat jump height?[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 28(11): 1402-1412.
- BOSCO C, KOMI P V, 1980. Influence of aging on the mechanical behavior of leg extensor muscles[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 45(2-3): 209-219.
- BROWN T N, PALMIERI-SMITH R M, MCLEAN S G, 2014. Comparative adaptations of lower limb biomechanics during unilateral and bilateral landings after different neuromuscular-based ACL injury prevention protocols[J]. *J Strength Cond Res*, 28(10): 2859-2871.
- CHALLIS J H, 1998. An investigation of the influence of bi-lateral deficit on human jumping[J]. *Hum Mov Sci*, 17(3): 307-325.
- CORNWELL A, KHODIGUIAN N, YOO E J, 2012. Relevance of hand dominance to the bilateral deficit phenomenon[J]. *Eur J Appl Physiol*, 112(12): 4163-4172.
- CROSBY C A, WEHBÉ M A, 1994. Hand strength: Normative values[J]. *J Hand Surg*, 19(4): 665-670.
- DONATH L, SIEBERT T, FAUDE O, et al., 2014. Correct, fake and absent pre-information does not affect the occurrence and magnitude of the bilateral force deficit[J]. *J Sports Sci Med*, 13(2): 439-443.
- DOS'SANTOS T, THOMAS C, JONES P A, et al., 2017. Assessing muscle-strength asymmetry via a unilateral-stance isometric midthigh pull[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(4): 505-511.
- FLANAGAN E P, HARRISON A J, 2007. Muscle dynamics differences between legs in healthy adults[J]. *J Strength Cond Res*, 21(1): 67-72.
- GRADY C, 2012. The cognitive neuroscience of ageing[J]. *Nat Rev Neurosci*, 13(7): 491-505.
- HÄKKINEN K, KRAEMER W J, NEWTON R U, 1997. Muscle activation and force production during bilateral and unilateral concentric and isometric contractions of the knee extensors in men and women at different ages[J]. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 37(3): 131-142.
- HAWLEY J A, 2002. Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training[J]. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 29(3): 218-222.
- HOFFMAN J R, RATAMESS N A, KLATT M, et al., 2007. Do bilateral power deficits influence direction-specific movement patterns?[J]. *Res Sports Med*, 15(2): 125-132.
- HOWARD J D, ENOKA R M, 1991. Maximum bilateral contractions are modified by neurally mediated interlimb effects[J]. *J Appl Physiol*, 70(1): 306-316.
- JAKOBI J M, CHILIBECK P D, 2001. Bilateral and unilateral contractions: Possible differences in maximal voluntary force[J]. *Can J Appl Physiol*, 26(1): 12-33.
- JANZEN C L, CHILIBECK P D, DAVISON K S, 2006. The effect of unilateral and bilateral strength training on the bilateral deficit and lean tissue mass in post-menopausal women[J]. *Eur J Appl Physiol*, 97(3): 253-260.
- KURUGANTI U, SEAMAN K, 2006. The bilateral leg strength deficit is present in old, young and adolescent females during isokinetic knee extension and flexion[J]. *Eur J Appl Physiol*, 97(3): 322-326.
- KVAMME B, JAKOBSEN V, HETLAND S, et al., 2005. Ski skating technique and physiological responses across slopes and speeds[J]. *Eur J Appl Physiol*, 95(2-3): 205-212.
- MACDONALD M, LOSIER D, CHESTER V L, et al., 2014. Comparison of bilateral and unilateral contractions between swimmers and nonathletes during leg press and hand grip exercises[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 39(11): 1245-1249.
- MARSLAND F, ANSON J, WADDINGTON G, et al., 2018. Macrokinematic differences between sprint and distance cross-country skiing competitions using the classical technique[J]. *Front Physiol*, 9: 570.
- NIJEM R M, GALPIN A J, 2014. Unilateral versus bilateral exercise and the role of the bilateral force deficit[J]. *Strength Cond J*, 36(5): 113-118.
- NOBLE J W, ENG J J, BOYD L A, 2014. Bilateral motor tasks involve more brain regions and higher neural activation than unilateral tasks: An fMRI study[J]. *Exp Brain Res*, 232(9): 2785-2795.



- PAIN M T, 2014. Considerations for single and double leg drop jumps: Bilateral deficit, standardizing drop height, and equalizing training load[J]. *J Appl Biomech*, 30(6): 722-727.
- POST M, VAN DUINEN H, STEENS A, et al., 2007. Reduced cortical activity during maximal bilateral contractions of the index finger [J]. *Neuroimage*, 35(1): 16-27.
- PROMSRI A, HAID T, FEDEROLF P, 2018. How does lower limb dominance influence postural control movements during single leg stance?[J]. *Hum Mov Sci*, 58: 165-174.
- PUTTEMANS V, WENDEROTH N, SWINNEN S P, 2005. Changes in brain activation during the acquisition of a multifrequency bimanual coordination task: From the cognitive stage to advanced levels of automaticity[J]. *J Neurosci*, 25(17): 4270-4278.
- RAMÍREZ-CAMPILLO R, BURGOS C H, HENRÍQUEZ-OLGUÍN C, et al., 2015. Effect of unilateral, bilateral, and combined plyometric training on explosive and endurance performance of young soccer players[J]. *J Strength Cond Res*, 29(5): 1317-1328.
- SECHER N H, 1975. Isometric rowing strength of experienced and inexperienced oarsmen[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 7(4): 280-283.
- SECHER N H, RØRSGAARD S, SECHER O, 1978. Contralateral influence on recruitment of curarized muscle fibres during maximal voluntary extension of the legs[J]. *Acta Physiol Scand*, 103(4): 456-462.
- ŠKARABOT J, CRONIN N, STROJNIK V, et al., 2016. Bilateral deficit in maximal force production[J]. *Eur J Appl Physiol*, 116(11-12): 2057-2084.
- STEFANYSHYN D J, NIGG B M, 1998. Dynamic angular stiffness of the ankle joint during running and sprinting[J]. *J Appl Biomech*, 14(3): 292-299.
- TAKEDA M, MIYAMOTO N, ENDO T, et al., 2019. Cross-country skiing analysis and ski technique detection by high-precision kinematic global navigation satellite system[J]. *Sensors*, 19(22): 4947.
- TANIGUCHI Y, 1998. Relationship between the modifications of bilateral deficit in upper and lower limbs by resistance training in humans[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 78(3): 226-230.
- TAUBE W, 2012. Neurophysiological adaptations in response to balance training[J]. *Ger J Sports Med*, 9: 273-277.
- VAN DIEËN J H, OGITA F, DE HAAN A, 2003. Reduced neural drive in bilateral exertions: A performance-limiting factor?[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 35(1): 111-118.
- VANDERVOORT A A, SALE D G, MOROZ J, 1984. Comparison of motor unit activation during unilateral and bilateral leg extension[J]. *J Appl Physiol*, 56(1): 46-51.
- VAN SOEST A J, ROEBROECK M E, BOBBERT M F, et al., 1985. A comparison of one-legged and two-legged counter-movement jumps[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 17(6): 635-639.
- VIITASALO J T, SALO A, LAHTINEN J, 1998. Neuromuscular functioning of athletes and non-athletes in the drop jump[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 78(5): 432-440.
- ŽELEZNIK P, SLAK V, KOZINC Z, et al., 2022. The association between bilateral deficit and athletic performance: A brief review[J]. *Sports*, 10: 8.

(收稿日期:2022-07-13; 修订日期:2023-03-22; 编辑:尹航)

