

文章编号: 1004-7220(2021)04-0553-07

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

李秋捷^a, 包蕾^b, 朱晓兰^b

(北京体育大学 a. 中国运动与健康研究院; b. 运动人体科学学院, 北京 100084)

摘要:目的 针对我国男子越野滑雪运动员上坡双杖推进技术进行生物力学分析, 确定不同水平运动员动作技术差异, 明确运动员动作技术对运动表现的影响。**方法** 选取 2019 年 9 月 11~12 日在吉林北山四季越野滑雪场 15 km 传统式越野滑雪比赛的 24 名运动员为研究对象, 按比赛成绩分为高速组和低速组, 通过三维拍摄方法获得运动学参数, 分析两组运动员在周期特征、动作阶段以及关键技术指标上的差异。**结果** 高速组周期速度显著大于低速组, 滑幅与周期速度正相关, 回摆距离与周期速度正相关; 撑杖阶段的肘伸展平均角速度与回摆距离正相关, 肘伸展时长与回摆距离负相关; 回摆阶段的肩伸展平均角速度、肩外展活动范围与回摆距离正相关。以上指标在高、低速组间均表现出统计学差异。**结论** 运动员上坡动作速度的差异主要由滑幅导致, 滑幅的差异主要来自于回摆阶段, 回摆距离越大, 周期速度越大。影响运动员回摆距离差异的技术主要集中在上肢肩、肘关节。在今后训练中, 我国低速组运动员应加强上肢肌肉力量, 尤其是肩、肘关节力量, 进一步充分发挥肩、肘关节活动的作用。同时在雪杖触地时刻, 应注意增大的身体前倾角以及髋、膝关节的屈曲角度。

关键词: 越野滑雪; 双杖推进技术; 生物力学; 动作分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.04.009

Biomechanical Analysis of Chinese Male Cross-Country Skiers with Double Poling Technique on Uphill Terrain during Long Distance Classical Race

LI Qiujie^a, BAO Lei^b, ZHU Xiaolan^b

(a. China Institute of Sport and Health Science; b. School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084)

Abstract: Objective By making biomechanical analysis of double poling (DP) technique on uphill terrain used by Chinese male cross-country (XC) skiers, to characterize biomechanical differences in DP for skiers at different levels, and determine the influence from motion techniques of skiers on their sports performance. **Methods** Twenty-four male XC skiers who participated in the 15 km classical race at the Beishan ski resort in Jilin, China, on Sept. 11-12, 2019 were selected in this study. On the basis of their race performance, they were divided into faster skiing group ($n=12$) and slower skiing group ($n=12$). The kinematic variables of the skiers were obtained by three-dimensional (3D) shooting, and the differences in cycle characteristics, action phases and key technique variables for skiers in two groups were analyzed. **Results** Faster skiers had a faster DP velocity. There

收稿日期: 2021-05-22; 修回日期: 2021-05-24

基金项目: 国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2018YFF0300404)

通信作者: 朱晓兰, 副教授, E-mail: zhuxiaolan@bsu.edu.cn

was a positive correlation between swing distance and velocity. The swing distance was positively correlated with average angular velocity of elbow extension in poling phase, average angular velocity of shoulder extension in swing phase, and range of motion (ROM) of shoulder abduction. The swing distance was negatively correlated with extension of the elbow in poling phase. All the above variables showed statistical differences between faster and slower skiers. **Conclusions** For a long distance competition, the difference in DP velocity on uphill terrain was mainly caused by the difference in swing distance, which originated from the swing phase. Faster skier had a longer swing distance. The differences in the swing distance came mainly from the shoulder and elbow joints. Therefore, slower XC skiers in China should strengthen muscle strength of the upper limbs, especially the shoulder and elbow joint strength. More forward body leaning and larger hip and knee flexion angle at pole plant might help the skier to cover more distance.

Key words: cross-country ski; double poling (DP) technique; biomechanics; motion analysis

越野滑雪在1924年首届冬奥会上便被列为正式比赛项目,同时还是北欧两项和冬季两项的比赛内容,由于涉及奖牌数量多,因此一个国家越野滑雪的竞技实力在冬奥赛场上具有举足轻重的战略地位。我国在该项目上与传统强国之间仍存在较大差距,特别是男子运动员的竞体水平亟待提高。

越野滑雪比赛中使用的技术分为传统式和自由式,其中传统式技术比赛在该项目中占据重要地位。常见的传统式技术包括两步交替(diagonal stride, DS)、双杖推进(double poling, DP)、双杆撑踏步(double-pole with kick, DPK)和步进式转弯(step turn, ST)等技术。研究发现,传统式10 km越野滑雪比赛中DP技术使用距离最长,占总距离的43%^[1]。

越野滑雪比赛地形分上坡、下坡和平地,各占全程1/3,其中上坡时间通常要占总时长的50%,故上坡的滑雪表现被认为是取得好成绩的主要决定因素^[2-6]。对国外高水平运动员比赛技术研究表明,速度更快的滑雪者倾向于在上坡地形中使用DP技术^[7]。本研究前期统计表明,我国男子运动员上坡时绝大多数使用DP技术。因此,上坡DP技术的运动表现是影响我国男子运动员长距离传统式比赛最终成绩的关键。

受环境因素和比赛条件的限制,实际比赛中的动作技术测量难度较大,国外针对比赛DP技术的生物力学研究多集中在平地,对上坡技术的研究多在跑台上进行滚轴滑雪,针对比赛中上坡DP动作生物力学方面的研究较少,已有研究很难为我国运动员提升技术提供参考。此外,我国越野滑雪起步

较晚,群众基础较差,以国内越野滑雪运动员为研究对象的动作技术分析较少,也无法为我国运动员备战本届奥运会的科学训练提供支撑^[8]。因此,本文针对我国男子越野滑雪运动员上坡DP动作技术的周期特征和运动学指标进行分析,明确我国越野滑雪运动员动作技术对成绩的影响。研究结果为运动员训练中技术优化和比赛中技术运用提供支持。

1 研究方法

1.1 研究对象

2019年9月11~12日在吉林北山四季越野滑雪场举行了国内男子15 km传统式越野滑雪模拟赛,在成绩排名前28的运动员中,选取所有上坡地形中超80%路程使用DP技术的运动员24人为研究对象,按比赛成绩分为高速组和低速组(见表1)。

表1 运动员基本信息

Tab.1 Basic information of the skiers

组别	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg	比赛成绩/s
高速组($n=12$)	22.9±4.0	178.9±4.4	73.4±5.1	2 335.7±103.3
低速组($n=12$)	20.5±1.7	181.3±4.9	72.1±8.5	2 569.3±42.9

1.2 数据采集与处理

比赛在室内雪道进行,赛道1圈长1 308 m。通过两台分辨率为1 920×1 080高清摄像机(SONY FDR-AX700, SONY公司,日本)采集运动员比赛动作视频,摄像机放置在上坡赛道两侧且主光轴夹角在90°左右,拍摄频率120 Hz,快门速度1/1 000 s。运动员比赛过程中11次通过拍摄区域。

使用有32个控制点的PEAK辐射式三维标定

框架对拍摄空间进行标定,另外使用1串悬挂小球和3个放置在已知位置的地标点A、B、C用以建立全局参考系。其中,Z轴垂直指向上,Y轴水平指向滑行方向,X轴指向赛道右侧。赛道坡度为A、B、C3点确定的平面与水平面之间的夹角,计算得到上坡坡度为3.86°。

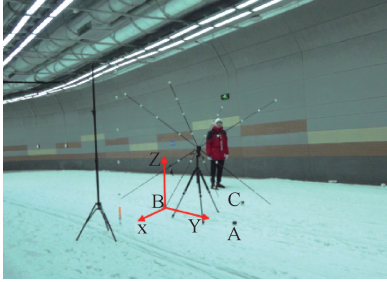


图1 空间标定示意图
 Fig.1 Schematic of spatial calibration

使用三维运动解析系统(Fastmove 1.2.2,大连锐动科技有限公司)对视频进行数字化处理,获取运动员全身21个标志点^[9]及雪杖远端点的三维坐标。采用De Leva调整后的Zatsiorsky-Seluyanovs人体惯性参数计算人体重心坐标。使用巴特沃斯四阶低通滤波法对坐标数据进行滤波,截断频率为10 Hz^[10]。选取每位运动员11次通过拍摄区域DP动作周期速度最快的一次进行技术指标的计算和分析。

将1个完整的DP动作周期定义为雪仗着地到雪仗再次着地的过程,由雪仗着地到雪仗离地的撑杖阶段和由雪仗离地到雪仗再次着地的回摆阶段组成(见图2)。

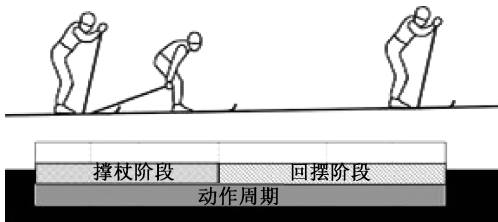


图2 DP技术动作周期和阶段划分示意图
 Fig.2 Schematic for motion cycles and phase division of double poling technique

技术的周期特征通过1个动作周期的速度、滑幅、滑频、各阶段时长等指标来反映。动作速度为运动员雪仗着地到再次着地期间身体重心轨迹长

度除以周期时间;滑幅为右侧雪杖着地点与再次着地点之间的直线距离,由撑杖距离(撑杖阶段身体重心移动路程)和回摆距离(回摆阶段身体重心移动路程)组成;滑频为周期时间的倒数,即每秒钟完成动作周期的次数;周期时间由撑杖时间(雪杖着地时刻到离地时刻的时长)和回摆时间(雪杖离地时刻到着地时刻的时长)组成。

为计算关节角度首先建立人体基本轴和基本切面^[11],坐标系X、Y、Z轴的单位向量分别表示为*i*、*j*、*k*。人体垂直轴 $L_{垂}$ 为两髋连线中点 M_{hip} 相对于两肩连线中点 $M_{shoulder}$ 的向量,以及人体额状轴 $L_{额}$ 和人体矢状轴 $L_{矢}$ 计算公式如下:

$$L_{垂} = (x_{M_{hip}} - x_{M_{shoulder}})i + (y_{M_{hip}} - y_{M_{shoulder}})j + (z_{M_{hip}} - z_{M_{shoulder}})k \quad (1)$$

$$L_{额} = (x_{右肩} - x_{左肩})i + (y_{右肩} - y_{左肩})j + (z_{右肩} - z_{左肩})k \text{ (计算上肢关节角度)}$$

$$L_{额} = (x_{右髋} - x_{左髋})i + (y_{右髋} - y_{左髋})j + (z_{右髋} - z_{左髋})k \text{ (计算下肢关节角度)} \quad (2)$$

$$L_{矢} = L_{额} \times L_{垂} \quad (3)$$

根据人体的基本轴,得到人体水平面S1、矢状面S2和额状面S3分别是以人体垂直轴、额状轴和矢状轴为法向向量的平面。

$$S1: (x_{M_{hip}} - x_{M_{shoulder}})x + (y_{M_{hip}} - y_{M_{shoulder}})y + (z_{M_{hip}} - z_{M_{shoulder}})z + D = 0 \quad (4)$$

$$S2: (x_{右肩} - x_{左肩})x + (y_{右肩} - y_{左肩})y + (z_{右肩} - z_{左肩})z + D = 0$$

$$(x_{右髋} - x_{左髋})x + (y_{右髋} - y_{左髋})y + (z_{右髋} - z_{左髋})z + D = 0 \quad (5)$$

$$S3: Ax + By + Cz + D = 0 \quad (6)$$

式中: D 为确定平面位置的系数,在后面计算中不需要知道其确切值。 $A = (y_{右肩} - y_{左肩})(z_{肘} - z_{颈}) - (z_{右肩} - z_{左肩})(y_{肘} - y_{颈})$; $B = (z_{右肩} - z_{左肩})(x_{肘} - x_{颈}) - (x_{右肩} - x_{左肩})(z_{肘} - z_{颈})$; $C = (x_{右肩} - x_{左肩})(y_{肘} - y_{颈}) - (y_{右肩} - y_{左肩})(x_{肘} - x_{颈})$

肩关节角度的计算通过确定上臂矢量 $L_{上臂}$,由上臂矢量在人体各基本切面上的投影与相关基本轴的夹角进行计算:

$$L_{上臂} = (x_{肘} - x_{肩})i + (y_{肘} - y_{肩})j + (z_{肘} - z_{肩})k \quad (7)$$

肩关节屈伸角为 $L_{上臂}$ 在人体矢状面S2上的投影与垂直轴 $L_{垂}$ 的夹角;肩关节内收外展角为 $L_{上臂}$

在人体额状面 S3 上的投影与垂直轴 $L_{\text{垂}}$ 的夹角。髌关节角度的计算通过确定大腿矢量 $L_{\text{大腿}}$ 在人体各基本切面上的投影与基本轴的夹角进行计算：

$$L_{\text{大腿}} = (x_{\text{膝}} - x_{\text{髌}})i + (y_{\text{膝}} - y_{\text{髌}})j + (z_{\text{膝}} - z_{\text{髌}})k \quad (8)$$

髌关节屈伸角为 $L_{\text{大腿}}$ 在人体矢状面 S2 上的投影与垂直轴 $L_{\text{垂}}$ 的夹角。肘关节角为上臂向量与前臂向量之间的夹角，膝关节角为大腿向量与小腿向量之间的夹角。角速度为角度对时间的 1 阶导数，单位为 $^{\circ}/s$ 。雪杖倾斜角为雪杖向量与 Z 轴的夹角。身体前倾角为双侧踝点连线中点指向身体重心的向量与 Z 轴的夹角。重心垂直移动范围为人体重心在垂直方向的移动距离，并除以身高进行标准化。选取每位运动员周期速度最快的一次滑行代表运动员的优秀技术表现，进行指标计算和统计分析。

1.3 统计分析

应用 Pearson 相关计算指标间的相关系数。将周期特征指标与周期速度进行相关分析，以探究影响周期速度的周期特征指标；进一步将动作技术参数与影响周期速度的周期特征指标进行相关性分析，以确定影响周期速度的动作技术指标。采用独

表 2 上坡 DP 技术周期特征指标

Tab.2 Cycle characteristics indicators for double poling technique on uphill terrain

分组	周期速度/($m \cdot s^{-1}$)	滑幅/m	滑频/($次 \cdot s^{-1}$)	撑杖距离/m	回摆距离/m	撑杖时间/s	回摆时间/s
高速组 ($n=12$)	3.67±0.28	3.50±0.21	1.06±0.07	1.51±0.11	1.95±0.19	0.43±0.06	0.51±0.03
低速组 ($n=12$)	3.29±0.18	3.15±0.30	1.07±0.08	1.49±0.07	1.61±0.26	0.48±0.02	0.47±0.07
<i>P</i>	0.001	0.003	0.827	0.537	0.001	0.025	0.033

2.2 动作阶段的技术特征

动作技术参数与回摆距离之间的相关分析结果显示，在撑杖阶段，肘伸展时长 ($r = -0.512, P = 0.011$) 与回摆距离负相关，肘伸展平均角速度 ($r = 0.534, P = 0.036$) 与回摆距离正相关；在回摆阶段，肩屈曲时长 ($r = 0.526, P = 0.008$)、肩伸展平均角速度 ($r = 0.572, P = 0.004$)、肩外展时长 ($r = 0.605, P = 0.002$)、肩外展活动范围 ($r = 0.523, P = 0.009$)、肘屈曲时长 ($r = 0.555, P = 0.005$) 与回摆距离正相关，其他指标均与回摆距离不相关 ($P > 0.05$)。

两组间独立样本 *t* 检验结果显示，在撑杖阶段，高速组肩伸展时长、肘伸展时长小于低速组，高速组

立样本 *t* 检验比较高速组和低速组各指标的差异，以了解取得好成绩的动作技术特征。所有统计分析采用 SPSS 21.0 软件完成，统计学显著性的定义为一类错误概率不大于 0.05。

2 结果

2.1 周期特征

周期特征与周期速度之间的相关分析结果显示，滑幅与周期速度正相关 ($r = 0.699, P < 0.001$)，滑频与周期速度不相关 ($r = 0.284, P = 0.178$)。进一步分析组成滑幅的撑杖距离、回摆距离与周期速度的关系，结果表明，撑杖距离与周期速度不相关 ($r = -0.040, P = 0.851$)，但回摆距离与周期速度正相关 ($r = 0.764, P < 0.001$)。另外，撑杖时间与周期速度负相关 ($r = -0.832, P < 0.001$)，但回摆时间与周期速度不相关 ($r = 0.319, P = 0.129$)。

两组间独立样本 *t* 检验结果显示，高速组周期速度和滑幅均大于低速组，而滑频在两组间无统计学差异。高速组回摆距离和回摆时间均大于低速组，撑杖距离两组间无统计学差异，高速组撑杖时间小于低速组(见表 2)。

肘伸展平均角速度大于低速组，撑杖阶段其余指标在两组间均无统计学差异。在回摆阶段，高速组肩伸展平均角速度、肩外展活动范围、肘屈曲活动范围大于低速组，回摆阶段其他指标在两组间均无统计学差异(见表 3)。

髌、膝关节动作技术参数与回摆距离的相关结果显示，在撑杖阶段，髌伸展时长 ($r = -0.428, P = 0.037$) 与回摆距离负相关；在回摆阶段，髌屈曲活动范围 ($r = 0.452, P = 0.026$)、髌伸展时长 ($r = 0.774, P < 0.001$)、膝屈曲时长 ($r = 0.473, P = 0.020$)、膝屈曲活动范围 ($r = 0.602, P = 0.002$)、膝屈曲平均角速度 ($r = 0.485, P = 0.016$)、膝伸展时长 ($r = 0.503, P = 0.012$) 与回摆距离正相关，回摆阶段重心垂直移

动范围与回摆距离正相关($r = 0.504$, $P = 0.012$), 其他指标均与回摆距离不相关($P > 0.05$)。

两组间独立样本 t 检验结果显示,在撑杖阶段,髌、膝关节指标在两组间均无统计学差异,两组间雪杖倾斜角、身体倾斜角、重心垂直移动范围

均无统计学差异。在回摆阶段,高速组膝屈曲时长、膝屈曲活动范围均大于低速组,回摆阶段其他指标在两组间均无统计学差异,两组间雪杖倾斜角、身体倾斜角、重心垂直移动范围均无统计学差异(见表4)。

表3 撑杖和回摆阶段肩、肘关节动作技术特征

Tab.3 Technique characteristics of the shoulder and elbow joints in poling and swing phase

指标	撑杖阶段			指标	回摆阶段		
	高速组	低速组	P		高速组	低速组	P
肩屈曲时长/s	0.11±0.06	0.07±0.06	0.183	肩屈曲时长/s	0.36±0.07	0.33±0.10	0.418
肩屈曲活动范围/(°)	17.3±9.0	14.0±15.0	0.553	肩屈曲活动范围/(°)	74.6±16.1	71.3±10.4	0.557
肩屈曲平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	169.8±64.4	210.9±194.3	0.534	肩屈曲平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	212.7±51.1	237.0±105.3	0.480
肩伸展时长/s	0.31±0.10	0.40±0.09	0.030	肩伸展时长/s	0.14±0.06	0.12±0.08	0.404
肩伸展活动范围/(°)	55.5±21.5	69.0±11.9	0.070	肩伸展活动范围/(°)	20.7±5.8	14.2±10.5	0.073
肩伸展平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	185.8±61.9	181.3±47.3	0.842	肩伸展平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	155.9±43.0	112.9±47.2	0.029
肩内收时长/s	0.37±0.07	0.39±0.09	0.418	肩外展时长/s	0.46±0.07	0.41±0.06	0.088
肩内收活动范围/(°)	37.0±7.7	35.7±8.1	0.693	肩外展活动范围/(°)	42.8±9.6	35.6±7.3	0.049
肩内收平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	105.1±32.7	94.4±27.0	0.391	肩外展平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	97.2±28.8	88.2±17.9	0.366
肘伸展时长/s	0.30±0.03	0.36±0.07	0.017	肘屈曲时长/s	0.45±0.05	0.43±0.10	0.494
肘伸展活动范围/(°)	83.0±9.2	77.5±7.2	0.117	肘屈曲活动范围/(°)	76.7±10.1	67.7±8.0	0.025
肘伸展平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	279.4±27.7	224.4±42.7	0.001	肘屈曲平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	171.7±19.4	168.1±47.9	0.810

表4 撑杖和回摆阶段髌、膝关节以及雪杖、重心等指标的动作技术特征

Tab.4 Technique characteristics of the hip and knee joints as well as the pole, center of gravity in poling and swing phase

指标	撑杖阶段			指标	回摆阶段		
	高速组	低速组	P		高速组	低速组	P
髌屈曲时长/s	0.30±0.05	0.32±0.04	0.429	髌屈曲时长/s	0.17±0.03	0.15±0.03	0.075
髌屈曲活动范围/(°)	56.9±9.7	60.0±10.9	0.471	髌屈曲活动范围/(°)	29.7±7.9	23.7±7.8	0.074
髌屈曲平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	189.7±24.3	190.4±38.7	0.958	髌屈曲平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	172.5±41.9	153.2±31.3	0.216
髌伸展时长/s	0.13±0.05	0.16±0.04	0.215	髌伸展时长/s	0.34±0.03	0.31±0.06	0.184
髌伸展活动范围/(°)	14.2±6.7	15.9±6.6	0.523	髌伸展活动范围/(°)	70.4±12.5	65.7±11.3	0.345
髌伸展平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	112.6±45.6	109.5±47.4	0.870	髌伸展平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	207.0±31.7	212.1±41.0	0.740
膝屈曲时长/s	0.23±0.06	0.26±0.06	0.271	膝屈曲时长/s	0.19±0.05	0.14±0.03	0.011
膝屈曲活动范围/(°)	28.7±8.9	26.9±8.0	0.623	膝屈曲活动范围/(°)	24.9±7.9	16.2±6.5	0.007
膝屈曲平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	126.9±35.2	107.9±32.0	0.180	膝屈曲平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	135.0±43.6	110.7±28.2	0.119
膝伸展时长/s	0.19±0.07	0.20±0.06	0.817	膝伸展时长/s	0.32±0.04	0.32±0.06	0.948
膝伸展活动范围/(°)	14.7±7.3	13.0±8.4	0.594	膝伸展活动范围/(°)	33.2±7.1	30.8±5.3	0.372
膝伸展平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	80.4±36.6	69.3±43.3	0.505	膝伸展平均角速度/[(°)·s ⁻¹]	103.1±15.9	97.8±18.7	0.466
雪杖倾斜角范围/(°)	46.6±3.4	43.9±4.6	0.115	雪杖倾斜角范围/(°)	66.7±8.5	62.7±8.8	0.271
身体前倾角范围/(°)	28.3±2.5	30.0±4.0	0.213	身体前倾角范围/(°)	27.0±3.2	26.1±3.7	0.553
重心垂直移动范围/(m·BH ⁻¹)	0.18±0.02	0.18±0.02	0.595	重心垂直移动范围/(m·BH ⁻¹)	0.24±0.02	0.22±0.03	0.076

2.3 特征时刻技术特征

雪杖触地时刻运动学参数结果表明,各关节角度及雪杖角度与回摆距离均不相关($P > 0.05$)。两组间独立样本 t 检验结果显示,高速组身体前倾角小于低速组,其余关节及雪杖的技术特征均未发现统计学差异(见表5)。

3 讨论

比赛速度是动作技术的最终体现,直接决定最终的运动成绩。本研究中成绩好的高速组在上坡时DP技术的周期速度高于比赛成绩较差的低速组。1个动作周期的速度等于滑幅和滑频的乘积,本文

表5 雪杖触地时刻各关节及雪杖角度

Tab.5 Angles of the joints and poles at pole plant

指标	高速组	低速组	P
肩屈伸角/(°)	39.9±24.7	45.7±13.1	0.475
肘关节角/(°)	61.7±8.7	62.4±8.3	0.847
髋关节角/(°)	49.5±11.3	41.1±9.8	0.066
膝关节角/(°)	142.0±10.3	146.0±7.5	0.278
身体前倾角/(°)	20.8±2.4	23.6±2.6	0.014
雪杖倾斜角/(°)	16.9±3.2	17.0±3.0	0.933

结果显示,运动员上坡 DP 技术的速度主要与滑幅相关,而与滑频关系不明显。滑频与周期速度不相关,表明动作周期速度的差异主要是由滑幅不同导致,滑幅越长速度越快。而 1 个动作周期的滑幅可以分为撑杖阶段和回摆阶段,回摆距离是导致周期速度差异的原因,回摆距离越长,速度越快,而撑杖距离不影响周期速度。高速组和低速组的比较结果也进一步表明,成绩好的运动员上坡 DP 技术更注重撑杖之后的滑行,避免过早结束回摆。本文结果与文献[3-7, 12-14]的研究结论相似,后者结合动力学指标发现,优秀运动员的上肢力量更大,产生的绝对和相对峰值推进力更高,速度可以在短时间内达到更快,使回摆阶段的滑幅和时长变长,从而增大了整个周期的滑幅^[15]。

以上分析表明,上坡 DP 技术的回摆距离是影响动作速度的主要因素。因此,进一步分析动作时长、关节活动范围和关节运动角速度等技术特征指标与回摆距离的关系,以及成绩好的运动员的技术特征。分析结果表明,造成高速组和低速组成绩差异的技术特征指标主要集中在上肢环节。在撑杖阶段,运动员的肘关节伸展角速度越大,伸展时长越短,回摆距离越大,进而有利于滑幅和速度的增大。这可能与运动员上肢撑杖的发力动作有关,关节伸展时长越短,角速度越大,越有利于增大力的加载率,进而增大周期速度^[15-16]。但 Holmberg 等^[15]研究认为,DP 技术速度更快的运动员撑杖阶段肘关节屈曲活动范围更大、角速度更快;而本文发现,运动员在撑杖阶段肘关节表现出更多的伸展运动,未发挥肘关节屈曲活动的作用,这说明本研究中的运动员更倾向于在充分的后伸活动中获得推进力和推进距离。

结合回摆阶段的数据可以发现,运动员撑杖阶段以肩内收和肘伸展运动为主,而回摆阶段以肩外

展和肘屈曲运动为主,且回摆阶段肩外展和肘屈曲运动越大,回摆距离越大。回摆阶段是非发力阶段,运动员肩外展和肘屈曲增大可能会使上臂内收肌和伸展肌在回摆阶段储存更多的弹性势能,为撑杖阶段的运动做准备。

研究表明,使用 DP 技术速度更快的运动员撑杖阶段肘关节屈曲活动范围更大、角速度更快,认为这是肱三头肌拉长-缩短周期活动增强的体现^[17]。还有研究发现,当在跑台上使用 85% 的最大速度进行 DP 滑行时,速度较快的滑雪者在撑杖阶段表现出更快和更明显的肘关节和髋关节屈曲,同时在雪杖触地时刻有更大的肩关节外展角和更大的肘关节屈曲角,由此认为与此相关联的更大撑杖力和更短撑杖时间可以使伸臂肌肉在肘部屈曲时承受更大的预负荷,有助于在撑杖阶段将这些肌肉的弹性后坐力与拉长-缩短周期结合使用^[15]。结合以上研究中有关肌肉力量的解释,本文认为,我国低速组运动员成绩差的原因可能与肩外展、肘屈伸活动不充分有关。因此,今后应增大上肢肌肉力量,尤其是肩、肘关节力量,进一步充分发挥肩、肘关节拉长-缩短周期活动的作用。

在雪杖触地时刻,高速组的身体前倾角显著小于低速组,但与回摆距离不相关,说明身体前倾角并不是产生成绩差异的原因。该结果与文献[18-20]的研究结果有所不同,后者研究表明,在雪杖触地时刻,速度更快滑雪者有更大的身体前倾角,这是滑雪者以期利用身体更大的摆动幅度以及身体重力作用在雪杖上,产生更大的撑杖推进力^[13]。此外,有研究发现,在雪杖触地时刻速度更快的滑雪者会出现更大的膝关节和髋关节屈角^[20-21]。但本研究没有表现出以上差异,这可能与我国运动员动作特异性以及技能水平有关,在今后的训练中应注意增大雪杖触地时刻髋、膝关节的屈曲角度,以及身体前倾角。

本研究中比赛场地上坡地形的坡度较小,与前人研究中 7° 的上坡具有一定差距,故本文结果仅适用于缓和上坡条件下,后续应进一步补充对陡峭上坡的研究,从而可以与国际高水平运动员技术参数进行对比,为国内运动员技术提高提供参考。

4 结论

我国越野滑雪运动员以 DP 技术上坡时,运动

员之间速度的差异主要与滑幅有关,滑幅的差异主要来自于回摆阶段,回摆距离越大,周期速度越大。

影响运动员回摆距离的技术主要在上肢。撑杖阶段肘伸展活动越大,伸展时长越短,越有利于提高回摆距离;回摆阶段肩外展和肘屈曲活动越大,越有利于提高回摆距离,进而提高周期速度。

在今后的训练中,我国运动员应加强上肢肌肉力量,尤其是肩、肘关节力量,进一步充分发挥肩、肘关节活动的作用,同时在雪杖触地时刻应注意增大身体前倾角以及髌、膝关节的屈曲角度。

参考文献:

[1] MARSLAND F, MACKINTOSH C, HOLMBERG H, et al. Full course macro-kinematic analysis of a 10 km classical cross-country skiing competition [J]. PLoS One, 2017, 12(8): e182262.

[2] LOSNEGARD T. Energy system contribution during competitive cross-country skiing [J]. Eur J Appl Physiol, 2019, 119(8): 1675-1690.

[3] NORMAN RW, KOMI PV. Mechanical energetics of world class cross-country skiing [J]. Int J Sport Biomech, 1987, 3(4): 353-369.

[4] SANDBAKK O, LOSNEGARD T, SKATTEBO O, et al. Analysis of classical time-trial performance and technique-specific physiological determinants in elite female cross-country skiers [J]. Front Physiol, 2016, 7: 326.

[5] BOLGER CM, KOCBACH J, HEGGE AM, et al. Speed and heart-rate profiles in skating and classical cross-country skiing competitions [J]. Int J Sports Physiol Perform, 2015, 10(7): 873-880.

[6] BILODEAU B, RUNDELL KW, ROY B, et al. Kinematics of cross-country ski racing [J]. Med Sci Sports Exerc, 1996, 28(1): 128-138.

[7] STOGGL T, WELDE B, SUPEJ M, et al. Impact of incline, sex and level of performance on kinematics during a distance race in classical cross-country skiing [J]. J Sports Sci Med, 2018, 17(1): 124-133.

[8] 庄薇, 邵恩, 朱志强, 等. 基于世界级运动员身体形态、机能及素质特征的雪上项目冠军模型研究[J]. 体育科学, 2018, 38(10): 80-88.

[9] HAY JG. The biomechanics of sports techniques [M].

Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

[10] YU B, GABRIEL D, NOBLE L, et al. Estimate of the optimum cutoff frequency for the butterworth low-pass digital filter [J]. J Appl Biomech, 1999, 15(3): 318-329.

[11] 刘卉. 三维摄影解析中人体三关节角度的计算方法[J]. 北京体育大学学报, 2004, 2(6): 767-769.

[12] STOGGL TL, MULLER E. Kinematic determinants and physiological response of cross-country skiing at maximal speed [J]. Med Sci Sports Exerc, 2009, 41(7): 1476-1487.

[13] JONSSON M, WELDE B, STOGGL TL. Biomechanical differences in double poling between sexes and level of performance during a classical cross-country skiing competition [J]. J Sports Sci, 2019, 37(14): 1582-1590.

[14] ZOPPIROLI C, HEBERT-LOSIER K, HOLMBERG HC, et al. Biomechanical determinants of cross-country skiing performance: A systematic review [J]. J Sports Sci, 2020, 38(18): 2127-2148.

[15] HOLMBERG H, LINDINGER S, STÖGGL T, et al. Biomechanical analysis of double poling in elite cross-country skiers [J]. Med Sci Sports Exerc, 2005, 37(5): 807-818.

[16] SUNDE A, JOHANSEN J, GJØRA M, et al. Stronger is better: The impact of upper body strength in double poling performance [J]. Front Physiol, 2019, 10: 1091.

[17] SMITH GA, FEWSTER JB, BRAUDT SM. Double poling kinematics and performance in cross-country skiing [J]. J Appl Biomech, 1996, 12(1): 88-103.

[18] STOGGL T, HOLMBERG HC. Force interaction and 3D pole movement in double poling [J]. Scand J Med Sci Sports, 2011, 21(6): e393-e404.

[19] STOGGL TL, HOLMBERG HC. Double-poling biomechanics of elite cross-country skiers: Flat versus uphill terrain [J]. Med Sci Sports Exerc, 2016, 48(8): 1580-1589.

[20] ZOPPIROLI C, PELLEGRINI B, BORTOLAN L, et al. Energetics and biomechanics of double poling in regional and high-level cross-country skiers [J]. Eur J Appl Physiol, 2015, 115(5): 969-979.

[21] LINDINGER SJ, HOLMBERG HC. How do elite cross-country skiers adapt to different double poling frequencies at low to high speeds? [J]. Eur J Appl Physiol, 2011, 111(6): 1103-1119.