



越野滑雪项目配速策略研究新方法:基于GNSS定位数据精细化分析

Exploring New Method for Researching Pacing Strategies in Cross-Country Skiing: A Comprehensive Analysis Based on GNSS Data

尚磊¹, 史瑞应², 蔡旭旦³, Craig A. Staunton⁴, 陈小平^{5*}
SHANG Lei¹, SHI Ruiying², CAI Xudan³, Craig A. Staunton⁴,
CHEN Xiaoping^{5*}

摘要:目的:分析我国优秀越野滑雪运动员短距离项目全程和分段的配速策略特征。方法:16名越野滑雪国家集训队男子运动员分别进行雪上最大速度测试和短距离1.5 km自由技术比赛。短距离1.5 km比赛场地分为6个段落(S1~S6),使用GNSS定位系统和计时设备测量运动员比赛中时间、速度和技术使用等指标数据。通过坐标映射程序的方法对其滑行位置和速度进行标准化处理,使用SPM 1D回归模型分析瞬时速度和分段时间的相关关系。结果:1)上坡段S3(339~476 m)、S3坡顶位置(517~537 m)、S5(1 127~1 167 m),平地段S1(13~84 m)、S6(1 223~1 400 m),下坡段S2(85~134 m)、S4的初始段(652~730 m)以及转弯区域的瞬时速度与其分段时间存在显著相关($P<0.01$),不同区域内的速度出现显著变化($P<0.05$)。后半程上坡段S5的平均滑行速度显著高于前半程上坡段S3($P<0.01$)。2)技术动作周期总量、G3技术动作周期数量与比赛时间以及上坡段时间存在负相关关系($r>-0.65, P<0.01$)。快速组运动员比赛中G3技术比例显著高于慢速组($P<0.01$),更快的运动员上坡段和平地段的G3技术速度和步幅显著高于较慢的运动员($P<0.01$),在S1—S2和S3—S4段的转换路段G3技术速度和步频显著增加($P<0.01$)。结论:1)越野滑雪短距离比赛中不同路段的配速策略与运动员竞技表现密切相关。上坡段的爬升阶段和靠近终点的位置采用更加积极的配速策略。平地段快速启动和终点冲刺区域内更快的瞬时速度与其分段时间有关,较高的下坡段的转弯速度有利于获得更好的下坡段表现。2)较少的动作周期数量和较高的G3技术比例与更好的越野滑雪短距离竞技表现相关联。上坡和平地段中更快的运动员G3技术速度具有更长的步幅。在上坡坡顶衔接转换中提高步频有利于保持较高的滑行速度。

关键词:越野滑雪;配速策略;GNSS定位系统;短距离比赛

Abstract: Objective: To examine the characteristics of pacing strategies of China's elite cross-country skiers during the sprint competition in the different terrains. Methods: Sixteen male cross-country skiers from the national team completed a maximum speed test and a 1.5 km sprint skating race. The 1.5 km sprint course was divided into 6 sections (S1~S6), and the GNSS system and timing equipment were used to measure skiers' times, speed, and sub-techniques during the race. Coordinate mapping procedure was utilized to normalize skiers' skiing position speed, and the SPM 1D regression model was introduced to analyze the correlation between instantaneous speed and section time. Results: 1) In the uphill terrain S3 (339~476 m), at the top of S3 (517~537 m), and in the uphill terrain S5 (1 127~1 167 m), as well as in the flat terrain S1 (13~84 m) and S6 (1 223~1 400 m), the downhill terrain S2 (85~134 m), the initial section of S4 (652~730 m), and the turning area, a significant correlation is observed between the instantaneous speed and sectional times ($P<0.01$). Furthermore, significant speed variations were noted within different areas ($P<0.05$). Average skiing speed of the second half of the uphill terrain S5 was significantly higher than that of the first half of the uphill terrain S3

基金项目:

国家体育总局科技创新项目(22KJCX068);江苏省社会科学基金项目(22TYD012)

第一作者简介:

尚磊(1991-),男,博士,主要研究方向为运动训练理论与实践, E-mail:13051832033@163.com。

*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理论、高水平运动员训练负荷监控和体能训练, E-mail:chenxiaoping@ciss.cn。

作者单位:

- 1.清华大学,北京 100084;
 - 2.中国政法大学,北京 102249;
 - 3.南京师范大学,江苏南京 210023;
 - 4.瑞典中部大学,厄斯特松德 SE-83125;
 - 5.国家体育总局体育科学研究所,北京 100061
- 1.Tsinghua University, Beijing 100084, China;
 - 2.China University of Political Science and Law, Beijing 102249, China;
 - 3.Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
 - 4.Mid Sweden University, Östersund, SE-83125, Sweden;
 - 5.China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China.

($P < 0.01$). 2) The total number of cycle movements and the number of G3 correlated negatively with the race time and time spent on the uphill terrain ($r > -0.65$, $P < 0.01$). The proportion of G3 in the fast skiers was significantly higher than that of the slow skiers ($P < 0.01$). Faster skiers had higher G3 speed and cycle length than slower skiers on uphill and flat terrains, respectively ($P < 0.01$), as well as a increase ($P < 0.01$) in G3 speed and cycle frequency in switchbacks in the S1—S2 and S3—S4, respectively. Conclusions: 1) Pacing strategies in different sections of a cross-country skiing sprint were closely related to athletes' performance. A more positive pacing strategy should be adopted in uphill terrains and near the finish line. Faster instantaneous speed within the start and finish sprint area on the flat terrain were related to section times, higher turning speed in downhill terrains favored better performance. 2) Less cycle movements and a higher percentage of G3 were associated with better performance in the sprint event. Faster skiers on the uphill and flat terrains had longer cycle lengths for G3 speed. Increasing cycle frequency during transitions at the top of uphill terrains facilitated the maintenance of higher skiing speed.

Keywords: *cross-country skiing; pacing strategy; GNSS; sprint*

中图分类号:G863.13 **文献标识码:**A

越野滑雪是雪上运动金牌数最多的竞速类项目,与越野滑雪技术相关的冬奥会项目金牌总数约占 24%。越野滑雪比赛场地由 1/3 上坡、1/3 平地 and 1/3 下坡构成,同时传统式和自由式技术共超过 10 余种技术(杨威等, 2020a, 2020b)。在运动员比赛过程中,不同类型路段的多次转换使得滑雪技术需频繁交替(包蕾等, 2021; 焦怡然等, 2021),这直接增加了越野滑雪比赛难度和复杂性。然而,由于运动员的能量供应有限,如何在比赛过程中合理选择配速策略对于越野滑雪运动员的竞技表现至关重要。

配速策略主要分为 6 种,即全速型、快速启动型、慢速启动型、匀速型、抛物线型和变化型(Abbiss et al., 2008)。越野滑雪比赛时间通常为 3 min~2 h,世界优秀越野滑雪运动员在短距离和长距离比赛中的配速策略主要分为两部分:1)通过逐圈分析速度变化的方式,显示“主动型”是主要采用的配速策略(Andersson et al., 2010; Losnegard et al., 2016; Stöggel et al., 2018; Welde et al., 2017),即运动的前期阶段速度逐渐达到最高,随着比赛进程速度逐渐下降,以相对较低的速度完成比赛的策略。2)剖析不同路段的速度特征,显示出优秀越野滑雪运动员在上坡、平地和下坡段中主要使用多种可变的配速策略方式。例如,在短距离比赛中上坡段和平地段冲刺主动增加输出功率,在途中平地段和下坡段中保持匀速或减少输出功率的配速策略有利于提高比赛成绩(Sundström et al., 2013; Swarén et al., 2019)。但逐圈分析的方法研究并未完全显示出越野滑雪运动员的分段速度和时间变化,这主要与不同路段的转换和多种专项技术有关。与此同时,由于越野滑雪比赛场地的特征和要求,单一路段长度在 100~500 m。北京 2022 年冬奥会越野滑雪比赛场地最长路段超过 450 m,最大坡度超过 22%,单次爬升高度 45 m 以上。因此,使用单一路段的平均时间和速度等指标难以准确反映运动员的竞技表现。

近年来,科技助力越野滑雪训练和比赛已成为主要发展趋势(林岭等, 2021; 刘卉, 2022),可穿戴式的数字化

技术监控训练和比赛负荷逐渐取代了视频记录和人工计时等传统手段。全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)可穿戴设备已经成为越野滑雪比赛分析和研究的主要工具(林岭等, 2021; 刘卉, 2022; Gløersen et al., 2018)。该设备具有高采样频率(50~200 Hz)和准确的测量精度,可有效分析运动员滑行速度、加速度和技术使用等指标。目前,GNSS 可穿戴设备对越野滑雪比赛成绩的助力和提升作用在诸多研究中得以体现(Andersson et al., 2010; Ihalainen et al., 2020; Staunton et al., 2022)。

尽管研究表明,逐圈分析和不同单一路段的配速策略对越野滑雪运动员竞技水平和比赛成绩有重要作用,但不同水平运动员短距离比赛中单一路段内的滑行速度和专项技术使用,目前还不清楚。为此,本研究拟以我国现役优秀男子越野滑雪运动员为研究对象,在充分了解和深入总结前人研究成果的基础上(蔡旭旦等, 2020, 2021, 2022; 张蓓等, 2020),运用 GNSS 等相关测试设备,对越野滑雪短距离 1.5 km 自由技术项目的配速策略特征进行研究。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

16 名男子越野滑雪国家集训队运动员(2 名国际级运动健将, 6 名运动健将, 8 名一级运动员),年龄(20.2±1.2)岁,身高(180.0±3.7) cm,体重(72.2±5.9) kg, BMI 指数(22.2±0.9) kg/m²,周训练时间(28.2±0.2)h,所有运动员均充分了解研究目的和比赛测试流程,参加测试前运动员近 1 个月内无运动损伤,身体健康。

1.2 雪上测试

1.2.1 最大速度测试

最大速度测试是为了确定运动员在其运动项目中能够达到的最高速度,评估运动员的专项技术速度和爆发力水平。测试前,所有运动员需要进行 15 min 热身活动,主要包括 10 min 的中强度自由技术滑雪(70%~80%最大心

率)热身和5 min 4~6次自由技术冲刺热身。热身结束3 min后开始最大速度测试。自由滑雪一步一撑技术最大速度测试方案(Andersson et al., 2010)为运动员在雪上平地(坡度0°~1°)从固定起点处启动加速冲刺80 m,以每20 m为分段,放置一对电子计时门(Brower Timing, 美国),记录运动员各个分段时间和速度。

1.2.2 短距离1.5 km自由技术比赛

短距离1.5 km自由技术比赛是按照越野滑雪国际竞赛规则进行的正式比赛。要求运动员按照赛道设置和路标滑行,运动员使用自由技术,间隔15 s出发,并在比赛场地内设有专业裁判。短距离比赛场地使用北京2022年冬奥会越野滑雪1.5 km比赛场地(国际雪联官方认证),高度差30 m,最大爬坡29 m,总爬坡57 m。根据越野滑雪比赛场地规则,将1.5 km比赛场地分为6个段落,上坡和下坡路段的高度差在10 m以上,平地段包括短距离的缓上坡和下坡,高度差小于10 m(FIS, 2017)。其中,上坡段2个(S3、S5),平地段2个(S1、S6),下坡段2个(S2、S4)(图1,图2)。1.5 km比赛场地总长度1 461 m,其中,上坡段总计566 m,占比38.7%;平地段共计348 m,占比23.8%;下坡段共计547 m,占比37.5%。

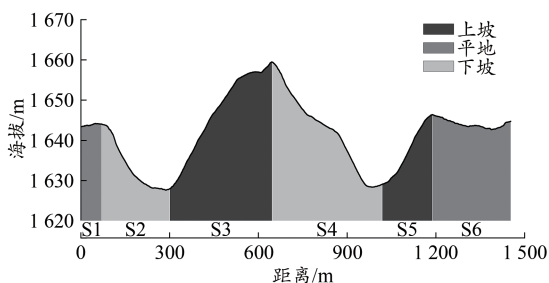


图1 越野滑雪1.5 km比赛场地剖面分段图

Figure 1. The Terrain Characteristics of Cross-Country Skiing Sprint 1.5 km Course

测试前进行40 min热身活动,热身方案主要包括10 min动态拉伸+25 min中强度训练(70%~80%最大心率)+5 min高强度冲刺训练(82%~87%最大心率)。所有运动员都被要求在测试前的最后2天进行标准化训练负荷(小于1.5 h低强度训练)。运动员的滑雪杖、滑雪鞋和自由式滑雪板根据个人尺寸进行选择,滑雪杖长度不得高于90%个人身高,测试前一天自由式滑雪板由团队专业打蜡师进行抛光和打蜡。测试日温度为-5.0℃,晴天,雪湿度29.6%,场地雪质为粒状雪(雪质较硬)。起点处,所有运动员在脚踝位置佩戴计时芯片,用于记录滑行时间。电子计时系统(远动未来,中国)采用Prochip芯片,全密封设计芯片,防水级别高,适用于雪上项目,感应灵敏度较高,计时准确,使用高性能电池,耐低温,可以在0.003 s内识别出运动员身份。运动员比赛中位置和速度数据使用GNSS定位系统和惯性测量设备测量(Inertial Measurement

Unit, IMU), 体积为81 mm×53 mm×17 mm,重量约为78 g, GNSS数据以10 Hz采样频率记录,惯性测量数据以200 Hz采样频率记录(Archinisis Gns, 瑞士)。测试当天,在比赛室外场地提前打开设备10 min以上,确保设备与卫星进行有效连接。研究表明,GNSS设备在越野滑雪比赛中定位、速度和时间分析结果具有准确性(水平面距离误差1.0 m,速度误差0.1 m/s)。越野滑雪自由技术主要包括抛镐(Gera 2, G2)、一步一撑(Gera 3, G3)和两步一撑(Gera4, G4)等。GNSS系统根据运动员使用的不同技术,量化关节角速度、躯干角度变化以及子技术特征,分析运动员不同子技术类型、步频和步幅(Fasel et al., 2016, 2017)。

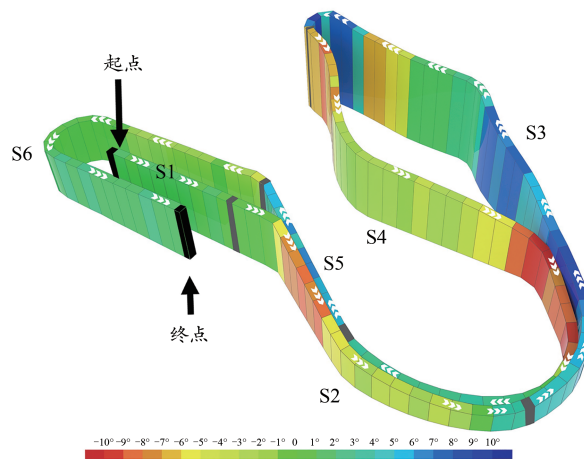


图2 越野滑雪1.5 km比赛场地3D分段图

Figure 2. 3D Sectional Illustration of the Cross-Country Skiing Sprint 1.5 km Course

注:红色越深表示下坡坡度越大,蓝色越深表示上坡坡度越高,灰色表示不同的分段间隔,黑色表示起点或终点。

1.3 数据处理

为了比较运动员在短距离1.5 km比赛场地相同位置的分段时间和速度,本研究采用坐标映射程序的方法对其滑行位置和速度进行标准化处理。首先,在比赛开始前使用GNSS定位系统设备测量短距离1.5 km比赛场地,该设备具有1 cm±1 ppm水平和2 cm±1 ppm垂直定位精度。其次,基于GNSS设备的距离和海拔等定位数据建立比赛场地模型。再次,比赛场地模型使用0.3 Hz的二阶低通Butterworth滤波器进行滤波,将比赛场地的映射轨迹坐标重新采样为1 m间隔,并使用3次样条进行插值。然后,将每名运动员在短距离比赛中GNSS数据(位置和速度)进行相同的Butterworth滤波器进行处理,再将GNSS位置数据映射到沿着映射轨迹最小化测量位置和映射轨迹之间欧几里得距离的点上。最后,为了比较不同运动员在映射轨迹相同位置的时间和速度,将GNSS设备记录的时间和速度线性插值到映射轨迹上的每个1 m位置。

1.4 统计分析方法

1)采用Shapiro-Wilk检验测试数据正态性,数据以平

均值±标准差($M\pm SD$)表示;2)使用 Pearson 相关系数或 Spearman 相关系数检验上坡段、平地段和下坡段时间以及专项技术表现指标与总成绩或分段时间的相关性,相关系数: $0.1 < r < 0.3$ 为低度相关; $0.3 < r < 0.5$ 为中度相关; $0.5 < r < 0.7$ 为中高度相关; $0.7 < r < 0.9$ 为高度相关; $r > 0.9$ 为极高度相关;3)使用多元回归分析方法评价上坡段、平地段和下坡段时间对比赛成绩的贡献率;4)计算效应量(effect size, ES)并评估差异大小,0.2 为小效应,0.5 为中效应,0.8 为大效应;5)瞬时速度曲线(一维数据)采用 SPM 方法进行分析,使用软件 MATLAB R2020b(The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA)和 SPM 1D(Pataký, 2012, USA)。使用 SPM 1D 回归模型分析瞬时速度和分段时间的相关关系,临界阈值设定为 $\alpha=0.05$ 。当 SPM{t}值超过临界阈值时,瞬时速度与分段时间存在显著关系。

2 研究结果

2.1 基于 GNSS 定位数据的短距离 1.5 km 比赛配速策略

2.1.1 不同路段的分段时间结果

我国优秀男子越野滑雪运动员短距离 1.5 km 比赛平均成绩为(186.6 ± 5.0)s,平均速度为(7.8 ± 0.2)m/s,上

坡段、平地段和下坡段总时间比例分别为 $47.6\pm 1.0\%$ 、 $24.4\pm 0.4\%$ 和 $28.1\pm 0.7\%$ 。多元逐步回归分析结果显示,短距离 1.5 km 自由技术赛上坡段、平地段和下坡段总时间(自变量)分别解释比赛总成绩(因变量)77.8%(调整后 $R^2=0.778, \beta=0.89$)、19.1%(调整后 $R^2=0.129, \beta=0.43$)、1.6%(调整后 $R^2=0.016, \beta=0.25$)。

在传统分析方法中,短距离 1.5 km 比赛中各路段时间与总成绩相关分析如表 1 所示。上坡段和平地段总时间与总成绩的相关系数 r 分别为 0.92 和 0.85($P < 0.01$),其中,上坡段(S3、S5)和平地段(S1、S6)分别与总成绩显著相关($r=0.58\sim 0.85, P < 0.01/0.05$)。下坡段(S2、S4)总时间与总成绩不存在显著相关($P > 0.05$)。

比较传统分析方法中单一路段的相关结果,SPM 分析方法在其基础上更注重单一路段的具体区域内速度变化。在 SPM 分析方法中,短距离 1.5 km 比赛中各上坡、平地和下坡段的瞬时速度与其分段时间的 SPM 分析结果如表 2 所示。SPM 回归分析结果显示为 3 个上坡、2 个平地 and 2 个下坡段的不同区域内,运动员的瞬时速度与其各分段时间存在显著相关关系($P < 0.01$),即运动员在此区域内的瞬时速度越快,其分段时间越短。

表 1 短距离 1.5 km 比赛成绩和各子路段时间相关分析

Table 1 Correlation Analysis of 1.5 km Sprint Race Performance and Time Spent on Each Terrain

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
地形	平地	下坡	上坡	下坡	上坡	平地
平均时间/s	9.6 ± 0.4	20.4 ± 0.8	62.2 ± 3.0	31.9 ± 0.7	26.6 ± 1.0	35.9 ± 1.3
r	0.58*	0.48	0.82**	0.51	0.85**	0.63**
95% CI	-0.40~0.93	-0.18~0.46	0.32~0.97	-0.10~0.88	-0.06~0.15	0.01~0.93
P	0.03	0.08	<0.01	0.07	<0.01	<0.01

注:*表示 $P < 0.05$,**表示 $P < 0.01$ 。

表 2 不同路段内瞬时速度与分段时间 SPM 集群位置、时间、速度和时间差

Table 2 SPM Cluster of Instantaneous Speed and Section Time in the Position, Time, Speed, and Time Difference within Different Terrains

地形	分段	集群起点/m	集群终点/m	集群距离/m	集群时间/s	集群速度/($m\cdot s^{-1}$)	时间差/s
平地	S1	13	84	71	7.7 ± 0.3	7.3 ± 0.2	1.1
下坡	S2	85	134	49	6.9 ± 0.2	9.7 ± 0.2	0.4
上坡	S3	339	476	137	29.5 ± 1.7	4.7 ± 0.3	4.9
		517	537	20	4.6 ± 0.2	4.6 ± 0.2	0.5
下坡	S4	652	730	78	8.4 ± 0.2	9.9 ± 0.3	0.8
上坡	S5	1 127	1 167	40	8.9 ± 0.5	4.7 ± 0.3	1.9
平地	S6	1 223	1 400	177	22.5 ± 0.7	7.9 ± 0.2	2.4

2.1.2 不同路段的分段速度结果

2.1.2.1 传统分析方法

短距离 1.5 km 比赛场地的上坡、平地和下坡段长度、平均坡度以及我国优秀男子越野滑雪运动员在各路段的平均速度如表 3 所示。1)后半程的下坡段(S4)和平地段

(S6)长度均分别高于前半程 52%(S2)和 280%(S1),且下坡段平均坡度高于前半程 24%。尽管前半程的上坡段(S3)坡长高于后半程(S5)61%,而二者的平均坡度基本相近(相差 0.5%)。2)后半程上坡段(S5)的平均速度和步幅显著高于前半程(S3)45%($P < 0.01, ES=8.3$)和 42%($P < 0.01$,

ES=3.6);前半程平地段(S1)的平均速度和步幅显著低于后半程(S6)3%($P<0.05$, $ES=0.7$)和5%($P<0.05$, $ES=0.4$)。3)最快运动员与最慢运动员上坡、平地和下坡段时间差

总和占比总时间差分别为58%、24%和18%,其中上坡段(S3)时间差占比43%。

表3 短距离1.5 km比赛各路段地形和运动学指标
Table 3 Terrain and Kinematic Indicators for 1.5 km Sprint Race Sections

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
距离/m	70	227	342	345	213	264
平均坡度/(°)	0.6	-7.5	8.9	-9.3	8.4	-0.5
平均速度/(m·s ⁻¹)	7.2±0.3*	11.2±0.4	5.5±0.3#	10.8±0.2	8.0±0.3	7.4±0.3
平均步频/Hz	0.63±0.13	0.59±0.16	0.57±0.07	0.65±0.18	0.59±0.07	0.61±0.14
平均步幅/m	11.4±1.8*	12.4±1.1	9.6±0.4#	12.9±0.2	13.6±1.5	12.0±1.2
时间差/s	1.8	2.4	12.0	2.5	4.3	4.8

注:*表示 $P<0.05$ (S1 vs S6),#表示 $P<0.01$ (S3 vs S5);下坡段(S2和S4)平均速度的步频和步幅指标由G3和G4技术计算所得,不包括下坡段滑降阶段。

2.1.2.2 SPM分析方法

由于越野滑雪比赛场地的不同路段具有波动起伏和轨迹变化的特点,传统分析方法中使用单一路段的平均坡度、速度、步频、步幅和时间差等指标未能有效反映出运动员的竞技表现。而SPM分析方法在此基础上更精细地量化了单一路段内的关键区域,明确运动员在上坡、平地和下坡衔接等具体路段变化的运动学指标变化特征。

在上坡段中,S3段前半程(339~476 m)、S3段坡顶位置(517~537 m)和S5段后半程(1 127~1 167 m)集群内的瞬时速度与其分段时间存在显著相关($P<0.01$;图3灰色区域标记),平均速度分别从(6.6±0.7)m/s下降到(4.7±0.3)m/s、从(4.4±0.1)m/s增加到(4.6±0.2)m/s以及从(4.5±0.1)m/s增

加到(4.7±0.2)m/s。在平地段中,S1段的部分区域内(13~84 m)、S6段中部的直线和转弯区域内(1 223~1 400 m)的瞬时速度与分段时间存在显著相关($P<0.01$),平均速度分别从(6.1±0.1)m/s增加到(7.4±0.5)m/s、从(6.7±0.5)m/s增加到(8.0±0.4)m/s。在下坡衔接段中,S2段的初始段(85~134 m)、S4段的初始段(652~730 m)转弯区域内的瞬时速度与分段时间存在显著相关($P<0.01$),平均速度分别从(7.4±0.2)m/s增加到(9.7±1.2)m/s、从(6.2±0.5)m/s增加到(9.9±2.0)m/s。此外,S4段的初始段(652~730 m)和S6段转弯区域内(1 223~1 400 m)的步频分别增加2%[从(0.85±0.01)Hz增加到(0.87±0.01)Hz]、3%[从(0.72±0.01)Hz增加到(0.74±0.01)Hz](图4)。

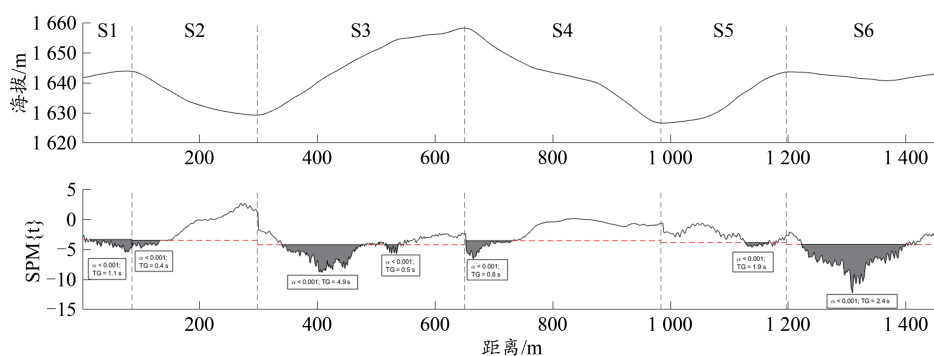


图3 短距离1.5 km比赛不同路段内瞬时速度与分段时间SPM分析结果

Figure 3. Results of SPM Analysis of Instantaneous Speed and Section Time in Different Terrain of the 1.5 km Sprint Race

注:TG表示该区域内最快与最慢运动员的时间差。

上坡段S3是最快运动员和最慢运动员时间差最多的集群(4.9 s)(表2)。在上坡段、平地和下坡段中 fastest 运动员与最慢运动员的时间差分别为7.3、3.5和1.2 s。

2.1.3 不同路段的专项技术结果

越野滑雪短距离1.5 km全程比赛中技术动作周期数量为116±8,技术动作周期总量、G3技术动作周期数量与比赛时间和上坡段时间存在高度负相关关系($r>-0.65$, $P<0.01$)。

自由技术中各子技术G2、G3、G4技术动作周期数量(时间比例)分别为6±1(3.1%±1.0%)、66±5(60.7%±2.7%)和10±5(7.6%±3.8%)。其中,G3技术动作周期数量和时间比例最高,均显著高于其他子技术($P<0.01$, $ES>11.0$)。运动员G3技术最大速度测试时间和最大速度分别为(8.8±0.7)s和(9.1±0.7)m/s,平地段S1和S6内G3技术的平均速度/最大速度比例分别为77%±1%和94%±1%。

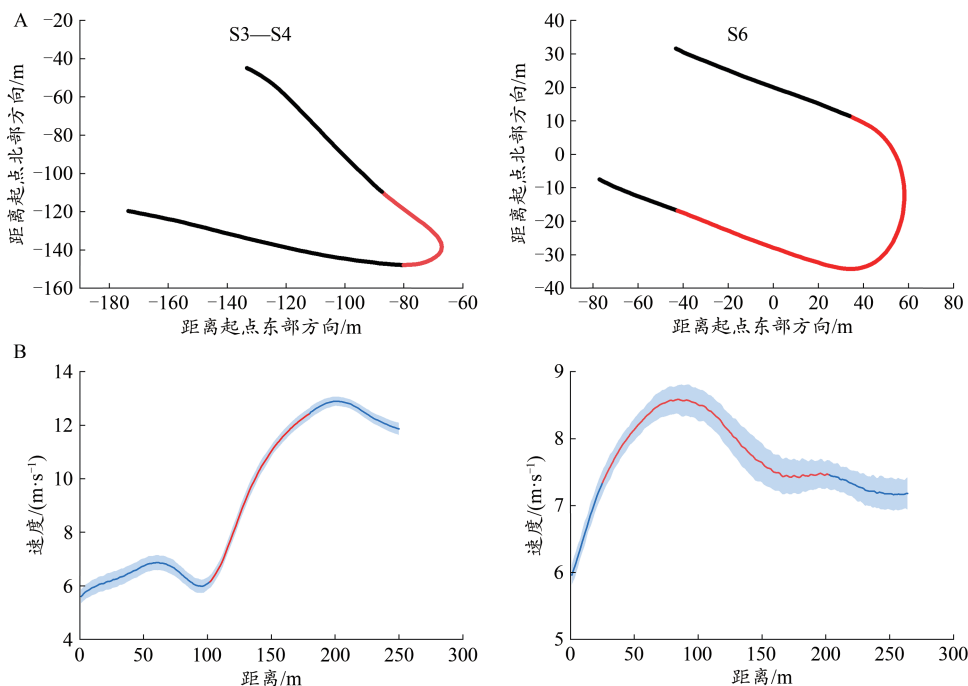


图 4 上坡段 S3 至下坡段 S4 和平地段 S6 内瞬时速度和分段时间 SPM 分析

Figure 4. SPM Analysis of Instantaneous Speed and Section Time within Uphill S3 to Downhill S4 and Flat S6

注:A. 比赛场地轨迹, 红色表示瞬时速度和分段时间的区域; B. 速度曲线, 红色表示瞬时速度和分段时间的区域。

以短距离 1.5 km 比赛最快 6 名运动员为快速组, 最慢 6 名运动员为慢速组, 2 组运动员的滑行速度、专项技术使用比例和差异如图 5 所示。快速组运动员全程平均速度高于慢速组运动员 7% [(7.9±0.3) m/s vs (7.4±0.1) m/s, $ES=2.2, P<0.01$], G3 技术比例高于 14% [(60.9±0.4)% vs (53.2±4.7)%], $ES=2.3, P<0.01$], G2 技术比例低于 2.3 倍 [(1.6±0.3)% vs (5.3±1.6)%], $ES=3.2, P<0.01$], G4 技术比例不存在显著性差异 [(11.4±1.7) vs (10.4±1.0)%, $P>0.05$]。快速组运动员在 S1 启动阶段、S1—S2 衔接段、S3 上坡段前半程和 S4—S5 衔接段中的 G2 和 G4 技术比例显著低于慢速组 ($P<0.05$; 图 5)。

传统分析和 SPM 分析方法均显示出快速组与慢速组运动员的 G3 技术速度和步幅在全程比赛、上坡段 (S3、S5) 和平地段 (S1) 中存在显著性差异 ($P<0.05$), 但区域位置有所差异 (图 6, 表 4)。同时, 这 2 种方法表明快速组和慢速组运动员 G4 技术的速度、步频和步幅均未表现出显著差异 ($P>0.05$)。在传统分析方法中, 快速组运动员的 G3 技术速度在全程比赛、上坡段 (S3、S5) 和平地段 (S1) 中分别高于慢速组 5%、7% 和 5% ($P<0.05, ES>0.6$), 步幅分别高 3%、5% 和 4% ($P<0.05, ES>0.5$)。与 SPM 分析方法相比较, 传统分析方法对单一路段内专项技术的平均速度忽略了坡长和坡度的变化, 进而不利于比较不同水平运动员比赛中关键路段的竞技表现。快速组与慢速组运动员在平地段的显著性区域内速度、步幅和步频比较结果如表 4 所示。在 SPM 分析方法中, 上坡段 S3 和 S5 显著性区域内, 快速组运动员 G3 技术的速度分别高于

慢速组 4%、6% ($ES=0.8, P<0.01$; $ES=1.8, P<0.01$), 步幅分别高于慢速组 4%、8% ($ES=0.3, P<0.05$; $ES=1.4, P<0.01$)。S3 段坡顶位置 (517~537 m) 快速组运动员 G3 技术的速度和步频分别提高 5% 和 3% ($ES=1.1, P<0.01$; $ES=0.7, P<0.01$)。平地段 S1 和 S6 区域内, 快速组运动员 G3 技术的速度分别高于慢速组 3% 和 3% ($ES=0.2, P<0.05$), 步幅分别高于慢速组 4% 和 2% ($ES=0.3, P<0.05$)。

此外, 在 S2 段的初始段 (85~134 m) 区域内, 快速组运动员 G3 技术速度、步频分别高于慢速组 4% 和 3% ($ES=1.2, P<0.05$; $ES=0.3, P<0.05$)。S4 段的初始段 (652~730 m) 转弯区域内, 快速组运动员 G3 技术速度、步频分别高于慢速组 7% 和 4% ($ES=1.1, P<0.05$; $ES=0.3, P<0.05$)。

3 讨论

本研究基于 GNSS 可穿戴式设备, 采用坐标映射程序的方法对我国优秀越野滑雪运动员短距离 1.5 km 自由技术比赛的滑行位置和速度以及技术使用进行标准化处理, 结果表明: 1) 上坡段时间是影响比赛成绩的最重要因素之一, 前半程或后半程上坡段中不同区域内的滑行速度与其分段时间密切相关; 2) 比赛出发后的加速和终点前的平地段区域内更高的滑行速度与更出色的竞技表现相关联, 表现出快速启动和冲刺能力的重要性; 3) 下坡段转弯区域内更快的滑行速度有利于获得更短的分段时间; 4) 减少动作周期数量和提高 G3 技术比例与更好的竞技表现高度相关, 更快的运动员 G3 技术具有更长的步幅; 5) 在上坡坡顶衔接转换中提高步频有利于保持较高的滑

行速度。相较之前越野滑雪比赛的逐圈和分段速度变化,本研究通过GNSS定位设备更加精细化解剖单一路段内速度和技术使用情况,创新地阐述了在不同路段内关

键区域的竞技表现对其分段时间的重要价值,使过往相对宏观和简单的速度分析更加具体和细致,从而有利于教练员、运动员在实际训练和比赛中加以应用。

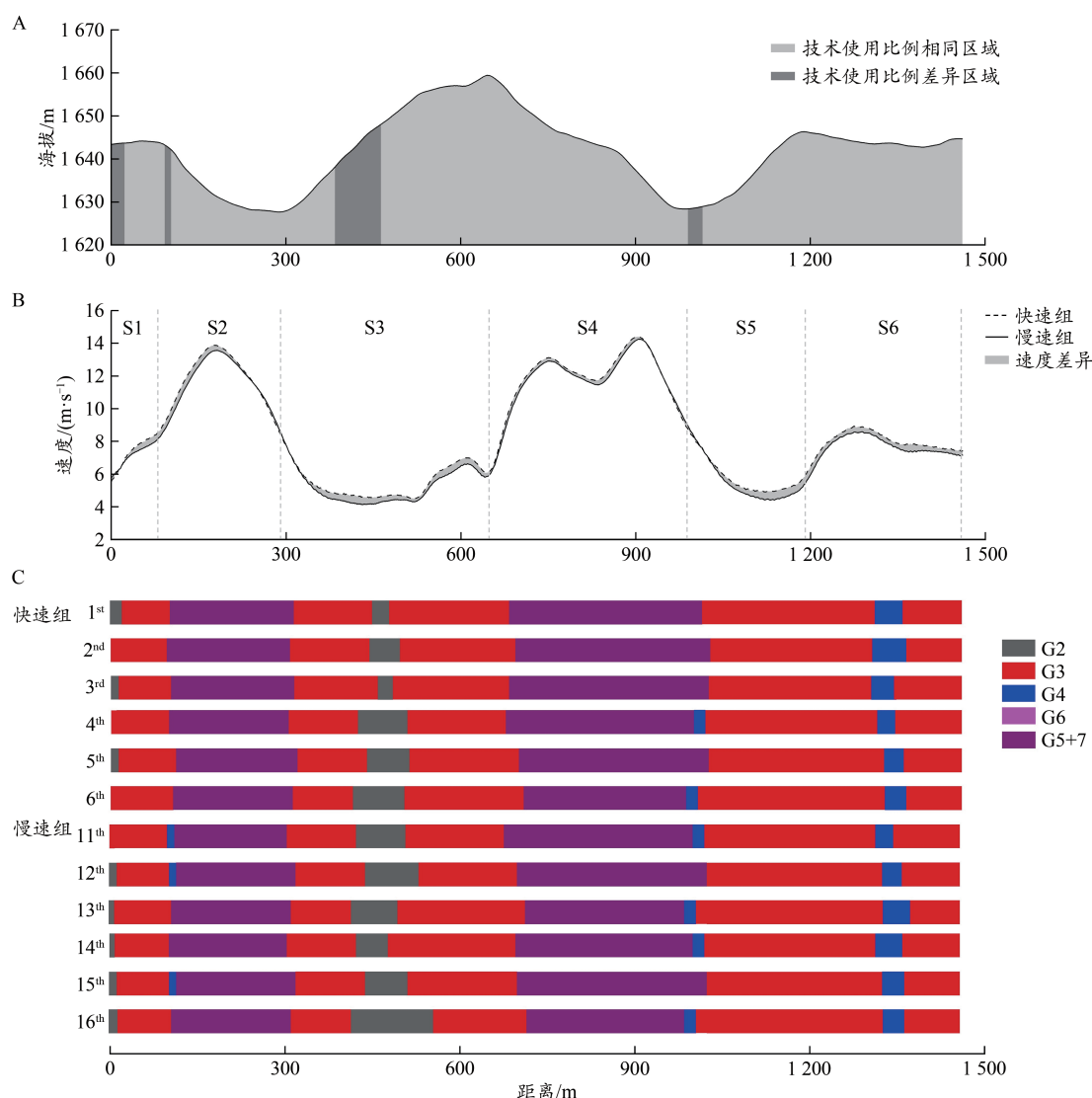


图5 短距离1.5 km比赛快速组和慢速组运动员速度、专项技术时间比例分布

Figure 5. Distribution of Speed and Sub-techniques for the Fast and Slow Cross-Country Skiers Across the 1.5 km Sprint Race

3.1 短距离1.5 km比赛上坡段配速策略分析

越野滑雪运动员在短距离1.5 km自由技术比赛中,不同位置和坡长的上坡段采用的配速策略有区别。本研究中上坡段时间贡献率接近八成,与比赛时间存在显著高度相关关系($r > 0.9$),是影响比赛成绩的最主要因素,该结果与诸多研究结论相一致(Sandbakk et al., 2016; Stöggl et al., 2018; Talsnes et al., 2021)。本研究中短距离1.5 km比赛中上坡段总长度约占1/3,总时间约占五成。因此,减少上坡段的时间和增强上坡滑行专项能力对于获得优异的比赛成绩至关重要。

首先,从上坡段S3的瞬时滑行速度与其分段时间的相关性来看,不仅上坡段S3总时间与短距离1.5 km比赛

时间高度相关,而且运动员在上坡段S3的前半程(约140 m)滑行速度与其分段时间更为密切。主要原因包括:1)本研究中上坡段S3总坡长约为342 m,高度差30 m,平均坡度8.9%,前半程的平均坡度高于后半程约33%,同时在此区域内的时间占比也高于后半程。2)越野滑雪运动员在上坡段滑行受限于克服重力和阻力等条件的影响。研究表明,在越野滑雪平地中,空气阻力约占输出功率的50%,而与滑行速度降低的上坡段相比,用于克服空气阻力的输出功率可忽略不计(约占3%),这有利于上坡滑行(Karlsson et al., 2018)。3)在长上坡S3段之后,紧接着为一个长下坡S4段(坡长约345 m,滑行时间约30 s)。尽管越野滑雪上坡段运动强度多次反复超过100%最大摄氧

量,无氧供能比例增加,乳酸堆积和氧亏量升高,然而长下坡 S4 段在一定程度上缓解了上坡段 S3 高强度滑行的疲劳累积,为随后的上坡段滑行提供了生理基础。基于上述,减少上坡段 S3 前半程的滑行时间将有利于获取更优异的上坡段表现和比赛成绩。此外,运动员在第一个长上坡 S3 段的坡顶阶段(约 20 m)保持较高的滑行速度,将有利于获得较短的 S3 分段时间。世界优秀越野滑雪运动员在上坡段的坡顶位置进行加速,通过短暂的加速期为下一路段提供初始速度基础(Andersson et al., 2010)。本研究中长上坡 S3 段的坡顶阶段位置凸显了不同路段之间的有效衔接和转换的重要作用,这有助于运动员主动控制和使用配速策略,从而达到体力节省化的目的。全程短距离比赛中最快和最慢的运动员之间最高的时间差是在上坡段 S3(4.9 s),显著高于其他路段。在上坡段 S3 区域较

大的时间差主要与以下方面有关:1)上坡段 S3 显著性集群区域内坡长约为 140 m,滑行时间约为 30 s,较长的路段和较多的时间易于分化不同水平运动员;2)上坡段的运动强度通常超过 100% 最大摄氧量强度,既需要强大的有氧供能系统,也需要出色的无氧能力,而不同水平的运动员在能量供应水平上可能存在差异;3)由于上坡段 S3 显著性集群区域出现在比赛的前半程,滑行速度较慢的运动员可能在速度分配过于保守,导致时间差较大;4)本研究中最快和最慢的运动员比赛成绩时间差约为 10 s 以上,不同运动员之间的竞技水平差异也进一步拉开了时间差距。这不仅反映出上坡段时间作为越野滑雪比赛成绩的关键路段,还可以为教练员和运动员提供更加准确的段落,有利于制定相应的配速策略和针对性的训练计划。

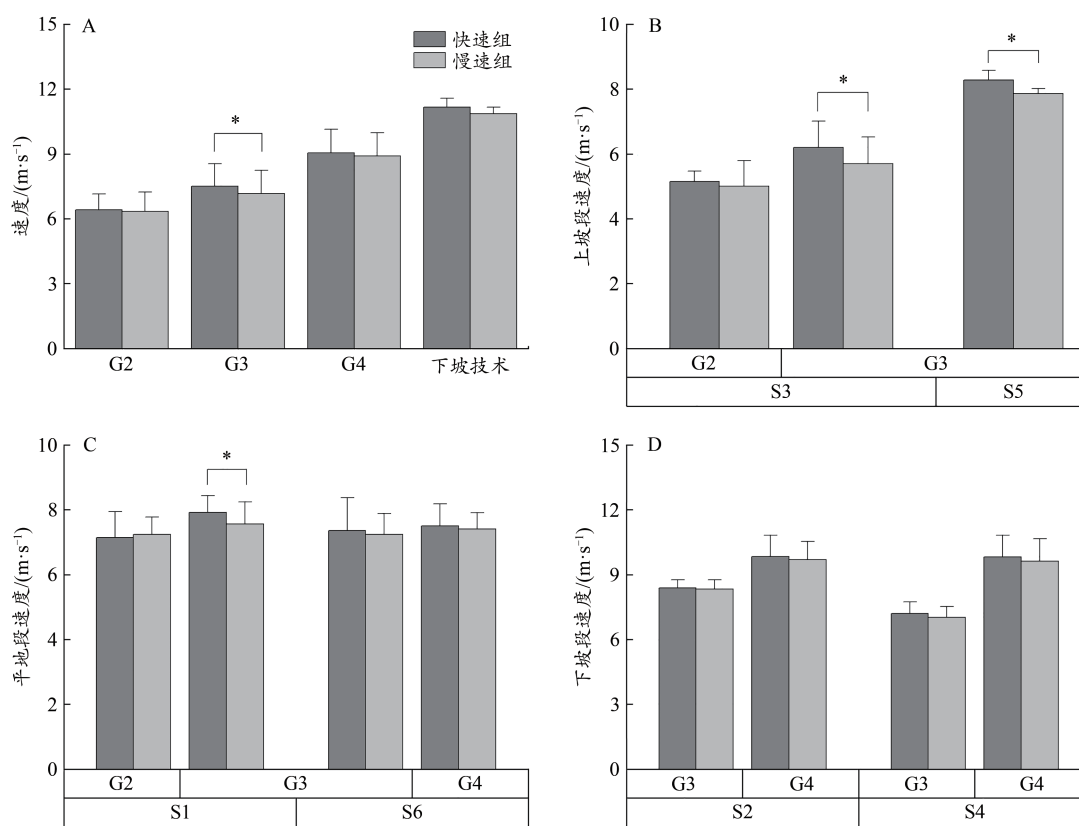


图6 快速组与慢速组运动员不同路段的专项技术速度比较分析

Figure 6. Comparative Analysis of Sub-technique Speed in the Fast and Slow Skiers Across the Different Terrains

注:*表示 $P < 0.05$,下坡技术包括G5+G7。

其次,上坡段 S5 后半程爬坡阶段(约 40 m)的瞬时滑行速度与其分段时间高度相关。相较上坡段 S3, S5 段保持较高的滑行速度与其坡段位置密切相关。上坡段 S5 总长度 213 m,高度差 18 m,平均坡度约为 8.4%,属于缓上坡类型。同时,上坡段 S5 距离终点线约 300 m,爬坡后随之而来的是 190 m 的平地。为了减少剩余路段的不确定性因素,在最后一个上坡段采用更加主动的配

速策略,这种在短距离计时类项目比赛结束前采用加速冲刺的配速策略较为常见(Foster et al., 1994; Hulleman et al., 2007; Thompson et al., 2000, 2003)。综上,在短距离 1.5 km 比赛中,运动员的上坡段表现是比赛成绩的风向标,对获取优异比赛表现具有决定性作用。不同上坡段的坡长、坡度和路段位置将会影响上坡段配速策略的变化。

表4 基于SPM分析结果快速组与慢速组运动员上坡段和平地段的专项技术运动学指标比较

Table 4 Comparison of Sub-technique Kinematic Indicators of Uphill and Flat Terrains between the Fast and Slow Skiers Based on the SPM Analysis

路段	组别	G2			G3			G4		
		速度/(m·s ⁻¹)	步频/Hz	步幅/m	速度/(m·s ⁻¹)	步频/Hz	步幅/m	速度/(m·s ⁻¹)	步频/Hz	步幅/m
S1(平地)	快速组	6.8±0.7	1.22±0.08	5.6±0.6	7.6±0.3	0.65±0.03	11.6±0.7	—	—	—
	慢速组	6.7±1.1	1.22±0.06	5.5±0.8	7.4±0.3*	0.66±0.04	11.2±0.8*	—	—	—
S3(上坡)	快速组	4.6±0.2	0.98±0.07	4.7±0.3	5.5±0.2	0.70±0.03	7.9±0.5	—	—	—
	慢速组	4.5±0.3	0.98±0.06	4.6±0.4	5.3±0.3*	0.71±0.10	7.6±1.2*	—	—	—
S5(上坡)	快速组	—	—	—	5.4±0.1	0.60±0.03	9.0±0.4	—	—	—
	慢速组	—	—	—	5.1±0.2*	0.61±0.02	8.3±0.6*	—	—	—
S6(平地)	快速组	—	—	—	7.5±0.6	0.59±0.05	12.6±1.1	7.7±0.4	0.65±0.08	11.8±1.5
	慢速组	—	—	—	7.3±0.6*	0.60±0.04	12.3±1.2*	7.7±0.4	0.66±0.02	11.7±0.7

注:*表示快速组与慢速组存在显著性差异, $P<0.05$ 。

3.2 短距离 1.5 km 比赛平地段配速策略分析

平地段的段落位置和最大速度能力是平地段配速策略选择和使用的关键因素。平地段 S1 作为短距离比赛的启动阶段,在出发后的快速启动加速能力是获取优异比赛成绩的基础。van Ingen Schenau 等(1992)研究认为,耐力项目比赛中的快速启动加速达到预定速度可获得较好的动能,而且尽可能在比赛早期出现,启动加速过低会占用更多的比赛成绩时间。本研究中,平地段 S6 的中部区域内的滑行速度与分段时间存在相关关系,运动员在此区域内保持 94% 的最大速度,这表现出最大速度能力的重要作用。Andersson 等(2010)的研究显示,在短距离越野滑雪比赛中,优秀越野滑雪运动员在比赛冲刺阶段保持 80% 以上的最大速度。越野滑雪短距离 1.5 km 比赛的开始阶段(S1)和冲刺阶段(S6)保持较高的滑行速度,不仅基于坡段位置的重要性,还应考虑到无氧代谢能力的变化。Hettinga 等(2006)研究认为,无氧代谢能力对配速策略至关重要。越野滑雪运动员保持最大速度能力与临界速度能力有关,即运动强度与持续时间之间的双曲线关系。临界速度是一种高于乳酸阈值的运动强度,无氧供能占据一定比例,同时又低于最大摄氧量强度,是属于无氧代谢和有氧代谢混合供能。Jones 等(2010)研究表明,在临界速度以下机体内肌肉磷酸肌酸、血乳酸值和无机磷酸盐处于稳定状态;当在临界速度以上,肌肉磷酸肌酸迅速下降直到枯竭,无氧供能将耗竭殆尽。所以,应避免过早耗竭肌肉磷酸肌酸,推迟高于临界速度的运动强度出现,在比赛末期进行全力冲刺获取较好的运动成绩。因此,对于越野滑雪运动员短距离比赛来说,具备较高的最大速度能力,同时在疲劳状态下保持高比例的最大速度,这有利于在短距离比赛中获得较好的运动表现。

3.3 短距离 1.5 km 比赛下坡段配速策略分析

虽然本研究中短距离 1.5 km 比赛下坡段时间与总成绩不存在显著性相关,然而不同水平运动员在下坡段衔

接和转换路段的滑行表现可能会影响其滑行速度。快速组运动员下坡段 S2 的显著性区域(49 m)处于平地 S1 和下坡段 S2 的转换路段,滑行速度和步频显著提高。运动员在平地-下坡段转换地段的过程中,最大化减少平地保持的高速滑行状态,同时借助地形优势,通过短暂的加速期间为下一路段提供高速的速度基础,从而维持较高的滑行速度。通常优秀越野滑雪运动员在下坡段前的加速有利于提升在随后路段的滑行表现。快速组运动员下坡段 S4 的显著性区域(70 m)处于上坡段 S3 和下坡段 S4 的转换路段,滑行速度和步频同样显著增加。在此区域内,下坡段 S4 包含了 1 个转弯路段,更好的转弯速度影响下坡段时间。运动员在下坡段转弯选择适宜的滑行路径、利用场地的特征以及使用正确的转弯技术,这将有利于获得更好的下坡段表现。研究显示,世界优秀越野滑雪运动员下坡转弯能力与比赛成绩密切相关,比赛成绩较好的运动员能够有效完成下坡转弯同时减少速度损失(Sandbakk et al., 2014)。优秀越野滑雪运动员在下坡转弯时最大化利用重力和推进力,获得合适的转弯轨迹路线,从而保持高速和降低转弯时间。基于此,运动员需要在下坡段转弯处保持较高的滑行速度,减少下坡段的滑行时间。

3.4 短距离 1.5 km 比赛专项技术分析

越野滑雪比赛场地主要分为上坡、平地和下坡段,在不同路段中不仅滑行速度的变化影响配速策略,而且专项技术的分布同样影响配速策略。因此,分析短距离 1.5 km 比赛中专项技术分布更有利于厘清配速策略的变化。越野滑雪比赛中不同子技术分类和使用比例是分析比赛配速策略的重要内容。由于比赛场地面临路段起伏和距离长等特点,单纯使用录像方式不能完全记录运动员子技术分布情况。目前,微型 GNSS 传感器已应用于越野滑雪比赛分析,有研究表明,使用传感器分析自由式滑轮、雪上自由式技术分类和使用的准确性在 98% 以上(Fasel et al., 2019)。

3.4.1 上坡段

在本研究短距离 1.5 km 比赛过程中, G3 是最主要使用的子技术, 使用比例超过 60%。研究表明, G3 是短距离自由式比赛中最主要使用的技术, 优秀越野滑雪运动员短距离比赛成绩与更高的 G3 技术比例使用有关 (Andersson et al., 2010)。本研究中快速组运动员技术动作周期数量低于慢速组, 同时, 获得更好比赛成绩的运动员 G3 技术使用比例高于较慢运动员, 尤其是在 S3 和 S5 上坡段。快速组运动员的上坡段滑行时间显著优于慢速组运动员, 同时 G3 使用比例高于慢速组运动员约 14%, 这与使用更多的 G3 技术数量高度相关。G3 技术特点为每一个单脚蹬动步配合一次双撑杖滑行, 可充分利用单脚蹬动力、双杖后撑和体重惯性力的合力加快滑行速度, 并可达到滑行动作的最快频率。研究显示, 更高水平的越野滑雪运动员在上坡段使用较多的 G3 技术 (Stöggl et al., 2018)。慢速组运动员 G3 技术的滑行速度降低均与步幅下降密切相关。本研究中, 快速组平地段 S1 的 G3 速度和步幅均高于慢速组 3% 左右。研究显示, 越野滑雪运动员较高的 G3 技术速度与步幅存在正相关关系, 与步频的相关性较低。Bilodeau 等 (1991, 1992) 研究表明, 越野滑雪自由式技术步幅与滑行速度之间存在高度相关关系。Smith 等 (1988, 1994) 研究表明, 滑雪速度与步频相关性较低, 步幅是区分越野滑雪运动员速度快慢的主要因素。优秀越野滑雪运动员保持较高的滑行速度和较大的步幅的原因主要是: 1) 较大的步幅可以提高运动强度或者输出功率增加; 2) 较大的步幅和较高的腿部肌肉激活程度与雪仗撑杖力高度相关; 3) 较大的上肢肌肉力量, 增强滑行的推进力。

3.4.2 平地和下坡段

短距离 1.5 km 自由式技术比赛中平地段主要使用 G3 技术, 这是因为: 1) G3 技术动作特点益于平地启动加速和维持高速滑行状态; 2) 平地段作为技术转换和衔接段, 通过下坡转弯或者 G2 技术衔接 G3 技术, 从而保持滑行速度的稳定性。此外, 运动员在平地段的长距离缓冲过程中使用 G3 技术作为体力恢复的手段, 减少技术转换的次数, 有利于保持较高的滑行速度。下坡段中运动员主要采用静态团身转弯-蹲伏技术 (G5+G7), 其地形条件使得短距离比赛中滑行速度变化较小, 而且滑行技术单一使得技术使用比例和转换次数较为稳定。下坡段多使用蹲伏技术不仅有利于减小风阻获得高滑行速度, 而且可以缓解上坡或平地段的乳酸堆积和恢复高强度上坡段的累积氧亏, 从而在下一个上坡段中产生较高的无氧代谢功率。研究表明, 更高成绩排名的运动员下坡段体力恢复较快, 对随后的上坡或者平地段成绩产生一定的影响 (Losnegard, 2019)。越野滑雪运动员利用下坡段获得高速滑行并且尽可能维持高速是下坡段最主要的任

务, 通过高速滑行为衔接上坡或平地段提供速度保障。

3.4.3 转换衔接段

由于不同数量的上坡、平地和下坡段组成越野滑雪比赛场地, 不同路段之间的速度转换是重点研究区域。对越野滑雪比赛的转换路段而言, 主要通过提高滑行初始速度和选择合理技术等措施, 尽可能减少速度流失。一方面, 本研究中上坡段 S3 的坡顶位置加速, 快速组运动员的 G3 技术速度和步频分别提高约 5% 和 3%。在此过程中主要采用自由式 G3 技术, 减少其他技术的使用和提高衔接段初始速度, 从而实现不同段落的速度转换。Stöggl 等 (2011) 研究发现, 越野滑雪运动员在跑台高坡度中高速加速到最大速度时, 步频大幅增加, 步幅缩短。这可能与步频的过量增加导致受试运动员在跑台克服自身重力输出功率增加有关, 因此在高速滑行状态下保持较高的步频和降低步幅有利于达到较高的滑行速度。另一方面, 短距离比赛中慢速组运动员 G4 技术动作数量的增加主要表现在转换路段, 而每一个 G4 技术动作增加预示着通过撑杖制动, 进而造成前期积累的高速状态逐渐消失, 提前进行路段衔接和滑行。本研究中 G4 技术主要应用于下坡段转换上坡段中, 其特点表现为一只脚蹬动时两杖前摆, 另一只脚蹬动时两杖向后压推的同时将身体向前滑出, 在两腿蹬动和两杖后撑过程中, 可以最充分将身体重心的惯性力运用到加速滑行中, 但这降低了上坡段滑行的初始速度。因此, 在下坡段转换上坡段的过程中, 有意识地选择合理滑行技术将有利于更高效完成坡段衔接。

4 结论

1) 越野滑雪短距离比赛中不同路段内的速度和技术使用与其竞技表现密切相关。上坡段的爬升阶段和临近终点的区域采用更加积极的配速策略。在平地段内更快的启动和终点前冲刺以及下坡段转弯速度有利于获得更少的分段时间。此外, 不同路段的有效转换对下一路段保持高速滑行至关重要。

2) 较少的动作周期数量和较高的 G3 技术比例与更好的竞技表现相关联。更快的运动员 G3 技术速度具有更长的步幅, 以及在坡顶转换位置提高步频有利于获得较高的滑行速度。

5 实践应用

通过更加精细化的配速策略研究, 教练员和运动员对越野滑雪短距离比赛中不同路段的滑行速度和专项技术进行优化, 尤其是影响比赛成绩的关键路段, 针对性地设计和应用比赛战术, 最大化发挥运动员的优势。为了提升运动员的比赛竞技状态, 以增加难度和训练干预等多种手段提高上坡段陡坡滑行和高强度冲坡能力, 增强

平地段的最大速度水平,优化不同路段的转弯路径和增强路段的衔接转换意识,从而降低滑行速度的流失。在短距离比赛的关键路段中减少技术动作转换和增加G3技术使用比例,有利于获得更好的比赛表现。同时,在不同路段的衔接转换中,通过增加步频提高滑行速度以便为下一路段建立更好的速度基础。

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,2020.不同来源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].中国体育科技,56(12):44-55.
- 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.
- 蔡旭旦,毛丽娟,张蓓,等,2022.3周1550m亚高原训练对优秀青年男子越野滑雪运动员生理机能和身体成分影响研究[J].中国体育科技,58(1):30-37.
- 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.
- 林岭,朱晟,廖世芹,等,2021.科技助力我国越野滑雪运动员备战北京冬奥会的着力点与对策[J].北京体育大学学报,44(3):17-26.
- 刘卉,2022.科技助力我国越野滑雪项目突破:新理念、新方法、新思路:《越野滑雪科学化训练理论与实践》述评[J].北京体育大学学报,45(12):153-156.
- 杨威,廖开放,魏佳,等,2020a.冬奥会越野滑雪科学化发展历程回顾与分析[J].中国体育科技,56(12):99-109.
- 杨威,王欣欣,廖开放,等,2020b.越野滑雪比赛特征的科学分析及建议[J].体育学研究,34(4):53-62.
- 张蓓,蔡旭旦,毛丽娟,等,2020.中国跨项目越野滑雪运动员身体成分特征及对我国备战北京2022年冬奥会的启示[J].中国体育科技,56(12):36-43.
- ABBISS C R, LAURSEN P B, 2008. Describing and understanding pacing strategies during athletic competition[J]. Sports Med, 38(3): 239-252.
- 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.
- BILODEAU B, BOULAY M R, ROY B, 1992. Propulsive and gliding phases in four cross-country skiing techniques[J]. Med Sci Sports Exerc, 24(8): 917-925.
- BILODEAU B, ROY B, BOULAY M R, 1991. A comparison of three skating techniques and the diagonal stride on heart rate responses and speed in cross-country skiing[J]. Int J Sports Med, 12(1): 71-76.
- FASEL B, SPÖRRI J, GILGIEN M, et al., 2016. Three-dimensional body and centre of mass kinematics in alpine ski racing using differential GNSS and inertial sensors[J]. Remote Sensing, 8(8): 671.
- FASEL B, SPÖRRI J, SCHÜTZ P, et al., 2017. An inertial sensor-based method for estimating the athlete's relative joint center positions and center of mass kinematics in alpine ski racing[J]. Front Physiol, 8: 850.
- FASEL B, SUPEJ M, LAAKSONEN M, 2019. Automatic classification of skating cross-country skiing sub-techniques based on a single

- wearable sensor and biomechanical models[J]. Ger J Exerc Sport Res, 49(1): 20.
- FIS, 2017. International ski federation homologations [EB/OL]. (2017-01-01)[2023-05-15]. <http://www.fis-ski.com/>.
- FOSTER C, SCHRAGER M, SNYDER A C, et al., 1994. Pacing strategy and athletic performance[J]. Sports Med, 17(2): 77-85.
- GLØERSEN Ø, KOCBACH J, GILGIEN M, 2018. Tracking performance in endurance racing sports: Evaluation of the accuracy offered by three commercial GNSS receivers aimed at the sports market[J]. Front Physiol, 9: 1425.
- HETTINGA F J, DE KONING J J, BROERSEN F T, et al., 2006. Pacing strategy and the occurrence of fatigue in 4 000 m cycling time trials[J]. Med Sci Sports Exerc, 38(8): 1484-1491.
- HULLEMAN M, DE KONING J J, HETTINGA F J, et al., 2007. The effect of extrinsic motivation on cycle time trial performance[J]. Med Sci Sports Exerc, 39(4): 709.
- IHALAINEN S, COLYER S, ANDERSSON E, et al., 2020. Performance and micro-pacing strategies in a classic cross-country skiing sprint race[J]. Front Sports Act Living, 2: 77.
- JONES A M, VANHATALO A, BURNLEY M, et al., 2010. Critical power: Implications for determination of $\dot{V}O_{2max}$ and exercise tolerance[J]. Med Sci Sports Exerc, 42(10): 1876-1890.
- KARLSSON Ø, GILGIEN M, GLØERSEN Ø N, et al., 2018. Exercise intensity during cross-country skiing described by oxygen demands in flat and uphill terrain[J]. Front Physiol, 9: 846.
- LOSNEGARD T, 2019. Energy system contribution during competitive cross-country skiing[J]. Eur J Appl Physiol, 119(8): 1675-1690.
- LOSNEGARD T, KJELDSEN K, SKATTEBO Ø, 2016. An analysis of the pacing strategies adopted by elite cross-country skiers[J]. J Strength Cond Res, 30(11): 3256-3260.
- SANDBAKK Ø, LOSNEGARD T, SKATTEBO Ø, et al., 2016. Analysis of classical time-trial performance and technique-specific physiological determinants in elite female cross-country skiers[J]. Front Physiol, 7: 326.
- SANDBAKK Ø, SANDBAKK S B, SUPEJ M, et al., 2014. The velocity and energy profiles of elite cross-country skiers executing downhill turns with different radii[J]. Int J Sports Physiol Perform, 9(1): 41-47.
- SMITH G A, HEAGY B S, 1994. Kinematic analysis of skating technique of Olympic skiers in the men's 50 km race[J]. J Appl Biomech, 10(1): 79-88.
- SMITH G A, MCNITT-GRAY J, NELSON R C, 1988. Kinematic analysis of alternate stride skating in cross-country skiing[J]. J Appl Biomech, 4(1): 49-58.
- STAUNTON C A, COLYER S L, KARLSSON Ø, et al., 2022. Performance and micro-pacing strategies in a freestyle cross-country skiing distance race[J]. Front Sports Act Living, 4: 834474.
- STÖGGL T, MUELLER E, AINEGREN M, et al., 2011. General strength and kinetics: Fundamental to sprinting faster in cross country skiing?[J]. Scand J Med Sci Sports, 21(6): 791-803.
- STÖGGL T, PELLEGRINI B, HOLMBERG H, 2018. Pacing and predictors of performance during cross-country skiing races: A systematic review[J]. J Sport Health Sci, 7(4): 381-393.