

# 三维步态运动分析技术在经典式越野滑雪项目中的应用

齐岩松<sup>1</sup>, 王一帆<sup>2</sup>, 吴海贺<sup>1</sup>, 傅冠达<sup>3</sup>, 包呼日查<sup>1\*</sup>, 徐永胜<sup>1\*</sup>

1. 内蒙古自治区人民医院骨关节科(运动医学中心), 呼和浩特 010017

2. 内蒙古医科大学研究生院, 呼和浩特 010110

3. 内蒙古体育医院康复医学科, 呼和浩特 010030

**摘要** 回顾了近年来三维步态运动分析技术在经典式越野滑雪项目中的应用, 通过对运动过程中不断变化的参数指标进行分析, 表明制订出符合滑雪运动员的个性化训练方案, 可以有效地提高比赛成绩。

**关键词** 冰雪运动; 经典式越野滑雪; 三维步态运动分析技术

第24届冬季奥林匹克运动会即将于2022年2月4日在中国北京市和张家口市举行<sup>[1]</sup>, 北京冬奥会的成功申办大力带动了中国冰雪运动产业的发展。自1924年第一届夏蒙尼冬奥会以来, 越野滑雪(cross-country skiing)是发展最快的冰雪运动之一, 包括新的比赛模式、改进的设备和赛道准备, 以及动作技术上的广泛变化<sup>[2]</sup>。

越野滑雪不仅是最具生理耐力要求的运动之一<sup>[3-4]</sup>, 还涉及复杂的人体生物力学<sup>[5-6]</sup>。越野滑雪在行进时的推进力是由上半身和下半身的肌肉组

织协同产生, 并通过滑雪板和滑雪杖传递到地面, 因此越野滑雪运动可以被看作是一种包含四肢的步态, 这对于通常主要分析双下肢步态的运动来说是相当特殊的<sup>[7]</sup>。

## 1 现代越野滑雪技术

越野滑雪比赛中使用的技术分为经典式和自由式两种, 其中经典式主要包括两步交替(diagonal stride, DS)技术、双杆撑踏步(double-pole with

收稿日期: 2021-11-21; 修回日期: 2021-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(82172444, 81960399); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0127, 201802154); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2020MS03064)

作者简介: 齐岩松, 助理研究员, 研究方向为运动医学临床与基础, 电子信箱: malaqinfu@126.com; 王一帆(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为骨关节临床与基础, 电子信箱: 1010868084@qq.com; 包呼日查(共同通信作者), 主任医师, 研究方向为骨关节、运动医学临床与基础, 电子信箱: chaganfu@126.com; 徐永胜(通信作者), 主任医师, 研究方向为骨关节、运动医学临床与基础, 电子信箱: dlxyf@163.com

引用格式: 齐岩松, 王一帆, 吴海贺, 等. 三维步态运动分析技术在经典式越野滑雪项目中的应用[J]. 科技导报, 2022, 40(2): 13-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.02.002

kick, DPK)技术、人字形(herringbone, HRB)技术、双杖推进(double poling, DP)技术;自由式主要包括桨舞(paddle dance, G2)、双人舞(double dance, G3)、单人舞(single dance, G4)、无杆滑冰(skating without Poles, G5)等,而两种风格均包含滑降(downhill tuck position, TCK)和一系列转弯(turn techniques, TRN)技术<sup>[8-10]</sup>。DS技术主要通过对滑雪板和滑雪杆施加力量来完成,其中手臂和腿互相协调运动,类似于行走或跑步。一侧手臂的推动与对侧腿的推动一同进行,腿在蹬进时需要停止滑雪板的滑行,并使发力侧快速向下和向后移动,可以被描述为“向后踢”;DP技术是通过两侧滑雪杆对称、同步的运动来完成,其推进作用通过较大幅度屈曲躯干获得,而且相较于其他技术,下肢在整个运动过程中的参与最少<sup>[11]</sup>;DPK技术上肢与DP技术中的双推动作类似,加上左腿或右腿额外的推进;HRB技术中,手臂和腿是主动活动,一侧的腿与对侧手臂是同步运动的,滑雪方向保持在行进方向,滑雪板相对于滑雪方向向外倾斜旋转,手臂或腿部运动定义运动周期的开始和停止<sup>[12]</sup>。这些技术的特点是下肢和上肢的贡献不同,推进阶段的时间和持续时间也不同<sup>[8-9]</sup>,其应用场景也不同。其中,DS技术主要用于中等或较陡峭的上坡阶段,DP技术主要用于平坦赛道上的滑行,为高速滑雪的首选技术,DPK技术主要用于低等到中等坡度的滑行,HRB技术在非常陡峭的上坡过程中使用<sup>[13]</sup>,而TCK技术在下坡过程中使用,各种TRN在转弯和赛道改变中使用<sup>[14]</sup>。越野滑雪是涉及不同技术、强度和持续时间的耐力要求最高的全身运动之一,比赛地形由上坡、平地和下坡组成,各占全程的1/3,由于约1/2的时间用在上坡滑雪中,上坡的表现被认为是成功的主要决定因素<sup>[15-17]</sup>。因此要求运动员掌握不同速度和坡度情况下不同的子技术以及这些子技术之间的转化情况,从而根据需要改变自身的运动模式。运动员在穿越上坡地形时会增加自身代谢强度,而下坡地形则提供了恢复体能的机会<sup>[17-18]</sup>。

滑雪技术长久以来的发展以及设备和赛道准备的改进带来了追求更高滑行速度的需求,如今越

野滑雪运动员必须广泛掌握不同的速度、地形、比赛距离和形式(例如,个人赛、集体起跑或追逐的长距离比赛;淘汰赛和团队赛;接力赛等),并通过对不同的子技术之间进行不断地交替来适应上述各种变化。新的冲刺和长距离比赛中,滑雪者正面竞争需要更灵活的技术和战术转变,鼓励高速技术(包括更快地推进力发展和更高的峰值力量)的应用,这就需要制定更加个性化及针对性的训练方案。虽然越野滑雪相关设备和生物力学研究在最近几十年得到了很大的发展,但还有进一步改进的空间,在这种情况下,对于性能分析和优化训练而言,三维步态运动分析技术具有极大的潜力。

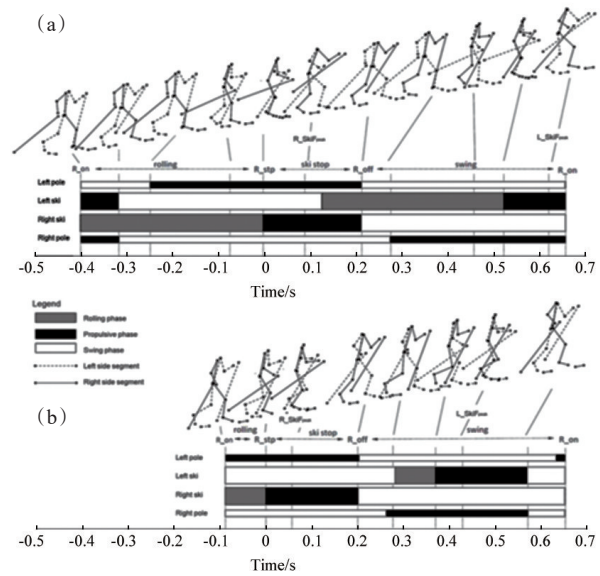
## 2 三维步态运动分析技术

人体步态分析传统上主要应用于医学诊断,是一门集生物力学、运动机能学以及不同运动医学领域(如足病学、膝病学)等多学科研究的综合技术手段。目前步态运动分析技术已经成为一种可行的评估工具,不仅用于基础生物力学研究,而且已经扩展为可应用于临床诊断、监测功能恢复和肌肉骨骼康复的非常有价值的工具<sup>[19]</sup>。作为一种强大的诊断工具,基于标记的步态分析也被应用于矫形器疗效的评估,创伤康复的前、后或随访分析,甚至用于不同手术方法的比较<sup>[20-21]</sup>。对于在经股截肢患者不同假肢系统的功能评估方面,三维步态运动分析技术已被证明是识别与改善对称性相关生物力学参数的可靠质量评估工具<sup>[22]</sup>。在体育科学研究方面,三维步态运动分析技术也已经成为运动生物力学在竞技体育研究中的主要应用技术手段,特别是在跑步、滑雪、竞走等个人项目的研究已取得丰富成果<sup>[23-24]</sup>。运用三维步态运动分析技术可以在充分了解人体受力结构和适应性变化的基础上,根据动作技术要求设计更合理的训练,并对已有训练手段的效果进行评价,为制定合理的训练方案提供科学依据,同时通过描述、分析和优化人体动作,改进运动员运动技术,为提高运动效能提供依据,切实有效提高运动员成绩。

### 3 三维步态运动分析技术在滑雪技术中的应用

#### 3.1 三维步态运动分析技术在DS技术中的应用

DS技术主要是通过两块滑雪板以及滑雪杖交替推进,上肢和下肢以相互交替的方式进行移动。在每个运动周期中,每块滑雪板与地面接触后都会产生较长时间的滑动期<sup>[25-27]</sup>,之后,下肢的推进作用可以被描述为“后踢”,致使滑雪板停止滑动(停滞阶段)。除了这些传统的经典技术外,滑雪者还针对不同条件改进开发了新技术,如在越野滑雪手册中描述的“山地跑步”<sup>[28]</sup>。山地跑步与DS技术的不同之处在于不需要弯曲膝盖,也没有自由滑行,因为至少有一侧滑雪杆总是与雪地接触。随着短跑滑雪和其他正面比赛对更高速度的要求,一种新的DS技术随之产生,这种技术涉及的滑行时间明显较少,其特征为包含一个类似跑步的空中阶段,称为“奔跑”DS(DSRUN)<sup>[27]</sup>。这种特殊的滑雪变种技术被广泛用于上坡,既可保持高速运动,也可进一步加速。当选择较硬的滑雪板或涂抹较少防滑蜡,以及当蜡层由于磨损和/或天气及雪况变化而厚度减小时,DSRUN技术可不同程度地增加施加在滑雪板上的力,以确保足够抓地力。Pellegrini等<sup>[29]</sup>对DSRUN和DSCONV(传统DS)技术从生理学、运动学方面进行详细比较,选取10名优秀的意大利青年越野滑雪运动员,在坡度为10°跑步机上以10 km/h速度使用两种不同滑雪技术滑行,采用一种光电运动捕捉系统以100 Hz的频率,采集每个受试者身上放置的14个反射半球标记信号,确定滑雪板和滑雪杆的三维运动学标记,通过滑雪杆内的承重感受器以及脚底的压力分布鞋垫确定生物力学参数变化,进行三维步态运动分析。结果表明,相比传统DS技术,DSRUN技术具有腿部伸展更早、推进速度更快以及膝关节屈伸运动范围更大等特点,DSRUN可能会产生更高的加速度和/或达到更高的峰值速度。采用DSRUN技术滑雪停止的瞬间,产生较大的摩擦力在理论上可能会降低对防滑蜡的需求,因此从测试成绩以及经济效应方面,DSRUN都明显优于DSCONV(图1<sup>[29]</sup>)。



DSCONV为常规对角线步幅;DSRUN为奔跑对角线步幅;  
L\_SkiFak和R\_SkiFak分别表示左、右力的峰值滑雪力; $R_{on}$ 为右滑雪板与地面第一次接触的瞬间; $R_{stp}$ 为右滑雪板停止的瞬间; $R_{off}$ 为右滑雪板抬起的瞬间;条状图表示运动周期中各运动阶段的时间

图1 DSCONV(a)和DSRUN(b)的步态分析对比

#### 3.2 三维步态运动分析技术在DPK技术中的应用

DPK技术是目前研究较少的越野滑雪技术之一<sup>[30]</sup>,关于其生物力学特性、速度或频率效应的详细科学研究相对缺乏,目前研究仅限于基本的周期特性。DPK技术的特点是在DP动作之间插入一个推进的蹬腿动作,以在较陡峭的上坡条件下保持动力<sup>[31]</sup>,而左或右的蹬腿动作类似于DS<sup>[25]</sup>(图2<sup>[32]</sup>)。与其他经典技术相比,DPK技术具有运动周期更长、周期频率更低的特点<sup>[33]</sup>。Göpfert等<sup>[32]</sup>研究了优秀滑雪运动员使用DPK技术时的生物力学特征及不同速度条件下的适应性,使用Pedar移动系统(100 Hz, Novel GmbH, Munich, Germany)测量了蹬腿和滑行阶段的伸直腿时的地面反作用力,由测量系统(Biovision, Werheim, Germany)收集关节运动学数据,记录了10名运动员在3种不同滑雪速度下进行DPK技术运动时的关节运动学和滑雪杖/足底压力,结果显示,速度的增加与周期长度和频率的增加有关。尽管力的脉冲频率保持不变,但杆/腿的峰值和平均力量都有所增加。在进行双推和蹬

腿动作时,肘关节屈伸活动范围增加( $P<0.05$ ),而髌屈膝和伸展的活动范围保持不变。周期长度的增加与平均极化力的增加(相关性 $r=0.71$ )和手臂摆动时间的增加( $r=0.88$ ;均 $P<0.05$ )相关。主要的速度适应是通过改变双推技术来实现的,而蹬腿动作在优秀滑雪者中表现出很大的差异性,说明了技术训练方面的重要性。因此作者建议要提高DPK技术成绩,运动员的训练应从两方面着手。一方面,应该发展特定的技术技能,使运动员即便在极富挑战性的单脚站姿的条件下仍可以实现有效的双撑杆。建议在不同的速度、周期频率和身体位置的情况下进行短时间内产生更高推进力的训练。另一方面,该技术的训练重点应该是改进蹬腿动作,提前将重心转移到前脚,为蹬腿动作做准备,然后将全部的重心转移到施力侧下肢,这应该是技术训练的重点<sup>[33]</sup>。



1、7、12为撑杆;2、8为撑杆过程中,肘部伸展的开始;3、9为脱杆;4为开始俯卧(右腿);5为开始蹬腿伸展(右腿);6为蹬腿;10为开始向前迈步(右腿);11为向前迈步结束(右腿)

图2 在有编号项目的越野滑雪中的一种DPK运动周期

### 3.3 三维步态运动分析技术在HRB技术中的应用

HRB技术使用频率不高,通常需要在更陡峭的上坡地形或DS抓地力不足时使用。为获得足够的抓地力推动向前,滑雪板要相对于滑雪前进的方向向外倾斜。然而,与滑冰技术中采用的侧向推进相比,滑雪板不允许滑行<sup>[12]</sup>。Anderssone等<sup>[13]</sup>首次采用2台固定摄像机以及3D视频软件(SIMI Reality Motion System GmbH, Unterschleissheim, Germany)进行三维视频重建,使用Pedar移动系统记录地面反作用力。选择11名优秀男子越野滑雪运动员在覆盖积雪的15°斜坡上以最大、高和中等速度使用HRB技术,在连续4个滑雪周期内分析了所有的运动学及动力学参数,最终的研究结果显示:(1)HRB技术涉及到手臂和腿部的斜向运动,滑雪板横向倾斜,没有滑行,力量主要分布在前脚内侧,以

便能够向前推进;(2)没有滑行限制了增加周期长度的可能性,从而迫使滑雪者以加快周期频率进行补偿;(3)滑雪杖推力冲量与腿力冲量之比表明,推力主要由腿部产生。然而,滑雪杖的推进力与总力的比率(即力量效率)约为腿部的3倍,而且手杖与地面接触的时间延长了20%;(4)通过同时提高长度和周期频率,滑雪者从中等速度提高到高速度;而仅通过更快的周期频率就可以进一步提高到最大速度。上述研究结果进一步加深了对越野滑雪者在最陡峭的上坡路段所使用技术的理解,突出了高峰值和快速产生腿部力量的重要性,强调滑雪运动员在今后训练过程中,面对陡峭的比赛路段,要着重于腿部爆发力量的训练。

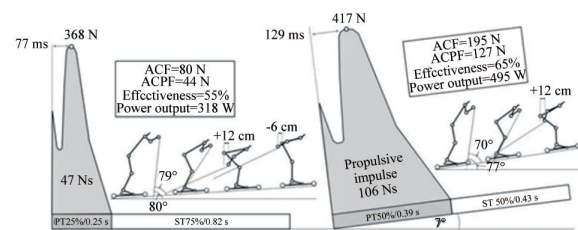
### 3.4 三维步态运动分析技术在DP技术中的应用

随着越野滑行新的比赛模式不断出现,最初的比赛目标已经不再适用于现在的赛程。当前整个比赛过程中要求更快的加速度<sup>[34]</sup>,因此为了产生更高的撑杆峰值力和下肢推进力<sup>[35]</sup>,在经典的滑雪技术基础上进行调整从而衍生出一系列新技术,如新的“袋鼠”或“现代”DP技术<sup>[36]</sup>。新的DP技术在最高速度下可用于推进的时间通常不超过 $0.21\text{ s}$ <sup>[37]</sup>,约为低速可用时间的50%<sup>[38]</sup>,与跑步时脚与地面接触的时间相当<sup>[39]</sup>。下肢在摆动阶段(滑雪杖与地面无接触时),脚踝、膝盖和髌部伸展,以提升和推动身体的重心向上和向前。这是一个动态过程,以至于足根部乃至整个脚都被抬离地面,使滑雪者看起来像一只“袋鼠”<sup>[40]</sup>。随后身体在重力的作用下向下加速,将力更有效地传递到两侧滑雪杆,这将恢复阶段获得的势能转化为动能。在撑杆最初阶段,身体更大的倾斜程度促进了更高的滑雪效率,并可能提供更有力的后续推力<sup>[41]</sup>。这些革命性的变化导致滑雪者在整个赛道的各种坡道上更频繁地使用DP技术<sup>[42-43]</sup>。DP技术主要用于赛道的平坦部分,但有些滑雪者可能在整个比赛中只使用DP技术,甚至包含陡峭的上坡部分( $>10^\circ\sim 12^\circ$ )<sup>[42]</sup>,即便有研究表明,在比 $8^\circ\sim 9^\circ$ 的陡峭度更大的斜坡上,滑雪者更喜欢使用DS,而不是DP技术<sup>[44]</sup>。选择DP技术可以免去打蜡的必要,从而减少平坦和下坡路段因摩擦力造成的动力损失。当滑雪板在滑行阶段

进行对称同步的撑杆推进时,推动力仅通过上肢运动产生以维持滑雪板连续滑行的状态。在摆动阶段,滑雪者将滑雪杖从雪面上拔起并重新定位后,摩擦会导致前进速度减慢。虽然所有的推进力都是通过滑雪杖引导的,但DP技术是一种全身运动,其中腿部和躯干的参与对于随后的撑杆阶段(滑雪杖与地面相接触时)产生最佳推进力非常重要<sup>[45-46]</sup>。在摆动阶段,腿部产生的力量导致身体重心上移,从而使身体重力势能增加。在滑雪过程中,身体重心迅速下降,就好像滑雪者“落在滑雪杆上”。这种技巧,可以调动腿部和核心部位更多的大肌肉群,使速度越来越快<sup>[47]</sup>。因此,下肢腿部在整个运动过程中所做的贡献随着DP技术强度的增强而增加。在撑杆阶段,瞬时撑杆推进动力中,有相当一部分可能来自于身体机械能的转移,即来自于前一个摆动阶段腿所做的功。如果取消这种机制,例如尽量减少腿的参与,动力输出和性能就会下降<sup>[48]</sup>。

Stöggel等<sup>[49]</sup>采取三维步态运动分析技术对在不同坡度地形下,采用DP技术的运动员进行了全身运动学和性能差异比较分析,选取13名优秀男子越野滑雪运动员在平坦(1°)或倾斜上坡(7°)的跑步机上进行了两次递增速度测试,采用DP技术在中速(13 km/h和24 km/h)和高速(15 km/h和28 km/h)下进行滑行。分别采用Vicon MX13运动系统,以250 Hz的频率捕捉附着在滑雪者衣服上的39个反射标记(直径14 mm),以及在手杖、滑板和跑步机上12个额外的反光点,在三维空间建立运动模型监测整体运动过程,采用安装在手杖手柄正下方铝管中的测力传感器,监测滑雪杖的地面反作用力。实验结果发现,在上坡地形时,运动过程中会产生更高的脉冲力和峰值杆力。俯卧前屈时撑杆摆动的时间会随之降低,需要身体保持更直立的姿势,这要求必须更好地利用下肢特有的“泵”运动——肘关节更加弯曲,手臂向后摆动最大次数更少。与同步的躯干伸展和手臂的向前摆动相结合,有助于更快地重新定位姿势,以备下一次推进。随着坡度不断增加,平行于地面的重力分量变得更大,重力在支承点上产生更大的力矩。斜坡上的这

些不同因素对滑行速度造成很大的影响,因此需要滑雪者减少挥杆的次数,增加撑杆时间,以减少在较陡峭的斜坡上在摆动阶段造成的前进的速度损失。减少摆动阶段的时间会导致用于重新定位支撑点以及调整身体姿势的时间变少,这使得DP技术不能完全发挥(图3<sup>[49]</sup>)。此外,在更陡峭的斜坡上,滑雪者会改变身体和手杖的位置,下肢关节变得更加弯曲,而且杆更靠近足部。因此,在陡峭的上坡阶段,在摆动阶段垂直势能转化为动能比例减少,这应该会增加陡坡上上肢的工作量,并在一定程度上解释了为什么运动员更喜欢在缓坡而不是陡坡上使用DP技术<sup>[44]</sup>。



ACF为平均周转力;ACPF为推进力;Effectiveness为疗效指标,是ACPF与ACF的比值(%);Power output为输出功率

图3 越野滑雪运动员不同地形下使用DP技术的三维步态运动分析

### 3.5 三维步态运动分析技术在TCK以及TRN技术中的应用

TCK是高山滑雪的基础技术,基本技术主要包括直滑降、犁式滑降、斜滑降和横滑降。直滑降是指双板平行,面对垂直落下线垂直滑下的技术,技术重点是通过腿部的屈伸来调节,以保持正确的滑行姿势。犁式滑降是雪板呈内八字形从山上直线滑下的技术动作,犁式滑降与直滑降最大的区别除了板型之外,就是犁式滑降在滑降的过程中,可以通过调节八字分开角度和改变立刃的强弱来控制速度。斜滑降是指在坡面上不是沿着垂直落下线下滑,而是用直线斜着滑过坡面。横滑降是指雪板横着沿垂直落下线方向以直线或斜线滑进。TRN的主要技术包括阶梯转弯、平行滑行、犁雪等。Sandbakk等<sup>[41]</sup>采用摄像机(松下NV-GS 280)和RTK GNSS卫星系统,视频记录了12名优秀的女子越野滑雪运动员连续6个标准几何转弯过程,分析

得出结论:滑雪者通过滑行和犁雪等方式减速入弯,然后通过阶梯转弯的方式加速通过弯道,速度越快的滑雪者使用犁雪的频率越低,减速阶段所用时间越短,因此她们可以在弯道中较早地通过阶梯转弯加速通过弯道。较强的腿部力量是使滑雪者在转弯时能够高速通过弯道的基础。由于越野滑雪比赛的下坡转弯涉及整个比赛的较短路段,并且在不同的速度下进行,转弯半径、雪况、滑雪技术和转弯策略对实际比赛成绩的影响应该是未来研究的重点,作者建议越野滑雪者达到一定的力量和力量水平,并多做下坡训练,以提高下坡转弯性能<sup>[14]</sup>。

## 4 结论

三维运动捕捉系统利用红外摄像机捕捉粘贴在人体上的标记点,通过软件将捕捉到的点连接成线,再把线转换成面,通过与采集视频信息相结合,建立人体三维模型。根据每个标记点在三维空间的坐标位置,获得时空、运动学、动力学参数,同时通过表面肌电图获得肌肉电信号变化。步态分析是研究步行规律的检查方法,旨在通过生物力学和运动学手段,揭示步态异常的关键环节和影响因素。通过三维步态系统,可以获得滑雪运动员在整个运动过程中各个参数指标的变化情况,具体包括:滑雪技术运用过程中关节活动角度的改变、上下肢力量协调性的平衡以及运动所涉及相应肌肉力量的强度改变等,根据运动员自身特点,以及不同比赛路况下不同滑雪技术的应用情况,为每个运动员制订符合其个性化特点的训练方案,从而针对性改善不同运动员运动过程中的薄弱项目,最大程度避免训练过程中的运动损伤,提高运动员机动性、优化训练和恢复程序,帮助运动员在比赛中取得更加优异的成绩。

随着三维步态运动分析技术的不断发展,对于越野滑雪运动的认识不再局限于静态过程,可以对身体各部位进行分类标记,通过对标记点的捕捉与扫描,重建运动员的肢体模型,模拟其运动的整个过程,分析各生物力学参数的动态变化,同时还可以通过肌电图记录运动过程中肌肉的收缩情况,根

据身体机能反应的各项指标,制订相应的个性化训练方案,帮助运动员能够在今后的比赛中取得更好的成绩。

## 参考文献(References)

- [1] 敖英芳. 我国运动医学发展与北京冬奥会和健康中国建设[J]. 北京大学学报(医学版), 2021, 53(5): 823-827.
- [2] 王佳宁, 敖英芳. 冬季奥运会与主要冬季项目运动损伤[J]. 科技导报, 2020, 38(6): 11-24.
- [3] Hoffman M D, Clifford P S. Physiological aspects of competitive cross-country skiing[J]. *Journal of Sports Sciences*, 1992, 10(1): 3-27.
- [4] Holmberg H C. The elite cross-country skier provides unique insights into human exercise physiology[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2015, 25(4): 100-109.
- [5] Smith G A. Biomechanics of crosscountry skiing[J]. *Sports Medicine (Auckland, NZ)*, 1990, 9(5): 273-285.
- [6] 刘卉, 于冰, 张力文, 等. 竞技体育运动生物力学研究现状与趋势[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(4): 491-501.
- [7] Pellegrini B, Zoppirolli C, Bortolan L, et al. Gait models and mechanical energy in three cross-country skiing techniques[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2014, 217(21): 3910-3918.
- [8] Nilsson J, Tveit P, Eikrehaugen O. Effects of speed on temporal patterns in classical style and freestyle cross-country skiing[J]. *Sports Biomechanics*, 2004, 3(1): 85-107.
- [9] Smith G A. Biomechanical analysis of cross-country skiing techniques[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1992, 24(9): 1015-1022.
- [10] Bolger C M, Kocbach J, Hegge A M, et al. Speed and heart-rate profiles in skating and classical cross-country skiing competitions[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2015, 10(7): 873-880.
- [11] Holmberg H C, Lindinger S, Stöggl T, et al. Contribution of the legs to double-poling performance in elite cross-country skiers[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2006, 38(10): 1853-1860.
- [12] FIS. International Ski Competition Rules(ICR)[EB/OL]. [2021-09-20]. Available at <http://www.fis-ski.com>.
- [13] Andersson E, Stöggl T, Pellegrini B, et al. Biomechanical analysis of the herringbone technique as employed by elite cross-country skiers[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2014, 24(3): 542-552.
- [14] Sandbakk S B, Supej M, Sandbakk Ø, et al. Downhill turn techniques and associated physical characteristics in cross-country skiers[J]. *Scandinavian Journal of Medi-*

- cine & Science in Sports, 2014, 24(4): 708–716.
- [15] Mogroni P, Rossi G, Gastaldelli F, et al. Heart rate profiles and energy cost of locomotion during cross-country skiing races[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2001, 85(1–2): 62–67.
- [16] Sandbakk O, Ettema G, Leirdal S, et al. Analysis of a sprint ski race and associated laboratory determinants of world-class performance[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, 111(6): 947–957.
- [17] Bolger C M, Kochbach J, Hegge A M, et al. Speed and heart-rate profiles in skating and classical cross-country skiing competitions[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2015, 10(7): 873–880.
- [18] Sandbakk Ø, Losnegard T, Skattebo Ø, et al. Analysis of classical time-trial performance and technique-specific physiological determinants in elite female cross-country skiers[J]. *Frontiers in Physiology*, 2016(7): 326.
- [19] 岳友, 吴海贺, 齐岩松, 等. 不同步态分析系统在骨性关节炎中的应用进展[J]. *科技导报*, 2021, 39(22): 35–42.
- [20] Petersen W, Ellermann A, Zantop T, et al. Biomechanical effect of unloader braces for medial osteoarthritis of the knee: A systematic review (CRD 42015026136)[J]. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 2016, 136(5): 649–656.
- [21] Brand A, Klöpfer-Krämer I, Böttger M, et al. Gait characteristics and functional outcomes during early follow-up are comparable in patients with calcaneal fractures treated by either the sinus tarsi or the extended lateral approach[J]. *Gait & Posture*, 2019, 70: 190–195.
- [22] Segal A D, Orendurff M S, Klute G K, et al. Kinematic and kinetic comparisons of transfemoral amputee gait using C-Leg and Mauch SNS prosthetic knees[J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2006, 43(7): 857–870.
- [23] Dugan S A, Bhat K P. Biomechanics and analysis of running gait[J]. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 2005, 16(3): 603–621.
- [24] Cairns M A, Burdett R G, Pisciotta J C, et al. A biomechanical analysis of racewalking gait[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1986, 18(4): 446–453.
- [25] Lindinger S J, Göpfert C, Stöggl T, et al. Biomechanical pole and leg characteristics during uphill diagonal roller skiing[J]. *Sports Biomechanics*, 2009, 8(4): 318–333.
- [26] Björklund G, Stöggl T, Holmberg H C. Biomechanically influenced differences in O<sub>2</sub> extraction in diagonal skiing: Arm versus leg[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2010, 42(10): 1899–1908.
- [27] Andersson E, Pellegrini B, Sandbakk O, et al. The effects of skiing velocity on mechanical aspects of diagonal cross-country skiing[J]. *Sports Biomechanics*, 2014, 13(3): 267–284.
- [28] Hall M, Penfold P. One stride ahead. An expert's guide to cross-country skiing[M]. Winchester: Winchester Press, 1981.
- [29] Pellegrini B, Zoppiroli C, Stella F, et al. Biomechanical analysis of the "running" vs. "conventional" diagonal stride uphill techniques as performed by elite cross-country skiers[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2020, 18: 2095–2546.
- [30] Lindinger S. Biomechanics in cross-country skiing—Methods and future research questions[C]//Linnamo V, Komi P V, Muller E, et al. *Science and nordic skiing*. Oxford: Meyer & Meyer Sport, 2007: 23–43.
- [31] Smith G A. Biomechanics of cross country skiing[C]//Rusko H. *Cross country skiing: Olympic handbook of sports medicine*. Oxford: Blackwell Publishing, 2002: 32–61.
- [32] Göpfert C, Holmberg H C, Stöggl T, et al. Biomechanical characteristics and speed adaptation during kick double poling on roller skis in elite cross-country skiers [J]. *Sports Biomechanics*, 2013, 12(2): 154–174.
- [33] Nilsson J, Tveit P, Eikrehagen O. Effects of speed on temporal patterns in classical style and freestyle cross-country skiing[J]. *Sports Biomechanics*, 2004, 3(1): 85–107.
- [34] Sandbakk Ø, Holmberg H C. A reappraisal of success factors for Olympic cross-country skiing[J]. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2014, 9(1): 117–121.
- [35] Stöggl T, Holmberg H C. Force interaction and 3D pole movement in double poling[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2011, 21(6): e393–e404.
- [36] Stöggl T, Müller E, Lindinger S. Biomechanical comparison of the double-push technique and the conventional skate skiing technique in cross-country sprint skiing[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2008, 26(11): 1225–1233.
- [37] Stoggl T, Enqvist J, Muller E, et al. Relationships between body composition, body dimensions, and peak speed in cross-country sprint skiing[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2010, 28(2): 161–169.
- [38] Lindinger S J, Stöggl T, Müller E, et al. Control of speed during the double poling technique performed by elite cross-country skiers[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2009, 41(1): 210–220.
- [39] Weyand P G, Sandell R F, Prime D N, et al. The biological limits to running speed are imposed from the ground up[J]. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md: 1985)*, 2010, 108(4): 950–961.
- [40] Stöggl T, Müller E, Ainegren M, et al. General strength

- and kinetics: Fundamental to sprinting faster in cross country skiing? [J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2011, 21(6): 791–803.
- [41] Zoppirolli C, Pellegrini B, Bortolan L, et al. Energetics and biomechanics of double poling in regional and high-level cross-country skiers[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2015, 115(5): 969–979.
- [42] Welde B, Stöggl T L, Mathisen G E, et al. The pacing strategy and technique of male cross-country skiers with different levels of performance during a 15-km classical race[J]. *PloS One*, 2017, 12(11): e0187111.
- [43] Stöggl 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]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2018, 17(1): 124–133.
- [44] Dahl C, Sandbakk Ø, Danielsen J, et al. The Role of power fluctuations in the preference of diagonal vs. double poling sub-technique at different incline-speed combinations in elite cross-country skiers[J]. *Frontiers in Physiology*, 2017(8): 94.
- [45] Danielsen J, Sandbakk Ø, McGhie D, et al. The effect of exercise intensity on joint power and dynamics in ergometer double-poling performed by cross-country skiers [J]. *Human Movement Science*, 2018, 57: 83–93.
- [46] Danielsen J, Sandbakk Ø, Holmberg H C, et al. Mechanical energy and propulsion in ergometer double poling by cross-country skiers[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2015, 47(12): 2586–2594.
- [47] Zoppirolli C, Pellegrini B, Modena R, et al. Changes in upper and lower body muscle involvement at increasing double poling velocities: An ecological study[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2017, 27(11): 1292–1299.
- [48] Hegge A M, Bucher E, Ettema G, et al. Gender differences in power production, energetic capacity and efficiency of elite cross country skiers during whole body, upper body, and arm poling[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2016, 116(2): 291–300.
- [49] Stöggl T L, Holmberg H C. Double-poling biomechanics of elite cross-country skiers: Flat versus Uphill Terrain [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2016, 48(8): 1580–1589.

## Progress in practical application of three-dimensional gait motion analysis technique in classical cross-country skiing

QI Yansong<sup>1</sup>, WANG Yifan<sup>2</sup>, WU Haihe<sup>1</sup>, FU Guanda<sup>3</sup>, BAO Huricha<sup>1\*</sup>, XU Yongsheng<sup>1\*</sup>

1. Department of Orthopedics (Sports Medicine Center), Inner Mongolia People's Hospital, Hohhot 010017, China

2. Graduate School, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, China

3. Department of Rehabilitation Medicine, Inner Mongolia Sport Hospital, Hohhot 010030, China

**Abstract** The study reviewed the application of 3D gait analysis technology in classical cross-country skiing in recent years. Through the analysis of constantly changing parameters in the process of skiing, the individualized training program suitable for skiers can be worked out, which can effectively improve the performance in the competition.

**Keywords** winter sports; traditional cross-country skiing; 3D gait motion analysis techniques ●



(责任编辑 傅雪)