



越野滑雪运动经济性影响因素研究综述 Influencing Factors of Cross-country Skiing Economy: A Review of the Literature

焦怡然,刘 卉,李翰君*
JIAO Yiran, LIU Hui, LI Hanjun*

摘要: 越野滑雪项目中运动员滑雪经济性越好,越易取得好的成绩。本文回顾并总结近年来国内外关于越野滑雪经济性影响因素的研究,发现技术类型与特定地形的匹配、滑雪动作周期特征、装备等是影响越野滑雪经济性的重要因素,滑雪的周期特征可能是影响运动经济性的直接因素。在水平地形选择使用同时推进技术滑行,有利于减少耗氧量;比赛或训练中,增加滑行周期的长度、回杆时间、支撑期冲量,减小质心在垂直方向的运动,增大身体前倾角,利用力量训练提高上肢输出功率,以及使用长杆(长于自选杆)等方法,也可改善滑雪经济性。实验环境等客观条件可能对结果产生影响,性别、年龄等个体差异对经济性的影响尚不确定。

关键词: 越野滑雪;滑雪技术;滑雪经济性;生物力学;摄氧量

Abstract: In general, the athletes with outstanding skiing economy are likely to perform better in cross-country skiing. The purpose of this literature review is to summarize the factors of economy in cross-country skiing from studies at home and abroad. The economy of cross-country skiing intimately links to techniques with specific terrain, kinematical characteristics, as well as equipment. For instance, using DP in the horizontal terrain, longer length of cycle, greater propulsive impulse, and longer recovery time in one cycle tend to cause an economical skiing. Less vertical displacement of the center of mass, and more obvious body forward inclination, greater output power of upper limbs through strength training, as well as longer poles compared to self-selected poles also contribute to less oxygen cost. It is noteworthy that kinematics of cycle plays a direct role in ameliorating skiing economy. Furthermore, experimental environment and conditions may also have influence on skiing economy. However, it's unclear about the impact of age and gender on economy.

Keywords: cross-country skiing; skiing techniques; skiing economy; biomechanics; oxygen cost

中图分类号:G863.1 **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(2018YFF0300404);中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(校2020029)

第一作者简介:

焦怡然(1997-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为运动生物力学,E-mail:jyr_31415@163.com。

*通信作者简介:

李翰君(1983-),男,副教授,主要研究方向为运动生物力学,E-mail:lihanjun@bsu.edu.cn。

作者单位:

北京体育大学,北京 100084
Beijing Sport University, Beijing 100084, China.

越野滑雪又名北欧滑雪,是冬奥会的正式比赛项目。根据使用的技术,越野滑雪分为经典式、自由式、混合式3类,比赛距离由0.8 km到50 km(奥运会与世界杯项目)。与其他耐力性项目相似,运动经济性对越野滑雪比赛成绩有重要影响。运动经济性被定义为,运动员在次极限负荷下的单位体重、单位时间的稳态摄氧量($\dot{V}O_2$, $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$),常通过气体代谢分析仪等实验器械在递增负荷实验中获得(Ainegren et al., 2013; Losnegard et al., 2017b)。它是反映耐力运动效率和能量消耗的重要指标(Cavanagh et al., 1985; Sandbakk et al., 2010),与最大摄氧量($\dot{V}O_{2max}$)、乳酸阈并称影响长距离运动项目成绩的3个关键生理因素(李斐等, 2019; 李慧, 2019)。滑雪经济性对1300 m短距离滑雪计时赛成绩的决定系数可达30%(Andersson et al., 2017),优秀的运动经济性可在一定程度上弥补 $\dot{V}O_{2max}$ 低的劣势(Weston et al., 2000)。

了解滑雪经济性的影响因素,对改善越野滑雪运动经济性,从而提高成绩有重要意义。目前,关于越野滑雪经济性影响因素的研究主要集中于地形、技术类型、滑雪动作周期特征、装备、年龄、性别以及实验环境方面,其中地形、技术类型、周期特征、装备因

素最重要,常与训练相结合用于提高运动员的滑雪经济性。地形和技术类型相辅相成,常结合在一起讨论。但关于越野滑雪经济性因素的研究国内较少,且缺少影响因素的综述。为备战2022年冬奥会,国内较多研究者及教练开始关注提高越野滑雪经济性的问题,明确越野滑雪经济性的影响因素对提高成绩有重要意义。

本文在百链云图书馆、知网、PubMed以及Web of Science数据库中,分别以“cross-country skiing”“economy”“economical”“energy expenditure”及“越野滑雪”“经济性”“滑雪经济性”等为检索词进行检索,最终选择70篇发表于1985—2020年、涉及越野滑雪运动经济性影响因素的文献进行研究,从越野滑雪运动经济性的评测方法和影响因素两方面进行综述。

1 越野滑雪运动经济性评测指标和方法

滑雪经济性的直接评价指标为:次极限负荷下滑雪时,摄氧量达到稳定状态每单位时间单位体重的氧气消耗量。也存在一些间接评测指标:1)用输出功率与耗氧速率比值(KJ/L)表示运动经济性(Hegge et al., 2016; Moseley L et al., 2001)。2)用耗氧量与呼吸商(respiratory exchange ratio, RER)评价经济性,如稳态摄氧量与RER对应氧热价的乘积(Sandbakk et al., 2010)、单位速度下的有氧代谢功率(Moxnes et al., 2009)。3)有氧、无氧总能耗或总代谢率用于间接评价运动经济性(Pellegrini et al., 2018b)。这些研究考虑了无氧代谢参与的可能性,测试过程会测量血乳酸浓度和二氧化碳排出量($\dot{V}CO_2$)(Hoffman, 1992; Sandbakk et al., 2010)。4)总体效率是工作率与总能量消耗代谢率的比值,用来间接评价经济性(Sidossis et al., 1992)。无论评价指标如何选取,更高的经济性意味着在给定任务中 $\dot{V}O_2$ 或能量消耗更低,运动员更易取得优异成绩。

越野滑雪运动经济性的测试环境主要为实验室与雪地。由于可控性和方便性,研究者更倾向选择在实验室使用滚轴滑雪板模拟越野滑雪,逐渐增加跑台速度,使用肺功能测量仪等测量运动员每种负荷下最后几分钟或1 min的摄氧量,以此段时间的稳态摄氧量($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)作为该负荷下的滑雪经济性(Losnegard et al., 2014b, 2017b)。也可和运动学测试相结合,探究经济性和运动学特征的关系(Pellegrini et al., 2013)。滑雪功率计也可代替跑台控制负荷,通过测量某功率下运动员的稳态摄氧量,从而评价滑雪经济性(Bojsen-Moller et al., 2010)。还可使用雪地测量的方式评价运动员的滑雪经济性。雪地测量通常发生在滑雪隧道或椭圆形雪道,使用节拍器或可控速度的电动雪橇控制滑雪速度,运用便携式气体分析仪测量此速度下的稳态摄氧量(Hoffman et al., 1990a; Saibene et al., 1989),从而评价滑雪经济性。雪地测量和实验室测

量的不同主要在于滑雪器械及环境差异,这可能对实验数据产生影响。虽然滚轴滑雪和雪上滑雪的经济性指标存在高度相关性,但不同静摩擦系数的滚轴滑雪板的经济性不同。如果以实际雪上静摩擦系数为标准,有些滚轴滑雪板的静摩擦系数较高,会产生更高的耗氧量与更低的下肢推进力(Ainegren et al., 2014)。因此,若测试时的滚轴滑雪板不合适,实验结果可能受到影响。实验室和雪地两种测试环境的温度不同,雪地通常温度较低,可能会使运动员产生更多的氧气消耗(Wiggen et al., 2016)。

测量经济性时需要设定次最大负荷速度,目前有多种设定方法:根据最大速度百分比选择速度(Gopfert et al., 2013);根据最大摄氧量、最大心率百分比选择速度(Bjorklund et al., 2015; Losnegard et al., 2017b);依据受试者主观疲劳等级程度确定速度(Hegge et al., 2016);根据滑雪功率计所测功率确定运动强度(Bojsen-Moller et al., 2010)等。

2 越野滑雪运动经济性影响因素

提高经济性,可以通过增加推进力和减小阻力来实现。除了遗传因素外(Roberts et al., 2002),地形及技术类型、滑雪动作周期特征、装备以及其他因素基本都通过作用于阻力或推进力,对运动员的能量消耗产生影响。

2.1 技术类型

越野滑雪具有大范围的速度区间(5~70 km/h)及地形区间(坡度-20%~20%),比赛中,上坡、下坡和水平地形各占1/3(Sandbakk et al., 2014)。越野滑雪技术分为经典式与自由式2类(图1)。经典式技术包括同时推进技术(double poling, DP)、二步交替式技术(diagonal stride, DS)、同时推进踢技术(kick double poling, DPK)等亚技术,自由式滑雪包括V1、V2、交替V2等多种亚技术(Nilsson et al., 2004)。其中,DP技术要求运动员双脚保持平行,仅靠双杆同时支撑获得推进力;DPK技术是在DP的基础上增加腿的蹬伸作用;DS与走路、跑步姿势类似,对侧的上下肢同时产生推进运动;V2技术需要运动员每滑一步双杆支撑一次;交替V2是滑行两步双杆支撑一次;V1技术与交替V2技术相似,但支撑姿势不对称,存在优势侧。探讨经济性影响因素时常将技术选择与地形变化一起讨论。实际比赛中,DP技术常用于水平地形,随着坡度增加转换成DPK技术,在更高坡度滑行时选用DS技术(Welde et al., 2017)。自由式比赛中,随着坡度增加,逐渐由交替V2转化成V2和V1技术(Stoggl et al., 2013)。

2.1.1 水平地形最佳技术

DP技术是水平地形上最经济的技术类型(Pellegrini et al., 2013)。Hoffman等(1990a)发现,运动员在雪地滑行时(14.2 km/h),DP技术对应的稳态耗氧量约为DS技

术的 74%，比 DPK 及 V1 技术低约 10%。使用滚轴滑雪板在 14 km/h 和 18 km/h 速度下滑行时，DP 技术比 DPK 技术及 V1 技术更经济，约降低 12% (Hoffman et al., 1990b)。自由式技术 (V1、V2、交替 V2) 间无经济性差异 (Bilodeau et al., 1991)。Saibene 等 (1989) 证明，相比 DS 技术，自由式滑雪技术与 DP 技术的耗氧量更低，而且自由式滑雪技术的耗氧量最低。当摩擦力逐渐增加时，DP 技术和自由式滑雪技术对应的氧气消耗逐渐一致。实验室中利用滚轴滑雪测试，也得到同样结论。Hoffman 等 (1994) 以 8 名国家级越野滑雪运动员为受试进行滚轴滑雪测试，发现 DP 技术的耗氧量低于 DS 技术。Pellegrini 等 (2013) 使用滚轴滑雪板测试，发现水平地形下，DP 技术的氧气消耗是 DP、DS 和 DPK 3 种技术中最低的，大部分受试倾向于选择 DP 技术。

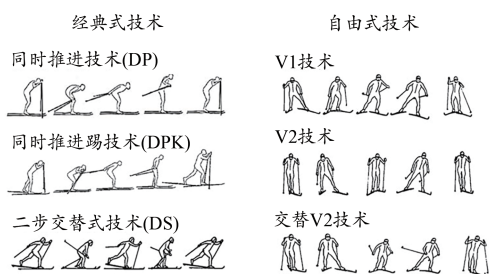


图 1 越野滑雪常用技术 (Bilodeau et al., 1992, Welde et al., 2017)

Figure 1. The Commonly Used Techniques in Cross-country Skiing

关于水平地形上 DP 技术有助于产生更低能量消耗的原因，有 3 种解释。1) 相较其他技术，DP 技术能产生更小的空气阻力、更大的向前推进分力以及更长的推进时间。此时侧向与垂直方向的分力较少，意味着 DP 技术利于提高做功效率，对提高经济性有积极影响 (Bellizzi et al., 1998; Hoffman et al., 1990a)。2) 虽然理论上运动员使用不同技术的对外做功 (克服重力与摩擦力做功之和) 是一致的，但由于技术动作不同，运动员的重心会发生额外波动，并产生不同的摩擦力 (Hoffman et al., 1995; Sandbakk et al., 2012)。使用 DP 技术时，质心位置波动小，对外做功比 DS 及 DPK 技术更小 (Pellegrini et al., 2014)，减少了与技术相关的机械能损耗，实现更高的经济性。3) Bellizzi 等 (1998) 发现，在水平地形仅用上肢滑雪比只用下肢滑雪少消耗 40% 的能量，这可能是由于上肢质量小，运动时能够辅助呼吸，所以耗氧量更少 (Boldt et al., 2016)。DPK 与 DS 技术需要上肢支撑与下肢推进共同参与，而 DP 技术主要依赖上肢获得推进力 (Hoff et al., 1999)，因此水平地形滑雪时能耗更少。

2.1.2 上坡地形技术

坡度增加时，DP 技术能量消耗低的优势不复存在。

考虑到 DS 技术产生的速度更大，运动员倾向选择 DS 技术继续滑行 (Hoffman et al., 1994; Pellegrini et al., 2013)。Hoffman 等 (1994) 发现，当滑雪者在 7.1% 的坡度上滑行时，使用 DS 技术消耗的氧气与 DP 技术相似，为 7.26 km/h，但在同样的主观疲劳感觉下，前者耗氧量更低。

自由式滑雪比赛中，运动员在上坡滑行时普遍使用 V1 技术。Kvamme 等 (2005) 利用滚轴滑雪板测试优秀运动员使用 V1 与 V2 技术在 3°~8° 的坡度上滑行时的生理反应 (3 m/s)，发现在较低坡度，V2 与 V1 的耗氧量相似；当坡度高于 5° 时，V1 的耗氧量比 V2 更低；当在 5° 上坡滑行时，多种速度条件下 (2.25~3.25 m/s) V1 耗氧量皆更少。这表明，从能量消耗角度出发，在陡上坡的地形条件下使用 V1 更有利。

2.1.3 坐式越野滑雪技术

坐式越野滑雪是残奥会的重要运动项目。运动员坐在滑雪板坐架上利用 DP 技术向前推进，不同坐位方法会对耗氧量产生不同影响。具有躯干支撑的条件下，跪式 (KL) 坐位与膝盖高于臀部 (KH) 坐位相比经济性更高 (Hofmann et al., 2016)。Lajunen 等 (2020) 发现，没有躯干支撑，KL 也比 KH 坐位消耗更少的氧气。但 Ohlsson 等 (2017) 发现，使用 DP 技术滑行时，大部分受试者使用 KL 坐位产生的氧气消耗高于 KH 坐位，并且 KH 坐位的滑雪总体效率更高。这可能与 KL 坐位基于向前躯干支撑的姿势有关。目前，关于坐式越野滑雪的研究大多以健康人群作为受试，可能对研究造成些许局限。

2.2 滑雪动作周期特征

越野滑雪比赛中，高水平运动员的技术优势常给他们带来更高的经济性。技术优势直接体现在运动员滑雪动作的周期特征上。周期特征是指运动员一个滑行周期 (支撑、回杆阶段) 的运动学及动力学特征，包括周期滑行长度、周期时间、支撑频率、支撑冲量、回杆时间等参数。Stoggl 等 (2007) 发现，虽然耗氧量与短距离比赛 (1 100 m) 的运动表现 (平均速度) 不存在相关性，但最快的滑雪者与最慢的相比，相同支撑频率下产生更长的周期滑行长度。Lindinger 等 (2011) 探究了周期特征与耗氧量之间的关系，发现滑雪者使用 DP 技术滑行时，随着支撑频率的增加，一个周期的滑行长度变长。虽然支撑频率 40 次/min 与 60 次/min 条件下的氧气消耗没有统计学差异，但两者与 80 次/min 时相比时，稳态摄氧量降低约 13%。这种耗氧量差异可能是因为高频率滑行时产生较大的下肢关节屈伸范围，以及更大的回杆时期角速度。低频、长滑行长度的动作模式有利于提高经济性，因此，适当增加低频训练可能提高经济性。另外，经济性和回杆时间可能存在一定关系。Holmberg 等 (2006) 发现，运动员使用 DP 技术时，更低耗氧量对应更长绝对回杆时间。Stoggl 等 (2013) 发现，使用 V1 技术时，回杆时间更长，周期频率更慢。Stoggl 等 (2009) 认为，高冲量的推进是更经济的动作，尤

其是对DS、V2以及DP技术而言。总之,更经济的周期特征及动作特征是相辅相成的,周期频率降低会伴随周期时间的增加,相对较短且冲量较大的支撑阶段会造成时间相对较长的回杆阶段。

上肢的有效摆动有助于实现更长的滑行周期长度,可能是降低能量消耗的重要技术特征。Alsobrook等(2009)发现,可以用10 s上肢平均输出功率反映越野滑雪运动员的经济性,平均输出功率越高,经济性越好。因此,有效的上肢力量训练可能是改善滑雪经济性的重要方法。Sandbakk等(2013)探究了有无上肢支撑动作对V2技术耗氧量的影响,发现伴有手臂支撑动作有利于产生更低的耗氧量、更长的滑行周期长度和时间,以及更低的周期频率。Grasaas等(2014)发现,交替V2技术也存在类似结论。Gopfert等(2016)研究了交替V2技术中手臂摆动对神经肌肉激活及腿部力量的影响,发现伸膝时,手臂自由摆动条件下的股内侧肌和股直肌的平均肌电更低,中速与高速滑行下尤为明显,从侧面体现手臂运动对经济性的提高作用。虽然神经激活模式未发生改变,但摆臂能充分利用拉伸-收缩周期储存的弹性势能,使有摆臂比无摆臂的经济性更高。在不控制周期长度和周期频率的情况下,上肢摆动产生更长的滑行周期长度,可能也是经济性提高的侧面体现。

下肢动作也会对经济性产生一定影响。DP技术中,下肢膝关节及踝关节的有效运动对维持更长时间的运动有重要作用。虽然膝、踝关节有无自由活动未对稳态耗氧量造成统计学差异,但下肢关节自由运动时,受试者滑行至力竭的时间更长。这说明虽然DP技术中下肢运动无法直接降低能量消耗,但可能通过增加运动时间减少相对能耗(Holmberg et al., 2006)。对于自由式滑雪如V2技术,降低髌关节垂直方向的加速度有利于减少氧气消耗和1 000 m计时赛的时间。因此,这种髌关节运动模式可能是V2技术的关键点,能够改善滑雪经济性,提高比赛成绩(Losnegard et al., 2017a)。

较高质心的稳定性有利于提高经济性。Zoppiroli等(2015)发现,与水平较低的滑雪运动员相比,高水平滑雪运动员通常伴随更低的耗氧量,这可能是由于他们支撑早期身体前倾角更明显,质心垂直位移范围较小,从而降低周期频率,改善了经济性。在冬季两项滑雪项目中,建议通过将步枪靠近身体质心来增强身体-器械总体质心的稳定性,从而提高滑雪经济性(Rundell et al., 1998)。Pellegrini等(2018a, 2018b)发现,区域级运动员的多余运动(如高频振动)更多,且与能量消耗成正相关。

2.3 装备

合适的滑雪装备是增加推进力或减少阻力的重要因素。其中,滑雪杆的长度非常重要,许多研究发现使用长杆有利于减少能量消耗。Losnegard等(2017b)发现,滑雪

者在低坡度下使用DP技术,长杆(自选杆+7.5 cm)对应的稳态耗氧量比自选杆($84 \pm 1\%$ 身高)更低,1 000 m计时赛成绩更优。Carlsen等(2018)得出相似的结论,发现在低坡度(1.7°)的实验条件下,使用长杆(自选杆+10 cm)消耗的氧气最少,其他杆长的耗氧量间无统计学差异;中等坡度(4.5°)滑行时,长杆仍保持最低氧耗,此时多种杆长(自选杆-5 cm、自选杆、自选杆+5 cm和自选杆+10 cm)的氧气消耗均有统计学差异。这说明随着坡度的增加,杆长对氧气消耗量的影响逐渐变大。杆长对经济性的影响可能通过作用于滑雪动作周期特征完成,与回杆时间、支撑冲量呈正相关,与周期频率呈负相关。这些周期特征有利于提高经济性(Onasch et al., 2017)。优秀的打蜡技术及滑雪板,能减小滑行时的摩擦系数,从而影响经济性(BreitschŠdel et al., 2012; Swarén et al., 2014)。滑雪板铰链(hinge)及滑雪杆握把位置的改变未对运动员的稳态摄氧量产生显著影响,但其分别造成肌肉激活模式、上肢输出功率的改变,可能会潜在地影响能量消耗(Bolger et al., 2016; Heil et al., 2004)。

2.4 其他因素

年龄可能会造成滑雪经济性改变。Lepers等(2016)发现,随着年龄增长,同样测试条件下的稳态摄氧量增加。但也有研究发现,年龄较大滑雪者的经济性及总体效率比年轻滑雪者更高(Ainegren et al., 2013)。这种差异可能由于年长及年轻的定义不同:前者年长滑雪者平均年龄为40岁,后者年龄为25岁,因此推测随年龄增长,稳态摄氧量可能呈现先上升后下降的趋势。

性别因素也可能对滑雪经济性产生影响。Rundell等(1998)研究不同性别滑雪者的耗氧量差异时,发现女性的相对氧气消耗高于男性,此时使用的是交替V2和V1技术。但Ainegren等(2013)发现,无论水平高低,滑雪运动员的经济性不存在性别差异,此时使用的技术是DS及V2。因此,性别对滑雪经济性的影响尚未定论,可能与技术类型有关。

越野滑雪运动存在多种距离项目。不同距离项目中,运动员的经济性水平可能有所差异。同样的测试条件下,长距离与短距离专项运动员的氧气消耗没有差异,但短距离运动员滑雪时氧亏更大,峰值摄氧量($\dot{V}O_{2\text{ peak}}$)更高,有更强的无氧能力,意味着总能耗可能更多(Losnegard et al., 2014a)。Skattebo等(2019)进一步发现,长距离(大于50 km)滑雪运动员与参与多种距离项目的全能运动员相比,氧气消耗量更低。

3 结论及展望

1)大部分研究使用次极限负荷下单位体重和单位时间的稳态摄氧量评价滑雪经济性,也存在少量研究使用有氧、无氧总能耗进行评价。大多数研究使用滚轴滑雪

模拟实地越野滑雪方法的测试,但实验条件以及器械可能对结果产生影响。2)在水平地形,DP技术是提高运动员比赛经济性的重要措施。随着坡度增加,DS技术的优势更大。3)技术训练中,运动员应注意增加滑行周期长度、支撑期冲量,延长回杆时间,减少质心在垂直方向的运动,保持身体前倾,从而提高经济性。上肢力量训练,降低髌关节垂直方向的加速度,都有利于产生更经济的滑行。这些因素可能通过改变滑雪的周期特征而改变运动经济性。4)使用长杆(长于自选杆)可以有效减少越野滑雪运动员的耗氧量。5)性别、年龄等个体差异对经济性的影响尚不明确。

目前越野滑雪经济性的研究仍较多关注某个因素的影响,缺乏对多个因素综合效应的探究和总结,未来需对此类问题加强研究。此外,需要进一步统一实验条件,增强研究的可比较性,更好地体现滑雪经济性是影响越野滑雪成绩的重要因素,运动员的水平差异可在经济性上有所反映。

参考文献:

李斐,丁海勇,2019.力量训练提升马拉松跑者耐力运动表现的研究进展及训练策略[J].*体育科研*,40(5):16-28.

李慧,2019.优秀女子越野滑雪运动员技术特异性生理决定因素分析[J].*当代体育科技*,9(8):247,249.

AINEGREN M, CARLSSON P, LAAKSONEN M S, et al., 2014. The influence of grip on oxygen consumption and leg forces when using classical style roller skis[J].*Scand J Med Sci Sports*, 24(2): 301-310.

AINEGREN M, CARLSSON P, TINNSTEN M, et al., 2013. Skiing economy and efficiency in recreational and elite cross-country skiers [J].*J Strength Cond Res*, 27(5): 1239-1252.

ALSOBROOK N G, HEIL D P, 2009. Upper body power as a determinant of classical cross-country ski performance [J].*Eur J Appl Physiol*, 105: 633-641.

ANDERSSON E, BJ RKLUND G, HOLMBERG H C, et al., 2017. Energy system contributions and determinants of performance in sprint cross-country skiing[J].*Scand J Med Sci Sports*, 27(4): 385-398.

BELLIZZI M J, KING K A, CUSHMAN S K, et al., 1998. Does the application of ground force set the energetic cost of cross-country skiing?[J].*J Appl Physiol*, 85(5): 1736-1743.

BILODEAU B, BOULAY M R, ROY B, 1992. Propulsive and gliding phases in four cross-country skiing techniques [J].*Med Sci Sports Exer*, 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.

BJORKLUND G, HOLMBERG H C, STOGGL T, 2015. The effects of prior high intensity double poling on subsequent diagonal stride skiing characteristics[J].*Springerplus*, 4(1): 40.

BOJSEN-MOLLER J, LOSNEGARD T, KEMPPAINEN J, et al., 2010. Muscle use during double poling evaluated by positron emission tomography[J].*J Appl Physiol*, 109(6): 1895-1903.

BOLDT K, KILLICK A, HERZOG W, 2016. Quadrupedal locomo-

tion-respiration entrainment and metabolic economy in cross-country skiers[J].*J Appl Biomech*, 32(1): 1-6.

BOLGER C M, SANDBAKK O, ETTEMA G, et al., 2016. How hinge positioning in cross-country ski bindings affect exercise efficiency, cycle characteristics and muscle coordination during sub-maximal roller skiing[J].*PLoS One*, 11(5): e0153078.

BREITSCHŠDEL F, BERRE V R, ANDERSEN R, et al., 2012. A comparison between timed and IMU captured Nordic ski glide tests [J].*Procedia Engineering*, 34: 397-402.

CARLSEN C H, RUD B, MYKLEBUST H, et al., 2018. Pole lengths influence O₂-cost during double poling in highly trained cross-country skiers[J].*Eur J Appl Physiol*, 118(2): 271-281.

CAVANAGH P R, KRAM R, 1985. The efficiency of human movement—a statement of the problem[J].*Med Sci Sports Exer*, 17(3): 304-308.

GOPFERT C, HOLMBERG H C, STOGGL T, et al., 2013. Biomechanical characteristics and speed adaptation during kick double poling on roller skis in elite cross-country skiers[J].*Sports Biomech*, 12(2): 154-174.

GOPFERT C, LINDINGER S J, OHTONEN O, et al., 2016. The effect of swinging the arms on muscle activation and production of leg force during ski skating at different skiing speeds [J].*Hum Mov Sci*, 47: 209-219.

GRASAAS E, HEGGE A M, ETTEMA G, et al., 2014. The effects of poling on physiological, kinematic and kinetic responses in roller ski skating[J].*Eur J Appl Physiol*, 114(9): 1933-1942.

HEGGE A M, BUCHER E, ETTEMA G, et al., 2016. Gender differences in power production, energetic capacity and efficiency of elite cross-country skiers during whole-body, upper-body, and arm poling[J].*Eur J Appl Physiol*, 116(2): 291-300.

HEIL D P, ENGEN J, HIGGINSON B K, 2004. Influence of ski pole grip on peak upper body power output in cross-country skiers [J].*Eur J Appl Physiol*, 91(4): 481-487.

HOFF J, HELGERUD J, WISLØFF U, 1999. Maximal strength training improves work economy in trained female cross-country skiers [J].*Med Sci Sports Exer*, 31(6): 870-877.

HOFFMAN M D, CLIFFORD P S, 1990a. Physiological responses to different cross country skiing techniques on level terrain [J].*Med Sci Sports Exer*, 22(6): 841-848.

HOFFMAN M D, CLIFFORD P S, FOLEY P J, et al., 1990b. Physiological responses to different roller skiing techniques[J].*Med Sci Sports Exer*, 22(3): 391-396.

HOFFMAN M D, CLIFFORD P S, WATTS P B, et al., 1994. Physiological comparison of uphill roller skiing: diagonal stride versus double pole[J].*Med Sci Sports Exer*, 26(10): 1284-1289.

HOFFMAN M D, CLIFFORD P S, WATTS P B, et al., 1995. Delta efficiency of uphill roller skiing with the double pole and diagonal stride techniques[J].*Can J Appl Physiol*, 20(4): 465-479.

HOFMANN K B, OHLSSON M L, HOOK M, et al., 2016. The influence of sitting posture on mechanics and metabolic energy requirements during sit-skiing: A case report[J].*Sports Engineering*, 19(3): 213-218.

HOLMBERG H C, LINDINGER S, STOGGL T, et al., 2006. Contribution of the legs to double-poling performance in elite cross-country skiers[J].*Med Sci Sports Exer*, 38(10): 1853-1860.

- 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.
- LAJUNEN K, RAPP W, AHTIAINEN J P, et al., 2020. Effect of sitting posture on sit-skiing economy in non-disabled athletes [J]. *Front Sports Act Living*, 2: 44.
- LEPERS R, STAPLEY P J, 2016. Master athletes are extending the limits of human endurance [J]. *Front Physiol*, doi: 10.3389/fphys.2016.00613.
- LINDINGER S J, HOLMBERG H C, 2011. How do elite cross-country skiers adapt to different double poling frequencies at low to high speeds? [J]. *Eur J Appl Physiol*, 111(6): 1103-1119.
- LOSNEGARD T, HALLEN J, 2014a. Physiological differences between sprint- and distance-specialized cross-country skiers [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 9: 25-31.
- LOSNEGARD T, MYKLEBUST H, EHRHARDT A, et al., 2017a. Kinematical analysis of the V2 ski skating technique: A longitudinal study [J]. *J Sports Sci*, 35: 1219-1227.
- LOSNEGARD T, MYKLEBUST H, SKATTEBO O, et al., 2017b. The influence of pole length on performance, O₂ cost, and kinematics in double poling [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(2): 211-217.
- LOSNEGARD T, SCHAFFER D, HALLEN J, 2014b. Exercise economy in skiing and running [J]. *Front Physiol*, doi: 10.3389/fphys.2014.00005.
- OHLSSON M L, LAAKSONEN M S, 2017. Sitting position affects performance in cross-country sit-skiing [J]. *Eur J Appl Physiol*, 117(6): 1095-1106.
- MOSELEY L, AE J, 2001. The reliability of cycling efficiency [J]. *Med Sci Sports Exer*, 33(4): 621-627.
- MOXNES J F, HAUSKEN K, 2009. A dynamic model of Nordic diagonal stride skiing, with a literature review of cross country skiing [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 12(5): 531-551.
- NILSSON J, TVEIT P, EIKREHAGEN O, 2004. Effects of speed on temporal patterns in classical style and freestyle cross-country skiing [J]. *Sports Biomech*, 3(1): 85-108.
- ONASCH F, KILLICK A, HERZOG W, 2017. Is there an optimal pole length for double poling in cross country skiing? [J]. *J Appl Biomech*, 33(3): 197-202.
- PELLEGRINI B, STOGGL T L, HOLMBERG H C, 2018a. Developments in the biomechanics and equipment of Olympic cross-country skiers [J]. *Front Physiol*, doi: 10.3389/fphys.2018.00976.
- PELLEGRINI B, ZOPPIROLI C, BOCCIA G, et al., 2018b. Cross-country skiing movement factorization to explore relationships between skiing economy and athletes' skills [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 28(2): 565-574.
- PELLEGRINI B, ZOPPIROLI C, BORTOLAN L, et al., 2013. Biomechanical and energetic determinants of technique selection in classical cross-country skiing [J]. *Hum Mov Sci*, 32(6): 1415-1429.
- PELLEGRINI B, ZOPPIROLI C, BORTOLAN L, et al., 2014. Gait models and mechanical energy in three cross-country skiing techniques [J]. *J Exp Biol*, 217(21): 3910-3918.
- ROBERTS A D, DALEY P J, MARTIN D T, et al., 2002. Differences in physiological test results and cross-country skiing race performance of a pair of identical twins [J]. *J Sci Med Sport*, 5(3): 236-240.
- RUNDELL K W, SZMEDRA L, 1998. Energy cost of rifle carriage in biathlon skiing [J]. *Med Sci Sports Exer*, 30(4): 570-576.
- SAIBENE F, CORTILI G, ROI G, et al., 1989. The energy cost of level cross-country skiing and the effect of the friction of the ski [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 58(7): 791-795.
- SANDBAKK O, ETTEMA G, HOLMBERG H C, 2012. The influence of incline and speed on work rate, gross efficiency and kinematics of roller ski skating [J]. *Eur J Appl Physiol*, 112(8): 2829-2838.
- SANDBAKK O, ETTEMA G, HOLMBERG H C, 2013. The physiological and biomechanical contributions of poling to roller ski skating [J]. *Eur J Appl Physiol*, 113(8): 1979-1987.
- SANDBAKK O, HOLMBERG H C, 2014. A reappraisal of success factors for Olympic cross-country skiing [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 9(1): 117-121.
- SANDBAKK O, HOLMBERG H C, LEIRDAL S, et al., 2010. Metabolic rate and gross efficiency at high work rates in world class and national level sprint skiers [J]. *Eur J Appl Physiol*, 109(3): 473-481.
- SIDOSIS L S, HOROWITZ J F, COYLE E F, 1992. Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency [J]. *Int J Sports Med*, 13(5): 407-411.
- SKATTEBO O, LOSNEGARD T, STADHEIM H K, 2019. Double poling physiology and kinematics of elite cross-country skiers: Specialized long-distance versus all-round skiers [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(9): 1190-1199.
- STOGGL T L, LINDINGER S, MULLER E, 2007. Analysis of a simulated sprint competition in classical cross country skiing [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 17(4): 362-372.
- STOGGL T L, HEBERT-LOSIER K, HOLMBERG H C, 2013. Do anthropometrics, biomechanics, and laterality explain V1 side preference in skiers? [J]. *Med Sci Sports Exer*, 45(8): 1569-1576.
- STOGGL T L, MULLER E, 2009. Kinematic determinants and physiological response of cross-country skiing at maximal speed [J]. *Med Sci Sports Exer*, 41(7): 1476-1487.
- SWARÉN M, KARLOF L, HOLMBERG H C, et al., 2014. Validation of test setup to evaluate glide performance in skis [J]. *Sports Technol*, 7(1-2): 89-97.
- WELDE B, STOGGL T L, MATHISEN G E, et al., 2017. The pacing strategy and technique of male cross-country skiers with different levels of performance during a 15-km classical race [J]. *PLoS One*, 12(11): e0187111.
- WESTON A R, MBAMBO Z, MYBURGH K H, 2000. Running economy of African and Caucasian distance runners [J]. *Med Sci Sports Exer*, 32(6): 1130-1134.
- WIGGEN O N, HEIDELBERG C T, WAAGAARD S H, et al., 2016. The effects of cold environments on double-poling performance and economy in male cross-country skiers wearing a standard racing suit [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 11(6): 776-782.
- ZOPPIROLI C, PELLEGRINI B, BORTOLAN L, et al., 2015. Energetics and biomechanics of double poling in regional and high-level cross-country skiers [J]. *Eur J Appl Physiol*, 115(5): 969-979.

(收稿日期:2020-05-27; 修订日期:2021-02-10; 编辑:马婧)