

冰川冻土
Journal of Glaciology and Geocryology
ISSN 1000-0240, CN 62-1072/P

《冰川冻土》网络首发论文

题目: 竞技型滑雪场赛道雪质及其气候变化风险评价——以河北省万龙滑雪场为例
作者: 毕研群, 王飞腾, 韩海东, 丁明虎, 效存德, 康世昌, 任贾文, 王兴
收稿日期: 2018-11-26
网络首发日期: 2019-06-18
引用格式: 毕研群, 王飞腾, 韩海东, 丁明虎, 效存德, 康世昌, 任贾文, 王兴. 竞技型滑雪场赛道雪质及其气候变化风险评价——以河北省万龙滑雪场为例 [J/OL]. 冰川冻土.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190617.1645.009.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0071

BI Yanqun, WANG Feiteng, HAN Haidong, et al. Snow quality and climate change risk assessment of competitive skiing grounds in China: a case study of Wanlong Ski Resort in Hebei Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3). [毕研群, 王飞腾, 韩海东, 等. 竞技型滑雪场赛道雪质及其气候变化风险评价: 以河北省万龙滑雪场为例[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3)]

竞技型滑雪场赛道雪质及其气候变化风险评价^①

——以河北省万龙滑雪场为例

毕研群^{1,4}, 王飞腾¹, 韩海东¹, 丁明虎², 效存德^{1,3},
康世昌¹, 任贾文¹, 王 兴^{1,4}

(1.中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2.中国气象科学研究院, 北京 100081;
3.北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要: 2022 年北京冬奥会将在我国举办, 比赛项目以雪上项目为主。赛道雪质是雪务工作的核心问题, 而目前国内关于竞技型滑雪场赛道雪质研究少有涉及。通过研究以人造雪为主的河北省万龙滑雪场赛道雪质特性, 了解我国竞技型雪场目前赛道现状。通过比较, 找出与国际雪联要求标准赛道雪质的差距, 依据赛道雪质变化特性, 提出雪质保持和提升方案, 并对影响雪质的要素进行风险评估, 以提升我国赛事雪务工作的科研能力和技术水平, 为冬奥会成功举办提供科学依据和服务。

关键词: 竞技型; 滑雪场; 人造雪; 雪质

中图分类号: P463.25/G863 **文献标志码:** A

0 引言

第 24 届冬季奥林匹克运动会(简称冬奥会)将于 2022 年由北京市、张家口市两地联合举办。雪上项目是冬奥会的主要内容, 在 2022 年冬奥会全部 109 枚金牌中, 雪上项目占了 76 枚。因此, 雪务工作是确保雪上项目赛事成功举办的重要基础和前提, 是本次冬奥会环境保障技术与应用最核心的问题之一。

冬奥会雪务工作主要包括造雪、赛道制作、赛道监测和预报以及风险应对(储雪、人工干预等)四个方面内容。其中, 赛道雪质是造雪和赛道制作的目标, 也是保障冬奥会成功的基础, 但雪质参数极大依赖于局地气象条件和人工赛道技术。因此, 不同地点举办冬奥会的历史经验不能简单照搬, 必须开展属地化试验和研究。

过去几十年, 滑雪场有关的研究主要集中在滑雪场气象条件^[1-5]、滑雪产业规划^[6-8]、滑雪运动发展^[9-11]、滑雪场设计^[12-14]、气象条件对人造雪的影响^[15-16]及滑雪行为学^[17-18]等, 鲜有赛道雪质的研究。我国竞技型雪场赛道存在的最大问题是无雪质量化指标, 科学研究我国竞技型雪场雪质现状及在气象要素影响下的变化机理, 找出与国际标准赛道雪质的差距, 显得尤为重要。因此, 为充分了解我国竞技型滑雪场目前的赛道技术水平, 本研究在张家口市崇礼区万龙滑雪场开展了雪质观测试验, 结合气象滚动监测, 提出有助于解决冬奥会雪质难题的技术方案, 为冬奥会提供保障技术和决策服务。同时, 本研究也对极端事件影响雪质的天气和环境风险进行评估, 开展风险

收稿日期: 2018-11-26; **修订日期:** 2019-04-23

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-323); 国家自然科学基金项目(41721091); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究项目(SKLCSS-ZZ-2018)资助

作者简介: 毕研群(1992—), 男, 山东巨野人, 2015 年在聊城大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事冰冻圈科学研究. E-mail: biyanqun16@mailsucas.ac.cn.

防范措施研究。

1 研究区概况

北京 2022 年冬奥会计划使用 25 个场馆，场馆分布在 3 个赛区，分别是北京赛区、延庆赛区和张家口赛区。张家口赛区位于张家口市崇礼区，崇礼区至今已有 20 年的滑雪产业发展历史，目前正在运营的雪场有 10 个，该区域是中国滑雪产业发展的龙头区，是中国及周边国家众多滑雪爱好者冬季滑雪休闲度假的目的地^[19]。

本研究主要对崇礼区的万龙滑雪场进行雪质研究。该滑雪场硬件设施好、开放时间早、认可度高，且承办过国内外多种赛事，是国内重要的竞技型雪场之一，具有较高的代表性和研究意义。万龙滑雪场所在崇礼区位于张家口市东北部，距北京市 249 km，距张家口市 60 km。雪场占地面积为 30 km²，最高处海拔 2 110.3 m，垂直落差 550 m。目前已开发建成初、中、高级滑雪道共计 24 条，总面积为 0.79 km²，雪道总长度为 36.5 km。

万龙滑雪场冬季平均气温为 -12 ℃，年降水量为 488 mm，位于中温带半湿润与半干旱气候交界区，属于大陆性季风气候区。降雪日集中在 11 月至次年 3 月，占全年的 93%，2 月最多，占 23%；积雪期主要集中在 12 月至次年 2 月，占全年的 69%^[3]，年均降雪量为 63.5 mm，最大积雪深度为 1.5 m^[4]。

2 观测试验

在全球气候变暖的背景下，雪线上升、雪量下降是人工造雪技术得以普遍运用的主要原因。通过人工造雪来保证甚至延长滑雪场的营业期，进而提高收益，已成为全球绝大多数滑雪场的普遍选择^[15]。与天然雪相比，人造雪更为密实，10 cm 厚的人造雪相当于 40 cm 厚的自然雪^[20]。人造雪比天然雪更能抵抗风、雨以及温度变化的影响，更为稳定和持久^[21]。赛道雪质稳定，可以减少滑雪板对赛道的影响，保障首尾出发的运动员赛道状况一致，提高比赛的公平性。对于天然降雪丰富的地区，也需要人造雪以满足赛道雪质的要求。万龙滑雪场所在的华北地区冬季降雪量小，自然降雪无法满足滑雪场对雪量的要求。因此，更需要人工造雪来满足比赛的要求。

目前，国内外赛道制作方面采取不间断人工造雪，边铺设赛道边压实，再在积雪不足区域进行填补的方式；雪质检测和控制方面采用自动气象观测、人工雪质观测和人工注水方式，对赛道雪质的保障具有一定成效，但存在消耗大、效率差等不足。

赛道雪质最关键的参数是雪硬度和赛道厚度，雪硬度由雪密度、雪温度、雪含水率以及雪粒之间的烧结作用^①决定。在实际雪务工作中，这些参数又受到造雪技术和天气条件的影响。因此，在万龙滑雪场 4 条雪道上架设了 2 台气象站（40°57'21.00" N，115°24'16.27" E，海拔 2 011 m；40°57'55.06" N，115°23'51.97" E，海拔 1 765 m），并按照 50 m 海拔高度间隔及重要雪道原则，依次选定 13 个（F1~F13）雪特性观测点开展雪冰物理特性观测，具体位置见图 1。

①雪粒烧结作用：由于太阳辐射、感热及潜热等影响，白天赛道能量摄入，积雪部分消融，析出的液态水填充雪粒间空隙；晚上液态水在低温条件下凝结黏合雪粒，积雪强度增强。

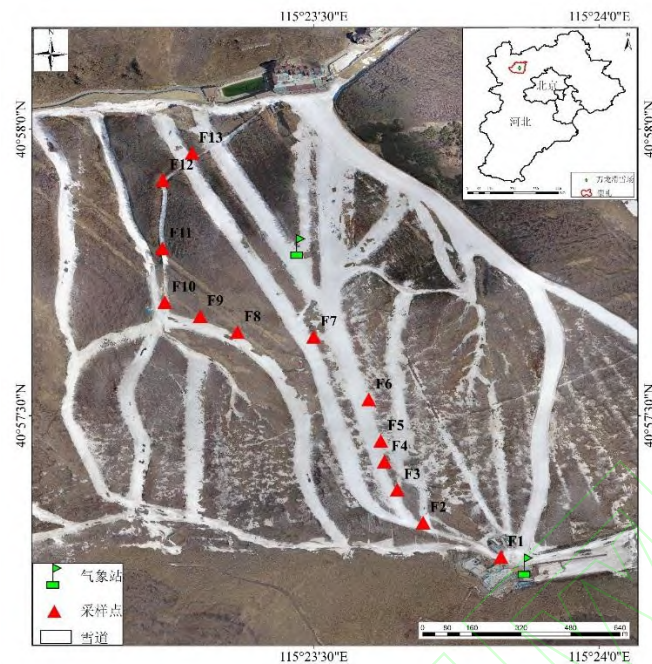


图1 万龙滑雪场区位及其观测点空间分布

Fig. 1 Map showing the location of Wanlong Ski Resort and the distribution of the observations and the sampling points

万龙滑雪场赛道由造雪设备集中造雪后利用压雪机进行铺展压实,进而形成质地密实的赛道。气象资料采用气象站 2017 年 3 月 3-19 日的数据,自动气象站间隔时间为 1 h,具体参数指标见表 1。滑雪场赛道成型过程中,积雪被大幅度压缩,积雪较原始形态发生很大形变。因此,赛道雪质在不同深度会有很大不同,依据滑雪板(单板、双板)在赛道上的嵌入深度,选定 0~20 cm 赛道深度为影响滑雪舒适度的有效赛道厚度。Snow Fork 雪特性仪是检测雪质的最常用仪器,详细性能指标见文献[22]。在使用 Snow Fork 雪特性仪时先打开仪器,使其探头暴露在空气中 15 min,进行大气校正,依据提供的标准值范围(衰减度介于 1 200~1 500,频率介于 800~900 Hz,3 dB 带宽介于 19~21 Hz),将 Snow Fork 探头插入雪层剖面的不同深度(5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm),依次直接获取有效雪密度、雪含水率数据。雪道表面温度利用手持红外温度计进行测量,雪层内部温度利用针式温度计进行测量。观测时间是在北京时间 09:00-11:00,并进行前推式雪坑剖面挖掘,每个剖面各雪层属性数据测量三次,求取平均,以保证测量数据的真实性和可靠性。

表1 气象站参数

Table 1 Information of the meteorological station

参数	单位	仪器名称及型号	仪器生产信息	精度
气温	℃	温湿度传感器 HC2S3	北京华益瑞科技有限公司	±0.1 ℃
相对湿度	%	温湿度传感器 HC2S3	北京华益瑞科技有限公司	±0.5%
太阳辐射	W·m ⁻²	四分量辐射 CNR4	北京华益瑞科技有限公司	±1.0%
风速	m·s ⁻¹	风速传感器 05103	北京华益瑞科技有限公司	±0.3 m·s ⁻¹
地温	℃	土壤温度传感器 109	北京华益瑞科技有限公司	±0.2 ℃

1960-2014 年 2 月 4 日至 3 月 13 日冬奥会和冬残奥会赛时崇礼地区逐日平均气温、最高气温、最低气温以及逐日降水资料由中国气象局国家气象中心提供。

3 结果与分析

3.1 赛道评估

滑雪场气象条件和赛道雪质是决定比赛成绩的重要影响因素，是国际雪联和运动员判断比赛舒适度和能否进行比赛的关键要素。雪上项目对气象条件有特殊的要求，气温高于 5℃、低于-20℃、强风、过高相对湿度和过大降雪等恶劣天气，经竞赛仲裁委员会研究可以决定是否开始比赛、延期甚至取消比赛。赛事对赛道厚度有定量标准，以平均雪层厚度 50~60 cm 为最佳^[23]。通过向国外雪冰专家咨询、与滑雪场技术人员探讨，结合加拿大曼尼托巴省越野滑雪协会公布的资料^[24]以及长期在滑雪场的观测经验，对赛道标准密度进行了划分（表 2）。此外，还涉及赛道定性标准，如颗粒状、含水率较小的积雪，主要用于越野滑雪、冬季两项场地；含水率相对较大的赛道，主要用于单板滑雪、自由式滑雪、跳台滑雪的着落区、停止区等；为体现雪上竞技运动的公平性、一致性和可比性，国际奥林匹克委员会要求部分项目（速降、回转、大回转等）应在具备一定密度和硬度的冰状雪赛道上举行。

表 2 雪密度列表^[24]

Table 2 Track standard densities ^[24]

种类/用途	密度(kg•m ⁻³)
新雪	150~200
自然堆积的雪	250~300
压雪机堆积的雪	300~350
娱乐休闲用雪(初级)	350~450
娱乐休闲用雪(中高级)	450~500
比赛赛道用雪	≥500
世界杯及更高级别赛事赛道用雪	540~560

滑雪场赛道雪质受外界影响，总体呈现随时间和空间变化的状态。因此，选取 2017 年 3 月 3-10 日较好雪质时间段对万龙滑雪场进行整体评估。观测期间万龙滑雪场气温为-17.7~3.1℃，最高、最低气温符合赛事标准；滑雪场赛道厚度为 58.6~120.0 cm，满足赛事要求的标准雪道厚度；雪道密度为 410~550 kg•m⁻³，符合雪上项目对雪密度的要求，但赛道密度受外界因素影响，稳定性差；赛道含水率为 0.79%~2.54%，属于潮雪，无法满足雪上项目中着落区、停止区等较大含水率的需求。

3.2 滑雪场雪质

本研究通过分析观测期内 13 个雪冰物理观测点逐日、逐层雪温度、雪密度、雪含水率以及其平均值数据，并通过图表分析、变异系数分析、相关性分析方法，探究万龙滑雪场滑雪场赛道雪质特性。

3.2.1 雪层密度变化

积雪密度主要受雪融水和雪层内对流、冷凝、辐射和传导引起的热量交换影响^[25]。图 2 为观测期内赛道各雪层密度变化情况。整个雪层密度变化趋势基本一致，不同雪层之间热量和水汽交换使得雪层密度随深度发生变化。观测期内赛道密度存在阶段性，3 月 3-10 日赛道密度范围为 410~550 kg•m⁻³，雪层密度大，但数值上下波动，稳定性差；3 月 11-19 日赛道密度范围为 220~350 kg•m⁻³，雪层密度持续下降，平均密度分别为 310、300、290、290 kg•m⁻³，除 15 cm、20 cm 处平均雪密度相等外，雪层密度基本上呈现出随深度的增加而减小的趋势，雪密度梯度为-6 kg•m⁻³。滑雪场赛道雪质紧密，最大持水能力远小于质地松散的自然积雪，雪层消融析出的液态水易饱和，雪融水依靠重力作用向下贯穿雪层，致使雪层下部孔隙率增大，密度减小。

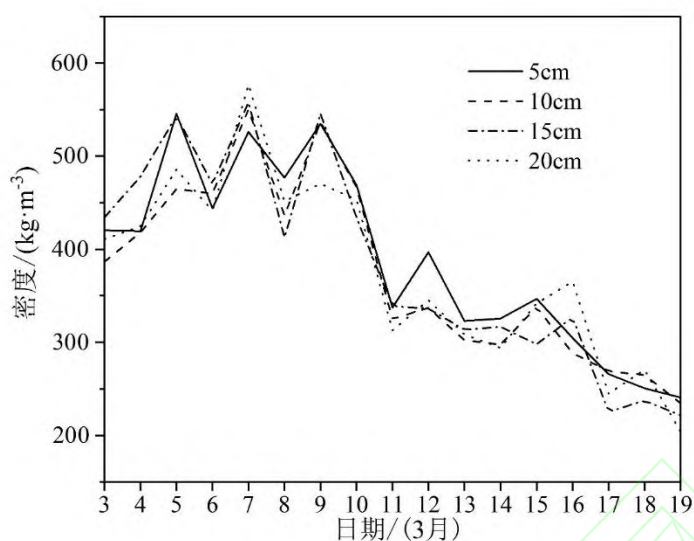


图2 雪层密度变化

Fig.2 Daily variation of the snow densities on the tracks

3月3-10日雪层温度先上升后下降再上升(图3),雪层温度波动幅度较大,无明显趋势,雪层平均温度为 -12.3°C ,平均气温为 -7.8°C 。7日雪层温度达到最低值,为 -17.7°C ,此时雪层平均密度达到最大值,为 $550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,且深度越深密度越大。雪层密度突变出现在11日,时段内雪层平均温度为 -10.0°C ,平均气温为 -0.3°C ,雪层密度为 $320\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。雪密度突变阶段开始出现最高气温大于 0°C ,分别是9日 0.2°C 、10日 3.1°C 和11日 1.0°C 。与9-11日雪层温度持续较高相比,雪密度变化滞后于雪温度变化,因此运用统计学方法对观测期雪温度、雪含水率、雪密度数据进行处理,变异系数分别为0.342、0.278、0.243。这在一定程度上反映出雪层雪质受外界自然因素影响下,雪温度最先响应,然后影响雪含水率,最后影响雪密度。

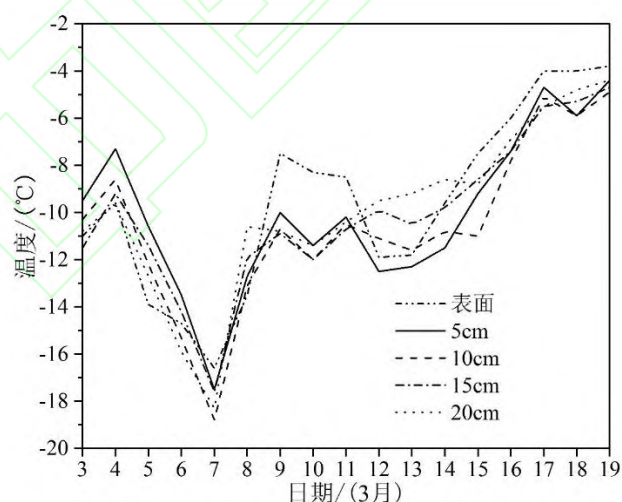


图3 雪层温度变化

Fig. 3 Daily variations of snow temperature at various depths

雪密度突变后雪层平均温度为 -8.1°C ,平均气温为 -1.4°C ,平均雪密度为 $290\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。9日前最高气温在不超过 0°C 时,各雪层密度随气温的变化呈现不同程度的变化,平均雪密度为 $470\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;最高气温超过 0°C 后,各雪层密度明显减小,平均雪密度降低至 $290\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。9日后最高

气温超过 0℃的天数为 10 天，占比为 90.9%，因此 0℃最高气温可以作为赛道雪密度发生显著变化的阈值点。统计雪密度突变阶段正积温和逐小时气温大于 0℃的时数，得知 9 日为 0.5℃，2 h；10 日为 21.0℃，12 h；11 日为 3.6℃，5 h。雪密度突变阶段正积温为 25.1℃，逐小时气温大于 0℃的时数为 19 h。研究结果在一定程度上可为赛道雪质维持和监测提供参考依据。

经相关性分析可知，雪层的平均密度与雪层的平均温度 ($R = -0.748, P < 0.01$)、最高气温 ($R = -0.626, P < 0.01$)、最低气温 ($R = -0.619, P < 0.01$)、日均温 ($R = -0.639, P < 0.01$) 和雪层平均含水率 ($R = -0.902, P < 0.01$) 具有显著的负相关性，与风速 ($R = 0.591, P < 0.05$) 具有较好的正相关性。因此，雪层密度与雪层温度、雪层含水率、气温、风速有关。

3.2.2 雪层温度变化

积雪温度是表征积雪能量高低最直接的指标^[26]，积雪温度的高低直接影响雪的消融和重冻结过程^[27]。图 3 为雪层温度随时间的变化。观测期内赛道各雪层温度变化趋势大体一致，温度波动幅度随深度存在差异，深度越深温度波动幅度越小。观测期内雪层平均温度为-10.0℃，依据温度梯度值计算^[28]，赛道温度梯度平均值为-0.1℃。观测期内表面平均温度和 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 处雪层平均温度分别为-9.5、-10.0、-10.5、-10.0、-9.9℃，表面温度最高，10 cm 处温度最低。

将观测期内雪层温度数据与最高气温、最低气温、平均气温、净辐射、风速、相对湿度、地温等做相关性分析（表 3）。结果表明，表面温度、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 处雪层温度均与最高气温、最低气温、平均气温和风速有显著的相关性。赛道表面温度与气温、风速的相关性大于赛道内部温度与气温、风速的相关性；赛道表面温度与赛道内部温度的相关性大于气温、风速与赛道内部温度的相关性，说明气温、风速等气象因素先作用于雪层表面，而后由融雪水、潜热等将热量转移至赛道内部。

表 3 雪层温度相关性分析

Table 3	Correlation coefficients between snow temperatures at various depths and various meteorological factors							
	表面温度	最高气温	最低气温	日均温	净辐射	风速	相对湿度	地温
表面温度	—	0.848**	0.878**	0.899**	0.250	-0.657**	-0.202	0.303
5cm 温度	0.861**	0.667**	0.762**	0.758**	0.162	-0.464*	0.096	0.647**
10cm 温度	0.884**	0.731**	0.761**	0.776**	0.144	-0.593*	0.027	0.564*
15cm 温度	0.866**	0.693**	0.743**	0.750**	0.035	-0.617*	0.015	0.559*
20cm 温度	0.846**	0.783**	0.767**	0.782**	0.122	-0.645**	-0.133	0.390*

注：*表示 $P < 0.05$ ，**表示 $P < 0.01$

除雪层表面温度与地温呈现不显著相关性外，5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 雪层温度均与地温呈现显著相关性。说明赛道内雪层温度是由气温、风速、地温三种要素控制。

3.2.3 雪层含水率变化

积雪液态含水率是指单位体积积雪中液态水含量，其支配着雪层内物质和能量迁移交换，是积雪雪温升高的表现^[29]。图 4 为观测期内雪层含水率变化。各雪层含水率随时间的变化趋势基本一致，含水率范围为 0.59%~4.81%。5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 处含水率平均值分别为 2.55%、2.65%、2.59%、2.67%，基本满足赛事要求。雪层内液态水从上逐层下渗，有效雪层内 20 cm 处含水率最大；10 cm、15 cm 处存在异常，原因在于 10 cm 处雪层存在破碎片状冰，阻碍液态水下渗，赛道上层含水率增大。这种情况在一定程度上造成赛道结构不均匀，首尾出发的运动员赛道状况不一致，影响比赛公平性和成绩。液态含水率作为积雪融化的指示指标，其变化快慢可表征积雪融化速度^[30]。

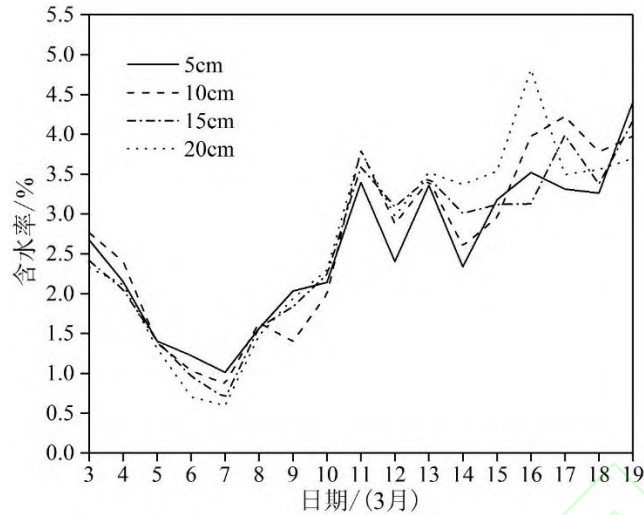


图4 雪层含水率变化

Fig. 4 Daily variations of snow water contents at various depths

根据国际水文科学协会（IAHS）发布的积雪液态含水率通用分类方案，将积雪依次划分为干雪（0%）、潮雪（>0~3%）、湿雪（>3%~8%）、非常湿（>8%~15%）和雪浆（>15%）^[22]。由图4可知，3月3-10日雪层平均液态含水率均小于3%。属于潮雪且随气温变化而变化，气温下降，含水率降低；气温升高，含水率上升。3月11-19日雪层内平均液态含水率逐步增大，除12日、14日液态含水率小于3%外，其余日期雪层平均液态含水率均超过3%，属于湿雪。雪层为潮雪日期内的日均温为-6.6℃，雪层为湿雪日期内的日均温为-0.2℃。

对雪层平均含水率与雪层平均温度、气温、风速等气象要素进行相关性分析，可知雪层平均含水率与雪层平均温度、最高气温、最低气温、日均温、风速通过了0.01水平显著性检验，其相关系数分别为0.785、0.778、0.760、0.780、-0.708。因此，雪层含水率受外界气象因素的影响较大。

3.3 雪场气候变化风险评价

影响雪质的风险因素主要是气象要素，全球变暖导致温度上升，异常天气频发。因此，对影响雪质的气象要素进行风险评估，开展风险防范措施显得尤为重要。

高温风险和极端寒冷并存。赛时历史时期最高气温、最低气温、最高气温极小值、最低气温极大值都出现上升趋势（图5），增加幅度分别为 $+(0.58 \pm 0.26) ^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $+(0.96 \pm 0.28) ^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $+(0.40 \pm 0.31) ^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $+(0.25 \pm 0.24) ^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。通过Mann-Kendall趋势检验（ $Z = \pm 1.96$ ，置信度水平 $\alpha = 0.05$ ），最高气温（ $Z = 2.06$ ）、最低气温（ $Z = 3.23$ ）呈现显著上升趋势，其中最低气温上升趋势最明显；最高气温极小值（ $Z = 1.22$ ）、最低气温极大值（ $Z = 0.66$ ）呈现上升趋势但不显著。崇礼（县城）日最低气温 $\leq -15.0 ^\circ\text{C}$ 的寒冷天气出现概率达52.9%，日最低气温 $\leq -20.0 ^\circ\text{C}$ 的概率达24.5%，冬奥会期间赛区出现低温寒冷天气的风险较高，甚至历史上曾出现过 $-32.4 ^\circ\text{C}$ （1978年2月15日）的极端最低气温。同时，冬奥会赛区存在一定的高温融雪风险。赛场平均气温一般在 $0 ^\circ\text{C}$ 以下，但会出现日平均气温 $0 ^\circ\text{C}$ 以上或者日最高气温 $\geq 5.0 ^\circ\text{C}$ 的情况，崇礼县日最高气温 $\geq 5.0 ^\circ\text{C}$ 的天气出现概率为20.3%，曾出现过 $17.0 ^\circ\text{C}$ （2001年3月13日）的极端最高气温。

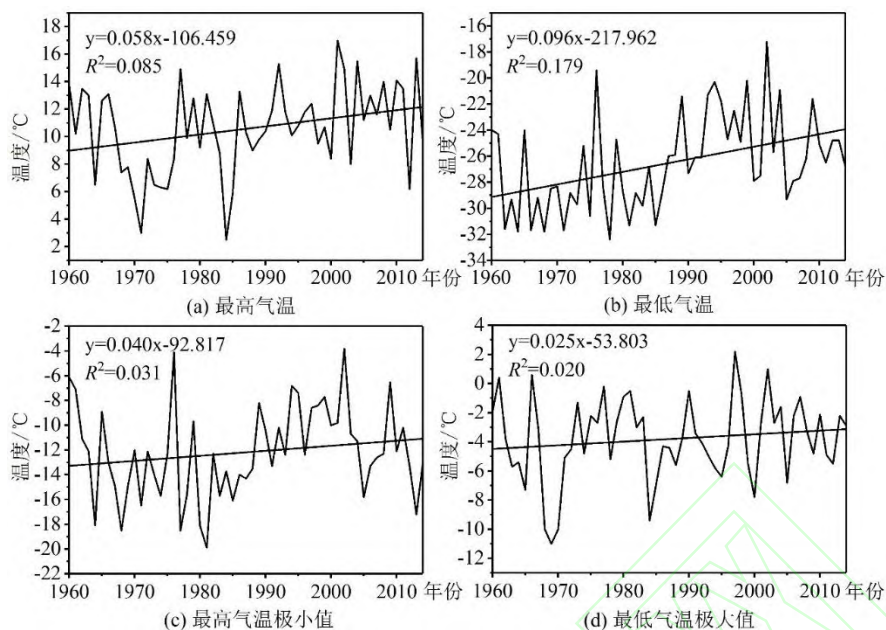


图5 赛期崇礼县最高气温、最低气温、最高气温极小值、最低气温极大值变化趋势

Fig. 5 Annual variations of the maximum temperature (a), the minimum temperature (b), the minimum temperature minimum (c) and the minimum temperature maximum (d) in Chongli County during the competition period

强降雪和强降雨风险并存。赛时历史时期总降水量、降水强度、日最大降水量、强降水量都呈现上升趋势（图 6）。增加幅度分别为 $+(0.004\pm0.76) \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $+(0.19\pm0.10) \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $+(0.37\pm0.30) \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $+(0.39\pm0.43) \text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。通过 Mann-Kendall 趋势检验（ $Z=\pm1.96$ ，置信度水平 $\alpha=0.05$ ），总降水量（ $Z=0.63$ ）、降水强度（ $Z=1.46$ ）呈现上升趋势但不显著；日最大降水量（ $Z=1.79$ ）、强降水量（ $Z=2.01$ ）呈现显著上升趋势，强降水量上升趋势最明显。冬奥会期间赛区总降水量稳定，但会出现极端降水情况，如崇礼县出现过 19.9 mm （1979 年 2 月 22 日）的极端日最大降水量。大雪或暴雪极端天气，影响事先铺设的赛道雪质，既耽误比赛赛程又消耗大量人力物力。赛时降雨促使赛道表面结冰，对赛道雪质具有毁灭性影响，加之空气湿度增大，加大赛时造雪难度。

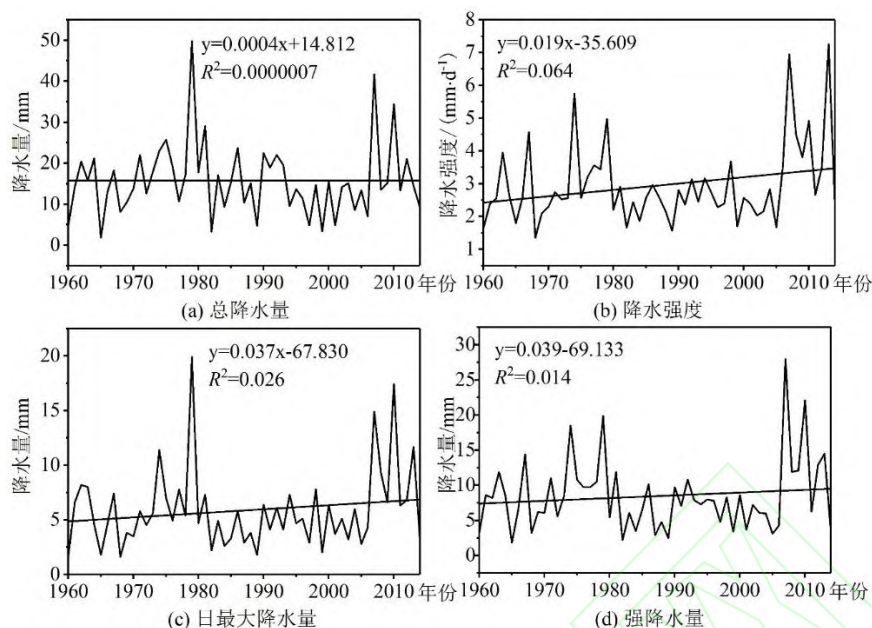


图6 赛期崇礼县总降水量、降水强度、日最大降水量、强降水量变化趋势

Fig. 6 Annual variations of total precipitation (a), precipitation intensity (b), daily maximum precipitation (c) and heavy precipitation (d) in Chongli County during the competition period

此外，其他高影响天气（雾、霾和沙尘天气）也存在一定的风险。赛时历史时期，崇礼县出现大雾天气3天、霾19天、浮尘50天、扬沙13天、沙尘暴4天。沙尘天气降低赛道上的能见度影响赛道的安全性。另外，尘埃、砂砾等吸光性物质吸附在赛道表面，降低赛道反照率，促进赛道融化。

4 结论与建议

经初步评估，观测期间我国竞技型滑雪场的气温为 $-17.7\sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最高、最低气温符合赛事标准；赛道厚度为 $58.6\sim 120.0\text{ cm}$ ，满足冬奥会赛事要求的标准赛道厚度；赛道密度为 $410\sim 550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，基本符合雪上项目要求，但易受外界因素影响，雪密度值上下波动，稳定性较差；赛道密度达标时，雪层含水率为 $0.79\%\sim 2.54\%$ ，属于潮雪，不满足雪上项目中着落区、停止区等对赛道相对湿度的要求。后期赛道密度随气温的上升而减小，雪层含水率增大，赛道剖面物理指标不达标，影响了赛道硬度。该研究为冬奥会雪场成功举办提供科学依据，具有重要的借鉴意义。

赛道雪质最关键的参数是雪硬度和赛道厚度，雪硬度由雪密度、雪温度、雪含水率以及雪粒之间的烧结作用决定。人造雪粒可以影响赛道雪粒之间的相互作用，在制作冰状雪特殊赛道时可以采用细孔径造雪机，制作粒径小、相对湿度小的积雪，并采用“干雪平铺—放置烧结—注水”的方式来制作赛道，以此提高赛道硬度、密度和可持续性。

人工造雪和储雪是近年来历届冬奥会应对雪量不足的重要手段，为保障冬奥会比赛期间的用雪需求，先期进行积雪的存储是必要的。通过开展一系列试验研究，建立天气、材料、地形和储雪消耗的物理模型，提供储雪决策建议，进而确定合理可行的储雪方案。另外，基于不同比赛项目的赛道标准，通过检测赛道物理特性和模式模拟，预测赛道质量演变，实现在统一的指挥中心实时监控不同赛场的气象、雪质及雪量变化；探究气象因子影响造雪效率和雪质的关系，构建气象条件—出雪量—雪质的模型，

利用气象预报数据预测未来几天赛场雪质质量的可能变化，协同研发赛区气象与雪冰短时临近无缝隙预报模型，提前应对赛道雪务风险。做到储雪模拟和实测相结合，从而打造一套高效的

雪务保障机制，为北京冬奥会和冬残奥会提供技术支持。

针对保障冬奥会成功举办所面临的雪冰科学与技术问题，结合历史经验，分析影响冬奥会赛场赛道的气候与雪冰条件，依据赛区极端天气条件，针对潜在风险，指定不同天气气候条件下的应急保障措施，为极端天气气候条件下的风险管理提供咨询建议。

参考文献(References):

- [1] Xiao Wangxing, Xiao Cunde, Guo Xiaoyin, et al. Winter and spring snow cover features in Beijing-Zhangjiakou region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 584-595. [肖王星, 效存德, 郭晓寅, 等. 北京-张家口地区冬春季积雪特征分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 584-595.]
- [2] Xu Qingzhe, Zheng Jingyun, Zhang Xuezheng, et al. Characteristics of snow season and snowfall during the Olympic Winter Game in Chongli of Zhangjiakou City, China[J]. Climate Change Research, 2017, 13(3): 223-230. [徐庆喆, 郑景云, 张学珍, 等. 张家口市崇礼的雪季与冬奥会的降雪特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(3): 223-230.]
- [3] Han Lijuan. Analysis on climatic characteristics of snowfall in Zhangjiakou City in recent 53 years[J]. Cultural Geography, 2014(8): 52. [韩丽娟. 张家口市近 53 年降雪气候特征分析[J]. 环球人文地理, 2014(8): 52.]
- [4] Jia Zhiqi, Wang Miao, Wang Xinning, et al. Analysis on the evolution of high-altitude situation of a snowfall process in Zhangjiakou[J]. Agricultural Disaster Research, 2015, 5(2): 23-24. [贾志奇, 王淼, 王新宁, 等. 张家口一次降雪天气过程高空形势演变分析[J]. 农业灾害研究, 2015, 5(2): 23-24.]
- [5] Luk'yanov V I, Dmitrieva T G, Vasil'ev E V. Weather services for the test event and Sochi-2014 Olympic and Paralympic Games[J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2015, 40(8): 495-503.
- [6] Wang Shijin, Xu Xinwu, Deng Jie, et al. Chinese skiing-tourism destination: spatial patterns, existing problem and development countermeasures[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 902-909. [王世金, 徐新武, 邓婕, 等. 中国滑雪旅游目的地空间格局、存在问题及其发展对策[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 902-909.]
- [7] Wang Ping, Fei Yuhong, Sun Yang. Development explorations of ski tourism industry under background of Olympic Winter Games[J]. Journal of Harbin Sport University, 2017, 35(6): 51-55. [王萍, 费郁红, 孙洋. 冬奥会背景下我国滑雪旅游产业发展的探析[J]. 哈尔滨体育学院学报, 2017, 35(6): 51-55.]
- [8] Lei Guofei. Supply and transformation of ice and snow sports industry in China under the background of escalation of consumption demand[J]. Journal of Guangzhou Sport University, 2017, 37(6): 45-49. [雷国飞. 消费需求升级背景下我国冰雪体育产业供给转型研究[J]. 广州体育学院学报, 2017, 37(6): 45-49.]
- [9] Li Xin. Analysis on the sustainable development of three core areas of skiing in China[J]. Journal of Beijing Sport University, 2017, 40(10): 9-16. [李欣. 我国滑雪运动三大核心区域可持续发展研究[J]. 北京体育大学学报, 2017, 40(10): 9-16.]
- [10] Wang Xudong, Cui Yingbo, Gu Huazheng. Research on the current situation and development strategy of Chinese skiing[J]. China Winter Sports, 2011, 33(5): 23-27. [王旭东, 崔英波, 谷化铮. 我国滑雪运动现状及发展战略研究[J]. 冰雪运动, 2011, 33(5): 23-27.]
- [11] Steiger R, Mayer M. Snow making and climate change: future options for snow production in Tyrolean Ski Resorts[J]. Mountain Research and Development, 2008, 28: 292-298.
- [12] Zhang Ying, Ye Haibo, Chen Yanxia. Current development and prospect of the skiing resort in Chongli County under the background of Winter Olympics[J]. China Winter Sports, 2016, 38(2): 78-82. [张莹, 叶海波, 陈艳霞. 冬奥会背景下崇礼县滑雪场发展现状与前景[J]. 冰雪运动, 2016, 38(2): 78-82.]
- [13] Mehmet Fuat Beyazit, Koc E. An analysis of snow options for ski resort establishments[J]. Tourism Management, 2009, 31(5): 676-683.
- [14] Wang Minmin. Ski resort planning and its landscape resources development and protection[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008. [王敏敏. 滑雪场规划及景观资源的开发与保护[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.]
- [15] Yang Zhanwu. Research on the snow-making for Beijing 2022 Winter Olympics and Winter Paralympics[J]. China Winter Sports, 2017, 39(1): 1-8. [杨占武. 北京冬奥会和冬残奥会人工造雪的研究[J]. 冰雪运动, 2017, 39(1): 1-8.]
- [16] Mao Mingce, Wang Qi, Tian Liang. The surface meteorological condition of snowmaking for Beijing 2022 Olympic and Paralympic Winter Games[J]. Climate Change Research, 2018, 14(6): 547-552. [毛明策, 王琦, 田亮. 2022 年北京冬季奥运会人工造雪气象条件初步研究[J].

气候变化研究进展, 2018, 14(6): 547-552.]

- [17] Lu Lu, Liu Chunling, Liu Lin. Ski tourist perceived value and satisfaction in relation to behavioral intentions: a case study of Yunding Ski Resort in Chongli[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5): 202-208. [路璐, 刘春玲, 刘琳. 滑雪游客感知价值、满意度与行为意向的关系: 以崇礼密苑云顶滑雪场为例[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 202-208.]
- [18] Rammsayer T H, Bahner E, Netter P. Effect of cold on human information processing: application of a reaction time paradigm[J]. Integrative Physiological and Behavioral Science, 1995, 30(1): 34-45.
- [19] Beijing Organizing Committee. Zhangjiakou competition culture of Beijing 2022 Olympic and Paralympic Winter Games[EB/OL]. [2018-10-29]. http://www.beijing2022.cn/cn/competition_zones/zhangjiakou.htm. [北京组织委员会. 北京 2022 年冬奥会和冬残奥会张家口市赛区文化[EB/OL]. [2018-10-29]. http://www.beijing2022.cn/cn/competition_zones/zhangjiakou.htm.]
- [20] Snow at Home. Make real snow at home with a home snow machine[EB/OL]. [2018-12-11]. http://www.snowathome.com/free_plans.php.
- [21] Lintzen N. Snowmaking and snow storage[R]. Lulea, Sweden: Lulea University of Technology, 2012.
- [22] Hao Xiaohua, Wang Jian, Che Tao, et al. The spatial distribution and properties of snow cover in Binggou watershed, Qilian Mountains: measurement and analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(2): 284-292. [郝晓华, 王建, 车涛, 等. 祁连山区冰沟流域积雪分布特征及其属性观测分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 284-292.]
- [23] Zhao Zhe, Chang Xiaoyu. Discussion on environmental impact assessment of construction project of ski resorts[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(9): 177-179. [赵哲, 常晓宇. 浅谈滑雪场建设项目环境影响评价[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(9): 177-179.]
- [24] Cross Country Ski Association of Manitoba. Course preparation and tracksetting[EB/OL]. [2019-04-18]. http://ccsam.ca/wp-content/uploads/2011/09/grooming_CCC_CoursePrep_Trackseting3.4.pdf.
- [25] Lu Heng, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, et al. A study on the vertical profile of forest snow liquid water content and variation with time in the snowmelt period[J]. Geographical Research, 2011, 30(7): 1244-1253. [陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 季节性森林积雪融雪期雪层含水率垂直廓线随时间变化特征[J]. 地理研究, 2011, 30(7): 1244-1253.]
- [26] You Jinsheng, Tarboton D G, Luce C H. Modeling the snow surface temperature with a one-layer energy balance snowmelt model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 10(12): 15071-15118.
- [27] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River basin in the last 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 365-377. [怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近 50 年黑河流域的冰川变化遥感分析[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 365-377.]
- [28] Hu Ruji. Physical geography of the Tianshan Mountains in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 155-162. [胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 155-162.]
- [29] Rawlins M A, McDonald K C, Frolking S, et al. Remote sensing of snow thaw at the pan-Arctic scale using the Sea-Winds scatterometer[J]. Journal of Hydrology, 2004, 312(1): 294-311.
- [30] Cao Zhi, Fan Haoming. Research on the snow characteristics at different slope position in the low mountain areas in Northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(5): 989-996. [曹志, 范昊明. 我国东北低山区不同坡位积雪特性研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 989-996.]

Snow quality and climate change risk assessment of competitive skiing grounds in China: a case study of Wanlong Ski Resort in Hebei Province

BI Yanqun^{1,4}, WANG Feiteng¹, HAN Haidong¹, DING Minghu², XIAO Cunde^{1,3},
KANG Shichang¹, REN Jiawen¹, WANG Xing^{1,4}

(1.State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In 2022, the Beijing Winter Olympic Games will be hold in China. Snowboarding is the most important question. The snow quality of the track is the most crucial in the snow work. However, at present, little research work has been done on the snow quality of competition-type snow track in China. By studying the snow quality characteristics of the track of Wanlong Ski Resort in Hebei Province, which is dominated by artificial snow, to understand the current situation of the competitive ski track in China, and find out the gap with the standard track snow quality required by the International Snow Federation.

According to the changing characteristics of snow quality, it is put forward that the scheme of snow quality maintenance and technical improvement, and risk assessment of the factors affecting snow quality.

It is necessary to enhance the scientific research capacity and technical level of the snow work in China and provide scientific basis and services for the successful hosting of the Winter Olympic Games.

Key words: competition-type; ski resort; artificial snow; snow quality

(本文编辑: 武俊杰)