



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

## 硕士学位论文

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

作者姓名: 毕研群

指导教师: 王飞腾 研究员

学位类别: 理学硕士

学科专业: 自然地理学

培养单位: 中国科学院西北生态环境资源研究院

2019 年 6 月



**Snow quality and climate change risk assessment of competitive  
skiing resorts:**

**a case study of Wanlong ski resort in Hebei Province**

**Thesis submitted to**

**University of Chinese Academy of Sciences**

**in partial fulfillment of the requirement**

**for the degree of**

**Master of Natural Science**

**In Physical Geography**

**By**

**BI Yanqun**

**Supervisor: Professor Wang Feiteng**

**Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,**

**Chinese Academy of Science**

**June 2019**



**中国科学院大学**  
**研究生学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

**中国科学院大学**  
**学位论文授权使用声明**

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分內容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：



## 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中最核心问题,而目前国内关于竞技型雪场赛道雪质研究少有涉及。本文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。

主要结论如下:

我国竞技型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。赛道雪质较好时间段内万龙滑雪场气温为 $-17.7\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高、最低气温符合国际赛事标准;滑雪场赛道厚度为 $58.6\text{ cm}\sim 120.0\text{ cm}$ ,满足赛事要求的标准赛道厚度;赛道密度为 $410\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\sim 550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 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,且赛道上下层密度不均一,影响赛事的公平性;赛道含水率为 $0.79\%\sim 2.54\%$ ,属于潮雪和湿雪,无法满足雪上项目中着落区、停止区等较大含水率的需求;赛道硬度范围为 $4.5\text{ N}\sim 68.0\text{ N}$ ,能够满足普通赛道硬度要求,但对于冰状雪赛道的 $70\text{ N}$ 以上标准,目前赛道硬度不够。

滑雪场净辐射最大值为 $59.19\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最小值为 $13.69\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,平均净辐射值为 $39.07\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ;最高气温为 $5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低气温为 $-17.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均气温为 $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,累积正积温为 $230.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,累积正积温时数为 $113\text{ h}$ ;净辐射和气温存在一定的延迟性,相关系数 $R^2=0.319$  ( $P<0.01$ ),气温总体受太阳辐射的影响;昼夜温差范围为 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均值为 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;相对湿度范围为 $15\%\sim 90\%$ ,结合日气温变化特性,适宜人工造雪的时间点为 $21:00\text{—}6:00$ 时,在气温相对较低的时期,全天都适合进行人工造雪。观测期内风速范围为 $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\sim 9.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风速为1级至5级,以2级至3级微风为主,雪场的风速满足人工造雪所需的风速要求。

赛道在外界因素影响下，赛道温度最先响应，其次为含水率，最后为密度。赛道最高温度为 $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最低温度为 $-18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均温度为 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度梯度值为 $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，赛道表面温度最高，10 cm处温度最低。赛道平均温度与日均温呈现较好正相关性，相关系数为 $R^2=0.761$  ( $P<0.01$ )。赛道温度由气温、风速、地温三种要素控制。赛道平均密度与日均温及赛道平均温度具有较好的相关性，相关系数分别为 $R^2=0.526$  ( $P<0.01$ )， $R^2=0.636$  ( $P<0.01$ )。赛道密度与赛道温度、赛道含水率、气温、风速有关。赛道含水率范围为 $0.59\%\sim 4.81\%$ ，平均值为 $2.62\%$ ，以潮雪和湿雪为主。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气温是赛道雪层含水率发生显著变化的阈值点，赛道含水率受外界气象因素的影响较大。赛道孔隙率相对于自然积雪较小，范围为 $0.33\%\sim 1.57\%$ ，平均孔隙率为 $0.83\%$ 。孔隙率符合正态分布， $\text{Mean}=0.858$ ， $\text{SD}=0.237$ ，主要集中在 $0.50\%\sim 1.25\%$ 。

滑雪场赛道积雪主要以人造雪为主，雪粒径相较于自然积雪存在一定的差异性，赛道积雪以粉雪和细粒雪为主。赛道硬度范围为 $4.5\text{ N}\sim 68.0\text{ N}$ ，整层硬度上下波动比较明显，一致性较差。赛道密度和硬度存在显著相关性，相关系数为 $R^2=0.894$  ( $P<0.01$ )。依据赛道密度和硬度的关系，可以得知冬奥会部分项目要求的冰状雪赛道硬度应在 $70\text{ N}$ 以上。

赛道物质平衡和正积温存在显著的负相关性，相关系数为 $R^2=0.854$  ( $P<0.01$ )，度日因子(DDF)范围为 $2.1\sim 6.1\text{ mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，平均值为 $3.4\text{ mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。依据赛道物质平衡和正积温的关系，为赛道消融状况提供高分别率量化数据以及人工造雪补给量化指标。

赛道制作采用一次性压实铺设方法，致使赛道整体密度大小不同，一致性较差。国内雪场造雪至压雪用时较长，通常存在隔日作业等问题，没有快速进行场地铺设和积雪压实，造成积雪理化性质发生改变，为后续赛道铺设及积雪烧结增强作用产生较大影响。

高温风险和极端寒冷并存，强降雪和强降雨风险并存。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，其中最低气温上升趋势最明显。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，强降水量上升趋势最明显。

**关键词：**竞技型，滑雪场，人造雪，雪质，气候变化

## 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 competitive ski track in China, and find out the difference between the standard track required by the International Federation of snow. According to the characteristics of snow quality changes, put forward the scheme of snow quality maintenance and technical improvement, and risk assessment of the factors affecting snow quality. 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.

The main conclusions are as follows:

The snow quality of China's competitive skiing track is influenced by the outside world, and it changes with time and space as a whole. The temperature of the Wanlong skiing ground is  $-17.7\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  in the period of good snow quality, the highest and lowest temperatures are in line with the international standards; the thickness of the skiing ground is  $58.6\text{ cm} \sim 120.0\text{ cm}$ , which meets the requirements of the standard track thickness; the density of the track is  $410\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \sim 550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , which meets the requirements of the snow density of the snow events, but the density of the track is affected by external factors and the stability is poor, and the race density is poor. The consistency of density is also poor; the water content of the track is  $0.79\% \sim 2.54\%$ , which belongs to tidal snow, and can not meet the needs of landing and stopping areas in snow projects. The hardness of the track ranges from  $4.5\text{ N}$  to

68.0 N, which can meet the hardness requirements of the ordinary track. However, the hardness of the track is insufficient for the above 70 N standard of the ice-snow track.

The maximum net radiation is  $59.19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , the minimum is  $13.69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , and the average net radiation is  $39.07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . The maximum temperature is  $5.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , the minimum temperature is  $-17.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , the average temperature is  $-3.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , the accumulated positive accumulated temperature is  $230.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the accumulated positive accumulated temperature is 113 h. There is a certain delay between net radiation and temperature, and the correlation coefficient  $R^2 = 0.319$  ( $P < 0.01$ ). The temperature difference between day and night ranged from  $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $5.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , with an average of  $2.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Relative humidity ranges from 15% to 90%. Considering the characteristics of daily temperature variation, the suitable time point for artificial snow making is 21:00—6:00. In the period of relatively low temperature, artificial snow making is suitable all day. During the observation period, the wind speed ranges from  $3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  to  $9.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The wind speed ranges from 2 to 5. The wind speed in the snow field is mainly from 2 to 3. The wind speed in the snow field meets the requirement of artificial snow making.

Under the influence of external factors, snow temperature first responds, followed by snow moisture content, and finally snow density. The highest temperature is  $-3.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , the lowest temperature is  $-18.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , the average temperature is  $-10.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , the temperature gradient value is  $-0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , the surface temperature is the highest, and the temperature is the lowest at 10 cm. The average temperature of the track is positively correlated with the daily average temperature, and the correlation coefficient is  $R^2=0.761$  ( $P < 0.01$ ). Snow layer temperature is controlled by temperature, wind speed and ground temperature. The correlation coefficients of track average density with daily average temperature and snow field average temperature are  $R^2=0.526$  ( $P < 0.01$ ) and  $R^2=0.636$  ( $P < 0.01$ ), respectively. The snow density of the track is related to the snow temperature, water content, temperature and wind speed. The water content of the track ranges from  $0.59\% \sim 4.81\%$ , with an average of  $2.62\%$ . Tidal snow and wet snow are dominant. Temperature at  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  is the threshold point for the significant change of snow water content in the track. The water content of snow layer is greatly

influenced by external meteorological factors. The track porosity is smaller than that of natural snow cover, ranging from 0.33%~1.57%, and the average porosity is 0.83%. Porosity conforms to normal distribution, Mean=0.858, SD=0.237, mainly concentrated in 0.50%~1.25%.

Artificial snow is the main snow cover in the ski track. There are some differences in snow particle size compared with natural snow cover. The snow cover in the track is mainly composed of powder snow and fine snow. The hardness of the track ranges from 4.5 N~68.0 N. The fluctuation of the hardness of the whole layer is obvious and the consistency is poor. There was a significant correlation between track density and hardness, and the correlation coefficient was  $R^2=0.894$  ( $P<0.01$ ). According to the relationship between track density and hardness, it can be known that the hardness of ice-like snow track required in some winter Olympic events should be more than 70 N.

There is a significant negative correlation between track material balance and positive accumulated temperature. The correlation coefficient is  $R^2=0.854$  ( $P<0.01$ ). The DDF ranges from  $2.1 \text{ mm}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  to  $6.1 \text{ mm}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , with an average of  $3.4 \text{ mm}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ . According to the relationship between track material balance and positive accumulated temperature, the quantitative data of high resolution rate and artificial snow recharge are provided for track ablation.

The one-time compaction paving method is used in the production of the track, which results in different density and poor consistency of the whole track. It takes a long time from snow-making to snow-pressing in domestic snow farms. There are usually some problems such as working every other day. There is no quick paving and compaction of snow, which changes the physical and chemical properties of snow, and has a great impact on subsequent track laying and snow sintering.

High temperature risk coexists with extreme cold, heavy snow and heavy rainfall risk coexist. The highest temperature, the lowest temperature, the minimum of the highest temperature and the maximum of the lowest temperature all showed an upward trend in the historical period, and the lowest temperature had the most obvious upward trend. Total precipitation, precipitation intensity, daily maximum

precipitation and heavy precipitation all show an upward trend in the historical period, and the upward trend of heavy precipitation is the most obvious.

**Key words:** competition-type, ski resort, artificial snow, snow quality, global change

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景及意义.....	1
1.1.1 滑雪运动背景.....	1
1.1.2 冬奥会背景.....	1
1.1.3 研究意义.....	3
1.2 国内外研究进展.....	3
1.3 研究目标、内容及技术路线.....	6
第 2 章 研究区概况.....	9
2.1 赛区概况.....	9
2.2 滑雪场概况.....	10
第 3 章 数据资料与研究方法.....	13
3.1 数据资料.....	13
3.1.1 赛道雪质数据.....	13
3.1.2 气象数据.....	15
3.2 研究方法.....	15
3.2.1 变异系数法.....	15
3.2.2 相关系数法.....	16
3.2.3 Mann-Kendall 趋势检验法.....	16
3.2.4 物质平衡模型-度日模型.....	16
3.3 观测试验.....	17
第 4 章 滑雪场气象要素变化.....	19
4.1 气温变化.....	20
4.2 太阳辐射变化.....	23
4.3 相对湿度变化.....	24

4.4 风速变化.....	25
4.5 本章小结.....	25
<b>第 5 章 赛道雪质变化分析.....</b>	<b>27</b>
5.1 赛道密度变化.....	27
5.2 赛道温度变化.....	30
5.3 赛道含水率变化.....	33
5.4 赛道孔隙率变化.....	36
5.5 赛道雪粒径变化.....	38
5.6 赛道硬度变化.....	39
5.7 赛道物质平衡变化.....	41
5.8 本章小结.....	44
<b>第 6 章 赛道及储雪试验评估.....</b>	<b>45</b>
6.1 赛道制作评估.....	45
6.2 赛道雪质评估.....	46
6.3 储雪试验评估.....	47
6.3.1 试验雪堆保温层.....	48
6.3.2 储雪试验评估与分析.....	48
6.4 本章小结.....	51
<b>第 7 章 赛区气候变化风险评价.....</b>	<b>53</b>
7.1 赛时历史气候变化.....	53
7.1.1 气温变化.....	53
7.1.2 降水变化.....	54
7.2 赛区历史气候变化.....	56
7.2.1 气温变化.....	56
7.2.2 降水变化.....	58
7.3 本章小结.....	59
<b>第 8 章 结论与展望.....</b>	<b>61</b>
8.1 结论.....	61
8.2 展望.....	64

参考文献.....	67
致 谢.....	71
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果 .....	73



## 第1章 绪论

### 1.1 选题背景及意义

#### 1.1.1 滑雪运动背景

滑雪是指沿自然或人工雪坡滑降的运动，从其历史演化角度可划分为古代滑雪、近代滑雪和现代滑雪。依据滑雪条件和参与目的可分为实用类滑雪、竞技类滑雪和旅游类（娱乐、健身）滑雪。实用类滑雪主要用于林业、边防、狩猎、交通等领域，随着科学技术水平以及生活质量的提高，应用价值逐步降低；竞技类滑雪是将滑雪运动升华为特定人工环境条件下，运用比赛形式，达到竞赛目的；旅游类滑雪是满足现代人们生活、文化需求而发展起来的大众性娱乐健身运动。研究证实人类滑雪起源于斯堪的纳维亚国家、阿尔卑斯山以及中国新疆阿勒泰地区，是人类在严酷冰雪环境中最重要的生产活动方式（单兆鉴，2011）。1924年，国际滑雪联合会成立，将滑雪运动正式列入体育竞技项目，并举行了第一届冬季奥林匹克运动会。1951年，人工造雪机的发明，为人类提供人工滑雪场地提供可能，并促使滑雪运动和滑雪旅游得以快速发展（Steiger，2008）。随着人类生产实践以及生活水平的逐步提高，滑雪运动逐渐被关注。早在上世纪八十年代，我国就提出了“北冰南展”的冰雪运动发展战略，但受到气候和经济条件限制，我国冰雪运动仍主要集中在东北三省及河北张家口地区，真正参与冰雪运动的人其实并不多。

#### 1.1.2 冬奥会背景

竞技性滑雪将滑雪运动提升至竞技比赛层次，突出滑雪运动的更高、更强，冬奥会是竞技性滑雪运动最高级别的赛事，无论是滑雪运动员的技术，还是赛场设备、赛道性质都是世界顶尖级别。冬奥会赛事受气象条件影响，多届冬奥会赛事存在较严重问题，如2010年温哥华冬奥会赛期遭遇暖冬，1月份平均气温较往年偏高3℃，无降雪事件，临近赛时调用多种大型设备远距离调雪以满足赛事用雪需求；2014年索契冬奥会，由于气温变暖，赛前存在降水事件、赛道融化、赛道整修，但吸取温哥华冬奥会教训，提前制定雪务保障工作，人工存储45万m<sup>3</sup>积雪以确保赛事所需雪资源；2018年平昌冬奥会，赛前

准备了很多应对措施，但受到大风影响，致使举办日期多次推迟，甚至部分雪上项目被迫取消。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（以下简称京-张）。冬奥会和冬残奥会的成功申办，将会改变我国冰雪运动的普及状况，为社会经济发展增添动力，并彰显我国的综合国力和社会文明风貌，有利于促进我国全民冰雪运动发展以及打造冬季体育冰雪产业发展新格局，为实现“3 亿人冰雪运动”提供重大发展契机。冬奥会比赛项目包括雪上项目和冰上项目，其中雪上项目是冬奥会的主要内容，雪上项目包括自由式滑雪、冬季两项、越野滑雪、跳台滑雪、北欧两项（越野滑雪、跳台滑雪）、无舵雪橇、有舵雪橇、钢架雪车(俯式冰橇)、单板滑雪、高山滑雪。在 2022 年冬奥会全部 109 枚金牌中，雪上项目占 76 枚，占比 69.7%。因此，冬奥会雪上项目服务工作显得尤为重要。冬奥会雪务工作主要包括人工造雪、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举办的基础。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。目前，国内外竞技型滑雪场雪务工作存在较大差异。以 2018 年平昌冬奥会为例，雪上项目赛道自然雪占比约为 10%~20%，人造雪占比约为 80%~90%；赛道提前 3 个月开始，不断造雪，边造边压，制备赛道，并接受国际奥委会（IOC）定期检查；赛道监测和预报方面，采用自动观测、人工观测和气象预报预警产品相结合的方法；为应对不利天气气候状况对造雪的影响，平昌冬奥组委进行储雪试验，制作两个大型储雪堆，上覆无纺布等隔热材料；针对潜在风险，平昌冬奥组委拟定不同天气条件下应急预案。而国内雪务工作存在一定的不足，赛道制作方法方面有待提高，储雪试验、赛道监测和预报方面没有形成完整体系。此外，赛道雪质参数极大依赖于局地气象条件和人工赛道技术，再加上极端气候事件频发以及山区天气复杂多变，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。

与国际冰雪运动相比，我国冰雪产业处于起步阶段，发展基础较差，产业链不完备，欠缺相关技术储备。另外，我国冰雪运动科学研究起步较晚，主要集中在运动技巧、理论、训练方法等方面，几乎没有开展过针对基础设施和环

境条件保障的研究；赛道质量监测、储雪制雪理念和技术仍然是空白领域，主要以师徒传帮带式的经验管理，这与冬奥会赛事标准相差甚远。赛道质量标准、赛道制作和储雪等关键技术和裁判权均掌握在欧美国家手中，并且对我国进行技术封锁。为抓住冬奥会机遇，推进我国冰雪运动科研和技术的发展，国家体育总局制定了《中国冰雪运动发展规划（2016—2025）》、《备战2022年冬奥会项目布局实施方案》等中长期发展规划。北京市和张家口市也把握契机，拟定了不同发展方略，一方面保障冬奥会的顺利召开，另一方面促进群众参与冬季运动的热情，这也是我国举办冬奥会的更深层意义。

除此之外，2022年京—张冬奥会拟定于2022年2月4日至3月13日举行，主要原因有两点：一是该时段温度和风速适宜；二是正值传统春节期间，有助于民众观赛。但是，在全球变暖背景下，近年来极端天气气候事件频发，如连年暖冬又阵发寒潮（如2015年12月至2016年2月），这对冬奥会赛事雪场的各项工作提出了挑战；尤其是冬残奥会举办期间，随着季节进程推进，京—张地区气温会进一步升高，室外雪场积雪条件保障工作将面临更高挑战，是冬奥会顺利举行的潜在风险。

### 1.1.3 研究意义

充分了解我国竞技型滑雪场目前赛道雪质及技术水平，科学研究我国竞技型雪场赛道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。通过开展滑雪场赛道雪质观测试验，填补我国竞技型滑雪场无赛道雪质量化指标的空白，以及结合赛道雪质特性和气象滚动监测，提出有助于解决冬奥会赛道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价，为冬奥会开展风险防范措施研究。

上述问题正是冰冻圈科学研究的重要内容，也是冰冻圈科学服务社会经济发展的落脚点，解决冬奥会赛事中潜在的雪冰科学与技术问题是冰冻圈科学工作者义不容辞的责任。

## 1.2 国内外研究进展

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、滑雪产业规

划、滑雪运动发展、滑雪场设计、气象条件对人造雪的影响及滑雪行为学等方面。肖王星等（2016）利用 MODIS 遥感积雪产品及气象站数据，指出北京—张家口地区冬春季积雪整体积雪频率小，积雪资源不足于应对赛事用雪。徐庆喆等（2017）研究结果表明张家口崇礼地区冬奥会赛期平均 4—5 d 出现一次降雪，且主要为小雪，出现大雪的概率极低。王世金等（2017）对中国滑雪旅游目的地空间格局进行了分析，指出了在市场需求下，滑雪场空间布局不合理、生态环境破坏严重、滑雪项目单一等问题，提出冰雪资源调查、滑雪地规划及冰雪专业技术人员培养等对策。张占武（2017）提出人工造雪系统效率、水资源循环利用和当季囤雪是北京 2022 年冬奥会和冬残奥会人工造雪工作应重点关注的三大关键要素。杨建明等（2010）指出在全球气候变暖背景下，近 100 年春冬两季是主要增温季节，北方地区增暖趋势明显，增温幅度  $0.4^{\circ}\text{C}\sim 0.8^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，导致积雪加快融化，将会缩短滑雪场的滑雪期。谢勇等（2015）研究表明，日最高气温、日降雪量及日平均风速对滑雪运动产生的影响最大。吴晓华等（2013）研究认为相对较小的风速对滑雪者产生的影响较小，滑雪运动员滑雪成绩能客观准确的表现其水平；当风速相对较大时，对滑雪者运动员产生较大影响，一方面降低滑雪运动感，同时也会影响运动员的滑雪成绩，造成不利影响。韩丽娟（2014）统计张家口市 1960—2012 年降雪及积雪观察资料，分析表明，降雪日数呈现波动下降趋势，降雪日集中在 11 月至次年 3 月，占全年 93%，2 月最多占 23%。毛明策等（2018）利用北京—张家口地区气象站数据，研究冬奥会人工造雪地面气象条件，指出京—张地区降水相态与地面气温及相对湿度具有较好的线性组合关系，估算出冬奥会期间造雪时数较多，而冬残奥会较少，因此应采取造雪和储雪方式来保证赛时用雪。希爽等（2013）分析了我国近 50 年积雪特征时空变化特征，指出我国主要降雪地为东北、内蒙古东北部、华北和华中地区， $0^{\circ}\text{C}$  气温稳定通过日数均显著性减少，以华北地区减少趋势最为明显，约减少  $3.11\text{ d}/10\text{a}$ 。Andrey Koptuyuga 等（2011）对越野滑雪运动与积雪相互作用的研究，指出赛道积雪的变形主要由滑雪板对雪的“拖拽”和阻尼作用影响，为后续赛道测量技术提供理论基础。Spandre P 等（2016）通过研究造雪气象条件指出冷干气象环境条件，有利于人造雪形成。李菁（2017）详细介绍了人造雪所必须的气象条件，并以此阐述了人工造雪管

理方案，为国内人工造雪管理提供帮助。张莹（2016）等对崇礼县滑雪场发展现状、存在问题及发展前景进行分析研究，指出崇礼滑雪场自然、社会优势大，但存在规划不统一等问题，需实施合理措施。许启慧等（2014）运用数理统计方法，分析了气象要素年际变化特征，依次评估气候适宜的滑雪场建造地址，并评估存在的风险性及可持续发展。滑雪产业的重要载体依附滑雪场，滑雪场区位的抉择与其他风景区相比更容受气候要素影响（如降雪、积雪条件等）（吕婵等，2012）。李欣（2017）对我国滑雪运动三大核心区域（东北地区、华北地区、西北地区）进行可持续发展研究，为滑雪运动的可持续发展提供重要理论基础和参考依据。路璐（2018）等通过问卷调查雪场游客，结果表明滑雪游客感知价值通过满意度间接影响行为意向，满意度是感知价值和行为意向的完全中介。H. Francois 等（2014）研究法国阿尔卑斯山地区 142 个滑雪胜地地理空间位置及雪场设备，结合模拟的自然积雪条件，建立了自然积雪度假村生存指数，结果与经济相关信息进行比较，突出了滑雪场运营与自然雪况之间的复杂关系。王萍（2017）等对我国滑雪旅游产业的发展状况进行调查、分析和总结，揭示了滑雪旅游产业及市场发展背景、动态和效益，提出建立滑雪场旅游资源评估标准体系，打造滑雪发展模式，科技助力滑雪旅游产业，建设以民办非企业单位为主的社会服务平台，推动体育旅游产业的可持续发展。李金早（2017）依仗冬奥会背景，中国冰雪产业将高速增长，2022 年后中国有望成为全球最大的滑雪旅游市场。雷国飞（2017）以冰雪体育产业转型为研究对象，对目前冰雪体育产业发展和供给存在的问题进行分析，提出冰雪场地及设备制造转型发展对策。北京—张家口地区冬奥会的成功申办和积极筹办，对民众的冰雪消费动机和行为具有深刻影响（顾久贤，2016），但是冰雪体育服务业经营规范的相关法律条例不完善，未能对冰雪体育服务产品消费形成完整的保护体系，应明确保障措施规定（张瑞林，2016），另外，冰雪体育产业逐渐落后于冰雪旅游产业（孙威等，2009）。目前，我国滑雪产业市场结构处于垄断竞争阶段，滑雪产品及服务存在一定差异（苗春竹，2009）。Li Yu 等（2016）统计分析目前我国滑雪场的发展状况，指出在自然因素和人为因素对滑雪场的发展潜力产生了两面性影响，综合发展程度不如国际一流的滑雪场，滑雪场发展条件有待改善。王旭东等（2011）研究了我国滑雪运动现状及发展

战略，提出滑雪运动与环境保护协调发展，完善竞技体育体制及滑雪运动规划管理措施，实现科技、教育、文化性滑雪运动可持续发展。

综上所述，目前国内外关于竞技型雪场赛道雪质研究少有涉及，对我国竞技型滑雪场赛道雪质进行量化分析，研究其在外界影响因素下的变化机理，提出具体、量化的数据指标，是重中之重。

### 1.3 研究目标、内容及技术路线

目前，我国竞技型滑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赛道雪质现状及其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雪质及技术水平，本研究在河北省张家口市崇礼区万龙滑雪场开展赛道雪质观测试验，结合气象滚动监测，提出有助于解决冬奥会赛道雪质难题的技术方案，为冬奥会提供保障技术和决策服务。此外，在北京奥组委的领导下，北京延庆区万科石京龙滑雪场开展了积雪存储试验，作为野外观测咨询项目组，对积雪存储试验开展了无人机测量、积雪属性观测等科学试验，探究目前人工储雪方案和技术实际效果，以此提出合理的建议和措施。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价，开展风险防范措施研究。

具体研究内容如下：

**赛道雪质变化研究：**赛道雪质包括赛道密度、赛道温度、赛道含水率、赛道孔隙率、人造雪雪粒径、赛道硬度以及赛道物质平衡。通过分析赛道雪质属性，了解目前我国竞技型雪场赛道雪质状况，并提供量化数据指标，填补我国竞技型滑雪场赛道雪质无量化指标的空白。研究赛道雪质在气象要素（如温度、辐射、降水等）影响下的变化机理，预测赛道变化趋势；依据赛道雪质变化特性，提出赛道雪质保持和技术提高的方案。

**赛道制作过程研究：**赛道制作是赛道雪质和保障冬奥会雪上项目成功举办的基础，探究我国竞技型滑雪场赛道制作过程、实施技术及赛道性质，为赛道制作提出改进措施和具体实施方案，从而满足冬奥会赛道标准。

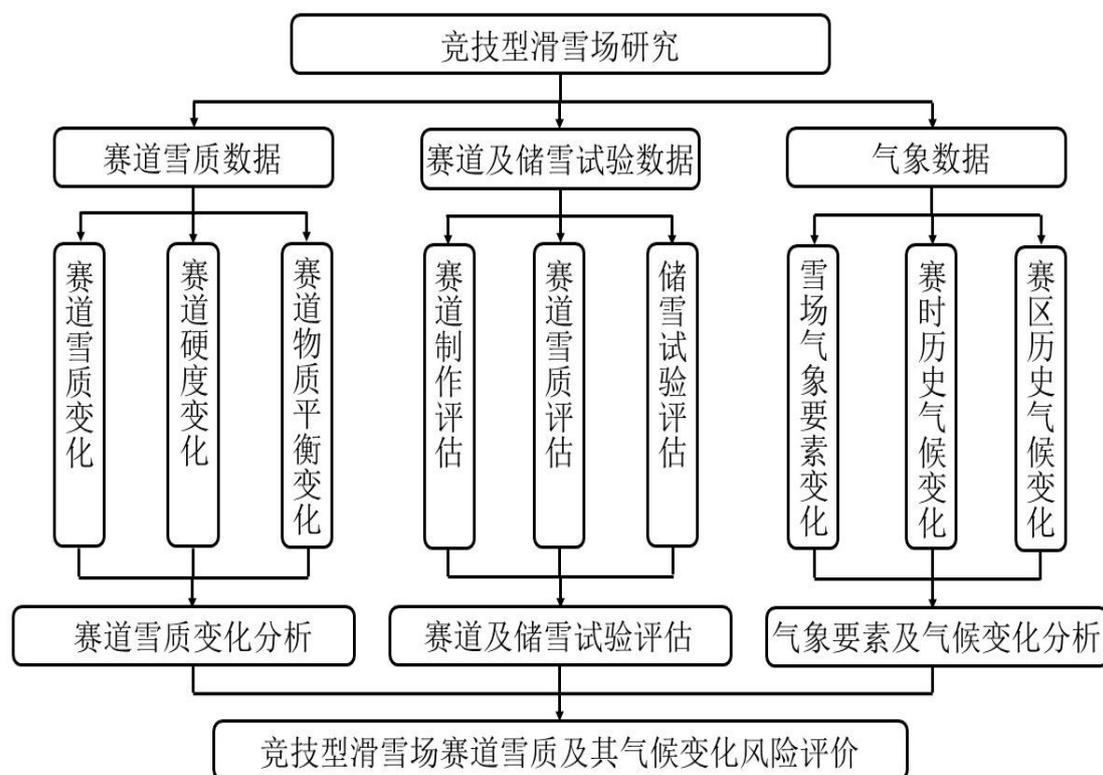
**赛道雪质评估：**将我国竞技型滑雪场赛道雪质性质和国际雪联要求的赛道雪质标准指标进行对比，找出差距。为赛道雪质提高以满足国际赛事标准，提

供方向、措施和技术依据。

**储雪试验评估：**人工储雪是近年来历届冬奥会应对雪量不足的重要手段，依据国内储雪试验以及积雪存储试验观测数据，对储雪试验效果进行评估，探究目前储雪方案和技术的具体成效，并针对性的提出相关建议。

**气候变化分析：**研究滑雪场气象变化特征对赛道雪质影响的关系，并依据人工造雪条件，提出国内滑雪场人工造雪最适宜条件和阶段，为滑雪场低耗能、低耗资人工造雪提供科学帮助。分析赛区气候变化，对极端事件影响雪质的天气和环境风险进行评价，为开展风险防范措施提供服务 and 帮助。

根据研究目标及内容，制定研究技术路线如图：





## 第2章 研究区概况

### 2.1 赛区概况

2022年北京冬奥会计划使用25个场馆，包括12个竞赛场馆、3个训练场馆、3个奥运村、3个颁奖广场、3个媒体中心、1个开闭幕场馆。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，目前正在运营滑雪场有10个，该区域是中国滑雪产业发展龙头区，是中国及周边国家众多滑雪爱好者冬季滑雪休闲度假目的地。

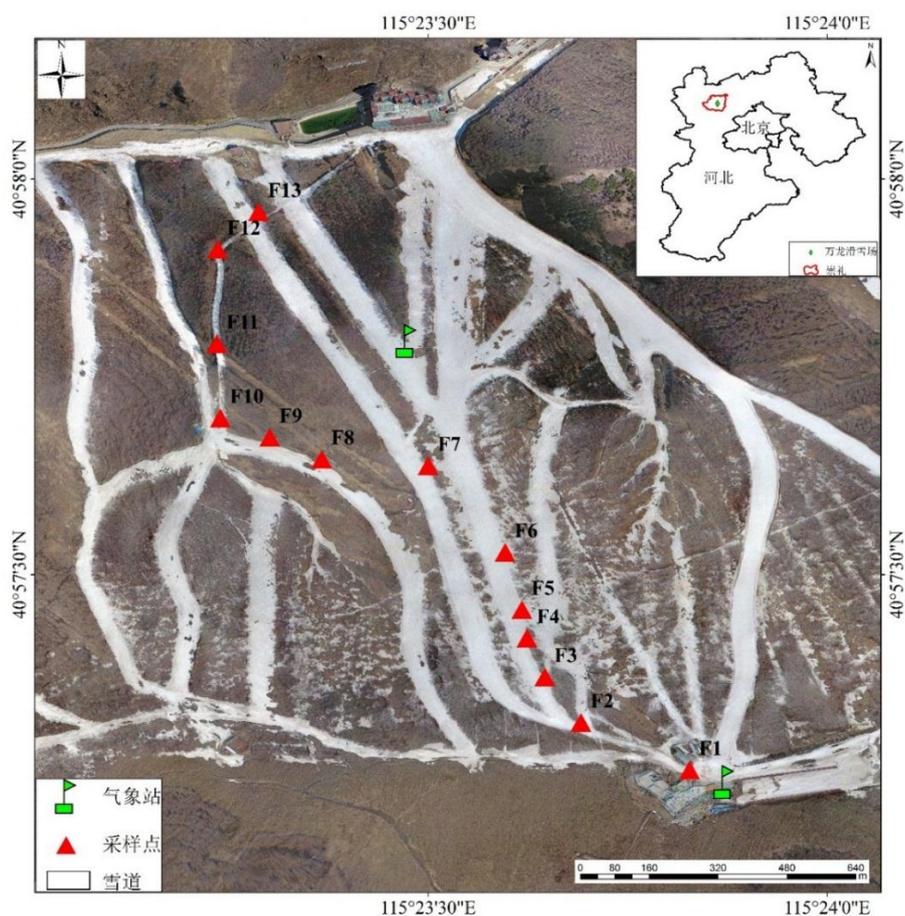


图 2.1 万龙滑雪场区位及其观测点空间分布

Figure 2.1 Location of Wanlong ski resort and spatial distribution of observation points

崇礼赛区境内80%为山地，森林覆盖率达到52.38%，境内大马山群山支系隶属阴山山脉东段，与燕山余脉相接，形成山连山、沟套沟的地貌特征，海拔范围为813 m~2 174 m，相对高度最大为1 361 m。由于其所处地理位置和地形

的影响，冬季冷空气活动频繁，带来大风降温天气，气候寒冷干燥；春季气温回升快，但波动较大，寒冷和暖温天气交替出现；夏季凉爽而短促，气温比较稳定，昼夜温差较大，降水量比较集中，山区时有冰雹、暴雨等灾害天气；秋季气温下降迅速，初霜期出现时间较早，气温相对较低。崇礼区冬季平均气温-12℃，年降水量488mm，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69%，年均降雪量63.5mm，最大积雪深度1.5m（贾志奇等，2015）。崇礼区积雪期持续时间较长，可达155天，结冰期长达165天；风向以东北风和西南风为主，平均风速相对较小，以二级和三级风为主，但存在极端大风天气（刘文仲，2011）。以优异的地形条件和适合滑雪运动的气象条件，崇礼赛区被认为是中国理想的滑雪运动区域（付宏，2015；梁林等，2015；孙海泉等，2014）。

## 2.2 滑雪场概况

本研究主要对崇礼区万龙滑雪场赛道雪质进行研究。万龙滑雪场所在崇礼区位于张家口市东北部，距北京市249km，距张家口市60km。滑雪场占地面积30km<sup>2</sup>，最高处海拔2110.3m，垂直落差550m。目前已开发建成初、中、高级滑雪道共计24条，总面积0.79km<sup>2</sup>，雪道总长度36.5km。万龙滑雪场是中国首家以滑雪为特色的国家AAAA级景区（储国儒，2007），是日本、韩国等国家专业运动员的指定训练基地，能够承办各类国际大型滑雪赛事，已连续5年成功承办国际雪联高山滑雪积分赛和远东杯赛等重大国际赛事。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滑雪场之一，具有较高代表性和研究意义。

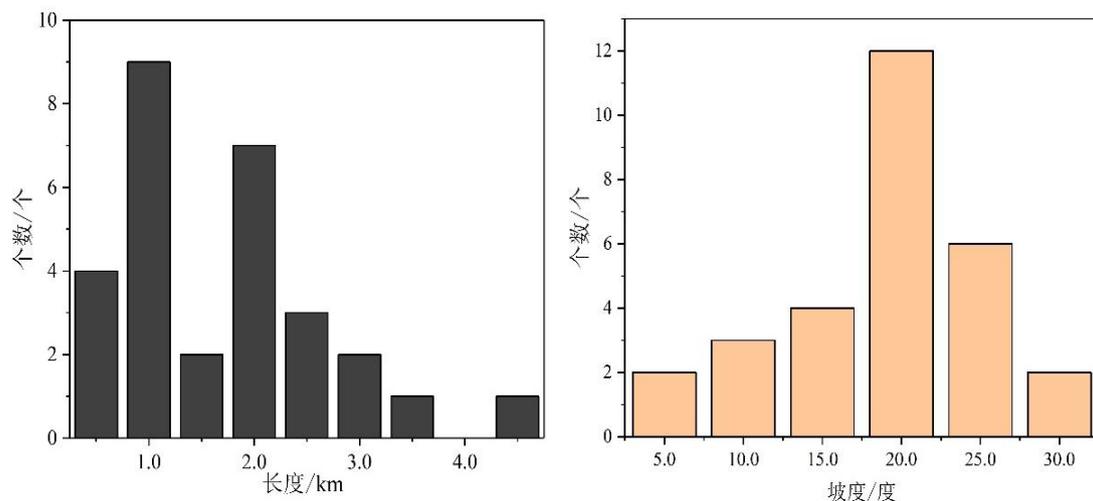


图 2.2 万龙滑雪场雪道长度和坡度统计

Figure 2.2 Length and slope statistics of skiway in Wanlong skiing ground

对崇礼万龙滑雪场雪道长度和雪道坡度进行统计，雪场雪道长度范围为 200 m~4 160 m，雪道平均坡度范围为  $5^{\circ}$ ~ $30^{\circ}$ 。按照 500 m 长度、 $5^{\circ}$  间隔进行划分，雪场雪道长度以 500 m~1 000 m 和 1 500 m~2 000 m 为主，分别占到雪道总量的 31.0% 和 24.1%，雪场雪道长度小于 2 000 m 居多；雪道坡度以  $15^{\circ}$ ~ $20^{\circ}$  为主，占比为 41.4%，如图 2.2 所示。



## 第3章 数据资料与研究方法

### 3.1 数据资料

#### 3.1.1 赛道雪质数据

赛道雪质数据包括赛道密度、赛道温度、赛道含水率、赛道孔隙率、雪粒径、赛道硬度和赛道物质平衡，赛道各雪质参数如表 3.1 所示。

表 3.1 赛道雪质参数

Table 3.1 Snow quality parameters of track

参数	仪器名称	精度
赛道温度	红外温度计、针式温度计	$\pm 1.0$ °C
赛道密度	Snow Fork 雪特性仪	-
赛道含水率	Snow Fork 雪特性仪	-
赛道孔隙率	Snow Fork 雪特性仪	-
雪粒径	拍照式显微镜	-
赛道硬度	雪硬度计 (Snow Wicro Pen)	$\pm 5$ mN
物质平衡	花杆、钢卷尺	$\pm 1.0$ cm

赛道密度、含水率及孔隙率数据。Snow Fork 雪特性分析仪是一种测量积雪密度和含水率特性的仪器，主要组成部分包括读数表和探头，探头为一钢质、叉形的微波共振器。雪特性仪由芬兰赫尔辛基大学研制，作为便携式雪特性分析仪，最低工作温度可达 $-40$  °C，能够方便并准确的进行野外积雪参数测量，近年已广泛应用于全球积雪研究中。Snow Fork 雪特性仪可直接测量共振频率、衰减度和 3 dB 带宽这 3 个电参数，利用这 3 个电参数测量值可计算积雪介电常数，并通过半经验公式计算出积雪密度和液态含水率。测量时，Snow Fork 雪特性分析仪依次获得：衰减度、共振频率、3 dB 带宽、介电常数（包括实部和虚部）、体积含水率、密度及重量含水率。雪孔隙率数据可由上述测量数据依据数学公式计算求得。

赛道温度数据。赛道表面温度利用手持红外温度计进行测量，赛道内部温

度利用针式温度计进行测量。

赛道积雪粒径数据。雪粒尺寸信息对于分析辐射传输和雪面相互机械作用至关重要，传统基于地面观测的积雪粒径一般是指雪粒径的物理尺寸。本研究采用轻巧、便于携带的 Anyty 拍照式显微镜 3R-V500IR/UV 系列测量积雪粒径。观测时，将取来的积雪样本放置在阴影下，在尽可能短的时间内通过调焦将雪颗粒放大并拍照，保存为 JPEG 格式，后续利用 3R-V500IR/UV Viewer Plus 软件，对雪粒径图片进行校正和测量。

赛道硬度数据。雪硬度测试是反映冰雪强度的重要指标，目前，积雪硬度测量常采用冲力硬度计。这种硬度计的上端有活动的金属砝码，根据砝码的质量和下降高度，以及硬度计被打入雪层的深度，可以计算出雪层的硬度。但这种方法一方面误差大，不精确；另一方面无法对整层赛道积雪硬度进行量化，因而实际使用效果不够理想。然而，瑞士雪冰中心生产的 Snow Wicro Pen 是一款高分辨率雪硬度计，通过测试积雪的单轴向抗压强度，测量雪粒之间的结合力，进而反映出不同深度下冰雪的强度，具有高空间分辨率和高速性等特点。可用于不同应用领域，如雪崩预报、雪地层学、遥感地面实况、滑雪赛道特征（稳定性试验）。该装置由两个部件组成，齿轮杆、压力传感器和电机单元中的电压测力器，它是为现场测量而设计，野外工作温度范围为  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，齿轮杆在雪层内部运动速度为  $2\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，雪层分辨率为  $0.5\text{ mm}$ ，误差值为  $\pm 5\text{ mN}$ 。雪硬度计压覆到雪面上，同时压力传感器在齿轮杆的带动下进入雪层中，压电式力传感器测量穿透阻力与深度的函数关系。测量数据显示在控制器上，并以二进制格式存储在 SD 卡上，二进制文件可以通过 Snowmicropyn 程序读取、绘制和评估。

赛道物质平衡数据。赛道深度是指赛道的总高度，在测量区的 13 个观测点布设花杆，通过钢卷尺测量赛道上部花杆长度，然后花杆总长度减去上部花杆长度获得赛道深度。观测期内赛道的日物质平衡，采用等高线法将计算后的单点物质平衡绘制到赛道地形图上，通过物质平衡计算公式计算观测期内赛道净物质平衡。

人工储雪试验数据。针对具有不同保温材料的 3 个储雪试验雪堆，设置 32 个温度传感器，对积雪表面和保温层间温度变化进行检测。此外，安置热流

板,对表层保温材料及雪面能量的收支状况进行检测。并于2017年3月8日至4月8日,通过无人机测量获取雪堆形态和体积变化数据。

### 3.1.2 气象数据

本研究的气象数据,包括张家口崇礼赛区气象数据和崇礼赛区万龙滑雪场气象数据。具体气象参数指标见表3.2。

表3.2 气象参数

Table 3.2 Meteorological parameters

参数	单位	仪器名称及型号	精度
空气温度	℃	温湿度传感器 HC2S3	±0.1 ℃
相对湿度	%	温湿度传感器 HC2S3	±0.5%
太阳辐射	W m <sup>-2</sup>	四分量辐射 CNR4	±1.0%
风速	m·s <sup>-1</sup>	风速传感器 05103	±0.3 m·s <sup>-1</sup>
地温	℃	土壤温度传感器 109	±0.2 ℃
降水量	mm	全自动降水测量仪 T-200B	±0.05 mm

崇礼赛区万龙滑雪场气象资料采用气象站2017年3月3日至2017年3月19日数据,自动气象站间隔时间为1h。

1960~2014年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。为了保证数据质量,对其进行质量控制,其中包括数据记录日期和现实是否一致、日最低气温是否大于日最高气温、数据错误值和异常值等的筛选。

## 3.2 研究方法

### 3.2.1 变异系数法

变异系数又称“标准差率”,是衡量数据中各测量值变异程度的一个统计量。当对两个或多个数据的变异程度进行比较时,如果其数据单位和平均值均相同,则可以直接利用标准差来比较;若二者不同则需计算变异系数,消除数据绝对大小和数据量纲对变异程度的影响。其定义为标准差和平均值之比,公式如下:

$$CV=SD/MN \quad \dots (3.1)$$

式中：CV 为变异系数；SD 为标准差；MN 为平均值。

### 3.2.2 相关系数法

相关分析是揭示地理要素之间相互关系的密切程度，被广泛应用于地学领域相关研究。相关系数的计算与检验是测定地理要素之间相互关系密切程度的主要方法。

相关系数  $R$ ，是表示数据变量之间相关程度的统计指标，相关系数  $R$  值介于  $[-1,1]$  区间。 $R > 0$  表示两组数据变量之间存在正相关关系； $R < 0$  表示两组数据变量之间存在负相关关系； $R$  绝对值越接近于 1，表示两者之间的相关性越好； $R$  绝对值越接近于 0，表示两者之间的相关性越差。

此外，根据样本值计算得出的相关系数会随着样本数的多少或取样方式的不同而不同，还需要对相关系数进行检验，通过检验才能确保其可信程度。通常使用两种显著性检验置信区间，分别为 95% ( $P < 0.05$ ) 和 99% ( $P < 0.01$ )。

### 3.2.3 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 趋势检验法是一种非参数统计检验方法，优点在于样本不需要遵从一定的分布，受样本异常值的干扰性小，适用于类型变量和顺序变量，该方法不但可以检验样本随时间序列的变化趋势，还可以检验样本随时间序列是否发生突变，通常使用  $Z = \pm 1.96$ ，置信度水平  $\alpha = 0.05$ 。

### 3.2.4 物质平衡模型-度日模型

物质平衡取决于能量收支状况，可以通过构建基于能量平衡方程模式来模拟计算物质平衡，这种模式被称为物质平衡模式，其核心是建立物质平衡与气象要素（如气温、降水、太阳辐射等）之间的关系，模式的输入端为各种气象要素，输出结果为物质平衡值。赛道积雪消融量可以通过建立物质平衡模式来进行模拟，为赛道状况和人工积雪补给提供重要的数据支撑。物质平衡模式类型有很多种，目前常用的物质平衡模式主要有两类：基于物理过程的能量平衡模型和基于经验统计的温度指数型模型。温度指数型模型是一种描述冰面及积雪面与气温关系的经验公式，相较于能量平衡模型，温度指数型模型所需参数少，便于空间插值，广泛应用于冰川积雪物质平衡研究。同时，因气温和能量

平衡中各分量具有较高的相关性，温度指数型模型往往比较可靠。度日模型是最常见的温度指数型模型。将消融量（M）和正积温（T）相联系，模式公式如下：

$$M=DDF \times T \quad \dots (3.2)$$

式中，DDF 是度日因子；T 为正积温(时间段可以使小时、天或月，通常以天为时间单位)。

### 3.3 观测试验

全球变暖导致北半球积雪面积及积雪量呈现下降趋势，在全球气候变暖背景下，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。与自然雪相比，人造雪更为密实，10 cm 厚人造雪相当于 40 cm 厚自然雪。人造雪比自然雪更能抵抗风、雨以及气温变化的影响，更为稳定和持久（Lintzen, 2012）。稳定的赛道雪质，可以减少滑雪板对赛道的影响，保障首尾出发运动员赛道状况一致，以提高比赛的公平性，对于自然降雪丰富的地区，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。国际奥组委提出北京延庆赛区和张家口崇礼赛区，赛事用雪必须依靠人工造雪。因此，更需要人工造雪来满足比赛要求。

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赛道硬度和赛道厚度，赛道硬度由赛道密度、温度、含水率以及雪粒之间的烧结作用<sup>1</sup>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，2 011 m；40°57'55.06" N，115°23'51.97" E，1 765 m），并按照 50 m 海拔高度间隔及重要雪道原则，依次

<sup>1</sup> 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。

选定 13 个 (F1—F13) 雪冰观测点开展雪冰物理特性观测, 具体位置如图 2.1。

万龙滑雪场赛道由人工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。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。在使用 Snow Fork 雪特性仪观测时先打开仪器, 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 探头插入赛道雪层剖面的不同深度 (5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm), 依次直接获取有效赛道密度、含水率数据。赛道表面温度利用手持红外温度计进行测量, 赛道内部温度利用针式温度计进行测量。每次观测时间保证在北京时间 9:00~11:00, 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。

## 第4章 滑雪场气象要素变化

水、热及其组合是影响赛道发育和演化的主要气象要素，相关研究表明气温是积雪变化的主要影响因素，其影响程度远远大于降水和日照时数。观测期内滑雪场气象要素变化直接影响赛道雪质变化，对观测期内滑雪场气象要素变化分析显得尤为重要。

观测期内滑雪场气温、降水及太阳辐射气象要素变化，如下图4.1所示。由图可知，观测期内净辐射最大值出现在17日为 $59.19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，净辐射最小值出现在5日为 $13.69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，平均净辐射值为 $39.07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。观测期内最高温度出现在19日为 $5.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最低温度出现在7日为 $-17.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均温度为 $-3.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，累积正积温为 $230.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，累积正积温时数为 $113 \text{ h}$ 。观测期内发生三次降水事件，分别为5日 $0.1 \text{ mm}$ ；16日 $0.4 \text{ mm}$ ；19日 $1.0 \text{ mm}$ ，累积降水量为 $1.5 \text{ mm}$ 。

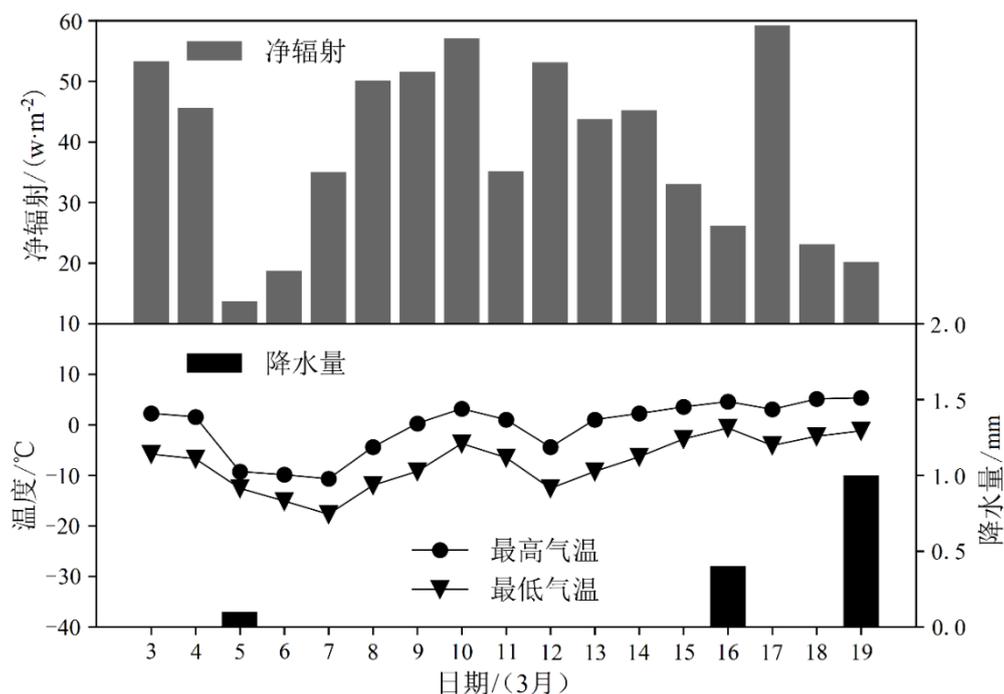


图4.1 观测期内气象要素变化

Figure 4.1 Variation of meteorological elements during observation period

#### 4.1 气温变化

由图 4.1 可知，观测期内净辐射和气温存在一定延迟性。通过分析观测期内日均温和太阳辐射关系，如图 4.2 所示，日均温和净辐射呈现正相关性，但相关性不太理想，相关系数  $R^2=0.319$  ( $P<0.01$ )，原因在于滑雪场地属山区，植被、岩石、土壤、积雪等下垫面较为复杂，再加上昼夜山谷风的影响，致使日均温和辐射相关性不理想，存在一定延迟性，但总体上气温主要受太阳辐射影响。

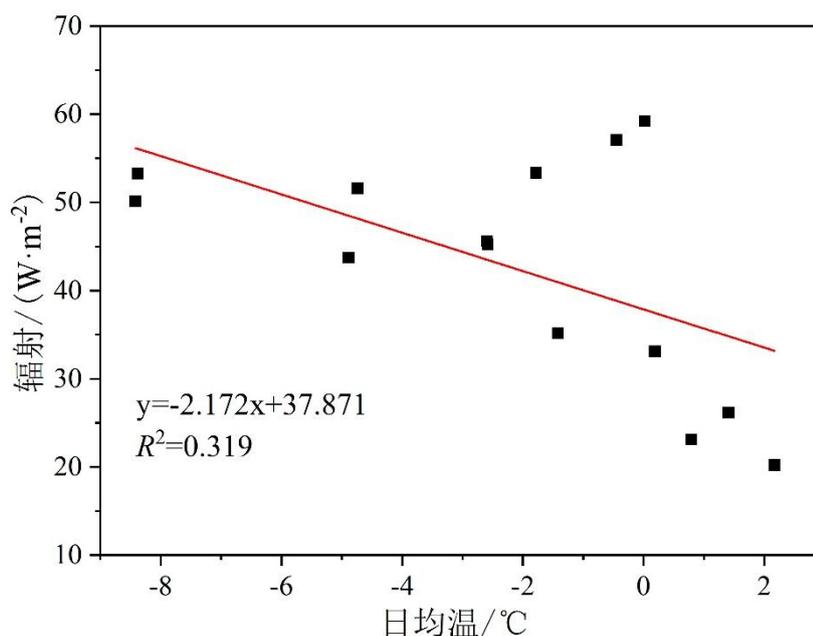


图 4.2 观测期内日均温与太阳辐射关系

Figure 4.2 The relation between daily mean temperature and solar radiation during observation period

依据气象预报中昼夜划分标准，白天是指上午 8 时至晚上 8 时；夜晚是指晚上 8 时至次日上午 8 时。根据该划分标准，对观测期内日平均温度进行了昼夜划分，可以从中研究观测期内日气温的差值大小，对白天赛道积雪消融和夜晚赛道液态水凝结冻结作用具有一定的数据参考。图 4.3 为观测期内昼夜气温平均值变化曲线。由图可知，观测期内昼夜日均温变化趋势一致，昼夜日均温变化和最高气温、最低气温变化趋势也大体一致；白天日均温大于夜晚日均温，昼夜温差变化幅度相对昼夜日均温较小，昼夜温差范围为  $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，昼夜温差最大值出现在 13 日，最小值出现在 17 日，昼夜温差平均值为  $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

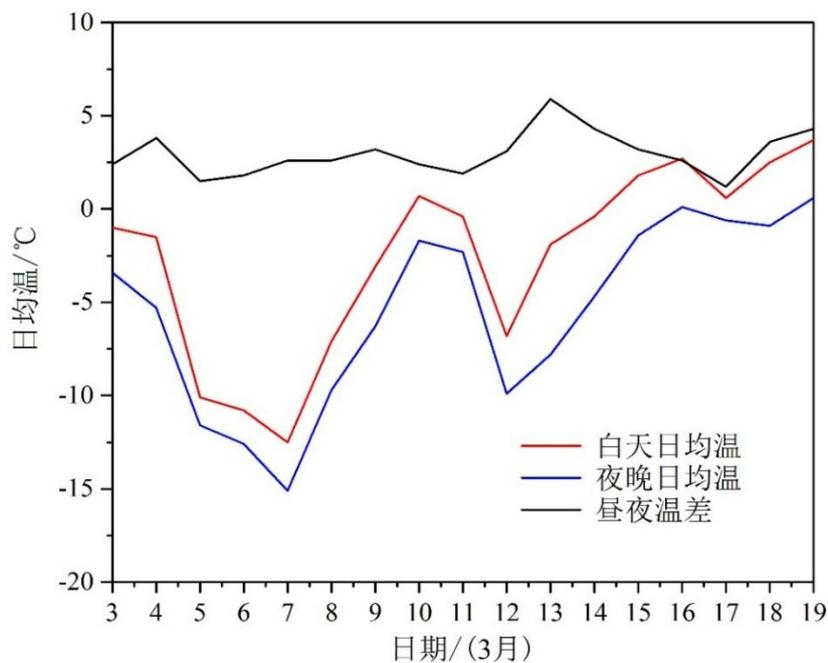


图 4.3 观测期内昼夜日均温变化

Figure 4.3 Daily and night mean temperature variation during observation period

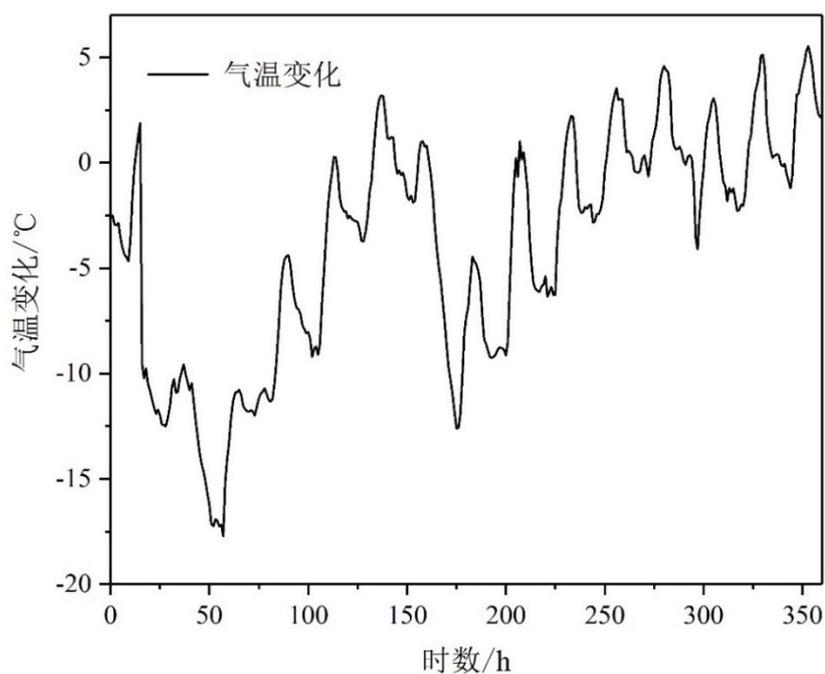


图 4.4 观测期内气温逐小时变化

Figure 4.4 Hourly variation of temperature during observation period

日气温整体动态变化曲线，可以反映气温的变化特征和性质。统计观测期内逐小时气温数据，对其进行分析，如图 4.4 所示。由图可知，逐小时气温变化幅度较大，气温稳定性较差，整体呈现上升趋势。日正积温表征日气温在一

天内温度超过 0 °C 的气温总量值，气温超过 0 °C 对积雪消融产生很大影响，这对滑雪场赛道消融和积雪属性变化具有重要的研究意义。统计观测期内日正积温时数和总量，如图 4.5 所示，正积温变化趋势和气温变化趋势一致，气温越高，正积温时数总量越大，观测期内正积温天数占比为 68.7%，时数占比为 32.2%。正积温和时数变化趋势一致，正积温时数越长正积温数值越大，相关系数  $R^2=0.815$  ( $P<0.01$ )，如图 4.6 所示。

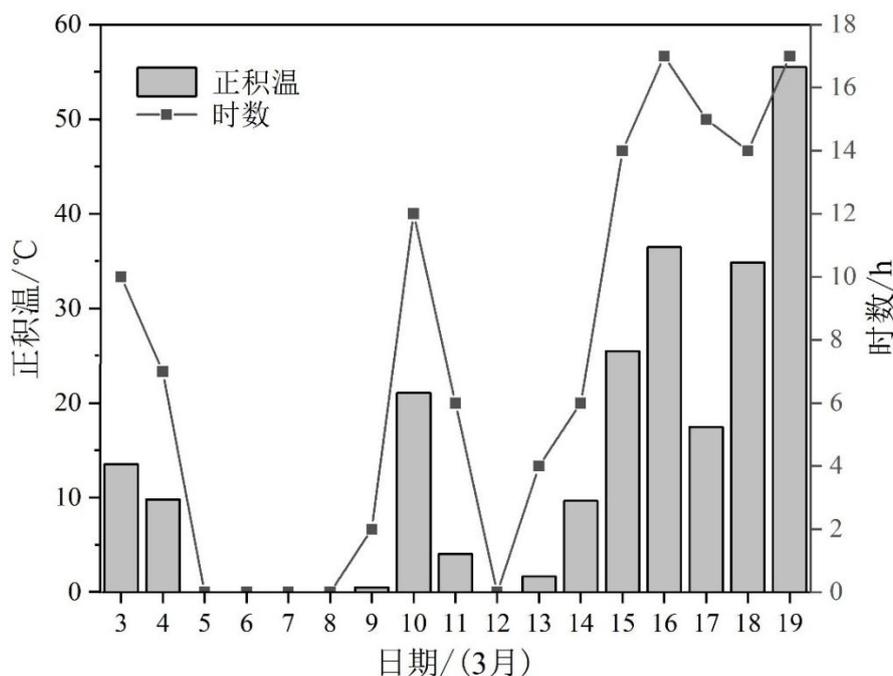


图 4.5 观测期内日正积温和时数变化

Figure 4.5 Daily positive cumulative temperature and time variation during observation period

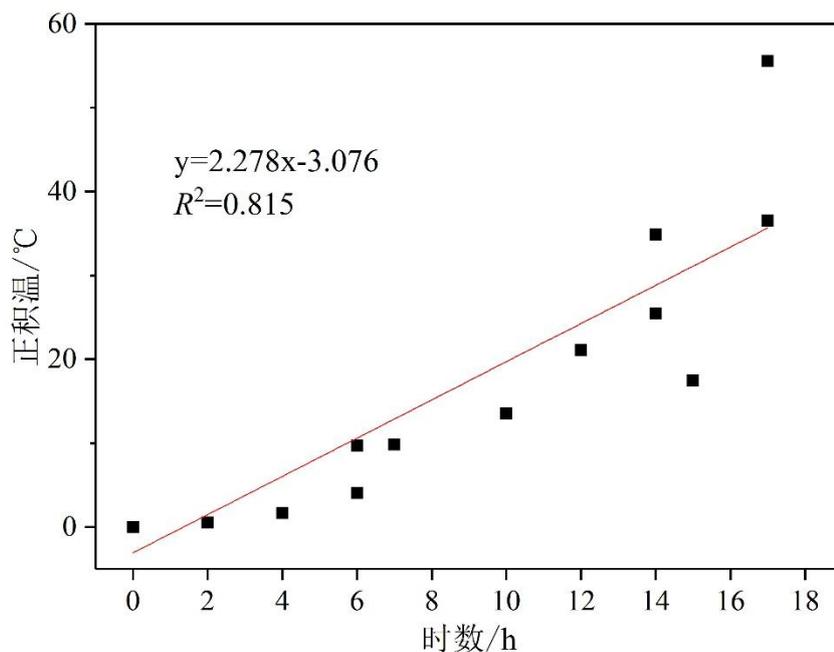


图 4.6 观测期内日正积温与时数关系

Figure 4.6 The relationship between daily positive accumulated temperature and time in observation period

#### 4.2 太阳辐射变化

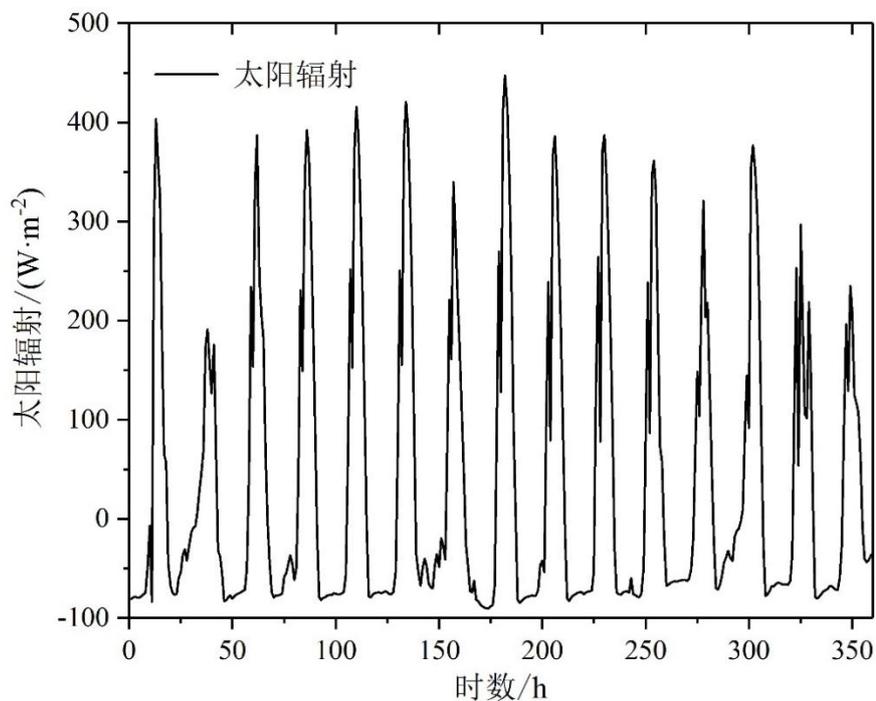


图 4.7 观测期内太阳辐射变化

Figure 4.7 Changes of solar radiation during observation period

太阳辐射是影响气温、地表温度和空气相对湿度最直接，也是最重要的因素。统计观测期内太阳辐射逐小时变化数据，对其进行系统分析，如图 4.7 所示。观测期内太阳辐射动态变化，峰值比较明显，太阳辐射范围为 $-100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ~ $450 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，太阳辐射转点在上午 11:00 时，峰值出现在 12:00—14:00 时，太阳辐射变化与气温变化趋势一致。

### 4.3 相对湿度变化

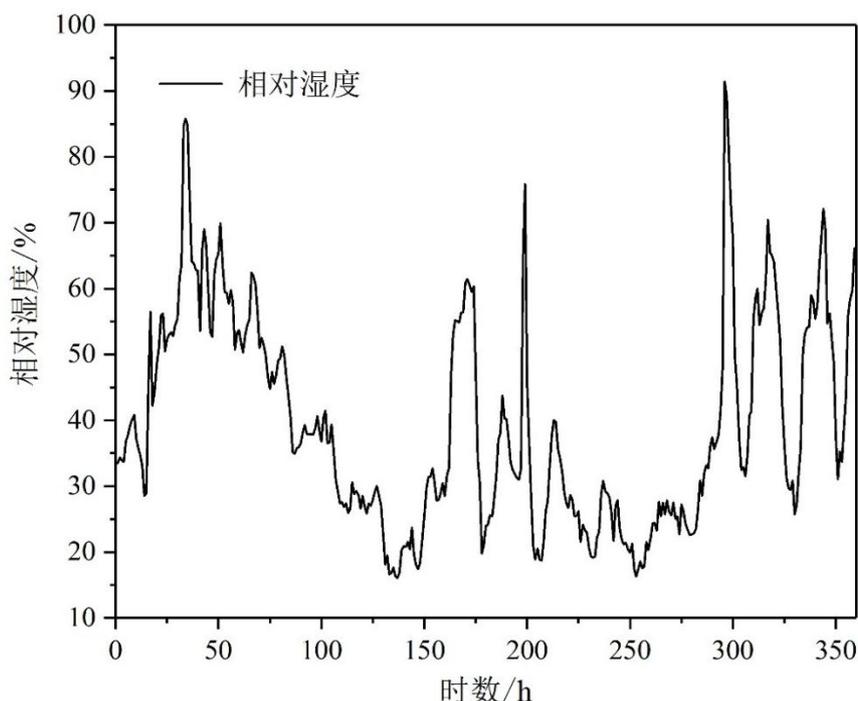


图 4.8 观测期内相对湿度变化

Figure 4.8 Changes of relative humidity during observation period

相对湿度以百分比形式表示空气中绝对湿度与同温度和同气压下饱和绝对湿度的比值。相对湿度大小影响滑雪场人工造雪量和质量，研究其变化特性并结合人工造雪条件，提出人工造雪最佳时期。图 4.8 为相对湿度逐小时变化情况，由图可知，观测期内滑雪场相对湿度变化波动比较大，相对湿度范围为 15%~90%，日相对湿度存在波浪形变化形式，峰值出现在早上 6:00—8:00 时，低值一般出现在 12:00—16:00 时。 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  气温，相对湿度不超过 80%，伴随微风是人工造雪适宜的气象条件。结合日气温变化特性，适宜人工造雪的时间点为 21:00—6:00 时，在气温相对较低时期，全天都适合进行人工造雪。

#### 4.4 风速变化

风速大小是影响人工造雪积雪分布和利用率大小的重要气象因素，风速过大，人造雪不易在赛道堆积，积雪被吹拂在赛道间隔地区，造成人造雪的浪费；风速过小，一方面喷射的雾状液滴凝结时间短，不易于人造雪成形，造成人造雪液态含水率高，影响其质量；另一方面，人造雪被大量堆积在造雪机下部，为后续赛道铺设增加难度。因此，对观测期滑雪场风速进行逐小时分析，如图 4.9 所示。观测期内风速变化幅度较大，日风速变化幅度也较大，日风速变化成波浪形，一般在 8:00—9:00 时风速开始增加，14:00—16:00 时风速达到最大值，随后风速逐步减小，白天风速大于晚上。观测期内风速范围为  $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\sim 9.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，依据风速风级划分，风速为 1 级至 5 级，以 2 级至 3 级微风为主，说明滑雪场风速满足人工造雪所需风速要求。

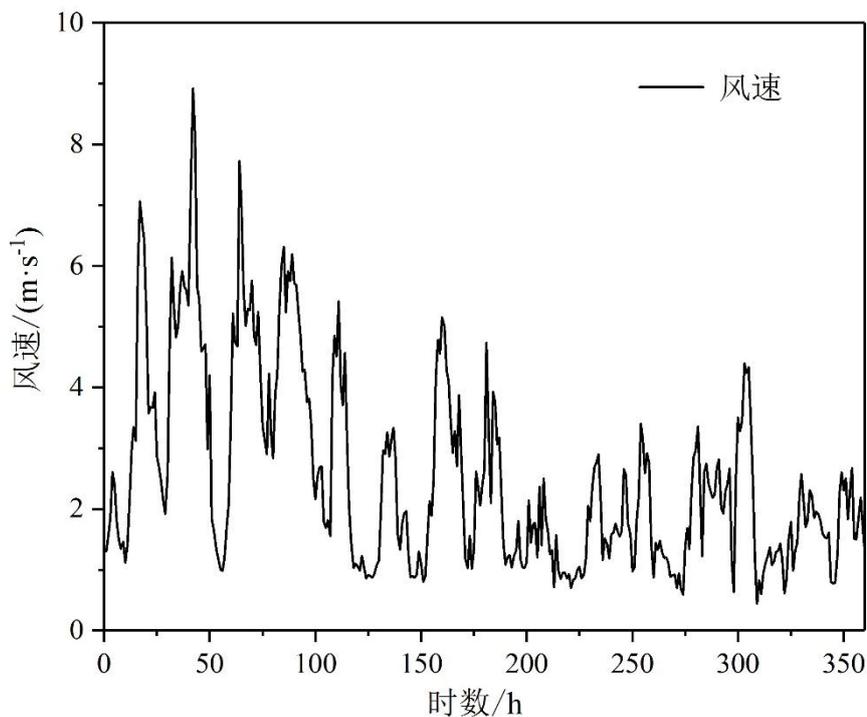


图 4.9 观测期内风速变化

Figure 4.9 Variation of wind speed during observation period

#### 4.5 本章小结

观测期内净辐射最大值为  $59.19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，最小值为  $13.69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，平均净辐射值为  $39.07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；最高温度为  $5.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最低温度为  $-17.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均温度为  $-3.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，累积正积温为  $230.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，累积正积温时数为 113 h；观测期内发生三次

降水事件，累积降水量为 1.5 mm。观测期内净辐射和气温存在一定延迟性，但总体上气温主要受太阳辐射影响，日气温整体呈动态变化，昼夜温差范围为  $1.2^{\circ}\text{C}\sim 5.9^{\circ}\text{C}$ ，平均值为  $2.9^{\circ}\text{C}$ 。观测期内太阳辐射动态变化，峰值比较明显，太阳辐射范围为  $-100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\sim 450\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，转点在上午 11:00 时，峰值出现在 12:00—14:00 时，太阳辐射变化与气温变化趋势一致。观测期内滑雪场相对湿度变化波动比较大，相对湿度范围为 15%~90%，日相对湿度存在波浪形变化形式，峰值出现在早上 6:00—8:00 时，低值一般出现在 12:00—16:00 时，结合日气温变化特性，适宜人工造雪的时间点为 21:00—6:00 时，在气温相对较低时期，全天都适合进行人工造雪。观测期内风速范围为  $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\sim 9.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，风速为 1 级至 5 级，以 2 级至 3 级微风为主，滑雪场风速满足人工造雪所需风速要求。

## 第5章 赛道雪质变化分析

本研究通过分析观测期内滑雪场 13 个雪冰物理观测点逐日、逐层的赛道温度、密度、含水率、孔隙率以及其平均值数据、赛道雪粒径数据、赛道硬度数据、赛道物质平衡数据，并通过图表分析、变异系数分析、相关性分析、物质平衡模型，探究我国竞技型滑雪场赛道雪质特性。

### 5.1 赛道密度变化

积雪密度主要受雪融水和雪层内对流、冷凝、辐射及传导引起的热量交换影响（陆恒等，2011），是描述积雪物理特性的重要指标（高培等，2010；魏玥，2010），常作为模型变量广泛使用（Jansson P-E,1991；Sturm M 等., 1997）。此外，赛道密度也可以整体上反映赛道雪质的硬度。

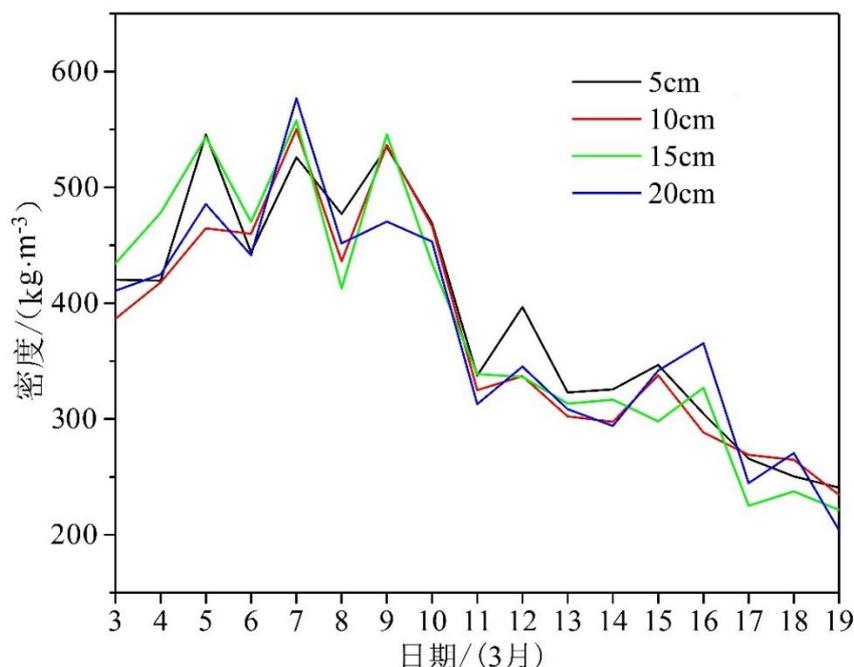


图 5.1 观测期内赛道密度变化

Figure 5.1 Variation of track density during observation period

图 5.1 为观测期内赛道各雪层密度变化情况。由图可知，赛道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赛道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 日至 3 月 10 日赛道密度范围为  $410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ~ $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，赛道平均密度为  $473 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，赛道密度较大，但数值上下

波动，稳定性较差；3月11日至3月19日赛道密度范围为  $220 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ~ $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，赛道平均密度为  $298 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，赛道密度呈下降趋势，各雪层平均密度分别为  $310 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，除赛道 15 cm、20 cm 处平均密度相等外，赛道密度基本上呈现随深度增加而减小趋势，密度梯度为  $-6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。将观测期内赛道雪层密度平均（如图 5.2）可知，赛道密度整体上呈现随深度增加而减小趋势。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，致使赛道雪层下部孔隙率增大，雪层密度减小。

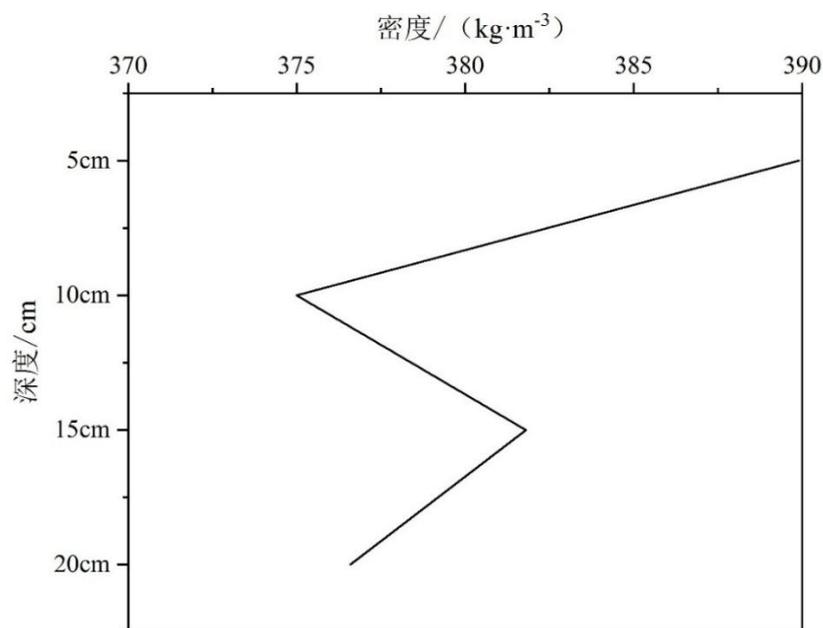


图 5.2 观测期内赛道密度随深度变化

Figure 5.2 Variation of track density with depth during observation period

3日至10日赛道温度先上升后下降再上升（图 5.5），赛道雪层温度波动幅度较大，赛道平均温度为  $-12.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，7日赛道温度达到最低值为  $-18.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此时赛道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。赛道密度突变点出现在11日，时段内赛道平均温度为  $-10.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均气温为  $-0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，赛道密度为  $320 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。赛道密度突变阶段开始出现最高气温大于  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的天气，分别为9日  $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10日  $3.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和11日  $1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与9日至11日赛道温度持续较高相比，赛道密度变化滞后于温度变化，因此运用统计学方法对观测期内赛道温度、含水率、密度数据进行处理，变异系数分别为 0.342、0.278、0.243，数值的大小反映数据的离散程度，这在一定程度上反映赛道雪质在外界自然因素影

响下，赛道温度最先响应，然后影响含水率，最后影响密度。图 5.3 为观测期内日均温与赛道平均密度的关系，由图可知，日均温与赛道平均密度有较好的正相关性，相关系数为  $R^2=0.526$  ( $P<0.01$ )。

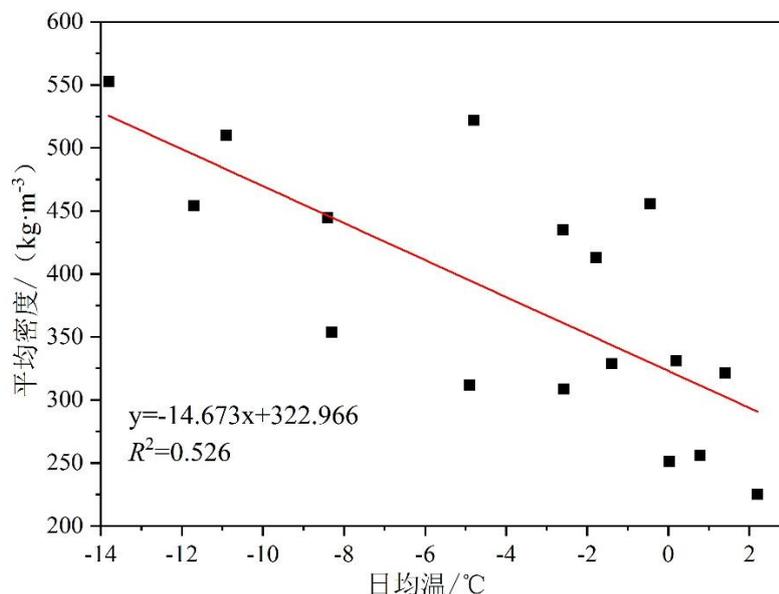


图 5.3 观测期内日均温与赛道平均密度关系

Figure 5.3 Relation between daily mean temperature and average track density during observation period

将观测期内赛道平均密度与赛道平均温度进行相关性分析（如图 5.4），赛道平均密度与赛道平均温度呈现较好正相关性，相关系数为  $R^2=0.636$  ( $P<0.01$ )。赛道平均密度与赛道平均温度的相关性大于赛道平均密度与日均温的相关性，因此，赛道平均温度对赛道平均密度的影响大于日均温对赛道平均密度的影响。

赛道密度突变后平均温度为  $-8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均气温为  $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均密度为  $290\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。9 日前最高气温在不超过  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，赛道各雪层密度随气温变化而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  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  后，各雪层密度明显减小，赛道平均密度降低至  $290\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。9 日后最高气温超过  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的天数为 10 天，占比为 90.9%，因此  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  最高气温可以作为赛道密度发生显著变化的阈值点。统计赛道密度突变阶段正积温和逐小时气温大于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的时数，得知 9 日为  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，2 h；10 日为  $21.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，12 h；11 日为  $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，5 h。赛道密度突变阶段正积温总量为  $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，逐小时气温大于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的时数为 19 h，研究

结果在一定程度上为赛道雪质维持和监测提供参考依据。

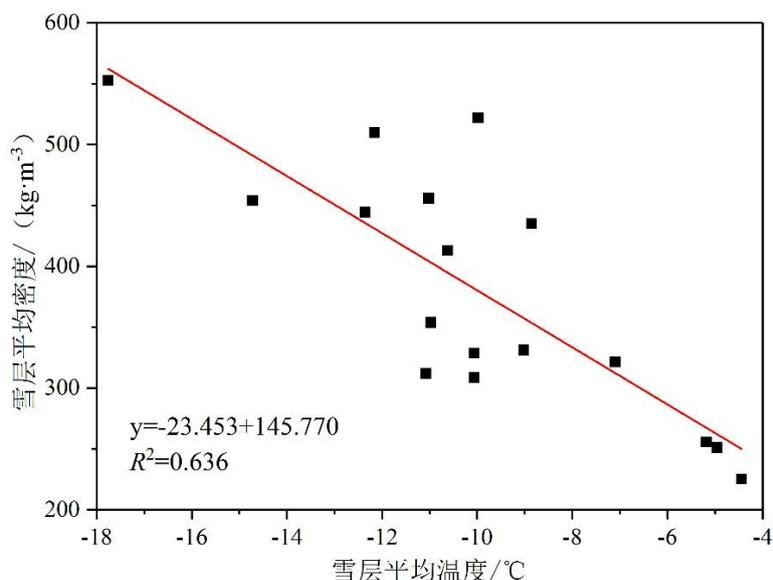


图 5.4 观测期内赛道平均温度与平均密度关系

Figure 5.4 Relationship between average temperature and density of snow layer during observation period

经相关性分析可知，赛道平均密度与赛道平均温度 ( $R=-0.797$ ,  $P<0.01$ )、最高气温 ( $R=-0.626$ ,  $P<0.01$ )、最低气温 ( $R=-0.619$ ,  $P<0.01$ )、日均温 ( $R=-0.725$ ,  $P<0.01$ ) 和赛道平均含水率 ( $R=-0.902$ ,  $P<0.01$ ) 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，赛道密度与赛道温度、赛道含水率、气温、风速有关。

## 5.2 赛道温度变化

积雪温度是表征积雪能量高低最直接的指标 (You Jinsheng 等., 2014)，积雪温度的高低直接影响雪的消融和重冻结过程 (怀保娟, 2014)，雪层温度梯度可显著改变雪层内水汽迁移、晶体生长过程。图 5.5 为观测期内赛道温度随时间的变化，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；观测期内赛道温度变化和气温变化趋势大体一致，都呈现出升高—下降—升高—下降—再升高。观测期内赛道最高温度为 19 日  $-3.8^{\circ}\text{C}$ ，最低温度为 7 日  $-18.8^{\circ}\text{C}$ ，平均温度为  $-10.0^{\circ}\text{C}$ ，依据温度梯度值计算 (胡汝骥, 2004)，赛道温度梯度平均值为  $-0.1^{\circ}\text{C}$ 。观测期内赛道表面平均温度和 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 处平均温度分别为  $-9.5^{\circ}\text{C}$ 、

-10.0 °C、-10.5 °C、-10.0 °C、-9.9 °C (如图 5.6), 赛道表面温度最高, 10 cm 处温度最低。将赛道雪层平均温度与日均温进行相关性分析 (如图 5.7), 赛道平均温度与日均温呈现较好的正相关性, 相关系数为  $R^2=0.761$  ( $P<0.01$ )。

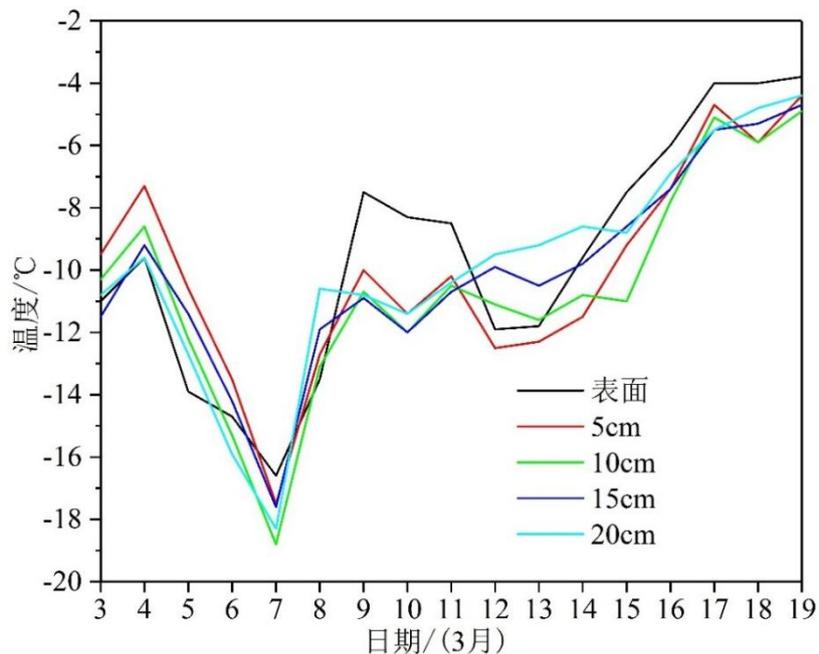


图 5.5 观测期内赛道雪层温度变化

Figure 5.5 Temperature variation of snow layer on raceway during observation period

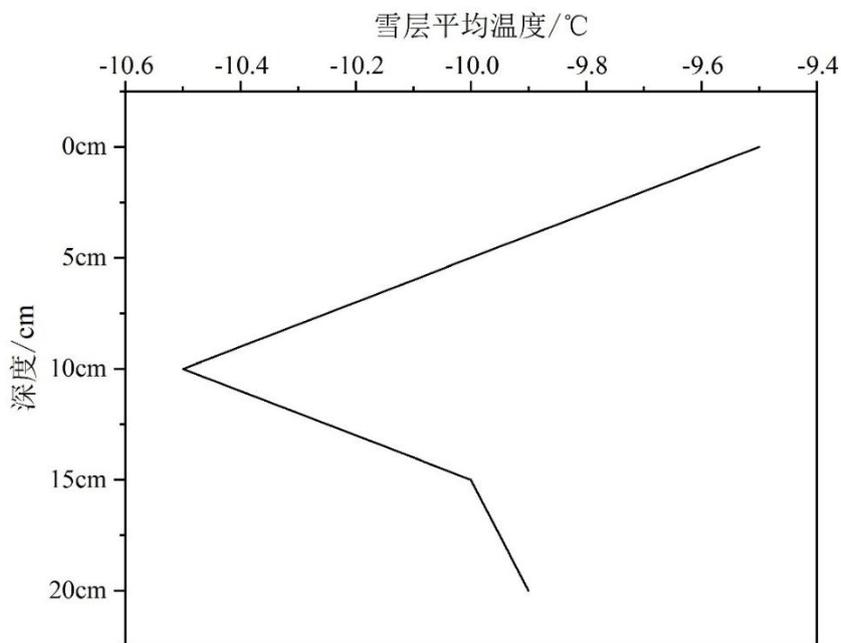


图 5.6 观测期内赛道雪层温度随深度变化

Figure 5.6 Variation of snow temperature with depth during observation period

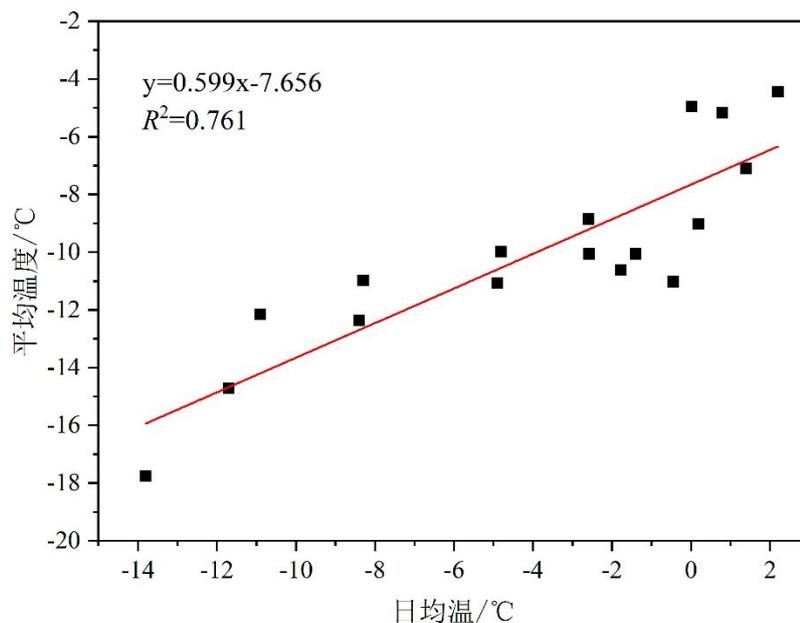


图 5.7 观测期内赛道平均温度与日均温关系

Figure 5.7 The relation between the average temperature of the track and the daily average temperature during the observation period

太阳辐射、地热通量、积雪消融和重冻结过程中的潜热共同影响积雪雪层温度变化（张伟，2014）。将观测期内赛道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、地温等进行相关性分析（表 5.1）。结果表明，表面温度、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 处赛道温度均与最高气温、最低气温、平均气温和风速呈现显著正相关性。赛道表面温度与气温、太阳辐射、风速的相关性大于赛道内部温度与气温、太阳辐射、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、太阳辐射、风速与赛道内部温度的相关性，说明气温、太阳辐射、风速等气象因素先作用于赛道表面，而后由雪融水、潜热等将热量转移至赛道内部。

除赛道表面温度与地温呈现不显著正相关性外，5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 赛道温度均与地温呈现显著正相关性。说明赛道温度是由气温、风速、地温三种要素控制。

表 5.1 雪层温度相关性关系

Table 5.1 Correlation of snow temperature

	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
5 cm 温度	0.861**	0.667**	0.762**	0.758**	0.162	-0.464*	0.096	0.647**
10 cm 温度	0.884**	0.731**	0.761**	0.776**	0.144	-0.593*	0.027	0.564*
15 cm 温度	0.866**	0.693**	0.743**	0.750**	0.035	-0.617*	0.015	0.559*
20 cm 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  $P < 0.01$

### 5.3 赛道含水率变化

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（Michael, 2004）。图 5.8 为观测期内赛道含水率变化，赛道各雪层含水率随时间的变化趋势基本一致，与气温和赛道温度的变化趋势大体一致。赛道含水率范围为 0.59%~4.81%，平均值为 2.62%，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。赛道内液态水从上逐层下渗，整体上呈现出深度越深含水率越大（如图 5.9），有效雪层内 20 cm 处含水率最大，5 cm 处含水率最小。10 cm，15 cm 处存在异常，原因在于赛道 10 cm 处存在破碎片状冰，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。

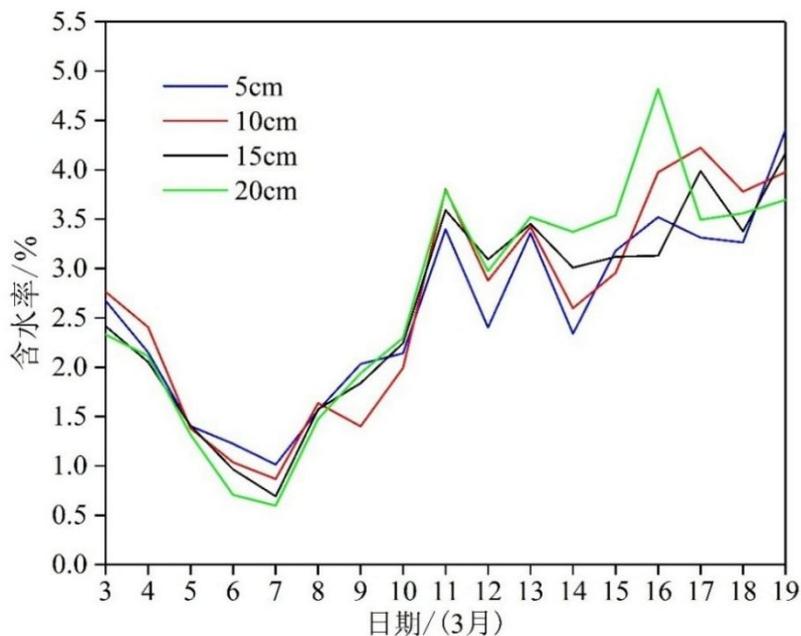


图 5.8 观测期内赛道含水率变化

Figure 5.8 Change of track water content during observation period

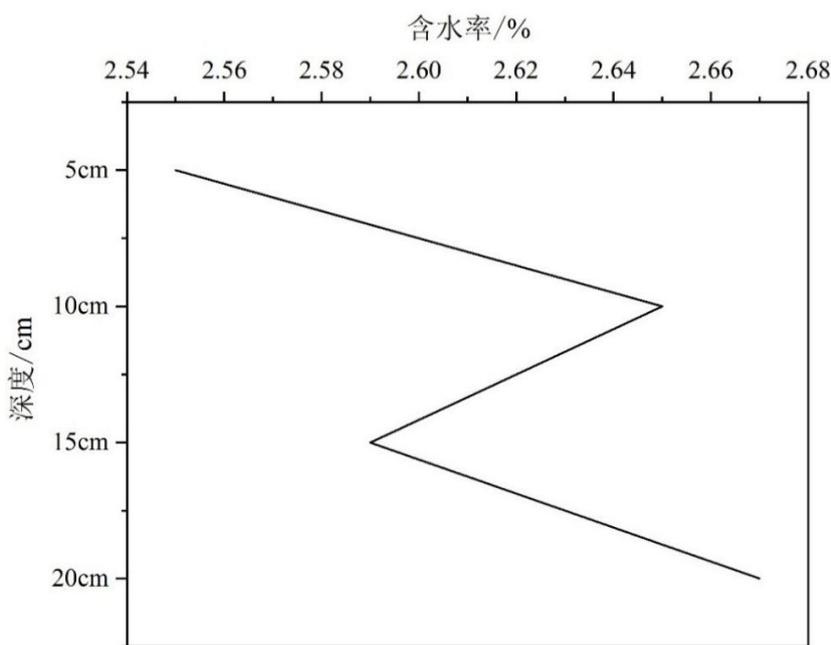


图 5.9 观测期内赛道含水率随深度变化

Figure 5.9 Variation of track water content with depth during observation period

根据国际水文科学协会 (IAHS) 发布的积雪液态水含水率通用分类方案, 将积雪依次划分为干雪 (0%)、潮雪 (<3%)、湿雪 (3%~8%)、非常湿 (8%~15%) 和雪浆 (>15%)。由图 5.8 可知, 3 月 3 日至 10 日赛道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日至19日赛道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，分别为2.83%、2.82%，其余日期赛道平均液态含水率均超过3%，属于湿雪。赛道积雪为潮雪日期内的日均温为 $-6.6^{\circ}\text{C}$ ，积雪为湿雪日期内的日均温为 $-0.2^{\circ}\text{C}$ 。

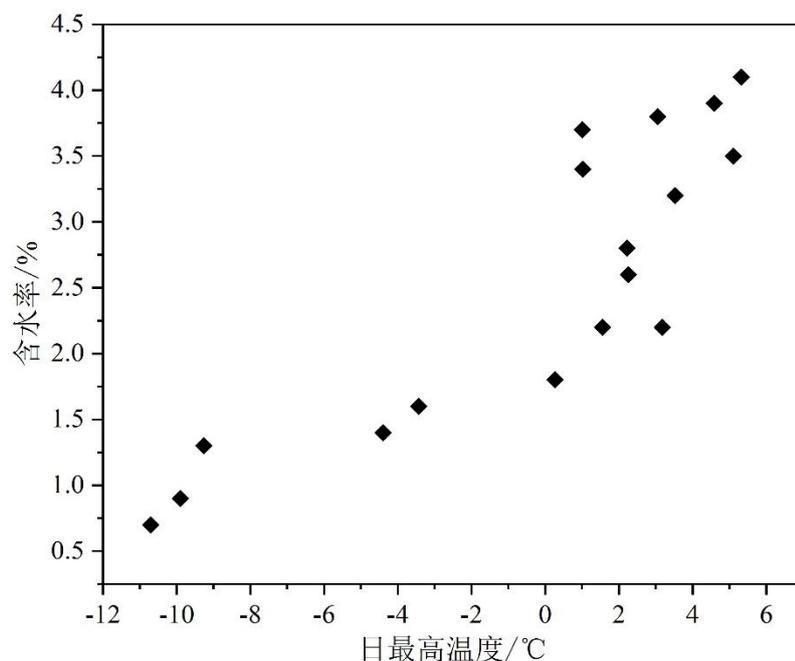


图 5.10 观测期内赛道含水率与日最高气温关系

Figure 5.10 Variation of track water content with depth during observation period

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（曹志等，2017）。统计观测期内日最高气温和赛道平均含水率数据，如图 5.10 所示，赛道雪层含水率随温度升高呈现增加的趋势；当日最高气温小于 $0^{\circ}\text{C}$ 时，赛道雪层含水率微弱升高，含水率维持在 $0.70\%\sim 1.60\%$ ，增幅不大；当日最高气温大于 $0^{\circ}\text{C}$ 时，赛道出现快速湿化现象，积雪由潮雪转化为湿雪，随着温度的升高，赛道含水率波动较为明显，最大含水率为 $4.10\%$ 。因此， $0^{\circ}\text{C}$ 气温是赛道含水率发生显著变化的阈值点，这与赛道密度发生显著变化的阈值点相吻合。由此， $0^{\circ}\text{C}$ 气温是监测滑雪场赛道雪质最重要的气象要素。

对赛道平均含水率与赛道平均温度、气温、风速等气象要素进行相关性分析，可知赛道平均含水率与赛道平均温度、最高气温、最低气温、日均温、风速在 $0.01$ 信度检测水平上呈现显著相关性，其相关系数分别为 $0.785$ 、 $0.778$ 、 $0.760$ 、 $0.780$ 、 $-0.708$ 。因此，赛道含水率受外界气象因素的影响较大。

## 5.4 赛道孔隙率变化

积雪作为一种自然状态下的非均质多孔介质，孔隙率是积雪重要的物理特性参数。积雪孔隙率对雪层内热传导（Woodside 等., 1958）、冰晶变质

（Sokratov, 2001）、融水下渗（Kuroiwa 等., 1968）等均有重要的作用。本研究对赛道孔隙率进行分析，一方面了解我国竞技性赛道雪质的孔隙率情况，提供量化数据指标；另一方面，为研究赛道雪层内热传导、冰晶变质及融水下渗提供数据依据。因此，对观测期内赛道孔隙率进行分析，如图 5.11 所示。

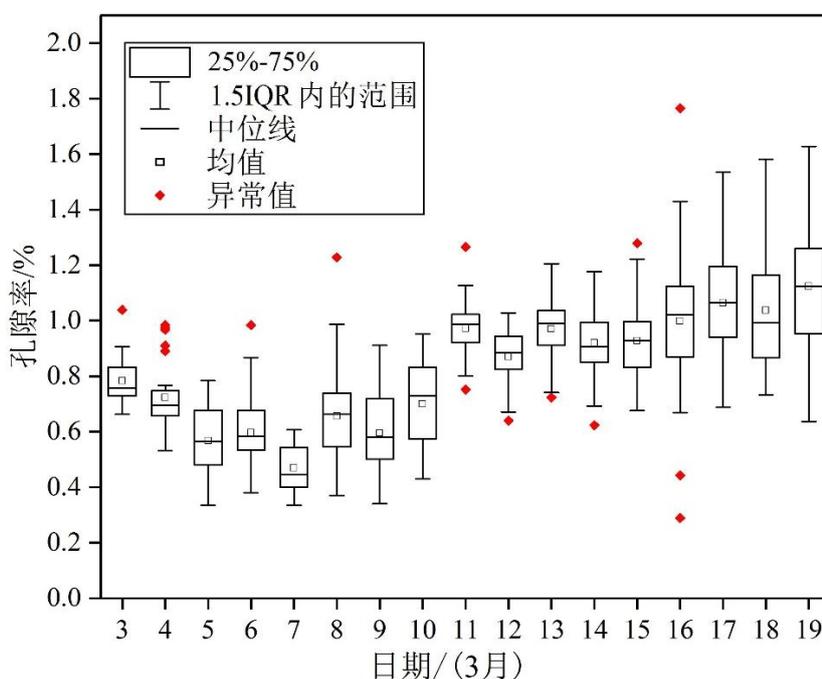


图 5.11 观测期内赛道孔隙率变化

Figure 5.11 Variation of track porosity during observation period

由图可知，观测期内赛道孔隙率范围为 0.33%~1.57%，平均孔隙率为 0.83%。赛道孔隙率与气温和赛道温度的变化趋势基本一致，温度下降时赛道孔隙率随之下降，反之上升。7 日平均气温最低为 -13.8℃，赛道平均孔隙率达到最低为 0.46%；19 日平均气温最高，为 2.1℃，赛道平均孔隙率最高为 1.12%。

我国竞技性滑雪场赛道孔隙率相对于自然积雪较小，原因在于赛道积雪需要通过压实来满足滑雪赛事要求，赛道制作完成后，赛道孔隙率主要受外界因素影响。由图 5.12 可知，赛道日均温与孔隙率存在较好正相关性，相关系数  $R^2=0.634$  ( $P<0.01$ )。赛道孔隙率的上升和下降，一方面源于气温的上下浮动，冰晶融冻变质反复进行，冰晶间空隙不断变化；另一方面由于积雪融水充斥在

空隙中，从而减小赛道孔隙率。图 5.13 可知，观测期内赛道有效雪层（5 cm、10 cm、15 cm、20 cm）孔隙率平均值分别为 0.83%、0.86%、0.86%、0.87%，赛道孔隙率随深度的增加而增加，但变化幅度小，基本一致。赛道孔隙率微弱增加，这与赛道内积雪融水微弱淋溶有关，与自然积雪相比存在很大不同。

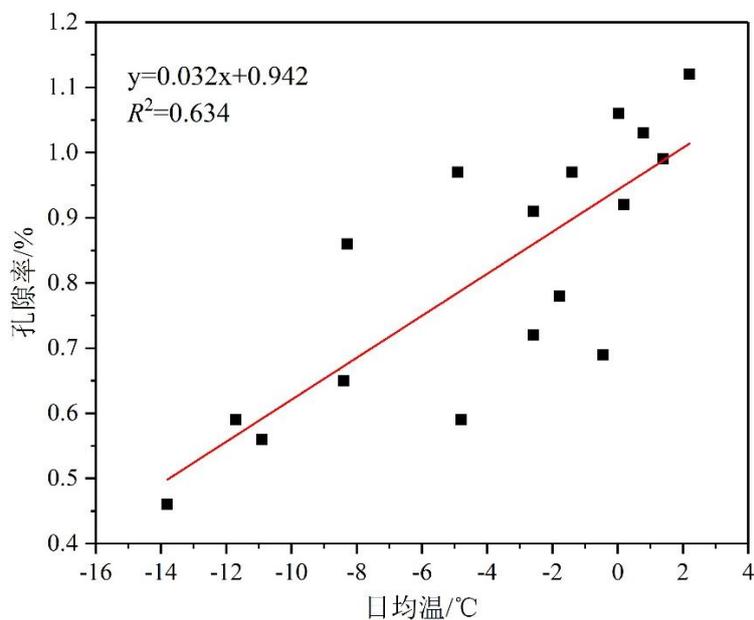


图 5.12 观测期内赛道孔隙率与日均温关系

Figure 5.12 The relationship between track porosity and daily mean temperature during observation period

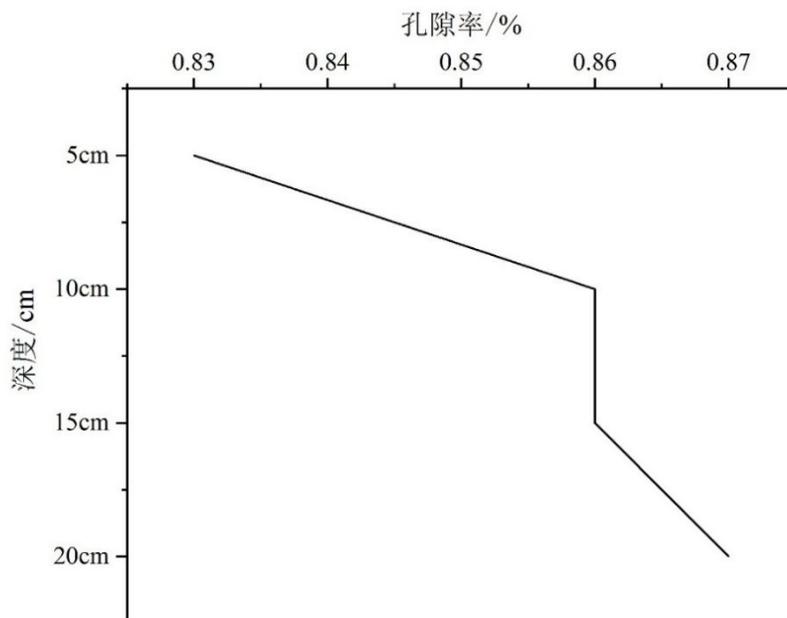


图 5.13 观测期内赛道孔隙率随深度变化

Figure 5.13 Variation of track porosity with depth during observation period

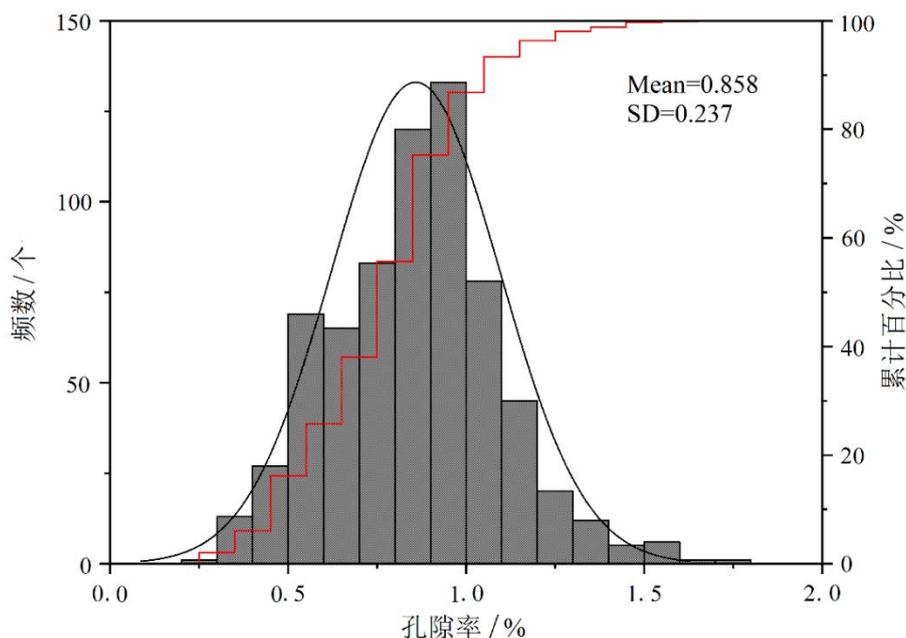


图 5.14 观测期内赛道孔隙率为正态拟合

Figure 5.14 Normal fitting of track porosity during observation period

对观测期内赛道孔隙率数据进行样本个数统计，如图 5.14 所示。观测期内赛道孔隙率符合正态分布，Mean=0.858，SD=0.237，孔隙率主要集中在 0.50%~1.25%。

## 5.5 赛道雪粒径变化

雪粒径是影响雪反照率的重要参数，其大小和变化响应着积雪热状况的结果。滑雪场赛道积雪主要以人造雪为主，雪粒径相较于自然积雪存在一定的差异性。赛道雪粒径研究提供我国竞技性雪场赛道雪粒径量化数据，为探究气象因子影响赛道雪质的关系，及构建气象条件—出雪量—雪质的模型，提供重要输入参数。

因此，对铺设好的滑雪场赛道进行剖面挖掘，逐层（0 cm、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、60 cm、70 cm）测取雪粒径数据。如图 5.15 所示，赛道在 0~50 cm 深度，雪粒径逐步增大，表面雪粒径最小为 0.29 mm，50 cm 处雪粒径最大为 1.21 mm；50 cm~70 cm 雪粒径逐步减小，70 cm 处雪粒径为 0.59 mm，赛道平均雪粒径为 0.67 mm。根据我国雪崩区积雪分类标准（魏文寿等，2001；赵哲等，2007），新雪或粉雪（粒径范围 0.1~0.4 mm）、细粒雪（粒径范围 0.5~1.0 mm）、中粒雪（粒径范围 1.0~2.0 mm）、粗粒雪（粒径范围

2.0~2.0 mm)、深霜 (粒径范围 3.0~6.0 mm)。因此,我国竞技型滑雪场赛道雪质以粉雪和细粒雪为主。

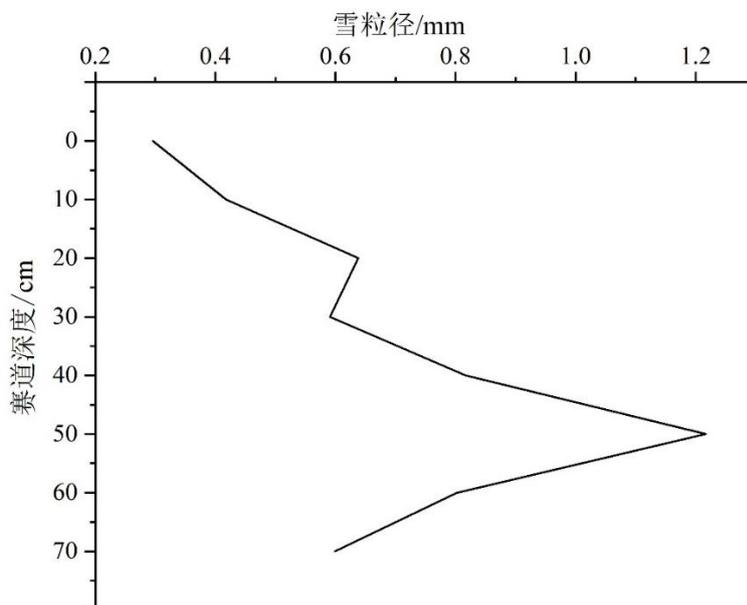


图 5.15 观测期内赛道雪粒径随深度变化

Figure 5.15 Variation of track snow particle size with depth during observation period

## 5.6 赛道硬度变化

赛道硬度是指赛道积雪抵抗外界物体压入其表面的能力,是竞技型赛道一项重要的物理参数。因此,对观测期赛道硬度进行分析,如图 5.16 所示。赛道最大硬度出现在表层 3.0 cm 处,为 68.0 N; 3.0 cm~25.0 cm 深度,赛道硬度呈下降趋势,硬度范围为 4.5 N~23.5 N; 25.0 cm~30.0 cm 深度,赛道硬度呈上升趋势,硬度范围为 13.0 N~44.0 N; 30.0 cm~45.0 cm 深度,赛道硬度呈下降趋势,硬度范围为 17.5 N~40.0 N; 45.0 cm~50.0 cm 深度,赛道硬度呈上升趋势,硬度范围为 22.0 N~37.0 N。因此,整层赛道硬度上下波动比较明显,一致性较差。有效赛道雪层内,赛道硬度差异性较大,不满足冬奥会赛道标准。

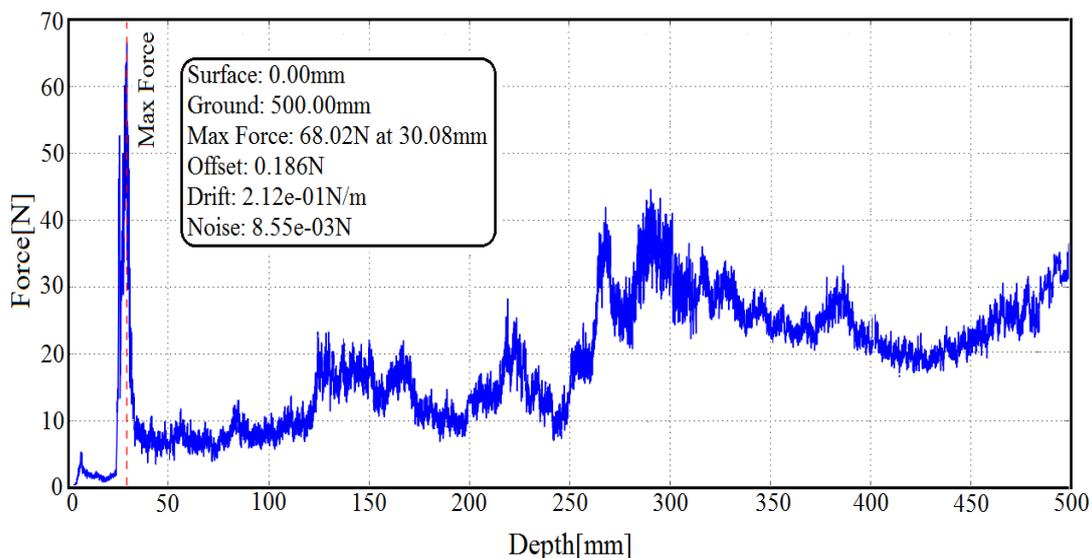


图 5.16 观测期内赛道硬度随深度变化

Figure 5.16 Variation of track hardness with depth during observation period

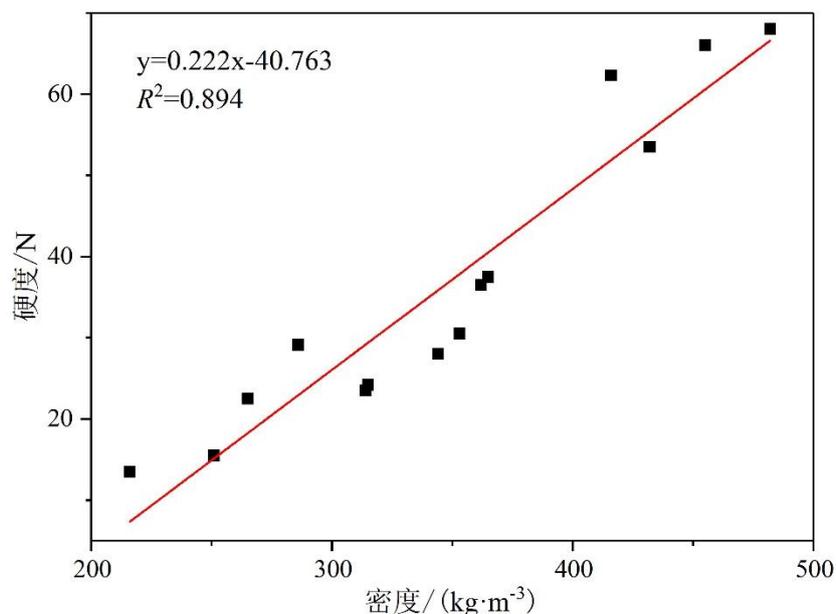


图 5.17 观测期内赛道密度与硬度关系

Figure 5.17 Relation between track density and hardness during observation period

积雪密度是单位体积物质的质量，密度越大，单位体积物质质量越大，在一定程度上可以反映积雪的硬度。因此，在赛道硬度测量区域进行雪坑剖面挖掘，逐层测取赛道雪层密度。依据测取赛道密度的深度，获取对应深度处赛道硬度数据。如图 5.17 为赛道雪层密度和硬度的线性回归方程，由图可知，赛道密度和硬度存在较好的正相关性，相关系数为  $R^2=0.894$  ( $P<0.01$ )。

国际奥林匹克委员会要求冬奥会部分项目（如速降、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。冰状雪赛道是指积雪密度大于  $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  的赛道，目前没有冰状雪赛道硬度的量化指标。依据本研究中赛道密度和硬度的关系，可以得知冰状雪赛道硬度应在  $70 \text{ N}$  以上。这为我国竞技型滑雪场赛道以及冬奥会雪场赛道的硬度提供了重要的量化指标，可以为后续滑雪场赛道制作提供数据依据。

### 5.7 赛道物质平衡变化

滑雪场赛道物质平衡系由赛道能量变化引发积雪物质收支变化，由图 5.18 可知，观测期内赛道物质平衡上下波动变化，出现过 7 次较强消融事件，分别为 4 日  $-49.9 \text{ mm}$ ，10 日  $-78.2 \text{ mm}$ ，15 日  $-97.3 \text{ mm}$ ，16 日  $-116.0 \text{ mm}$ ，17 日  $-45.5 \text{ mm}$ ，18 日  $-78.9 \text{ mm}$ ，19 日  $132.5 \text{ mm}$ ，平均物质平衡为  $-63.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ，累积物质平衡为  $-694.6 \text{ mm}$ 。观测期内赛道无正物质平衡，原因在于赛道制作完成后无后续人工造雪补给，自然降雪量较小，可忽略不计。

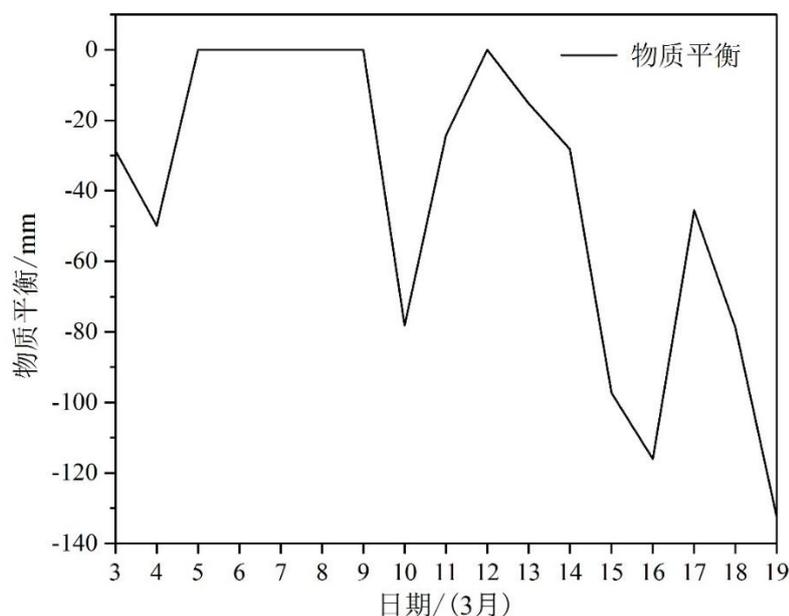


图 5.18 观测期内赛道物质平衡变化

Figure 5.18 Material balance change of raceway during observation period

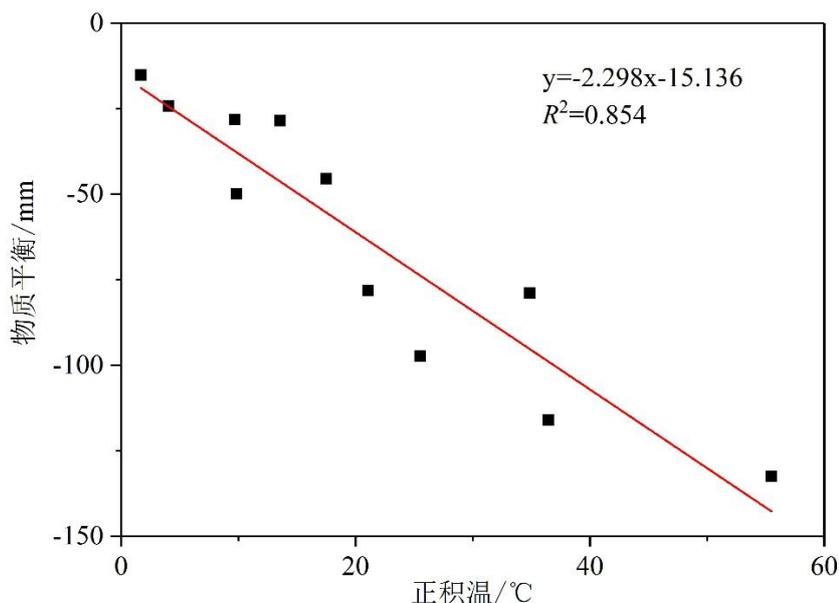


图 5.19 赛道物质平衡与正积温关系

Figure 5.19 Relation between material balance and positive accumulated temperature in track

通过分析观测期气温数据，日气温存在正积温时，赛道呈现负物质平衡，日正积温越大赛道消融越强烈；5日—9日和12日物质平衡为零，日气温不存在正积温。分析赛道物质平衡和日正积温的关系（如图5.19），物质平衡和正积温存在较好的负相关性，相关系数为 $R^2=0.854$ （ $P<0.01$ ）。因此，日正积温的大小对赛道物质平衡存在很大的影响。通过赛道物质平衡和正积温的关系，可以确定赛道的消融状况，一方面对冬奥会赛事，尤其是对冬残奥会赛事赛道的消融提供高分别率量化数据；另一方面可以依据赛道消融量，为人工造雪补给提供量化指标。

观测期内，赛道物质平衡度日因子（DDF）范围为 $2.1\sim 6.1\text{ mm}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，平均值为 $3.4\text{ mm}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。利用赛道物质平衡平均度日因子（DDF）值和日正积温值进行赛道物质平衡模拟（如图5.20）。由图可知，赛道物质平衡模拟值与实测值的变化趋势一致，模拟值曲线依附在实测值曲线上下波动，物质平衡模拟值为 $-774.9\text{mm}$ ，比实测值大 $80.3\text{mm}$ 。3日至17日模拟值波动幅度小，模拟值与实测值的差值较小，能够很好的对赛道积雪物质平衡进行模拟；18日至19日模拟值相对于实测值偏大，误差值分别为 $39.6\text{ mm}$ 、 $56.2\text{ mm}$ ，原因在于这两日温度较大且持续高温，正积温值较高有关。对赛道积雪模拟值和实测值进行相关性分析（如图5.21），由图可知，两者具有较好的相关性，相关系数为

$R^2=0.919$  ( $P<0.01$ )。因此，可以利用滑雪场物质平衡度日因子结合气象预报数据预测未来几天滑雪场赛道积雪量的可能变化，增强赛道雪质预测和风险评估能力，并以此提前采取必要的防范和保护措施。

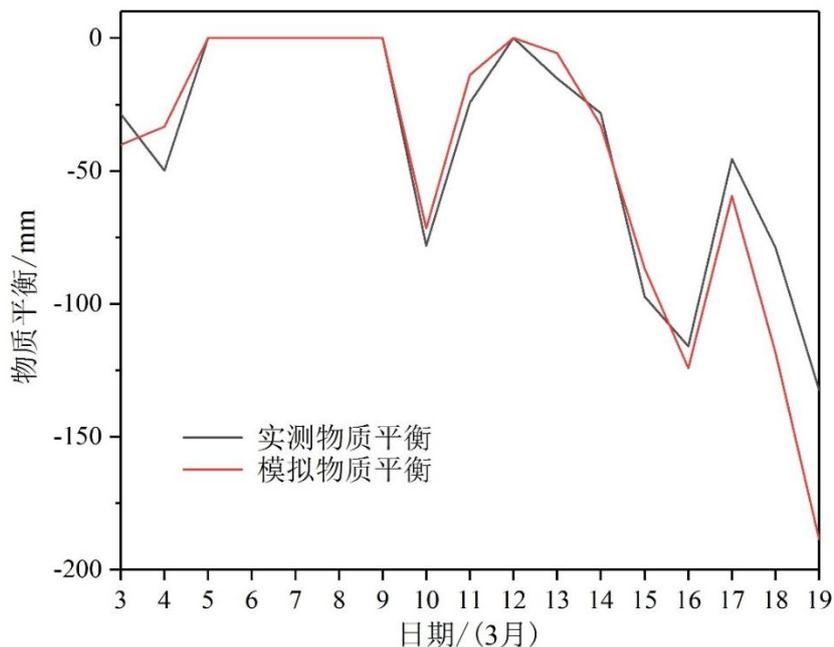


图 5.20 赛道物质平衡实测值与模拟值变化

Figure 5.20 Variation of the measured and simulated values of track material balance

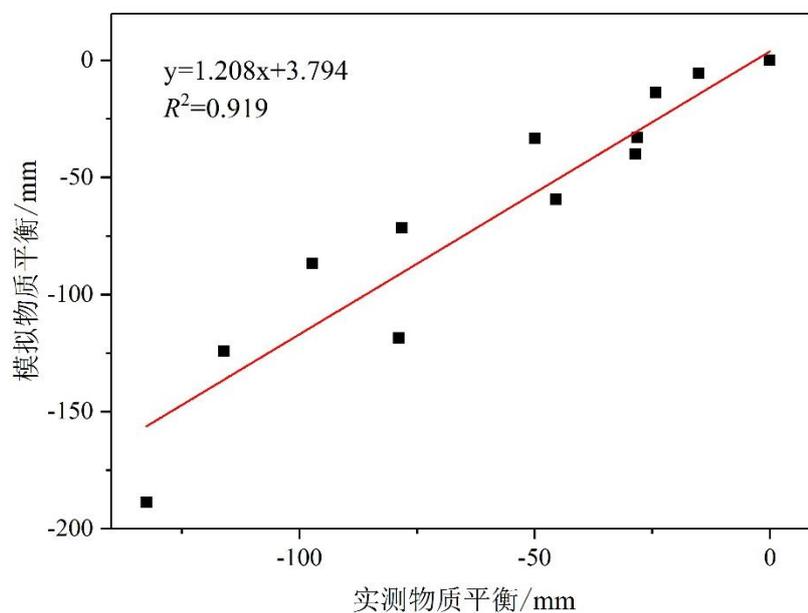


图 5.21 赛道物质平衡实测值与模拟值关系

Figure 5.21 Relationship between measured and simulated values of track mass balance

固然，滑雪场赛道积雪存在升华效应，但在观测期内赛道积雪升华量度对赛道积雪物质平衡的影响程度远小于气温。因此，滑雪场赛道积雪升华效应忽

落不计。

## 5.8 本章小结

观测期内赛道有效深度密度范围为  $220 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ~ $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，赛道平均密度为  $385 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；赛道密度基本上呈现出随深度的增加而减小的趋势，密度梯度为  $-6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；赛道密度与赛道温度、赛道含水率、气温、风速有关，且赛道雪质在外界自然因素影响下，赛道温度最先响应，然后影响含水率，最后影响密度， $0^\circ\text{C}$  最高气温为赛道密度发生显著变化的阈值点。观测期内赛道最高温度为  $-3.8^\circ\text{C}$ ，最低温度为  $-18.8^\circ\text{C}$ ，平均温度为  $-10.0^\circ\text{C}$ ；赛道温度是由气温、风速、地温三种要素控制，且与日均温呈现较好的正相关性。赛道含水率范围为  $0.59\%$ ~ $4.81\%$ ，平均值为  $2.62\%$ ；赛道含水率整体上呈现随深度增加而增大的趋势，赛道含水率受外界气象因素的影响较大， $0^\circ\text{C}$  最高气温为赛道含水率发生显著变化的阈值点。观测期内赛道孔隙率保持在  $0.33\%$ ~ $1.57\%$ ，平均孔隙率为  $0.83\%$ ，且孔隙率符合正态分布；赛道孔隙率随深度的增加而增加，但变化幅度小，基本一致。观测期内赛道雪粒径范围为  $0.29\text{mm}$ ~ $1.21\text{mm}$ ，雪质以粉雪和细粒雪为主。赛道硬度范围为  $4.5\text{N}$ ~ $68.0\text{N}$ ，整层赛道硬度上下波动较大，一致性较差，且有效赛道雪层内，赛道硬度差异性较大，不满足冬奥会赛道标准；依据赛道密度与硬度的关系，得知冬奥会赛事要求的冰状雪赛道硬度应在  $70\text{N}$  以上。观测期内，赛道物质平衡度日因子（DDF）范围为  $2.1$ ~ $6.1 \text{ mm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，平均值为  $3.4 \text{ mm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

## 第6章 赛道及储雪试验评估

以上论述了我国竞技型滑雪场赛道雪质的现状,给出赛道雪质量化数据,填补了竞技型滑雪场赛道雪质无具体指数的空白,并对其在气象要素影响下的变化机理进行研究,找出了影响雪质变化的主要影响因素,另外分析得出赛道雪质变化监测、预测的阈值点和重要参数。接下来,针对我国竞技型滑雪场赛道雪质现状进行评估,找出不足点以及与国际雪联要求赛道标准的差距,为提升我国滑雪场赛道质量提供方向和数据依据。依据国内储雪试验和积雪存储试验观测数据,对储雪试验的成效进行评估,探究目前储雪方案和技术的效果,并针对性的提出相关建议。

### 6.1 赛道制作评估

赛道制作是提供高质量赛道雪质的重要前提,也是满足国际雪联要求的重要途径。我国竞技型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。由图 6.1 可知,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。赛道铺设前,人造雪堆积,上下密度变化大,原因是上层人造雪在外界环境影响下理化性质变化比下层大,上层积雪密度最大为  $360 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,但整体密度偏小平均值为  $286 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。赛道铺设完成后,赛道密度增大,平均值为  $403 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $0\sim 15 \text{ cm}$  赛道深度平均密度为  $432 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $20 \text{ cm}\sim 50 \text{ cm}$  赛道深度平均密度为  $375 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。国内赛道制作采用一次性压实铺设方法,致使赛道整体密度大小不同,上层密度相对于下层较大,整体一致性较差,因而造成很多不利影响,一方面不能提供均质赛道而影响前后出发运动员的赛道质量,降低了比赛的公平性,不符合国际赛事标准;另一方面赛道上层密度大,下层密度小,增加了赛道坡体的不稳定性,赛道风险增加。此外,从造雪机进行人工造雪至压雪机铺设雪道,国内雪场用时较长,通常存在隔日作业等问题,没有快速进行赛道场地铺设和积雪压实。结果造成积雪理化性质发生改变,为后续赛道铺设及积雪烧结增强作用产生较大影响。因此,我国竞技型滑雪场赛道制作方面应在制作初期阶段予以重视。

根据目前我国竞技型滑雪场赛道制作方法以及压雪机对人造雪的压缩能力（压力为 3.5—5 kPa），提出相应的改进措施。在人工造雪方面，每次造雪深度不超过 20 cm，压雪机对每层积雪压实 3—5 次，促使赛道积雪密度增大，逐层铺设赛道直至赛道深度及赛道质量符合国际赛事标准；在赛道静置方面，赛道铺设完成后对赛道进行静置烧结，以提高赛道积雪强度。

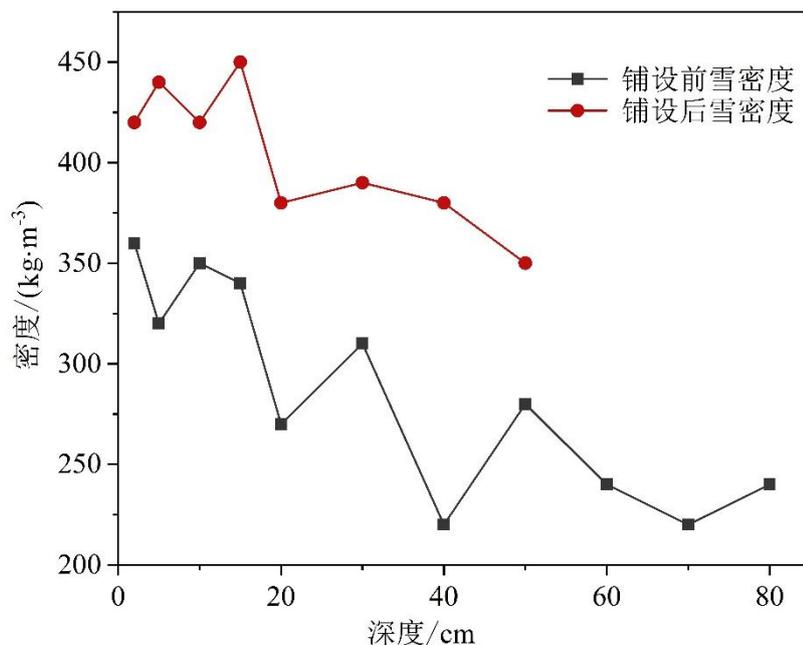


图 6.1 赛道铺设前后密度随深度的变化

Figure 6.1 Variation of density with depth before and after track laying

## 6.2 赛道雪质评估

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。冬奥会雪上项目对气象条件有特殊的要求，气温高于 5 °C、低于 -20 °C、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、是否延期甚至是否取消比赛。赛事对赛道厚度有定量标准，以平均赛道厚度 50 cm~60 cm 为最佳（郝晓华等，2009）。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 6.1）。另外，赛道涉及定性标准，如颗粒状、含水率较小的积雪，主要用于越野滑雪、冬季两项赛事；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 6.1 雪密度列表

Table 6.1 Snow density list

种类/用途	密度/ $\text{kg m}^{-3}$
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	$\geq 500$
世界杯及更高级别赛事赛道用雪	540~560

注：资料来源：[http://ccsam.ca/wpcontent/uploads/2011/09/grooming\\_CCC\\_CoursePrep\\_Trackseting3.4.pdf](http://ccsam.ca/wpcontent/uploads/2011/09/grooming_CCC_CoursePrep_Trackseting3.4.pdf)

我国竞技型滑雪场赛道雪质受外界气象因素影响，总体呈现随时间和空间变化的状态。因此，选取 2017 年 3 月 3 日至 2017 年 3 月 10 日较好雪质时间段对万龙滑雪场赛道雪质进行整体评估。观测期间万龙滑雪场气温为  $-17.7\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最高、最低气温符合国际赛事标准；滑雪场赛道厚度为  $58.6\text{ cm}\sim 120.0\text{ cm}$ ，满足赛事要求的标准赛道厚度；赛道密度为  $410\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\sim 550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  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，且赛道上下密度一致性也较差，不满足国际赛事赛道要求；赛道含水率为  $0.79\%\sim 2.54\%$ ，赛道积雪属于潮雪，无法满足雪上项目中着落区、停止区等较大含水率的需求。赛道硬度范围为  $4.5\text{ N}\sim 68.0\text{ N}$ ，能够满足普通赛事赛道硬度要求，但对于冰状雪赛道的  $70\text{ N}$  以上标准，目前赛道硬度不够。

### 6.3 储雪试验评估

人工储雪是指将人造雪集中堆放，并在其表层覆盖具有隔热效果的材料，使其不受外界气象因素影响，以达到积雪的存储和在极端天气条件下赛道应急用雪需求，如图 6.2 所示。在北京奥组委领导下，北京京奥建设有限公司及哈尔滨体

育学院于 2017 年 3 月在北京延庆区石京龙滑雪场开展了人工积雪存储试验，并于 2017 年 3 月 8 日建成 3 个储雪试验堆。



图 6.2 储雪试验人工雪堆

Figure 6.2 Snow storage test of artificial snow reactor

### 6.3.1 试验雪堆保温层

主雪堆保温盖层为表层土工织布（0.5 cm 厚度）+多层铝箔 PE 保温层（0.5 cm—3.0 cm）+底部土工织布的三元结构，其中雪堆南北两侧为表面 2 层土工织布+3 层 PE 覆膜保温层+底部 2 层土工织布；雪堆东西侧为表面 1 层土工织布+2 层铝箔 PE 保温层+2 层土工织布；雪堆顶部为表面 3 层土工织布+2 层铝箔 PE 保温层+3 层 PE 保温层+底部 3 层土工织布。主雪堆底部铺设两层 7.5 cm 厚度的高密挤塑板，隔绝地热输入。

西侧小雪堆保温层仅为土工织布，其中南北两侧及顶部为 2 层，东西两侧为 1 层。东侧小雪堆保温盖层为表层土工织布+多层草帘保温层（单层厚度约为 3 cm）+底部土工织布的三元结构，其中南西侧为 2 层草帘保温层+1 层土工织布；北东侧为 1 层草帘保温层+1 层土工织布；顶部为 5 层草帘保温层。两个试验雪堆均未铺设底部保温层。

### 6.3.2 储雪试验评估与分析

试验储雪堆包括主雪堆、西侧小雪堆和东侧小雪堆，雪堆建成后，利用无人机对其初始形态和体积进行了测量，如表 6.2 所示。

表 6.2 储雪堆形态要素和体积量

Table 6.2 Shape elements and volume of snow storage reaches

	平均高度/米	平均坡度/度	体积/立方米
主雪堆	11.12	62.9	13 606.5
西侧小雪堆	4.69	60.8	266.498
东侧小雪堆	4.63	61.6	203.129

在人工储雪堆建成后进行过 2 次无人机测量，分别为 2017 年 3 月 8 日（如图 6.3）、2017 年 4 月 8 号（如图 6.4）。

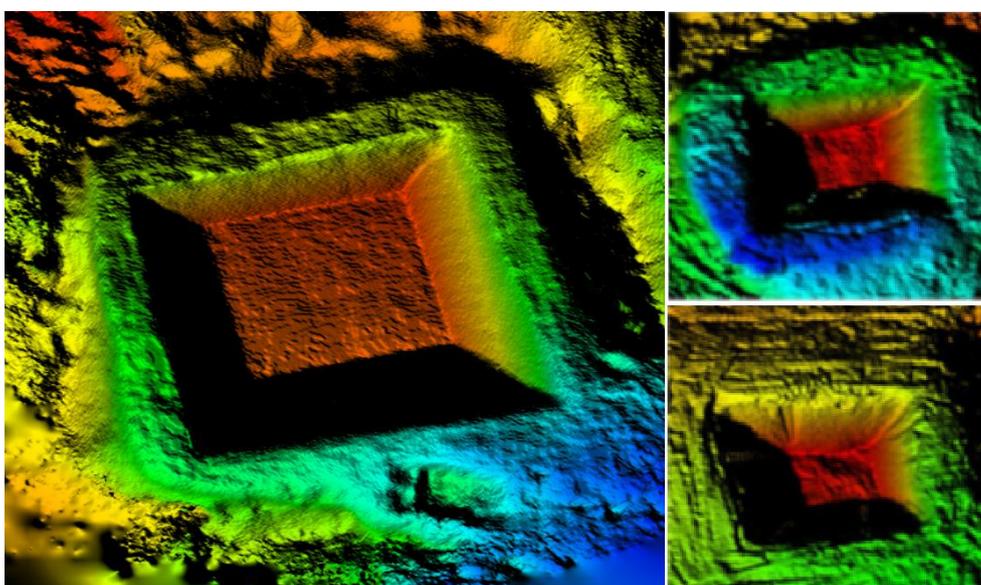


图 6.3 储雪堆数字高程模型（假彩色高程渲染）

左侧为主雪堆、右上为西侧小雪堆、右下为东侧小雪堆

**Figure 6.3** Digital elevation model of snow storage reactor (false color elevation rendering)

The main snowdrift is on the left, the small snowdrift on the west is on the upper right and the small snowdrift on the East is on the lower right.

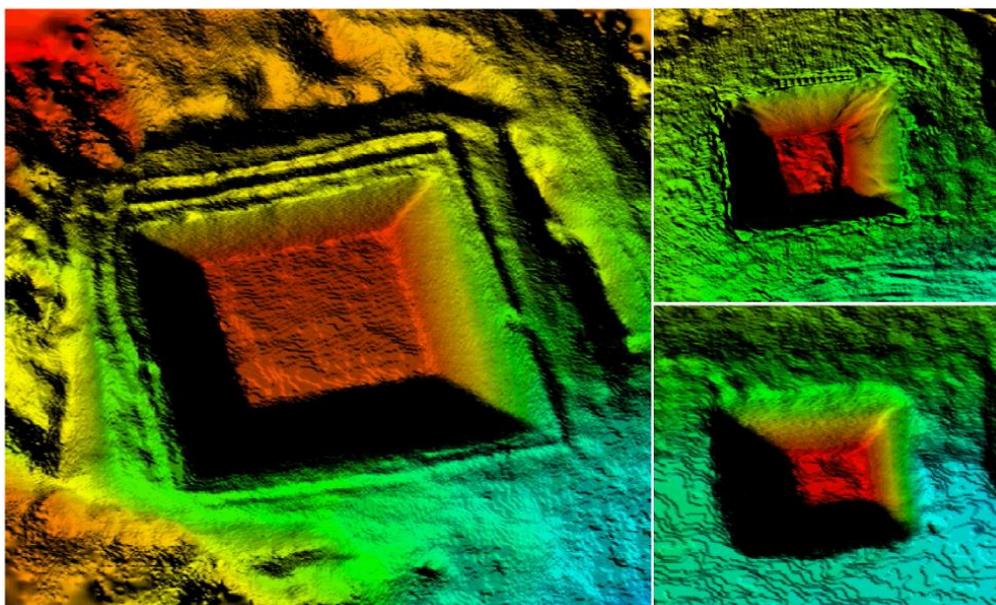


图 6.4 储雪堆数字高程模型（假彩色高程渲染）

左侧为主雪堆、右上为西侧小雪堆、右下为东侧小雪堆

Figure 6.4 Digital elevation model of snow storage reactor (false color elevation rendering)

The main snowdrift is on the left, the small snowdrift on the west is on the upper right and the small snowdrift on the East is on the lower right

表 6.3 储雪堆形态要素变化

Table 6.3 Change of Shape Elements of Snow Storage Reaches

	高度变化量/米	高度变化率	体积变化量/立方米	体积变化率
主雪堆	-0.13	-1.17%	-1 258.9	-9.3%
西侧小雪堆	-0.23	-4.90%	-76.6	-28.8%
东侧小雪堆	-0.17	-3.67%	-25.5	-12.6%
无保温层雪堆	-1.90	-79.0%	-131.6	-94.4%

两次测量储雪堆高度与体积变化数据，如表 6.3 所示。通过储雪堆高度和体积量变化可以看出，3 月 8 日至 4 月 8 日主储雪堆的积雪剩余量为 90.7%、西侧小储雪堆为 61.2%、东侧小储雪堆为 87.4%。主储雪堆顶部采用了较厚的保温层，致使其顶部积雪消融少，储雪堆高度变化和体积变化较小；西侧小储雪堆只采用简单的保温措施，且土工织布的导热系数较高 ( $k < 0.064$ )，积雪损失率较大；东侧小储雪堆采用土工织布+编织草帘的保温措施，中空的麦秆和多层草帘间的大量空隙较大程度上削弱热量的传导，雪堆积雪较低的温度抑制了空

隙中热对流的发展,因此保温效果超过预期值。作为比较,同时计算了东侧小储雪堆旁无保温措施雪堆的消融情况,可以得知,无保温措施的积雪在外界气象条件影响下快速消融,月消融量约为95%。

然而,储雪堆形态和体积的变化量不是评判储雪试验成效的唯一标准,还需要研究雪堆中雪质的变化。由于积雪是冰和空气的混合物,内部存在大量空隙,按照目前雪堆现状,当表面积雪消融后,雪融水沿纵向空隙向下转移,一部分被深层雪粒吸附,一部分在积雪冷储的条件下逐渐冻结。融水的迁移造成储雪堆冷储减少,温度逐步升高,积雪含水率增大,雪粒直径增长,致使雪面形成冰层,雪堆内部和底部含冰量也不断增加,储雪堆密度不均一。储雪结束后,储雪堆剩余量不足80%,且积雪雪质发生很大变化,能否直接铺设赛道还是未知数。因此,积雪雪质的保持是人工储雪的核心,在往后的储雪试验和储雪方案方面要给予关注。

目前,储雪试验的最大不足是储雪方案和采用的保温材料未能形成有效的热流屏障,大量热能得以穿透保温层进入储雪堆内部,随着储雪堆冷储的减少,储雪堆平均温度升高,即使外界气温稳定不变,储雪堆内部积雪消融量也会不断增加,进而造成积雪雪质变差。因此,探究和试验更加优异的储雪方案和保温材料是当前人工储雪的重点。

#### 6.4 本章小结

国内赛道制作采用一次性压实铺设方法,赛道整体密度大小不同,上层密度相对于下层较大,整体一致性较差,不利影响较多;从造雪机进行人工造雪至压雪机铺设雪道,国内雪场用时较长,通常存在隔日作业等问题,没有快速进行赛道场地铺设和积雪压实,造成积雪理化性质发生改变,为后续赛道铺设及积雪烧结增强作用产生较大影响。我国竞技型滑雪场赛道雪质受外界气象因素影响,总体呈现随时间和空间变化的状态。观测期间万龙滑雪场气温为 $-17.7\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高、最低气温符合国际赛事标准;滑雪场赛道厚度为 $58.6\text{ cm}\sim 120.0\text{ cm}$ ,满足赛事要求的标准赛道厚度;赛道密度为 $410\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\sim 550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 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,且赛道上下密度一致性也较差,不满足国际赛事赛道要求;赛道含水率为

0.79%~2.54%，赛道积雪属于潮雪和湿雪，无法满足雪上项目中着落区、停止区等较大含水率的需求；赛道硬度范围为 4.5 N~68.0 N，能够满足普通赛事赛道硬度要求，但对于冰状雪赛道的 70 N 以上标准，目前赛道硬度不够。目前，储雪试验的最大不足是储雪方案和采用的保温材料未能形成有效的热流保障，大量热能得以穿透保温层进入储雪堆内部，随着储雪堆冷储的减少，储雪堆平均温度升高，即使外界气温稳定不变，储雪堆内部积雪消融量也会不断增加，进而造成积雪雪质变差，因此，探究和试验更加优异的储雪方案和保温材料是当前人工储雪的重点。

## 第7章 赛区气候变化风险评价

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。气温和降水是主要的气象影响要素，因此，本研究以气温和降水变化开展风险评价。

### 7.1 赛时历史气候变化

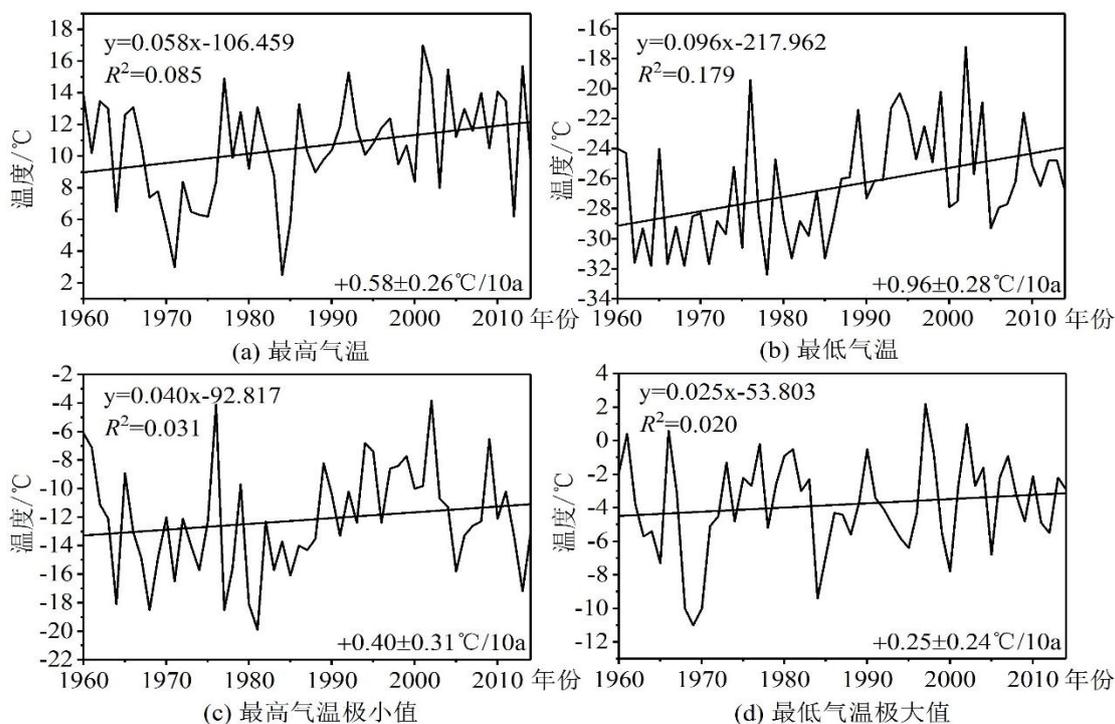
赛时历史气候变化是指冬奥会赛事时间段多年的气候变化，选取赛事时间段更加有针对性的探究该时间段气候变化对赛道雪质的影响状况，进而对其进行风险评价。

#### 7.1.1 气温变化

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（如图 7.1），增加幅度分别为  $+0.58\pm 0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.96\pm 0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.40\pm 0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.25\pm 0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。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  $\leq -15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的寒冷天气出现概率达 52.9%，日最低气温  $\leq -20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  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  $-32.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ （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  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下，但会出现日平均气温  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上或者日最高气温  $\geq 5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况，崇礼县日最高气温  $\geq 5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的天气出现概率为 20.3%，曾出现过  $17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ （2001 年 3 月 13 日）的极端最高气温。

滑雪场适宜人工造雪的气温条件为  $\leq -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，高温风险，一方面无法满足人工造雪条件，增大了赛道用雪风险；另一方面，气温过高，加速赛道积雪消融，进而影响赛道质量。极寒风险，一方面降低人体的体感温度，影响赛时运

动员舒适度 (Rammsayer T H 等, 1995), 进而影响比赛成绩; 另一方面, 寒冷天气影响观赛群众的热情度。如 2018 年韩国平昌冬奥会, 大风降温天气造成赛事部分项目推迟甚至被迫取消; 此外, 赛事观赛群众量少, 赛场气氛过于冷清, 不利于促进全民冰雪运动的发展。



**图 7.1** 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

**Figure 7.1** Change trends of maximum temperature, minimum temperature, maximum temperature minimum and minimum temperature maximum in Chongli County during the competition period

### 7.1.2 降水变化

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 (如图 7.2)。增加幅度分别为  $+0.004 \pm 0.76$  mm/10a、 $+0.19 \pm 0.10$  mm/10a、 $+0.37 \pm 0.30$  mm/10a、 $+0.39 \pm 0.43$  mm/10a。通过 Mann-Kendall 趋势检验 ( $Z = \pm 1.96$ , 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, 一方面, 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清除; 另一方面, 造成赛道

上下密度差异性增大，上层自然积雪在外界影响下部分消融，液态水下渗至自然雪和赛道雪界面，润滑两者之间的界面，加大赛道结构不稳定性，上层自然积雪在外力作用（如滑雪者、机械等）扰动下，易引发“雪崩”造成极大损失。赛时降水，一方面，促使赛道表面结冰，对赛道雪质具有毁灭性影响，也加大运动员受伤的风险；另一方面，降水致使空气湿度增大，在较高相对湿度的条件下加大赛时造雪难度，为赛时补雪增加困难。

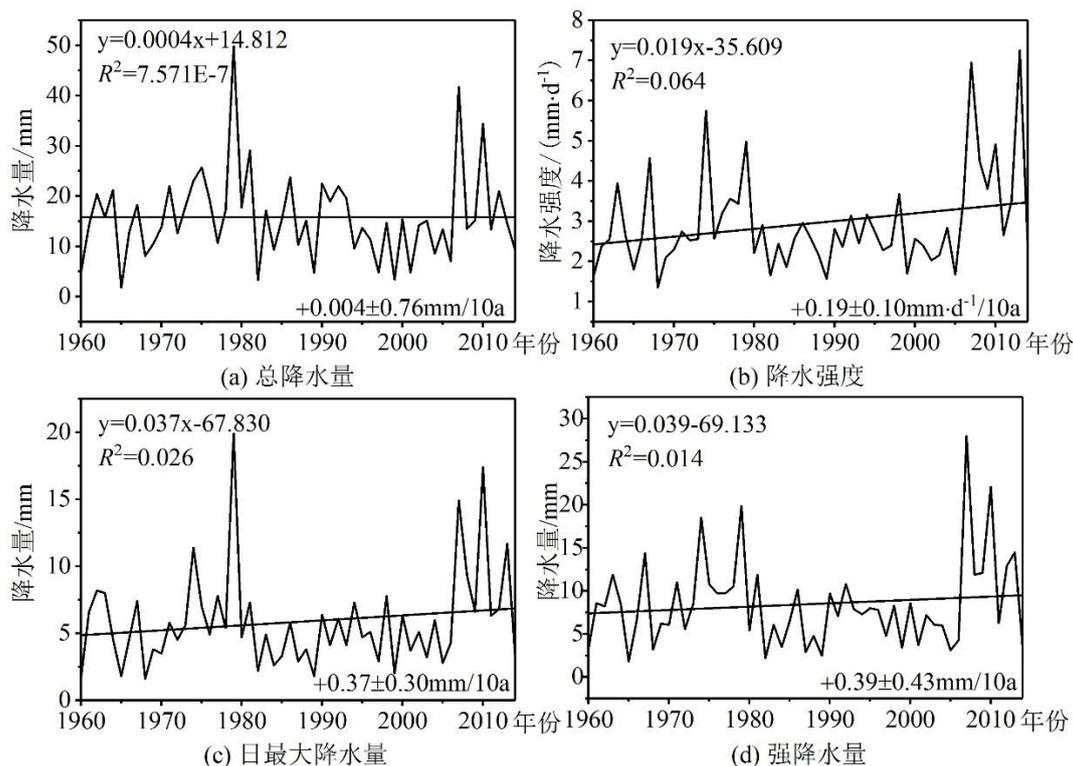


图 7.2 赛期崇礼县总降水量、降水强度、日最大降水量、强降水量变化趋势

Figure 7.2 Change trends of total precipitation, precipitation intensity, daily maximum precipitation and heavy precipitation in Chongli County during the competition period

此外，其他高影响天气（如雾、霾和沙尘天气）也存在一定风险。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。沙尘天气降低赛道能见度，进而影响赛事运动员安全性。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。

面对极端天气的影响，提前制定雪务保障计划显得尤为重要。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，因此，为保证冬奥会赛事的顺利进行，先期进行积雪的存储是必要的，应及早开展储雪试验，在不同滑雪场开展属地化人工储雪试验，进而确定合理可行的储雪方案。

## 7.2 赛区历史气候变化

针对赛区历史气候变化研究，从整体上探究赛区气候变化特性，分析其多年变化趋势，进而预测冬奥会赛时赛区气候状况，为气候预测和相应措施的提出提供科学数据依据。

### 7.2.1 气温变化

气温年变化。1960—2014年崇礼赛区多年平均气温为 $3.7^{\circ}\text{C}$ ，总体上呈现增加趋势，增幅为 $+0.26\pm 0.09^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ （如图7.3）。从图中可以得知，1990年以前平均气温相对较低，年最低气温出现在1969年为 $2.4^{\circ}\text{C}$ ，随后气温迅速提升，1990—2000年增温幅度较大，年最高气温出现在1998年为 $5.3^{\circ}\text{C}$ ，之后气温出现降低趋势。

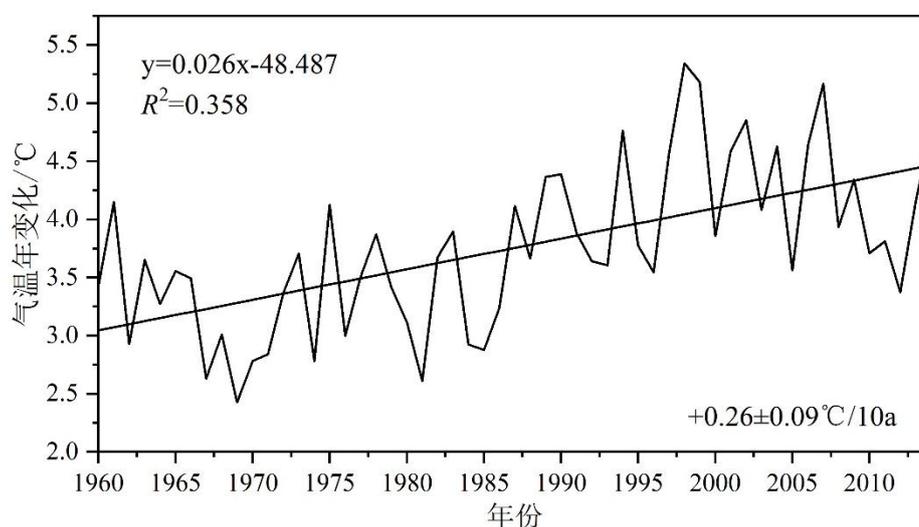


图 7.3 崇礼赛区气温年际变化

Figure 7.3 Annual variation of temperature in Chongli competition area

气温季节变化。如图7.4所示，1960—2014年崇礼赛区四季气温都呈现上升趋势，春夏秋冬气温的增加幅度分别为 $+0.23\pm 0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.23\pm 0.11^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.20\pm 0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.39\pm 0.24^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，其中冬季增温幅度最为明显。与气温年变化相比，1990年以前各季节平均气温相对较低，90年代增温幅度最大，之后又呈现下降趋势。

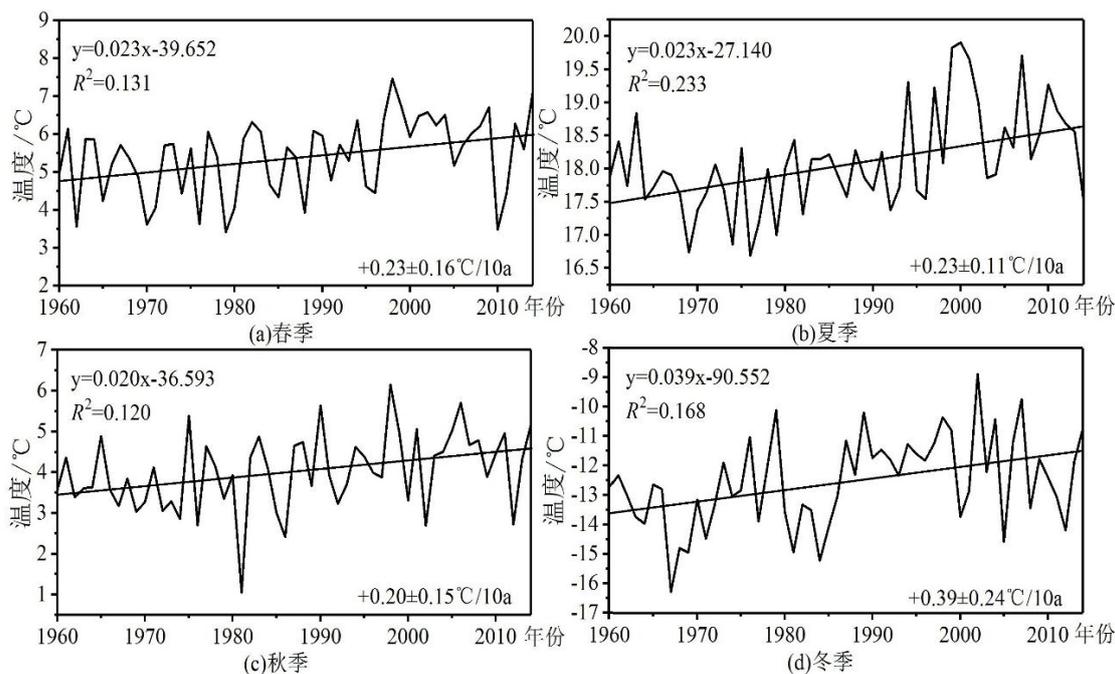


图 7.4 崇礼赛区气温季节变化

Figure 7.4 Seasonal variation of temperature in chongli competition area

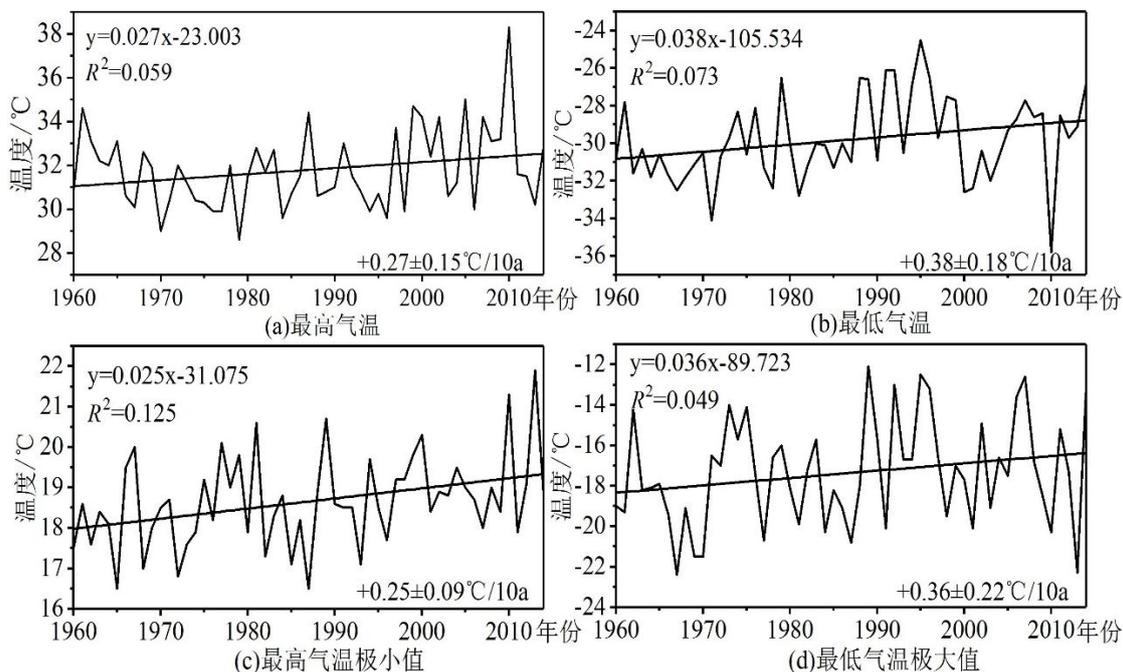


图 7.5 崇礼赛区最高气温、最低气温、最高气温极小值、最低气温极大值变化趋势

Figure 7.5 Change trends of maximum temperature, minimum temperature, maximum temperature minimum and minimum temperature maximum in Chongli competition area

极端气温变化。图 7.5 为崇礼赛区最高气温、最低气温、最高气温极小值、最低气温极大值的变化，都呈现出增加趋势，增加幅度分别为  $+0.27\pm 0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.38\pm 0.18^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.25\pm 0.09^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $+0.36\pm 0.22^{\circ}\text{C}$

/10a，其中最低气温增加趋势最明显。与气温相关的极端天气指数是气候变暖的表现形式，其变化趋势和年气温变化趋势一致，极端天气指数可以从不同的角度反映出崇礼赛区气候的变化特征。

### 7.2.2 降水变化

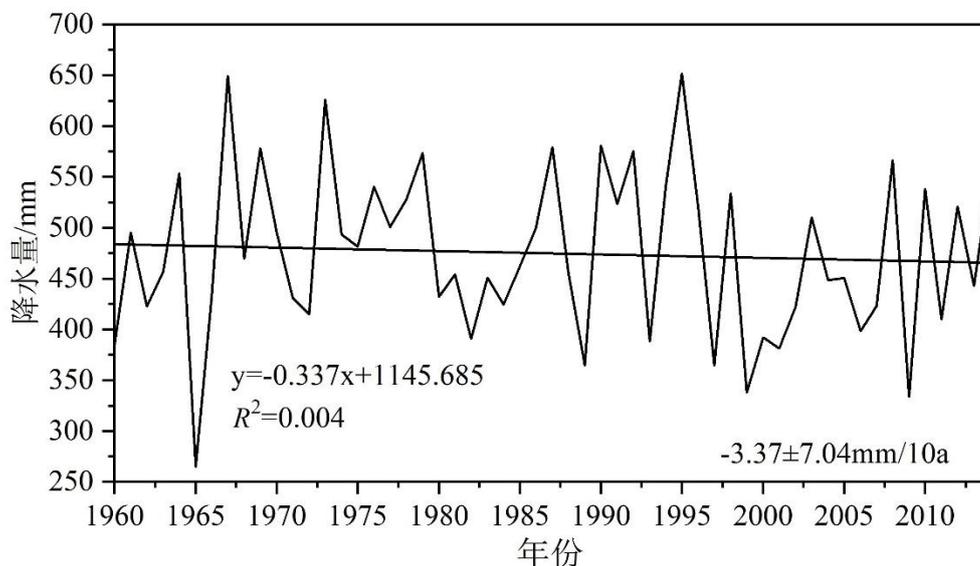


图 7.6 崇礼赛区总降水量年际变化

Figure 7.6 Interannual variation of total precipitation in Chongli competition area

降水年际变化。图 7.6 为崇礼赛区总降水量年际变化，由图可知，55 年来崇礼赛区降水总量呈现下降趋势，降低幅度为  $-3.37 \pm 7.04 \text{ mm/10a}$ ，降水量最低值出现在 1965 年为 263.0 mm，最高值出现在 1967 年为 650.0 mm，1967—1995 年总降水量增加幅度加大，1995 年后总降水量又呈现减小趋势。

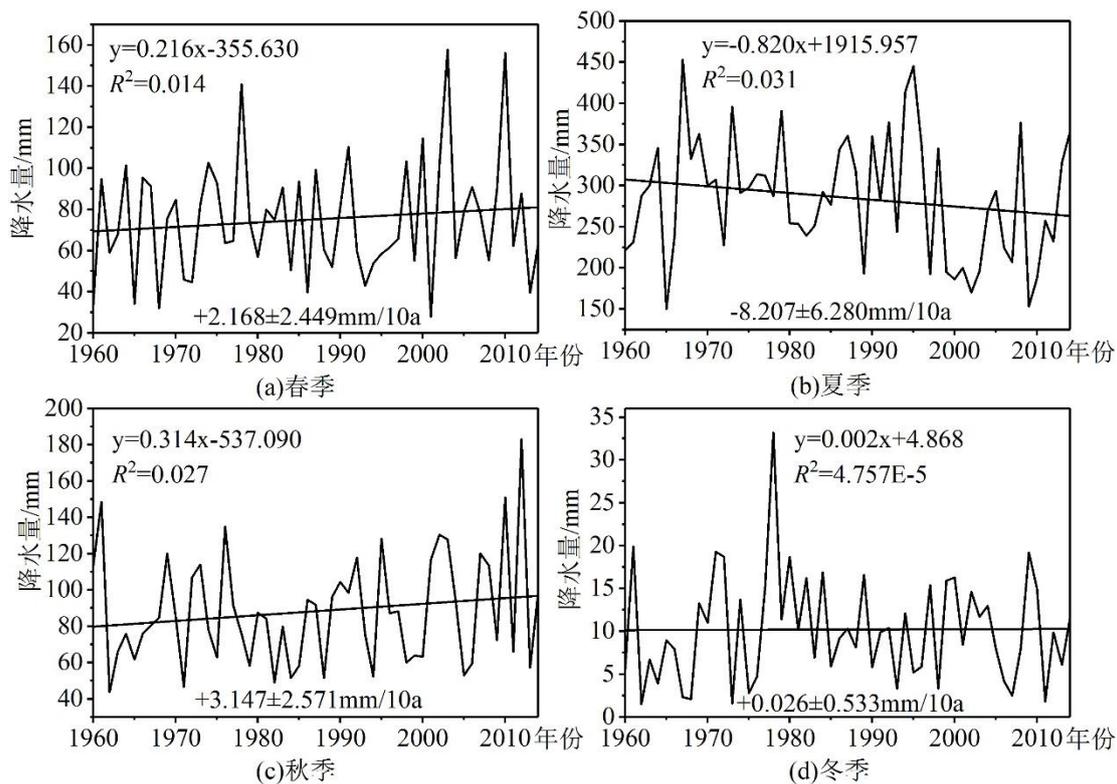


图 7.7 崇礼赛区降水量季节变化

Figure 7.7 Seasonal variation of precipitation in Chongli competition area

降水季节变化。如图 7.7 所示，1960—2014 年崇礼赛区春季、秋季、冬季降水量呈现上升趋势，增加幅度分别为  $+2.16\pm 2.44\text{ mm}/10\text{a}$ 、 $+3.14\pm 2.57\text{ mm}/10\text{a}$ 、 $+0.02\pm 0.53\text{ mm}/10\text{a}$ ，其中秋季降水量增幅最为明显，冬季增幅最小；夏季降水量呈现下降趋势，幅度为  $-8.02\pm 6.28\text{ mm}/10\text{a}$ 。

### 7.3 本章小结

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，最高气温，最低气温呈现显著上升趋势，最低气温上升趋势最明显；崇礼（县城）日最低气温  $\leq -15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的寒冷天气出现概率达 52.9%，日最低气温  $\leq -20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的概率达 24.5%，同时，崇礼县日最高气温  $\geq 5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的天气出现概率为 20.3%，高温风险和极端寒冷并存。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，日最大降水量、强降水量呈现显著上升趋势，强降水量上升趋势最为明显，强降雪和强降雨风险并存。赛区历史气候多年平均气温为  $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，总体呈上升趋势；四季气温都呈现上升趋势，冬季增幅最大。赛区历史降水量呈现下降趋势，春季、秋季、冬季降水量呈现

上升趋势，秋季增幅最为明显，冬季增幅最小，夏季降水量呈现下降趋势。

## 第8章 结论与展望

### 8.1 结论

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。冬奥会和冬残奥会的成功申办，对我国的冰雪运动、冰雪产业、经济发展、综合国力、科研技术、全民运动等都有巨大的重要意义。由于我国冰雪产业及科学研究仍然处于初级阶段，在基础、产业、技术设备、科研力量等与国际存在较大差距。在冬奥会的背景下，应抓住这次重大机遇，推进冰雪相关方面的发展和进步。因此，为充分了解我国竞技型滑雪场目前的赛道雪质及技术水平，科学研究我国竞技型雪场赛道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。本研究在河北省张家口崇礼区万龙滑雪场开展了赛道雪质观测试验，填补我国竞技型滑雪场无赛道雪质量化指标的空白，并结合赛道雪质特性和气象滚动监测，提出有助于解决冬奥会赛道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，对人工储雪方案以及对极端事件影响赛道雪质的天气和环境风险进行评价，为冬奥会开展风险防范措施研究。取得的主要结论如下：

观测期内滑雪场净辐射最大值为  $59.19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，最小值为  $13.69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，平均净辐射值为  $39.07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；最高气温为  $5.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最低气温为  $-17.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均气温为  $-3.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，累积正积温为  $230.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，累积正积温时数为  $113 \text{ h}$ ；山区复杂下垫面影响下，净辐射和气温存在一定的延迟性，相关系数  $R^2=0.319$  ( $P<0.01$ )，但总体上气温主要受太阳辐射的影响；昼夜温差范围为  $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}\sim 5.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均值为  $2.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度范围为  $15\%\sim 90\%$ ，结合日气温变化特性，适宜人工造雪的时间点为  $21:00\text{—}6:00$  时，在气温相对较低的时期，全天都适合进行人工造雪。观测期内风速范围为  $3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\sim 9.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，依据风速风级划分，风速为1级至5级，以2级至3级微风为主，雪场的风速满足人工造雪所需的风速要求。

观测期内滑雪场赛道温度、含水率、密度变异系数分别为  $0.342$ 、 $0.278$ 、 $0.243$ ，在一定程度上反映雪层雪质受外界自然因素影响下，赛道温度最先响应，其次为含水率，最后为密度。赛道雪层温度变化和气温变化趋势大体一

致，赛道最高温度为 $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最低温度为 $-18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均温度为 $-10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，赛道平均温度与日均温呈现较好正相关性，相关系数为 $R^2=0.761$  ( $P<0.01$ )。雪层温度是由气温、风速、地温三种要素控制。

观测期内整个赛道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赛道密度随深度发生变化。赛道密度存在阶段性，较好时间段赛道密度范围为 $410\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\sim 550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均密度为 $473\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，雪层密度相对较大，但数值上下波动，稳定性较差，不符合冬奥会赛时赛道要求；较差时间段赛道密度范围为 $220\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\sim 350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均密度为 $298\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。赛道平均密度与日均温及滑雪场平均温度具有较好正相关性，相关系数分别为 $R^2=0.526$  ( $P<0.01$ )， $R^2=0.636$  ( $P<0.01$ )。赛道密度突变阶段与正积温和逐小时气温大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时数存在一定关系，赛道密度突变阶段正积温为 $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，逐小时气温大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时数为 $19\text{ h}$ ，研究结果在一定程度上为赛道雪质维持和监测提供参考依据。赛道密度与赛道温度、赛道含水率、气温、风速有关。

赛道含水率与气温和赛道温度的变化趋势大体一致。赛道含水率范围为 $0.59\%\sim 4.81\%$ ，平均值为 $2.62\%$ ，赛道积雪以潮雪和湿雪为主。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气温是赛道含水率发生显著变化的阈值点，与赛道密度发生显著变化的阈值点相吻合。当日最高气温小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，赛道含水率微弱升高，含水率维持在 $0.70\%\sim 1.60\%$ ，增幅不大；当日最高气温大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，赛道雪层出现快速湿化现象，赛道积雪由潮雪转化为湿雪，随着温度的升高，赛道含水率波动较为明显，最大含水率为 $4.10\%$ ，赛道含水率受外界气象因素的影响较大。

观测期内赛道孔隙率保持在 $0.33\%\sim 1.57\%$ ，平均孔隙率为 $0.83\%$ 。赛道孔隙率与气温和赛道温度的变化趋势基本一致，温度下降时赛道孔隙率随之下降，反之上升。赛道孔隙率与日均温存在正相关性，相关系数 $R^2=0.634$  ( $P<0.01$ )。赛道孔隙率符合正态分布， $\text{Mean}=0.858$ ， $\text{SD}=0.237$ ，孔隙率主要集中在 $0.50\%\sim 1.25\%$ 。

滑雪场赛道积雪主要以人造雪为主，雪粒径相较于自然积雪存在一定的差异性。赛道积雪在 $0\sim 50\text{ cm}$ 深度，雪粒径逐步增大，表面雪粒径最小为 $0.29\text{ mm}$ ， $50\text{ cm}$ 处雪粒径最大为 $1.21\text{ mm}$ ； $50\text{ cm}\sim 70\text{ cm}$ 雪粒径逐步减小， $70\text{ cm}$ 处雪粒径为 $0.59\text{ mm}$ ，赛道平均雪粒径为 $0.67\text{ mm}$ 。根据积雪分类标准，我国竞

技型雪场赛道积雪以粉雪和细粒雪为主。

赛道整层硬度上下波动比较明显, 硬度范围为 4.5 N~68.0 N, 一致性较差, 有效赛道雪层内, 赛道硬度差异性较大, 不满足冬奥会赛道标准。赛道密度和硬度存在较好的相关性, 相关系数为  $R^2=0.894$  ( $P<0.01$ )。依据赛道密度和硬度的关系, 可以得知冬奥会部分项目要求的冰状雪赛道硬度应在 70 N 以上。

观测期内赛道物质平衡上下波动变化, 出现过 7 次较强消融事件, 平均物质平衡为  $-63.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , 累积物质平衡为  $-694.6 \text{ mm}$ 。赛道物质平衡和正积温存在显著负相关性, 相关系数为  $R^2=0.854$  ( $P<0.01$ )。依据赛道物质平衡和正积温的关系, 为赛道消融状况提供高分别率量化数据以及人工造雪补给量化指标。观测期内赛道物质平衡度日因子 (DDF) 范围为  $2.1\sim 6.1 \text{ mm}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , 平均值为  $3.4 \text{ mm}\cdot\text{°C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , 物质平衡模拟值与实测值具有较好的相关性, 相关系数为  $R^2=0.919$  ( $P<0.01$ )。

国内滑雪场赛道制作采用一次性压实铺设方法, 致使赛道整体密度大小不同, 一致性较差, 不满足冬奥会赛事赛道要求。人工造雪至铺设雪道, 国内雪场用时较长, 存在隔日作业等问题, 没有快速进行场地铺设和积雪压实, 造成积雪理化性质发生改变, 为后续赛道铺设及积雪烧结增强作用产生较大影响。

我国竞技型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。赛道雪质较好时间段内万龙滑雪场气温为  $-17.7\text{°C}\sim 3.1\text{°C}$ , 最高、最低气温符合国际赛事标准; 滑雪场赛道厚度为  $58.6 \text{ cm}\sim 120.0 \text{ cm}$ , 满足赛事要求的标准赛道厚度; 赛道密度为  $410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\sim 550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  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, 且赛道上下密度一致性也较差; 赛道含水率为  $0.79\%\sim 2.54\%$ , 属于潮雪和湿雪, 无法满足雪上项目中着落区、停止区等较大含水率的需求。赛道硬度范围为 4.5 N~68.0 N, 能够满足普通赛道硬度要求, 但对于冰状雪赛道的 70 N 以上标准, 目前赛道硬度不够。

目前, 储雪试验的最大不足时未能形成有效的热流屏障, 大量热能得以穿透保温层进入雪堆内部, 随着雪堆冷储的减少, 雪堆平均温度升高, 即使外界气温稳定不变, 雪堆内部积雪消融量也会不断增加, 雪质变差。因此, 探究和试验更加有利于储雪的方案和保温材料是当前人工储雪的重点。

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，其中最低气温上升趋势最明显。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，强降水量上升趋势最明显。赛区历史气候多年平均气温为 $3.7^{\circ}\text{C}$ ，总体呈上升趋势；四季气温都呈现上升趋势，冬季增幅最大。赛区历史降水量呈现下降趋势，春季、秋季、冬季降水量呈现上升趋势，秋季增幅最为明显，冬季增幅最小，夏季降水量呈现下降趋势。

## 8.2 展望

赛道雪质最关键的参数是赛道硬度和赛道厚度，赛道硬度由赛道密度、温度、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，国内人工造雪机以大孔径为主，存在造雪速度快，耗能少等优点，但是也存在人造雪雪质差，浪费水等缺点。冬奥会赛事需要的特殊冰状雪对积雪要求高，因此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、赛道雪质及雪量变化；探究气象因子影响造雪效率和赛道雪质的关系，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赛道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，提前应对滑雪场赛道雪务风险；建立冬奥会赛事窗口期极端天气气候事件预警机制和应急预案，开展雪冰条件保障风险管理；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，分析影响冬奥会滑雪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。

成功举办冬奥会是我国对国际奥林匹克的庄严承诺，同时是增强我国软实力和国际影响力的重要举措，举办冬奥会将会极大推动我国冰雪运动产业的发展，带动中国经济的进一步发展。通过冬奥会赛事场地雪冰保障及其风险管理研究，系统分析影响我国冰雪运动、冰雪旅游及冰雪产业发展的关键驱动因子，进而制定符合我国冰雪产业发展规划，以发挥冬奥会国际赛事会后扩散效应，使“冬奥遗产”可持续利用。与此同时，推动冰冻圈科学实验研究平台、人才培养、科学技术合作以及相关学科发展，将冰冻圈科学理论研究成果切实运用到国家项目、国家经济发展中来。



## 参考文献

- 曹志, 范昊明. 我国东部低山区不同坡位积雪特征性研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 989-996.
- 储国儒. 培强崇礼滑雪产业, 争办全国冬运盛会[J]. 经济论坛, 2007, 6: 29-30.
- 单兆鉴. 人类滑雪起源地: 中国·新疆·阿勒泰[M]. 北京: 人民体育出版社, 2011.
- 付宏. 北京成为申办 2022 年冬奥会候选城市的地理优势分析[J]. 中学地理教学参考, 2015(5): 44-45.
- 高培, 魏文寿, 刘明哲, 等. 天山西部季节性积雪密度及含水率的特性分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 786-793.
- 顾久贤. 2022 年冬奥会的举办对区域消费需求与行为影响的研究—以河北冰雪体育旅游为分析个案[J]. 体育与科学, 2016, 37( 3): 114-120.
- 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(1): 52.
- 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.
- 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.
- 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, 地理学报, 2014, 69(3): 365-377.
- 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.
- 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.
- 李金早. 发展冰雪旅游, 让冰天雪地变成金山银山[EB/OL]. 中国日报网. [2017-07-19]. [http://www.chinadaily.com.cn/interface/360/1072261/2017-07-20/cd\\_30182329.html](http://www.chinadaily.com.cn/interface/360/1072261/2017-07-20/cd_30182329.html).
- 李菁. 气象条件对人造雪活动的影响. 中国天气网, DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.024
- 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.

- 梁林, 颜雄. 北京申办冬奥会的 SWOT 分析[J]. 军事体育学报, 2015, 34(1): 104-108.
- 刘文仲. 河北崇礼滑雪旅游产业结构优化对策研究[D]. 石家庄.: 河北师范大学, 2011.
- 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与时间变化特征[J]. 地理研究, 2011, 30(7): 1244-1253.
- 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.
- 吕婵, 麻冬梅, 姚世庆, 等. 我国部分地区滑雪场发展现状及对策研究[J]. 哈尔滨体育学院学报, 2012, 30(4): 35-39.
- 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.
- 苗春竹. 我国滑雪产业的 SCP 范式分析[J]. 体育文化导刊. 2018, 2(2): 99-103.
- 孙海泉, 刘润珍, 谢君. 张家口市滑雪旅游产业地理优劣势分析研究[J]. 中学地理教学参考, 2014(18): 67-68.
- 孙威, 刘明亮. 我国冰雪消费及相关产业发展的对策研究[J]. 北京体育大学学报, 2009, 32(11): 11-14.
- 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.
- 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.
- 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.
- 魏文寿, 秦大河, 刘明哲. 中国西北地区季节性积雪的性质与结构[J]. 干旱区地理, 2001, 24(4): 310-313.
- 魏玥, 陈蜀江, 陈霞. 新疆北部地区季节性积雪密度变化特性分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 519-523.
- 吴晓华. 非运动技术因素对越野滑雪成绩的影响[J]. 体育科技, 2013(5): 47-49.
- 希爽, 张志富. 中国近 50a 积雪变化时空特征. 干旱气象, 2013, 31(3): 451-456.
- 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.
- 谢勇, 等. 吉林省滑雪运动气象指数的讨论. 第 32 届中国气象学会年会, 2015.

- 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.
- 许启慧, 范引琪, 于长文, 等. 滑雪场建设气候条件分析[J]. 气象科学, 2014, 42(5): 938-944.
- 杨建明, 万春燕. 全球气候变化对冬季滑雪旅游的影响[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 356-361.
- 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.
- 张瑞林. 我国冰雪体育产业商业模式建构与产业结构优化[J]. 体育科学, 2016, 36(5): 18-23.
- 张伟, 沈永平, 贺建桥, 等. 阿尔泰山融雪期不同下垫面积雪特性观测与分析研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 491-499.
- 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.
- 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.
- Andrey Koptuyug, Leonid Kuzmin. Experimental field studies of the cross-country ski running surface interaction with snow[J]. Procedia Engineering, 2011, 13: 23-29.
- Colbeck, S. C. Anderson, E. A. The permeability of a melting snow cover. Water Resource Res, 1982, 18(4):904-908.
- H. François, S. Morin, M. Lafaysse, et al. Crossing numerical simulations of snow conditions with a spatially-resolved socio-economic database of ski resorts: A proof of concept in the French Alps[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 108: 98-112.
- Jansson P-E. Simulation Model for Soil Water and Heat Condition: Description of the SOIL Model[R]. Uppsala, Sweden: Division of Agricultural Hydrotechnics, Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Science, 1991.
- Kuroiwa, D. Liquid permeability of snow. Low Temperature Science Ser, 1968, 26: 29-52.
- Li Yu, Zhao Minyan, Guo Peng, et al. Comprehensive Evaluation of Ski Resort Development Conditions in Northern China[J]. Chinese Geographical Science, 2016, 26(3): 401-409.
- Lintzen N. Snowmaking and snow storage[R]. Lulea. University of Technology, 2012.
- Michael A, Rawlins, Kyle C, et al. Remote sensing of snow thaw at the pan-Arctic scale using the SeaWinds scatterometer[J]. Journal of Hydrology, 2004, 312(1): 294-311.
- Rammsayer T H, Bahner E, Netter P. Effects of cold on human information processing: application

- of a reaction time parading[J]. *Integrative Physiological and Behavioral Science*, 1995, 30(1): 34-45.
- Sokratov, S.A. Parameters influencing the recrystallization rate of snow. *Cold Regions Science and Technology*, 2001, 33(2-3): 263-274.
- Spandre P, Morin S. Integration of snow management processes into a detailed snowpack model[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 125: 48-64.
- Steiger R, Mayer M. Snow making and climate change: future option for snow production in Tyrolean[J]. *Mountain Research and Development*. 2008, 28: 292-298.
- Sturm M, Holmgren J, König M, et al. The thermal conductivity of seasonal snow[J]. *Journal of Glaciology*, 1997, 43(143): 26-41.
- Woodside, W. Calculation of the thermal conductivity of porous media. *Canadian Journal of Physics*, 1958, 36(7): 815-823.
- 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.

## 致 谢

时间如白驹过隙般飞驰而失，转眼间3年的研究生生涯已到尾声，脑海中依旧清晰的记得刚来研究院时的情景，刚下火车时那种对陌生环境的胆怯和兴奋，带着这种复杂的情感迈出了进入这里的第一步。第一次走进研究院时，就对这个地方产生了一种莫名的感觉，不知是陌生还是喜悦，便四处打量着研究院里的一草一木，每一个实验楼，每一个办公楼，甚至是每一个从身边经过的同学和老师，心中默默的喜欢上了地方，这个将要陪伴我生活、学习3年的地方。时间总是过得很快，转眼间就要毕业，虽然经历过很多，学习到了很多，但总感觉还有很多事情没有做，很多事情还想要做，但时间不会等人，我所能做的就是尽力做好现在该做的事情，为人生的这个阶段画上圆满的句号。在毕业论文完成之际，我要向在此期间帮助过、支持过、鼓励过、关心过以及给予我最重要改变的人表示出最诚挚的感谢。

首先，感谢我的家人，感谢爸爸、妈妈、媳妇、弟弟这3年来对我关心、帮助和鼓励，无论是生活还是学习都给了我莫大的动力。在我低迷时你们给予我安慰、支持甚至是包容，是你们帮助我度过一道又一道难关。3年的研究生生活，我过得很好，很满足，没有过多的遗憾。感谢媳妇在我人生中一个重要转折点给予的指导，使我找到了本科毕业后一个很好的人生方向，感谢这接近8年来的陪伴。另外感谢爸爸、妈妈给予我莫大的经济帮助，我给家里带来的负担也从不埋怨，是你们坚强的后盾支撑着我向前迈进。

感谢中国科学院大学，感谢中国科学院西北生态环境资源研究院，感谢冰冻圈科学国家重点实验室这3年来对我的教育和帮助，使我取得了学习上的很大进步，思想上的更加成熟和稳进，以及经济生活上的支撑。最想感谢的是我所在的天山团队的所有成员，感谢李忠勤老师、王飞腾老师这3年来对我的帮助，无论是科学知识的引导、思维体系的建立、科学研究的方向还是踏实研究的心态，都给予了莫大的指导和帮助；最重要的是教授与我做人的道理，为人处世的方式，使我能和社会、家人、朋友、同学和睦相处，和谐共进。其中最感谢的是王飞腾老师，在研究院的时光里给予我莫大的帮助，科研上的引导、

生活上的帮助，很多事情都能为我着想，尽量满足我的一切要求。在我做错事情的时候，也从不埋怨，给予我关心和鼓励。谢谢王老师提供给我接触外面更大世界的机会，使我增加了世面和眼界。和王老师共处的3年时间里，感觉和王老师不再是单纯的师生关系，有的时候更像是家人，是知心朋友，王老师像兄长一样对我照顾，所以在此郑重的说声谢谢，谢谢有你，谢谢你的帮助、关心和陪伴。此外，还要感谢的是王琳师姐、李慧林师姐、王璞玉师姐、怀保娟师姐、叶万花师姐、宋梦媛师姐、岳晓英师姐、周平师兄、张欣师兄、张慧师兄、徐春海师兄以及王兴师弟等对我科研上和生活上的指导和帮助。另外，还要感谢我的同学，康虎虎、韦海宁、王炳尧、刘振宇、张余、李芳、辛赞品、刘兆晨、李芳、郭纪君、吕文聪、肖瑶、李云飞在国科大学习上和生活上的陪伴和帮助。

在论文方面也要感谢韩海东老师、丁明虎老师的指导和帮助，感谢一起采集数据的杨瑞堂师姐、李晨煜师兄、杨淑萍师妹，是你们辛勤的劳动才换取了论文的撰写和完成。与此同时，还要感谢研究生处的各位老师，蔡英老师、陈辉老师、刘晓东老师、陈茹老师、邓姣婧老师在学习和生活上的关心和照顾，感谢冰川冻土编辑部武俊杰老师和审稿人对小论文的耐心和负责指导，感谢硕士毕业论文评审老师们的辛勤批阅和指导，感谢硕士毕业论文答辩各位评审老师的建议和意见。

毕业在即，在今后的工作和生活中，我会铭记所有人的教诲，用不懈的努力和追求来报答所有支持和帮助过我的人。总之，谢谢你们！

## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

### 作者简历:

2011年9月—2015年6月,在聊城大学资源与环境学院获得学士学位。

2016年9月—2017年6月,在中国科学院西北生态环境资源研究院攻读硕士学位。

2017年9月—2018年6月,在中国科学院大学资源与环境学院攻读硕士学位。

2018年9月—至今,在中国科学院西北生态环境资源研究院攻读硕士学位。

### 获奖情况:

1. 荣获2016—2017学年中国科学院大学“三好学生”;
2. 荣获2017年第八届“天山杯”三等奖;
3. 荣获2019年第十届“天山杯”一等奖。

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

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.

### 参加的研究项目:

中国科学院重点部署项目,2022年京—张冬奥会雪道保障技术与示范研究(KFZD-SW-323);

国家自然科学基金委员会创新研究群体(41721091);

冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCS-ZZ-2018)