

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0136

JI Kaicheng, DING Minghu, SUN Weijun, et al. Preparation of icy piste for alpine skiing under different weather conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(6):1776-1788. [季凯程, 丁明虎, 孙维君, 等. 不同天气条件下高山滑雪冰状雪赛道制作方法[J]. 冰川冻土, 2023, 45(6):1776-1788.]

# 不同天气条件下高山滑雪冰状雪赛道制作方法

季凯程<sup>1</sup>, 丁明虎<sup>2,4</sup>, 孙维君<sup>1</sup>, 田彪<sup>2</sup>, 赵守栋<sup>2</sup>, 温海焜<sup>3</sup>,  
吕泓佑<sup>6</sup>, 张东启<sup>2</sup>, 王飞腾<sup>4</sup>, 秦大河<sup>4</sup>, 效存德<sup>4,5</sup>

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250014; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/全球变化与极地研究所, 北京 100081; 3. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042; 4. 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; 5. 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; 6. 国家高山滑雪中心, 北京 102100)

**摘要:** 为攻克冬奥会等顶级赛事高山滑雪项目赛道制作技术, 在黑龙江省亚布力体育训练基地、张家口密苑云顶乐园和北京延庆国家高山滑雪中心开展了多次冰状雪赛道制作试验, 发现-12℃晴空天气条件最适宜开展赛道制作, 最优方案为-15~-10℃(气温)/6~9 bar(注水压力)/4~8 s(注水时长)。基于试验数据, 建立了冰状雪赛道合格标准, 以及国际上第一个冰状雪赛道制作的天气-注水定量模型, 该模型可应用于大陆性气候条件下高山赛事并有潜力推广至其他冷干地区。此外, 研究发现人造雪含水量和微观结构对赛道质量有显著影响, 含水量越低、雪颗粒越小、雪形态越均一, 赛道稳定性和硬度越大。研究成果弥补了国内有关冰雪体育保障技术的空白, 可为我国承担大型冰雪赛事提供智力支撑。

**关键词:** 冰冻圈服务; 冰状雪赛道; 冬奥会; 雪冰工程技术; 高山滑雪

**中图分类号:** G863.11; P426.63\*5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)06-1776-13

## 0 引言

2022年北京冬季奥林匹克运动会(以下简称北京冬奥会)是我国首次承办的奥林匹克冰雪赛事, 也是提升我国影响力、发展冰雪经济<sup>[1-3]</sup>、提高竞技水平<sup>[4-5]</sup>的重要契机。北京冬奥会是国际上第一次在大陆性季风区举办的冬奥会, 面临多种新的天气气候挑战<sup>[6]</sup>, 特别是雪务保障工作。因此, 科学技术和北京冬奥组委设立了一系列攻关项目<sup>[7-11]</sup>, 目的是研发适用于我国气候环境的冰雪体育赛事保障技术, 提升冬奥保障能力, 支撑我国冰雪竞技和冰雪经济的发展。

高山滑雪具有快速、壮观、惊险、多变的特点, 是最复杂的冬季体育项目之一, 因此被称为冬奥会“皇冠上的明珠”。在此项赛事中, 为了保障不同顺序出发的运动员竞技公平, 同时保证安全, 需要制

作表面物理性质均一、抗压性高、抓地力强、平整度好、赛道表面磨损率低, 同时具有一定弹性的冰状雪赛道(icy piste), 以保证运动员的动作(高速滑行、快速转弯)基本不受场地表面雪冰物理状态影响。冰雪产业运动发达国家如瑞士、奥地利、意大利、日本、加拿大等均掌握此技术, 但目前未有公开资料可参考。

我国冰雪运动起步晚, 主要围绕运动员技术训练、健康保障等“软科学”开展研究<sup>[12-15]</sup>, 对雪场或赛场保障等“硬技术”的关注较少, 雪务保障能力较低。比如, 北京冬奥会申办成功之初, 全国数百个滑雪场均无能力制作符合国际滑雪联合会(International Ski Federation, FIS)要求的高山赛事冰状雪赛道<sup>[16]</sup>。这种情况极大地影响了我国冰雪运动员竞技能力的提升, 也限制了我国举办国际大型赛事的

收稿日期: 2023-04-24; 修订日期: 2023-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFF0304402); 中国气象科学研究院基本科研业务项目(2023Z004; 2023Z015)资助

作者简介: 季凯程, 硕士研究生, 主要从事冰冻圈变化及其响应研究. E-mail: jikaicheng@foxmail.com

通信作者: 丁明虎, 研究员, 主要从事极地气象与冰冻圈研究. E-mail: dingminghu@foxmail.com

能力,给北京冬奥会带来较大的风险。基于对瑞士积雪与雪崩研究所(SLF)和2018年韩国平昌冬奥会等研究机构和赛事调研考察,发现国际上主要有2种冰状雪赛道制作方法。第一种为注水法,在常规赛道制作完成后(厚度超过60 cm具有一定紧实度的雪道),使用专用注水器在特定天气条件下向雪层内部注水,促使雪层形成粗粒雪烧结结构,以提高表层雪硬度和均一性。其优点在于制作快速,但由于赛道底层较松软,导致持续性较差。该方法为大部分欧美国家采用,如意大利、奥地利、美国、俄罗斯。第二种为压实法,采用“分层造雪—多次压实—再次分层造雪—多次压实”的循环流程制作。其优点在于持续性强,但制作过程较为繁琐,人力和用水成本较高。该方法主要被瑞士、日本等国家采用,主要原因是这些地区雪季湿度较大或气温较高,注水法不适用于这些地区(无法形成粗粒雪烧结结构)。一般情况下,FIS裁判通过目视赛道表层结构是否均一稳定,或通过捏、踩等经验方法测量表层雪密度是否达到 $600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (女子比赛为 $560\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),

以判断赛道是否达到比赛要求。

考虑到我国北方气候(偏干)的特点,本研究采用注水法在黑龙江省亚布力体育训练基地、河北张家口密苑云顶乐园和北京延庆国家高山滑雪中心三个雪场开展了不同天气条件下的冰状雪赛道制作试验。研究中制定了符合FIS比赛要求的冰状雪赛道判定标准,通过分析不同方案的雪道密度和硬度结果,获得冰状雪赛道制作的技术方案。

1 试验方案

1.1 试验区选择

为了充分了解注水法制作冰状雪的主要控制因子,选择亚布力体育训练基地、密苑云顶乐园和国家高山滑雪中心三个雪场开展试验(图1)。三个雪场均位于典型的温带大陆性季风气候区,呈现寒冷干燥的气候特征,但因纬度和地形差异,其天气变化区别较大,因此,可获取不同天气条件下的赛道物理参数变化,探索不同技术要点对赛道雪质的影响。其中,亚布力体育训练基地和密苑云顶乐园

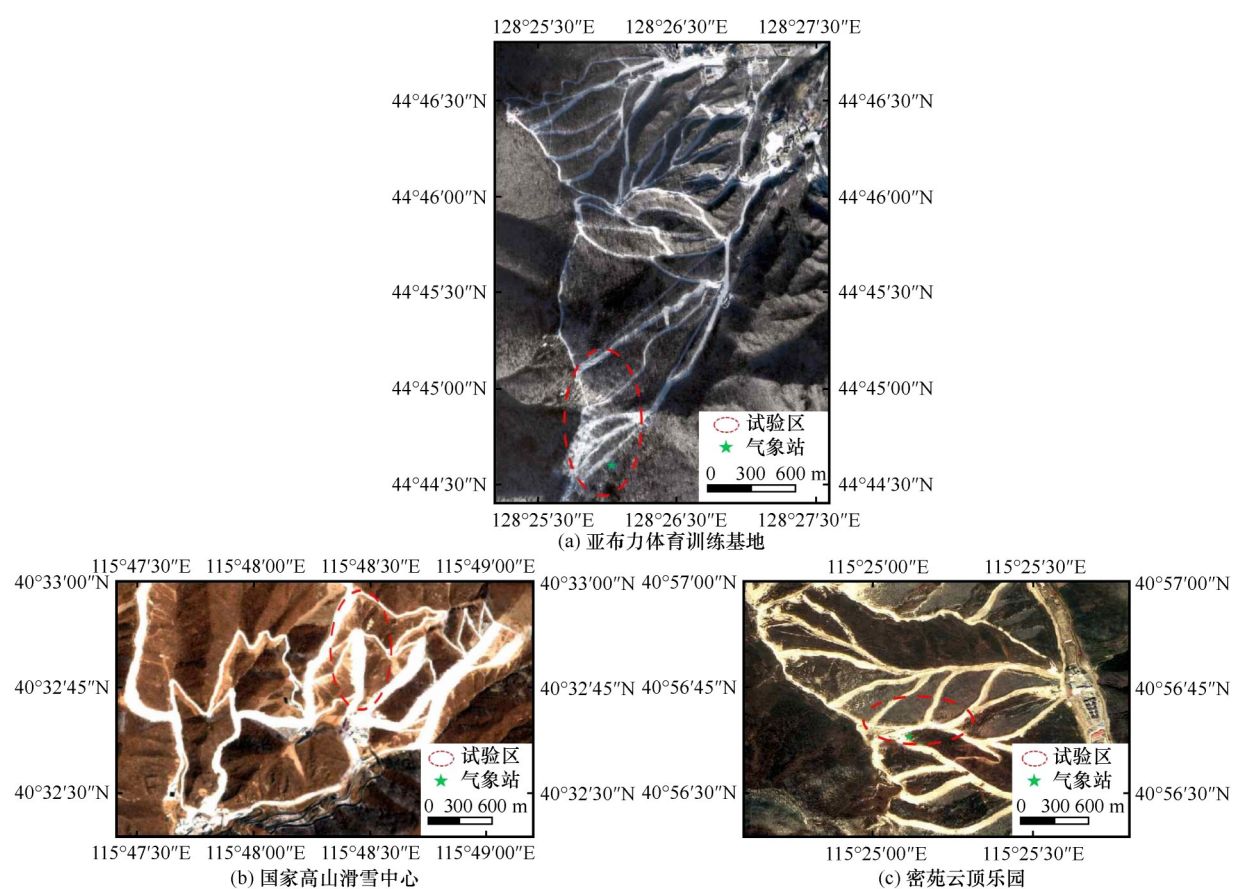


图1 试验区概况

Fig. 1 Overview of the test area: Heilongjiang Yabuli Sports Training Base (a), National Alpine Ski Center (b) and Genting Resort Secret Garden (c)

作为敏感性试验场地,国家高山滑雪中心作为方案验证场地。

亚布力体育训练基地位于黑龙江省哈尔滨市尚志市亚布力镇东南约 20 km 处,地处大锅盔山和二锅盔山北麓,整个地势由东南向西北倾斜,东南高,西北低。最高海拔 1 374.8 m,垂直落差 913 m,属中温带大陆性季风气候<sup>[17]</sup>,纬度较高,四季分明,夏季短凉,冬季寒冷漫长。11 月至翌年 3 月呈现典型的寒冷干燥特征,极端最低气温 $-44^{\circ}\text{C}$ ,冬季平均气温 $-13.3^{\circ}\text{C}$ ,最大积雪深度可达 1 m 以上<sup>[18]</sup>,总存雪期约 170 天。亚布力体育训练基地于 1984 年建立,是我国建设最早的大型滑雪场之一,曾承办 1996 年亚洲冬季运动会、2009 年世界大学生冬季运动会等多项高级冰雪赛事,是适合滑雪旅游和滑雪运动员训练比赛的综合性雪场,也是我国国家滑雪队指定训练基地和国家极地科学考察冬训基地。研究中选择的试验区域位于海拔约 1 200 m 的斜坡,坡度介于 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,地势较为陡峭。

密苑云顶乐园位于河北省张家口市崇礼区,属内蒙古高原与华北平原过渡地带,地形起伏较大,最高处海拔 2 104 m,垂直落差约 400 m。该地属东亚大陆性季风气候中温带亚干旱区<sup>[19]</sup>,冬季平均气温 $-12^{\circ}\text{C}$ ,受所处地理位置和地形的影响,冬季空气活动频繁,降雪早、积雪厚,平均积雪深度 10 cm 以上,存雪期达 150 多天<sup>[20]</sup>。赛道制作试验区域海拔约 1 800 m,坡度介于 $16^{\circ}\sim 24^{\circ}$ ,地势陡峭适合开展高

水平滑雪运动。密苑云顶乐园是 2021 年国际雪联自由式滑雪和单板滑雪世界锦标赛,以及北京冬奥会自由式滑雪和单板滑雪比赛场地。

国家高山滑雪中心位于北京市延庆区西北部小海坨山南麓,其最高点为小海坨峰(海拔 2 198.38 m),以此峰向西南与东南沿山脊线方向延伸,整个地势为各条沟谷从东北小海坨峰向下汇聚至西南角沟口,海拔高差约为 960 m<sup>[21]</sup>。小海坨山为温带大陆性季风气候典型的山地小气候区,冬冷夏凉,冬季严寒干燥多风,冬季月份平均气温 $-8.4^{\circ}\text{C}$ ,山顶极端气温可达 $-37^{\circ}\text{C}$ ,冬季平均积雪深度 15 cm 左右。赛道制作试验区域海拔约 1 600 m,坡度介于 $16^{\circ}\sim 23^{\circ}$ ,适合进行高水平滑雪运动。国家高山滑雪中心以其优越的地形地势条件和理想的海拔高度,成为 2022 年北京冬奥会和冬残奥会高山滑雪项目赛场<sup>[22]</sup>,因此,将该雪场选为冰状雪赛道技术的验证场地。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 冰状雪赛道制作试验设计

赛道制作试验流程分为人工造雪、赛道压实、注水以及赛道物理特性检测四个部分(图 2)。其中,造雪机造雪时要尽量选择干燥天气,以生产出粒径小、含水量低的雪粒,以减少初始雪性质对后续试验效果的影响;在试验过程中,发现传统压雪车压力传导最大可达到 20~30 cm,因此采用间隔 20 cm 分层制作的方法生产初始赛道。

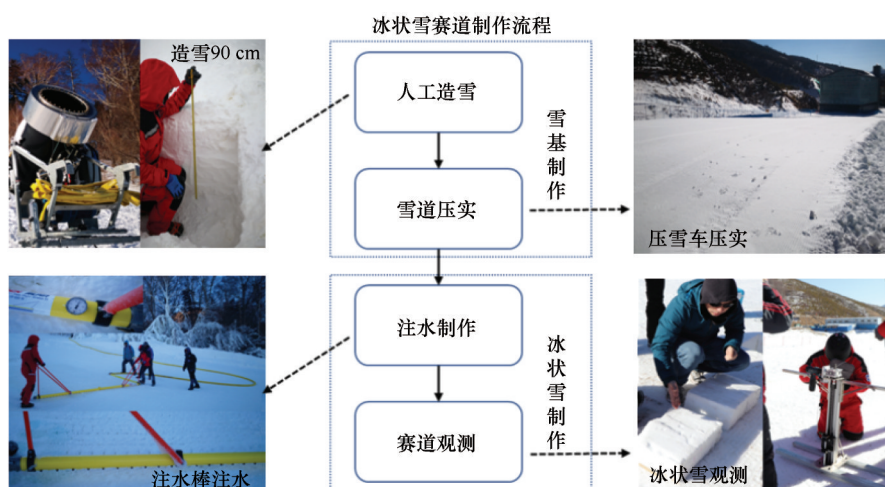


图 2 冰状雪赛道制作试验流程(摄于 2020 年 12 月)

Fig. 2 Procedures of icy piste experiments (photos taken in December 2020)

三个试验赛道均设计为 100 m 长、30 m 宽,但由于造雪机在不同天气下产雪量的不同,约 3~7 天完成了厚度 90~100 cm 的初始赛道制作。静置 24 h 后,检

测了初始赛道的硬度、密度、雪粒径等物理参数剖面。三个初始赛道表层 20 cm 积雪密度均超过  $400\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,赛道表面为松散风吹雪,向下则为粒雪,有



别于自然形成的雪花,其粒径小而密度大。赛道硬度剖面均达到2~4 MPa,远高于自然状态的新雪。

随后,采用Steinbach-Alpin注水棒开展注水试验,该注水棒喷嘴间隔为10 cm,注水时将喷嘴垂直对准雪表。一般情况下,设定的水压影响注水深度,同一位置停留时间决定注水量;注水棒每次水平移动距离约为10 cm。注水完成后再次静置24 h,以保证水体充分扩散并冻结。然后开展赛道最终物理性质检测,以判定试验效果。

1.2.2 冰状雪赛道物理性质检测方法

调查发现,运动员的感受局限于赛道表面形态及其脚下的硬度、弹性和抓地力(摩擦力)等直观感受。但表层雪物理状态及其可持续性受到底部至表面整个剖面雪物理特性的影响,因此,我们采用雪硬度测量仪、电子天平、雪密度/含水量测量仪、雪粒径测量仪等专用设备,检测赛道表面至60 cm深度的硬度、密度、含水量、雪粒径、雪比表面积等关键指标(图3),各设备传感器参数可见表1。

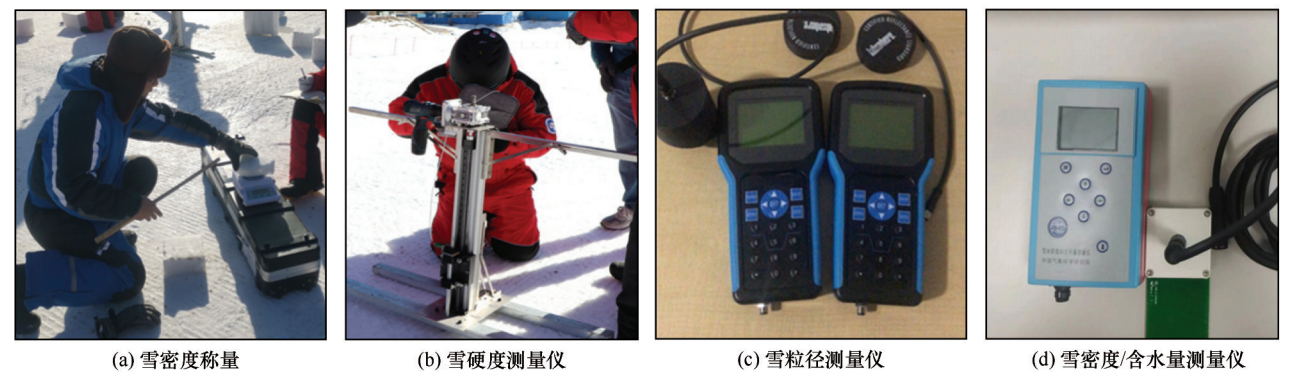


图3 冰状雪雪质参数检测仪器

Fig. 3 Icy snow quality parameter detection: snow density weighing (a), snow hardness analyzer (b), snow particle size analyzer (c), snow density/water content analyzer (d)

表1 各冰雪设备传感器参数			
Table 1 Sensor specifications of instrument used in this study			
参数	单位	仪器名称	精度
气温	℃	自动气象站温湿度传感器	±0.1℃
雪密度	kg·m <sup>-3</sup>	电子天平	±0.1g
雪密度	kg·m <sup>-3</sup>	雪密度/含水量测量仪	±3%
雪硬度	MPa	雪硬度测量仪	±5%
雪含水量	%	雪密度/含水量测量仪	±1%
雪粒径	mm	雪粒径测量仪	±5%
雪比表面积		雪粒径测量仪	

按照定义,雪比表面积(specific surface area,简称SSA)为每单位质量的积雪样品中空气和冰颗粒交界面总面积,受到颗粒尺寸和形状的影响<sup>[23]</sup>。雪SSA与积雪等效粒径的关系为

$$SSA = \frac{6}{D_{\text{eff}} \rho_i}$$

(1)

式中: $D_{\text{eff}}$ 为等效直径; $\rho_i$ 为冰在0℃的密度(0.917 g·cm<sup>-3</sup>)。

雪剖面硬度采用雪硬度测量仪<sup>[24]</sup>实测,该仪器通过电机驱动探头缓慢进入雪层深处,同时检测不同层位的反作用力,从而计算雪层硬度的连续变化。

雪密度检测采用体积-重量法,首先使用电锯剖出近20 cm×20 cm×20 cm赛道样块,精确测量其体积的同时使用高精度电子天平测量其质量,最终计算其密度。之后,使用雪密度/含水量测量仪<sup>[25]</sup>,以5 cm为间隔检测不同深度的粒雪密度和含水量。

雪粒径检测采用雪粒径自动测量仪实测<sup>[26]</sup>,该仪器可通过近红外激光漫散射衰变原理获取特定区域的雪面粗糙度,而积雪表面的粗糙程度由粒径决定,因此可以反演冰雪粒径变化;为提高激光检测精度,该设备还采用了低温补偿算法。与雪密度/含水量检测相同,以5 cm间隔检测雪粒径。

1.2.3 试验过程

为了检验天气条件、注水压力和注水时长三个因子对冰状雪赛道雪质的影响,本研究在亚布力体育训练基地和密苑云顶乐园以5℃作为间隔,开展了-5~0℃、-10~-5℃、-15~-10℃和-20~-15℃四个气温区间的试验。需要特别注明的是,本文气温区间均指开展注水试验期间的实测气温。在瑞士和韩国调研过程中,发现强风天气不利于注水操作,同时强风易导致雪面热量快速散失到空气中,注入的水冻结过快,因此可能影响水体在雪层中的扩散过程;云量可影响雪面向大气的长波辐射过

程;空气越干燥,雪中含水量就会越低,有利于注入液态水与粒雪的烧结。因此,试验均选择在晴朗微风或无风天气进行。

2020年12月,在亚布力体育训练基地 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天气条件下开展了一次试验。注水压力设置为5 bar、10 bar、15 bar,注水时长设置为3 s、5 s、7 s、10 s,共获取了12个方案的赛道雪冰物理参数敏感性结果。

2021年2月,在密苑云顶乐园开展了 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天气条件下的三次制作试验。注水压力设置为6 bar、8 bar、10 bar,注水时长设置为3 s、5 s、7 s、9 s,每个试验均得到12个方案的敏感性结果。

通过以上试验,共获取了四个天气条件下、多种压力-时长组合方案下的冰状雪赛道密度、硬度、含水量、雪粒径、雪比表面积等数据,用于定量分析气温、注水压力和注水时长对赛道雪质的影响,以建立赛道雪质模型。

## 2 冰状雪赛道判定标准的拟定

如前所述,高山赛事冰状雪赛道是否合格,主要依靠国际裁判的经验判定。根据公开资料,相关赛事组织只拟定了冰状雪赛道的雪密度指标,如加拿大曼尼托巴省越野滑雪协会公布的数据<sup>[27]</sup>显示,冬奥会高山赛事要求赛道表层密度 $>560\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。基于瑞士积雪与雪崩研究所和韩国平昌冬奥会的考察调研,并使用多种设备进行了赛道检测,获取了多种赛道的雪冰物理参数。经分析、讨论拟定了冰状雪赛道标准,并请多位雪冰物理专家进行论证,最终拟定赛道合格标准如下(图4):

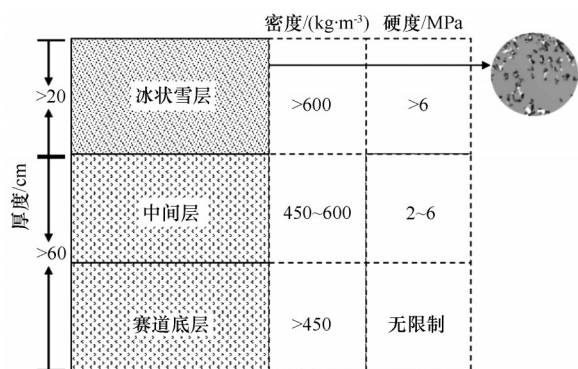


图4 冰状雪赛道合格标准

Fig. 4 Physical profile of icy piste for Winter Olympics

1) 赛道雪层厚度一般 $>80\text{ cm}$ ,以保障赛道的弹性和可持续性;

2) 赛道表层(即运动员体感有效赛道层,约上

部 $20\text{ cm}$ )密度 $>600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,以保障赛道表层稳定性;

3) 赛道表层雪硬度不低于 $6\text{ MPa}$ ,以保障赛道表面强度较高,可经多次滑行不发生形变;

4) 赛道表面平整、性质均一;

5) 有适度抓地力(摩擦力),以保障运动员可做出多种滑行动作。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同天气条件下的赛道物理性质差异

本研究在 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 四种气温条件下完成赛道制作试验,获得四种天气条件下的赛道密度和硬度结果。如表2和图5所示,在 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气温条件下,6个试验(6 bar/5 s、6 bar/7 s、8 bar/5 s、8 bar/7 s、10 bar/5 s、10 bar/7 s)所制作赛道表层平均密度均小于 $600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,未达到合格标准。其主要原因可能是气温接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,表层雪温较高,注水无法在赛道表层快速冻结,因此无法促进粒雪烧结作用,水量过多的情况下甚至可能导致部分表层雪融化。值得一提的是,尽管 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行的试验未达到合格标准,但6 bar/5 s和6 bar/7 s两个方案将表层雪硬度提高到 $10\text{ MPa}$ 以上,这说明在近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温天气条件下,可采用这两个方案提高表层雪硬度以应急使用。

在约 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气温条件下,实施了6 bar/5 s、6 bar/7 s、8 bar/5 s、8 bar/7 s、10 bar/5 s、10 bar/7 s共6个试验。其中6 bar/5 s和6 bar/7 s试验均实现赛道密度标准,但后者表层雪硬度未达标;8 bar和10 bar水压下的试验赛道硬度和密度均未达到合格标准。简而言之,在 $-10\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气温条件下,可采用6 bar/5 s方案制作冰状雪赛道。

在约 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气温条件下,分别实施了水压为6 bar、8 bar、10 bar,注水时长为3 s、5 s、7 s、9 s的12个制作试验。其中6 bar/5 s、6 bar/7 s、8 bar/3 s、8 bar/5 s、8 bar/7 s、8 bar/9 s和10 bar/7 s试验结果显示赛道表层密度和硬度均达到合格标准。6 bar/3 s制作方案仅 $0\sim15\text{ cm}$ 深度雪层平均密度达到 $600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,未达到既定的表层 $20\text{ cm}$ 加固的目标。其可能原因是该方案未能注入足量的水,水压穿透力不足,水流停留在上层 $15\text{ cm}$ 。8 bar水压下4个方案均表现出良好效果,赛道表层密度可达 $650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,硬度最高为 $15.92\text{ MPa}$ 。10 bar水压下,10 bar/7 s的方案实现了合格赛道,10 bar/3 s、10 bar/5 s和10 bar/9 s的方案

表2 不同天气条件下不同试验方案的冰状雪赛道制作结果

Table 2 Results of icy piste making experiments under four weather conditions

气温	制作方案		试验结果		评价
	注水水压/	注水时长	表层平均密度/	硬度/	
	bar	/s	(kg·m <sup>-3</sup> )	MPa	
-0.4℃	6	5	596	11.3	不合格
	6	7	560	12.0	不合格
	8	5	570	5.0	不合格
	8	7	595	3.1	不合格
	10	5	569	5.8	不合格
	10	7	557	4.0	不合格
-6℃	6	5	611	8.5	合格
	6	7	607	4.8	不合格
	8	5	566	10.3	不合格
	8	7	593	10.6	不合格
	10	5	595	12.0	不合格
	10	7	532	5.5	不合格
-12℃	6	3	597	7.0	不合格
	6	5	692	6.5	合格
	6	7	631	6.3	合格
	6	9	575	8.5	不合格
	8	3	647	10.5	合格
	8	5	672	7.8	合格
	8	7	638	15.9	合格
	8	9	620	9.3	合格
	10	3	573	5.8	不合格
	10	5	542	8.7	不合格
	10	7	617	8.5	合格
	10	9	593	7.4	不合格
-20℃	5	3	560	5.5	不合格
	5	5	580	6.4	不合格
	5	7	588	5.2	不合格
	5	10	690	7.7	合格
	10	3	652	8.3	合格
	10	5	637	8.2	合格
	10	7	681	9.1	合格
	10	10	547	6.4	不合格
	15	3	550	5.0	不合格
	15	5	558	4.1	不合格
	15	7	562	4.2	不合格
	15	10	465	4.4	不合格

下密度均未达标,通过观察试验剖面,发现其原因  
为水压较高导致烧结主要发生在深部雪层。值得  
一提的是,该气温条件下的各方案所得赛道表层硬  
度均超过6 MPa,符合赛道硬度要求。

在约-20℃气温条件下,分别实施了注水水压

为5 bar、10 bar、15 bar,注水时长为3 s、5 s、7 s、10 s  
的12个试验。其中5 bar/10 s、10 bar/3 s、10 bar/5 s  
和10 bar/7 s的方案均实现赛道制作理想结果。水  
压为15 bar的4次试验,赛道表层平均密度甚至低  
于550 kg·m<sup>-3</sup>,硬度约为4~5 MPa,未达到赛道要求。  
相较于-12℃气温条件下的试验,赛道制作成功率  
明显下降,说明气温条件改变对赛道制作结果产生  
影响显著。

通过以上结果可以发现,在-15~-10℃气温区  
间内的试验成功率最高,说明该温度是进行冰状雪  
制作的最佳天气。当气温升高,需调整注水压力和  
时长,以提高烧结作用对粒雪结构的影响。逼近  
0℃时,由于水难以冻结,注水压力和时长无论如何  
调整都难以促进粒雪烧结,冰状雪赛道难以制作,  
只能在特殊情况下作为应急方案。当气温条件低  
至-20℃,气温和雪温过低,导致注入到雪层中的水  
快速冻结,未能有效向四周扩散,表层雪形成雪-冰  
夹杂结构而不是均一结构,虽然某些方案所制作的  
赛道密度和硬度达标,但雪层稳定性不好。

3.2 敏感性分析

3.2.1 注水压力

除天气条件外,注水压力和注水时长是冰状雪  
制作的重要影响因子。根据试验结果分析,-15~  
-10℃是冰状雪制作的最优天气条件,利于分析不  
同水压和时长条件下冰状雪的雪质变化,所以,选  
择-12℃气温条件下的试验进行分析。结果如图6  
所示,赛道表层密度和硬度随水压增强呈先升后降  
的总体变化特征:当注水压力达到8 bar时,赛道  
密度达到最高,其中8 bar/5 s方案密度最高达到  
672 kg·m<sup>-3</sup>。在其他三个注水方案(3 s、7 s、9 s),注  
水压力为8 bar时赛道硬度达到最高,其中8 bar/7 s  
方案硬度达到15.92 MPa,显然8 bar是理想水压。  
需要特别说明的是,无论哪种天气条件,水压超过  
10 bar后,水流容易击穿表层,使得烧结作用发生在  
赛道底部。

3.2.2 注水时长

与注水压力敏感性分析相同,以-12℃气温条  
件下的试验结果进行分析(图7)。所有试验均呈现  
表层雪密度随注水时长先上升后下降变化:在6 bar  
水压下,随着注水时长增加,密度也在逐步增大,在  
注水时长达到7 s时,平均密度达到了631 kg·m<sup>-3</sup>;注  
水时长超过7 s后,密度开始下降。在8 bar水压下,  
在注水时长5 s时达到672 kg·m<sup>-3</sup>,之后密度下降。



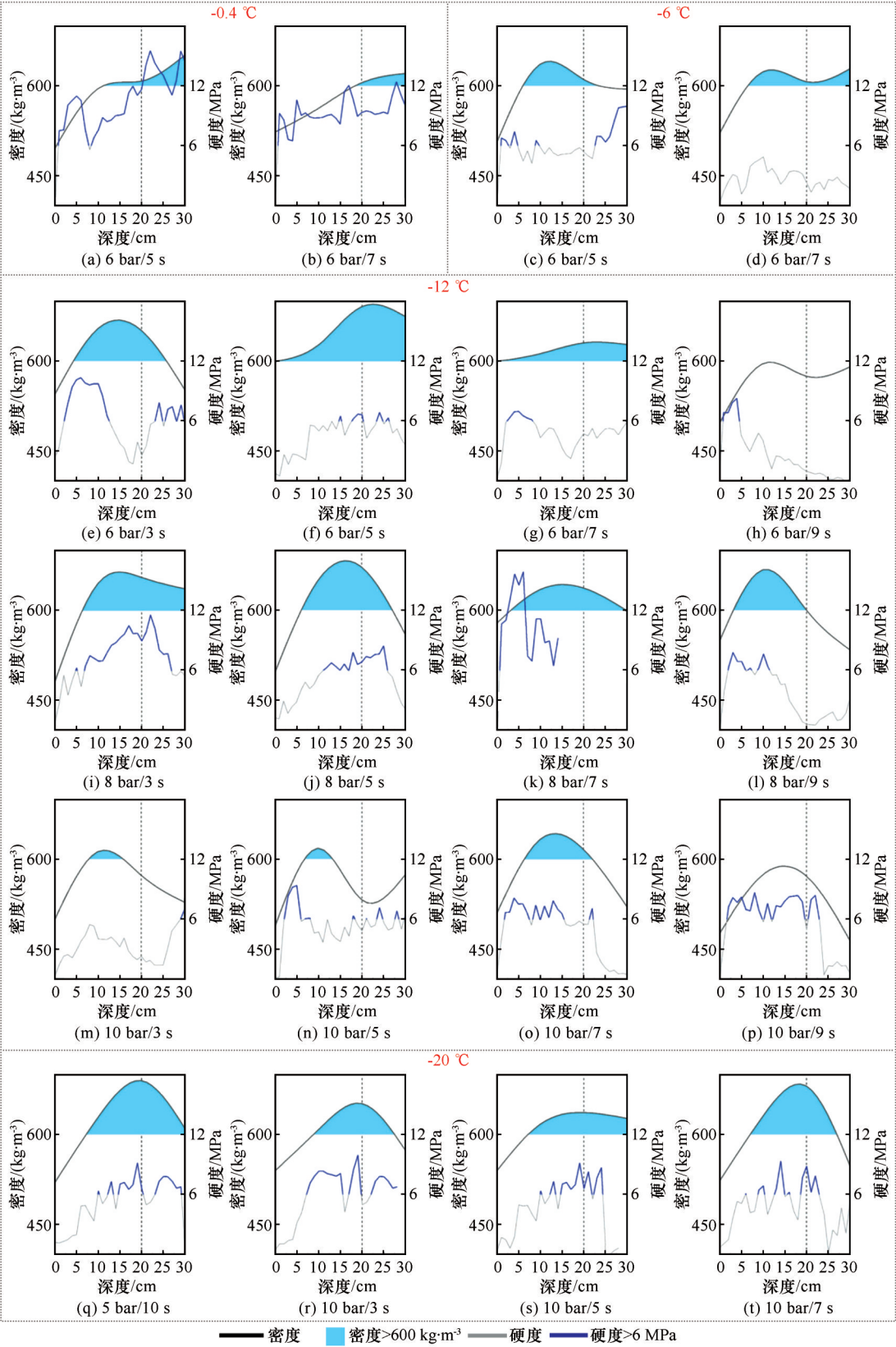


图5 四种天气条件下(-0.4 °C, -6 °C, -12 °C, -20 °C)冰状雪赛道制作试验结果(以代表性试验为例)  
Fig. 5 Representative results for icy piste making experiments under air temperature of -0.4 °C, -6 °C, -12 °C, and -20 °C

在10 bar水压下,密度在注水时长7 s时达到617 kg·m<sup>-3</sup>。赛道硬度在6 bar和8 bar的水压条件下随注水

时长延长呈现波动变化(这也可能与试验次数较少有关),在10 bar水压条件下硬度随注水时长延长呈

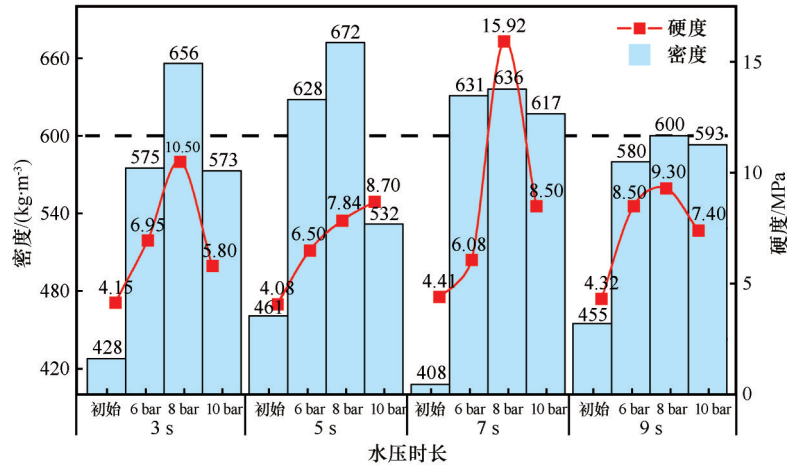


图6 -12 °C气温条件下,赛道表层物理性质对不同注水水压的敏感性

Fig. 6 Sensitivity of physical characteristics of icy piste to water injection pressures, under -12 °C air temperature

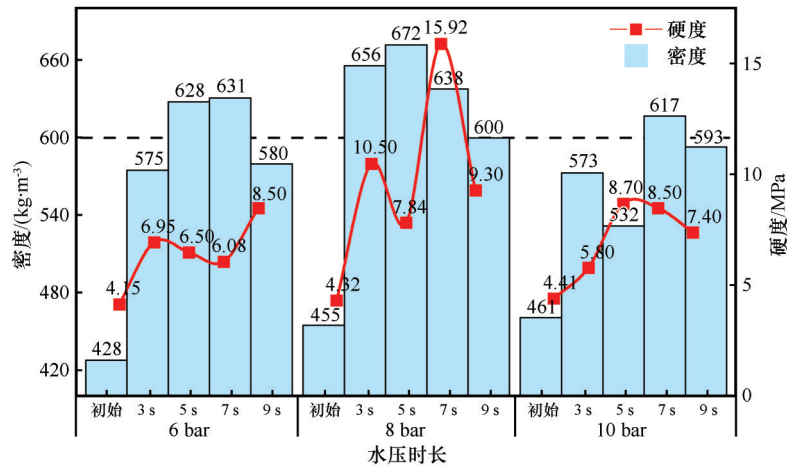


图7 -12 °C气温条件下,赛道表层物理性质对不同注水时长的敏感性

Fig. 7 Sensitivity of physical characteristics of icy piste to water injection durations, under -12 °C air temperature

现先上升后下降趋势,当注水时长为5 s时,硬度达到最高为8.7 MPa。

### 3.3 冰状雪赛道制作天气-注水模型

通过以上分析可知,在合适的天气条件下(多选择晴朗无风或微风天气),通过控制注水压力和注水

时长可以控制表层雪质,以得到合格的冰状雪赛道。为了得到可推广应用于不同天气条件下的制作技术,本研究基于试验数据,以温度区间、注水压力和注水时长为关键因子进行了多元非线性拟合分析,得到了天气-注水的关系模型,关系式如表3所示。

表3 天气-注水关系模型

Table 3 Weather-water injection relationship model

气温	硬度关系式	密度关系式
-5~0 °C	$0.677p^2 - 0.220t^2 - 0.202pt - 10.803p + 4.426t + 39.455$	$-1.469p^2 - 1.958t^2 - 2.838pt + 31.838p + 44.867t + 366.342$
-10~-5 °C	$-0.409p^2 - 0.303t^2 - 0.377pt + 9.257p + 6.408t - 47.314$	$-3.469p^2 - 1.708t^2 - 3.388pt + 67.513p + 43.433t + 248.192$
-15~-10 °C	$-0.865p^2 - 0.085t^2 + 0.042pt + 13.803p + 0.957t - 48.425$	$-12.75p^2 - 3.042t^2 + 1.775pt + 187.475p + 21.400t - 131.192$
-20~-15 °C	$-0.102p^2 - 0.025t^2 - 0.037pt + 2.045p + 0.694t - 3.114$	$-2.97p^2 - 4.197t^2 - 1.785pt + 63.911p + 73.404t + 121.955$

注:  $p$  为注水压力, 单位为 bar;  $t$  为注水时长, 单位为 s。

Note:  $p$  is the injection pressure (bar) and  $t$  is the injection duration (s).

根据模型,我们绘制了不同天气条件下雪表层密度、硬度(图8)随注水压力和注水时长变化的分

布。结果显示,在气温接近0 °C时,通过采用5~6 bar的注水压力和6~9 s的注水时长方案,可以获得合格



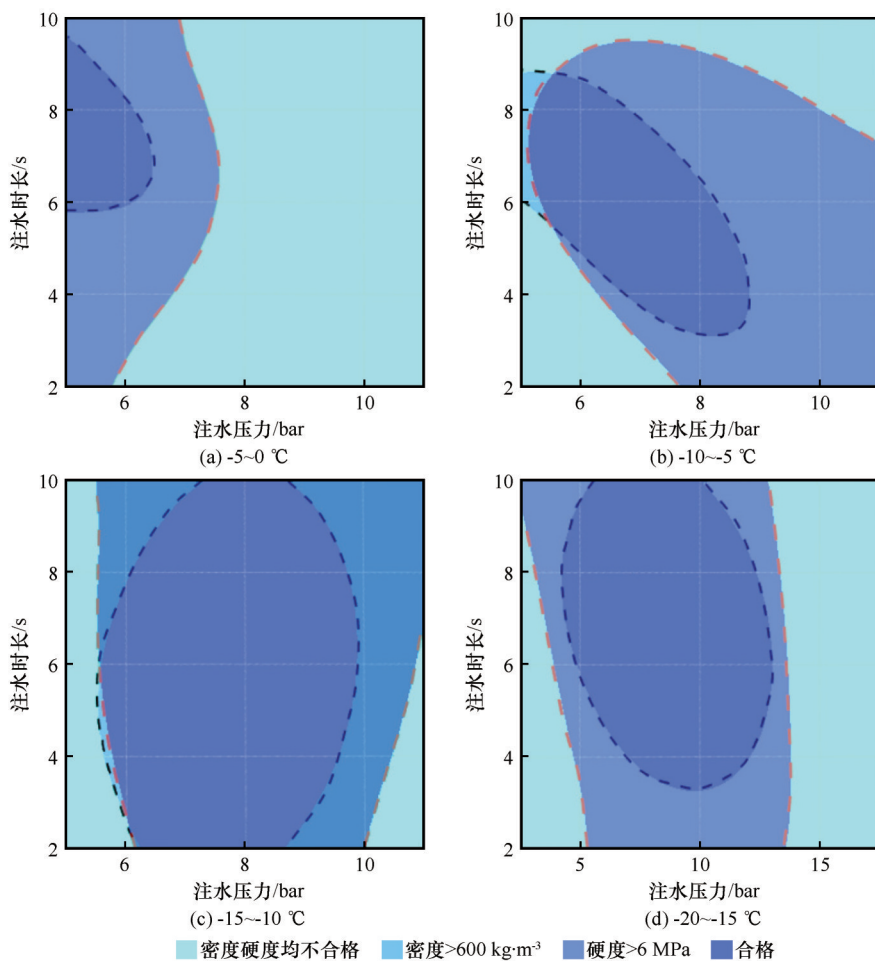


图8 不同天气条件下冰状雪赛道表层密度、硬度与注水压力、时长的关系

Fig. 8 The distributions of surface density and hardness of icy piste varied with water injection pressure and duration under different weather conditions

的冰状雪赛道,即赛道密度通常超过  $600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,硬度超过  $6\text{ MPa}$ 。当气温处于  $-10\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  区间时,为获得合格的冰状雪赛道,建议将注水压力适当增大到  $8\text{ bar}$ ,同时相应缩短注水时长至  $4\sim7\text{ s}$ 。在  $-15\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情境下,最佳的注水方案为  $6\sim9\text{ bar}$  的注水压力和  $4\sim8\text{ s}$  的注水时长。这种方案组合可保证在低温条件下制作出密度和硬度都符合要求的冰状雪。当气温降至更低的  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近时,建议将注水压力进一步提高至  $10\text{ bar}$ ,同时将注水时长延长至  $4\sim10\text{ s}$ 。该方案可以达到相对最佳效果。

通过精细调节注水压力和注水时长以适应不同的天气条件,我们可以制作出符合需求的冰状雪赛道。这种根据天气条件调整注水方案的方法不仅可以提高冰状雪赛道的制作效率,也可增强冰状雪赛道的整体质量。

### 3.4 模型验证

为检验本研究拟定的天气-注水模型的适用性,

试验团队于2021年2月在国家高山滑雪中心开展了验证试验。试验期间气温约为  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此选择  $8\text{ bar}/5\text{ s}$  和  $8\text{ bar}/7\text{ s}$  的两个注水方案进行赛道制作,并检测得到了赛道物理性质。结果(图9)显示  $8\text{ bar}/5\text{ s}$  方案所获赛道表层平均密度为  $623\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,表层硬度随深度迅速上升,至  $10\text{ cm}$  深度达到  $6\text{ MPa}$ 。 $8\text{ bar}/7\text{ s}$  方案表层平均密度为  $621\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,硬度迅速上升,在  $5\text{ cm}$  和  $10\text{ cm}$  深度均达到  $7\text{ MPa}$  以上。简而言之,两种方案均获得了合格的冰状雪赛道,证明本研究提出的模型可应用于我国典型大陆性气候区。

### 3.5 讨论

除上述天气条件(包括气温、风速、云量等)、注水压力和注水时长之外,还有很多因素可对冰雪变质过程产生影响,其中人造雪的含水量(湿度)、微观结构(雪粒径、比表面积)因为可直接影响粒雪烧结作用的效率,显得尤为重要<sup>[28-29]</sup>。此外,冰状雪赛道硬度并非越高越好,某些情况下雪易变质为冰,

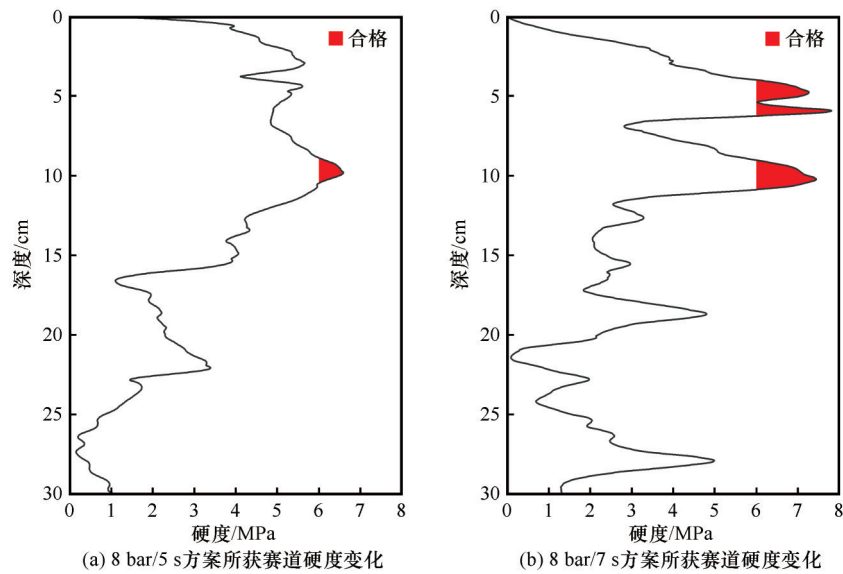


图9 国家高山滑雪中心冰状雪赛道制作试验结果

Fig. 9 Variations of the surface snow hardness in National Alpine Ski Center under 8 bar/5 s scheme (a) and 8 bar/7 s scheme (b)

给运动员带来受伤风险。

3.5.1 雪含水量对冰状雪赛道的影响

受造雪机性能、不同经验参数设置、现场条件(如水洁净度)等因素的影响,人造雪含水量可能有显著差异<sup>[30]</sup>。含水量较高时,自由水在雪层的孔隙中可冻结成不规则的颗粒,使雪粒之间连接变得脆弱,初始雪道硬度更低,也不利于压雪效果。如我们在亚布力体育训练基地的试验过程发现,其基础

雪道含水量在20 cm 深度达到1.2%,显著高于密苑云顶乐园[图10(a)],导致两个密度相近的试验赛道其初始硬度存在显著差异,即亚布力体育训练基地赛道硬度显著偏低。经过注水试验后,密苑云顶乐园8 bar/7 s 方案和亚布力体育训练基地10 bar/5 s 方案,密度分别为 $638\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $637\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,硬度则分别为15.9 MPa和8.3 MPa,虽然都达到了合格标准,但其赛道物理性质差距显著。

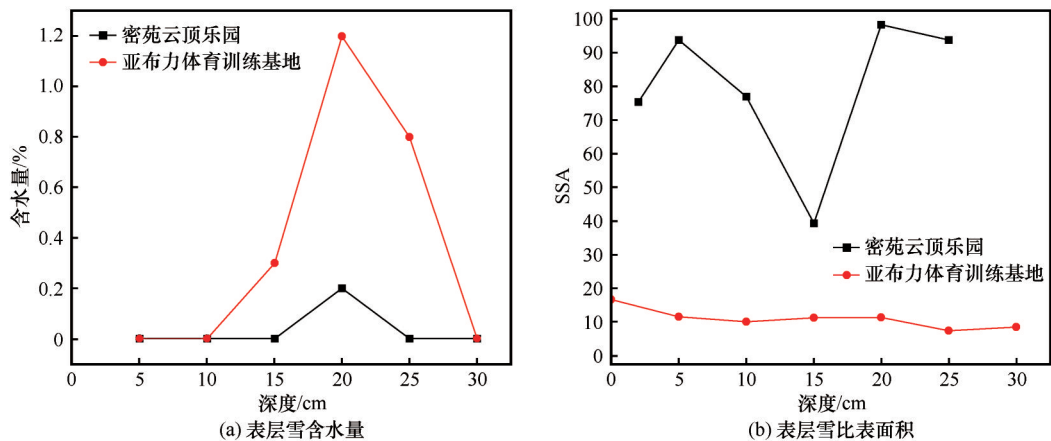


图10 亚布力体育训练基地与密苑云顶乐园初始赛道表层雪含水量(a)和比表面积(b)变化

Fig. 10 Surface snow water content (a) and specific surface area (SSA) (b) of the initiative icy piste in Yabuli Sports Training Base and Genting Resort Secret Garden

3.5.2 雪微观结构对冰状雪赛道的影响

雪的微观结构越光滑,SSA越大,雪颗粒之间连接更好。相对于大型的多面体结构,小圆形结构的粒雪每单位体积连接数量更多,硬度也就越高<sup>[31]</sup>。在亚布力体育训练基地和密苑云顶乐园两个试验

中,测量了密度分别为 $637\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $638\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的两个雪层的平均粒径和SSA[图10(b)],发现密苑云顶乐园赛道的表层雪SSA显著高于亚布力体育训练基地,其微观结构上更加均一,雪颗粒更近于小圆形。密苑云顶乐园的表层雪粒径在0.1~0.15

mm之间,亚布力体育训练基地赛道的表层雪粒径则在0.15~0.3 mm之间。更大的颗粒和不规则的形状导致雪颗粒连接更加脆弱,雪层结构稳定性差,质地就会更加松软,硬度较低。因此,密苑云顶乐园试验所获得的赛道硬度远高于亚布力体育训练基地。

#### 4 结论

为突破雪务保障技术难关之一,研发适用于中国大陆性气候区的冰状雪赛道制作技术,本研究采用注水法开展了不同天气条件下的科学试验,并通过检测赛道密度和硬度的变化,进行了定量分析,得到如下认识:

(1)气温对试验效果影响显著,其中-15~-10℃的晴朗微风天气是制作冰状雪赛道的最佳条件。冰状雪赛道表层物理性质对水压具有较强敏感性,过高水压会对赛道雪基产生破坏作用,因此赛道制作时对于高水压的制作方案选择应当慎重;同样注水时长也应严格控制,防止过量水导致赛道融化或结冰,给运动员带来受伤风险。

(2)通过定量分析建立了可推广的天气-注水方案模型,给出了适用于不同天气条件下冰状雪赛道制作方案,该方案在高山滑雪中心经过技术验证,取得极佳效果。

(3)检验了人造雪含水量和微观结构对赛道制作效果的影响,建议重视制作的上游过程,选择合适天气晴朗冷干天气、采用细粒径造雪机实施造雪,以降低人造雪的含水量、提高粒雪的均一性,进而提升初始赛道的稳定性和强度。

最后需要说明的是,本研究为世界公开资料显示范围内,第一个开展冰状雪赛道定量研究的试验,主要原因可能有两方面:一是掌握此技术的部分团队可能以保密态度开展工作,以获取商业利益;二是此类试验受到天气和可选择场地的限制,实施成本以百万元计。也正因如此,本研究开展试验次数有限,所获取的数据量较少,可能限制了部分试验结果的可信度。但是,在我国相关研究和技术领域空白的情况下,本研究建立了包括造雪、赛道铺设-压实、注水等多个关键技术环节的冰状雪赛道制作标准化流程,提出了不同天气条件下定量注水模型,也是国际上第一个冰状雪赛道的定量模型,可为全球大型冰雪赛事举办提供智力和技术支撑。通过补充国际其他地区试验进行修正,本模型

有潜力应用于如俄罗斯、北欧、北美等冷干地区。

下一步,我们将协同冰雪竞技有关部门、运动员,共同拟定可推广的高山滑雪赛事业务标准,丰富我国高山运动的保障体系,进一步提升我国运动员训练和保障水平,推动我国冰雪产业和冰雪竞技高质量发展。

#### 参考文献(References):

- [1] Tao Shangwu. Research on the development of China's ice and snow industry under the background of Beijing Winter Olympics [J]. *Economic Research Guide*, 2017(27): 31-32. [陶尚武. 北京冬奥会背景下我国冰雪产业发展研究[J]. *经济研究导刊*, 2017(27): 31-32.]
- [2] Wei Yaru, Wang Hongkun, Zhao Wenyan, et al. Research on the upgrading path of ice and snow sports tourism in China under the background of Winter Olympics [J]. *Ice and Snow Sports*, 2018, 40(6): 56-60. [魏亚茹, 王宏坤, 赵文艳, 等. 冬奥会背景下中国冰雪体育旅游升级路径研究[J]. *冰雪运动*, 2018, 40(6): 56-60.]
- [3] Wang Shijin, Xu Xinwu, Deng Jie, et al. Chinese skiing-tourism destination: spatial patterns, existing problems 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.]
- [4] Chen Jing. Research on sports psychological skills training of alpine skiers [J]. *Innovative research of ice and snow sports*, 2021(3): 27-28. [陈静. 高山滑雪运动员运动心理技能训练研究[J]. *冰雪体育创新研究*, 2021(3): 27-28.]
- [5] 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.]
- [6] Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 869-879. [秦大河, 周波涛, 效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 869-879.]
- [7] Bi Yanqun, Wang Feiteng, Han Haidong, et al. Snow quality of the track and climate change risk assessment of competition-type skiing grounds in China: a case study of Wanlong Ski Resort in Hebei Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(3): 709-718. [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): 709-718.]
- [8] Wang Xing, Wang Feiteng, Ren Jiawen, et al. Experiment and numerical simulation of snow storage in alpine region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(6): 1617-1627. [王兴, 王飞腾, 任贾文, 等. 高山区雪堆储雪的实验和模拟计算[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(6): 1617-1627.]
- [9] 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.]
- [10] Yang Shuping, Han Haidong, Wang Feiteng, et al. Prelimi-



- nary evaluation of snow storage in Chongli District, Zhangjiakou City, Hebei Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1253-1266. [杨淑萍, 韩海东, 王飞腾, 等. 河北省张家口市崇礼区储雪试验的先期评估[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1253-1266.]
- [11] 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.]
- [12] Chen Sanzhong. Investigate the function of sports fatigue recovery in alpine skiing training[J]. *Contemporary Sports Technology*, 2020, 10(30): 83-84. [陈三忠. 研究运动疲劳恢复在高山滑雪训练中的能动作用[J]. 当代体育科技, 2020, 10(30): 83-84.]
- [13] Wang Sugai, Zhong Yaping, Gao Weifeng, et al. Research progress on core competitive ability and training characteristics of the world's elite alpine skiing athletes[J]. *China Sport Science and Technology*, 2021, 57(10): 3-11. [王素改, 钟亚平, 郜卫峰, 等. 世界优秀高山滑雪运动员的核心竞技能力及训练特征研究进展[J]. 中国体育科技, 2021, 57(10): 3-11.]
- [14] He Wei, Shu Yang, Li Haipeng, et al. Research on the competitive and kinematic characteristics of alpine skiing[J]. *China Sport Science and Technology*, 2020, 56(12): 3-8. [何卫, 束洋, 李海鹏, 等. 高山滑雪比赛及运动学特征研究[J]. 中国体育科技, 2020, 56(12): 3-8.]
- [15] Huang Linhao, Sun Chengzhe. Technical classification and teaching analysis of the characteristics of alpine skiing[J]. *Contemporary Sports Technology*, 2020, 10(17): 161, 163. [黄林浩, 孙成哲. 高山滑雪运动的特点技术分类及教学分析[J]. 当代体育科技, 2020, 10(17): 161, 163.]
- [16] Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Minghu, et al. Serving Beijing 2022 Olympic winter games and developing ice and snow industry: Application and extension of cryospheric science[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(3): 395-402. [秦大河, 效存德, 丁明虎, 等. 服务冬奥、支撑发展: 冰冻圈科学的延拓[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 395-402.]
- [17] Wang Xiufen, Yang Yanzhao, You Fei. Analysis on characteristics of climate change in recent 30 years in Heilongjiang Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(Suppl 1): 28-32. [王秀芬, 杨艳昭, 尤飞. 近30年来黑龙江省气候变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(增刊1): 28-32.]
- [18] Wang Bo, Wang Ying, Li Yongsheng. Snowfall in Heilongjiang: Climatic change characteristics[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(10): 114-120. [王波, 王莹, 李永生. 黑龙江省降雪气候变化特征[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10): 114-120.]
- [19] Han Lijuan. Analysis of 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.]
- [20] 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.]
- [21] Liang Xu, Lu Jianqi, Tan Zeyang, et al. Leaning along mountains, painting Haituo swallows on the design of national alpine skiing center[J]. *Architectural Journal*, 2021(Suppl 1): 83-91. [梁旭, 路建旗, 谭泽阳, 等. 即峰峦体势, 绘海垞飞燕——国家高山滑雪中心设计[J]. 建筑学报, 2021(增刊1): 83-91.]
- [22] Gu Jin, Zhao Rixue, Guo Hongguang. National alpine ski center project [J]. *Construction Science and Technology*, 2022(5): 6-9. [顾进, 赵日学, 郭红光. 国家高山滑雪中心项目[J]. 建设科技, 2022(5): 6-9.]
- [23] Che Tao. Chinese guidelines for snowpack observation in the field[M]. Beijing: Science Press, 2020. [车涛. 中国积雪地面观测规范[M]. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [24] Ding Minghu, Wen Haikun, Wang Feiteng, et al. A measuring device for measuring the hardness of icy snow surface: CN202010230237.4[P]. 2020-06-26. [丁明虎, 温海焜, 王飞腾, 等. 用于测量冰状雪面硬度的测量装置: CN202010230237.4[P]. 2020-06-26.]
- [25] Ding Minghu, Zhang Weiwei, Xiao Cunde, et al. Sensor for in situ detection of snow density: CN202210451871. X[P]. 2022-05-31. [丁明虎, 张伟伟, 效存德, 等. 积雪密度原位检测传感器: CN202210451871. X[P]. 2022-05-31.]
- [26] Ding Minghu, Du Fujia, Wen Haikun, et al. Measurement device and method for measuring snow particle size: CN201910483042.8[P]. 2020-09-01. [丁明虎, 杜福嘉, 温海焜, 等. 用于测量雪面雪粒径的测量装置及测量方法: CN201910483042.8[P]. 2020-09-01.]
- [27] Cross Country Ski Association of Manitoba. Course preparation and tracksetting[EB/OL]. [2023-11-11]. [http://ccsam.ca/wp-content/uploads/2011/09/grooming\\_CCC\\_CoursePrep\\_Tracksetting3.4.pdf](http://ccsam.ca/wp-content/uploads/2011/09/grooming_CCC_CoursePrep_Tracksetting3.4.pdf).
- [28] Armstrong R L, Brun E. Snow and climate: physical processes, surface energy exchange and modeling[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [29] Hagenmuller P, Theile T C, Schneebeli M. Numerical simulation of microstructural damage and tensile strength of snow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(1): 86-89.
- [30] Dong Peiwen, Liu Guoqiang, Zhang Bowen, et al. Magic of turning water into snow: artificial snowmaking technology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(21): 2447-2449. [董佩文, 刘国强, 张博文, 等. “冰雪魔术”变水成雪: 人工造雪技术[J]. 科学通报, 2022, 67(21): 2447-2449.]
- [31] Proksch M, Rutter N, Fierz C, et al. Intercomparison of snow density measurements: bias, precision, and vertical resolution[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(1): 371-384.

## Preparation of icy piste for alpine skiing under different weather conditions

JI Kaicheng<sup>1</sup>, DING Minghu<sup>2,4</sup>, SUN Weijun<sup>1</sup>, TIAN Biao<sup>2</sup>, ZHAO Shoudong<sup>2</sup>,  
WEN Haikun<sup>3</sup>, LÜ Hongyou<sup>6</sup>, ZHANG Dongqi<sup>2</sup>, WANG Feiteng<sup>4</sup>,  
QIN Dahe<sup>4</sup>, XIAO Cunde<sup>4,5</sup>

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather / Institute of Global Change and Polar Research, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;  
3. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 4. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 6. Chinese National Alpine Skiing Center, Beijing 102100, China)

**Abstract:** To surmount the technical obstacles in producing alpine skiing pistes for high-level events such as the Winter Olympic, this study carried out various snow piste production experiments at the Heilongjiang Yabuli Sports Training Base, the Genting Resort Secret Garden, and the National Alpine Ski Center in Yanqing. The study discovered that a cloudless sky with a temperature of  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  is the ideal condition for icy piste production. The optimal scheme is  $-15\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperature)/6~9 bar (water injection pressure)/4~8 s (water injection duration). Based on experimental data, this study established the qualification standards for icy piste and the first international weather-water injection quantitative model for icy piste production. The model has the capability of being applied to alpine events in continental climate conditions and also has the potential to be expanded to other cold and dry regions. Furthermore, we discovered that the quality of the track is significantly influenced by the water content and microstructure of artificial snow. The lower the water content, the smaller the snow particles become, leading to a more uniform snow morphology and improved stability and track hardness. This achievement fills the gap in domestic ice and snow sports support technology and can provide intellectual support for China to undertake large-scale ice and snow events.

**Key words:** cryosphere service; icy piste; Winter Olympics; snow and ice engineering technology; alpine skiing

(责任编辑: 王宁练)