

# 气象因子对滑雪运动发展的影响

包苏伦高娃<sup>1</sup> 王一飞<sup>2</sup> 阿荣<sup>3</sup>

(1 内蒙古自治区气象服务中心, 呼和浩特 010051; 2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;

3 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022)

**摘要:** 在全球气候变暖、极端天气发生概率增加的大背景下, 如何以健康绿色可持续的方式发展滑雪运动正在成为一个挑战。主要通过文献调查法和实地调研法探讨与滑雪运动密切相关的气象因子和雪质之间的关系。国内外文献调研发现, 气象条件与滑雪运动之间的关系研究较少, 国内相关研究以定性描述居多, 国外则多侧重于生物力学、气象因素与滑雪摩擦力之间的综合性微观研究。通过考虑在全球气候变暖大背景下如何有效判断气象对滑雪运动的影响, 以及怎样保证雪质、雪量等问题, 从气象的角度探讨了冬季冰雪运动的影响因子, 以丰富该领域的研究成果。

**关键词:** 气象因子, 滑雪运动, 影响

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.008

## Analysis on the Possible Influence of Weather Factors on Skiing

Bao Sulungaowa<sup>1</sup>, Wang Yifei<sup>2</sup>, A Rong<sup>3</sup>

(1 Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Service Center, Hohhot 010051 2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081 3 College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022)

**Abstract:** Under the background of global warming and the increasing probability of extreme weather, the green and sustainable development of winter sports has become a challenge. This paper mainly discusses the relationship between meteorological factors and snow quality closely related to winter sports through literature investigation and field investigation. After collecting the literature at home and abroad, it is found that in China, the study on the relationship between meteorological conditions and winter sports is mostly qualitative description, while in foreign countries, the attention is paid to the micro research on meteorological factors, biomechanics, and ski friction. Under the background of global warming, how to effectively judge the impact of meteorology on winter sports and how to ensure snow quality and snow volume remain as key determinants. This paper discusses the influencing factors of winter ice and snow sports from the perspective of meteorology so as to enrich the research results in this field.

**Keywords:** weather factors, winter sports, influence

### 0 引言

全球气候变暖已经导致我国北方冬季降雪量减少, 雪期缩短。所以如何合理开发利用气候资源、降低成本、实现滑雪场可持续发展, 或建设可持续滑雪场是冬季旅游业关注的热点话题。本文通过用分段法检索“雪质”“滑雪运动”和“滑雪气象”等关键词, 在谷歌学术、百度学术、万方数据与中国知网(CNKI)检索到1992—2019年国内外体育与气象相关专业类期刊上发表的关于滑雪运动-雪质-气象相关的学术论文150余篇, 发现相关领域研究尚处于探索阶段, 存在的问题较多。科学认识气象因子如何影响滑雪运动发展具有重要的现实意义。

收稿日期: 2022年3月21日; 修回日期: 2022年9月18日  
作者: 包苏伦高娃(1987—), Email: 790537770@qq.com

### 1 气象因子对雪上运动发展的影响

据世界气象组织发布的《2020年全球气候状况声明》, 20世纪80年代以来, 每10年比前一个10年更暖, 有记录以来的6个最暖年均出现在2015年以后。气温每升高1℃, 雪线将上升约150 m。由于全球变暖, 雪期开始日推迟与雪期结束日提前, 降雪量减少、滑雪营业期缩短已经是不争的事实。为应对此类问题, 国内即使是降雪充沛的东北也都靠人造雪铺设雪道、保证雪质雪量, 以延长滑雪营业期。

随着人造雪的大量应用, 其对环境带来的负面影响也日益凸显。据杨建英等<sup>[1]</sup>分析, 人造雪融雪造成的土壤侵蚀度为中度, 坡度大时融雪造成的水土流失会更严重。一些欧美国家已经开始不提倡人工造雪, 导致在这些国家随着雪期的缩短, 滑雪人数在减少<sup>[2]</sup>。

## 1.1 气象因子对冬奥会赛事的影响

雪上竞技赛一般在海拔较高、地形较复杂的山野进行，大风、高温、大雪、大雾等致灾性的天气条件直接决定比赛能否正常进行。冬奥会举办城市的选址，有两条硬性气象指标，2月平均气温 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，降雪量 $>30\text{ mm}$ 。主办城市这两项指标中，任一项概率 $<75\%$ 时，则没有资格申请冬奥会。所以，气象指标是历届冬奥会选址的重要依据。

对于成人滑雪，Shih等<sup>[3]</sup>针对高山滑雪人群做调研，认识到滑雪爱好者最关注的气象条件是气温。气温高、雪质不易达标，气温过低又不适宜滑雪。气温过低容易引起滑雪者不适，肌肉收缩，运动受阻，对人体健康产生影响。当日最高气温 $<-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，普通人不宜户外活动<sup>[4]</sup>。而竞技型的滑雪运动员为适应各种气候条件，要求在全国各地训练，适应当地寒冷环境。不同的比赛项目气温临界阈值也有差异，以北京冬奥会为例，如表1。

表1 北京冬奥会雪上赛事气象阈值

Table 1 Meteorological thresholds for snow events at the Beijing Winter Olympics

比赛项目	最高时速/(km/h)	气象阈值	雪质
高山滑雪	140	能见度 $<200\text{ m}$ 、气温 $<-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或气温 $>1\text{ }^{\circ}\text{C}$	冰状雪
跳台滑雪	110	风速 $>5\text{ m/s}$ 、风向变化 $>90^{\circ}$ (侧风) 新增积雪 $>3\text{ cm/h}$	粉状雪(跳前)、 浆状雪(着落与 停止区)
雪橇、雪车 (室内)	130~150	赛道温度： $-2\sim-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	冰面雪

滑雪最高时速能达 $140\text{ km/h}$ ，滑雪过程中影响动态平衡的主要气象因子是风速和风向。依“滑雪气象指数”行业标准，对于大众娱乐型滑雪运动最适宜的风速条件为 $<3.5\text{ m/s}$ <sup>[5]</sup>。但竞技型的滑雪运动会根据不同的风速、风向调整赛事。如，全国冬运会跳台滑雪比赛气象要素临界阈值，风速 $>4\text{ m/s}$ ，风向变化 $>90^{\circ}$ 或上下坡风速差 $>4\text{ m/s}$ 。评委在合理的范围内，根据风速和风向来调整最终得分。跳台滑雪当处于适当的逆风条件下时，有利于运动员的起跳高度，因为逆风会延缓运动员身体下降速度，而顺风则会加快下降速度，起跳高度越高越有利于运动员空中动作的完成，这是运动员得分的关键点。但是，对于其他对滑行速度有要求的大部分滑雪项目，合理的顺风，运动员可以借助风势，滑行速度会显著加快，而在逆风条件下，风速阻力占滑行总阻力的 $80\%$ <sup>[6]</sup>，此时滑行速度会大打折扣，从而影响运动员的总成绩。因此为了保证运动员最后成绩的公平性，冰雪体育运动是对气象条件要求最苛刻的运动项目。

河北冬奥会服务团队“2018/19年冬训预报检验

及赛事影响评估”报告中分析单板滑雪U型场地技巧资格赛因平均风指标超过阈值，而取消了该项训练。但是，目前因为国内针对山地地形较复杂的局部精细化预报和短时临近预报技术研究经验较少，做好冬季滑雪多方位精细化智慧气象服务保障工作面临着种种挑战。

## 1.2 气象因子对赛道雪质的影响

雪质是指在降雪过程中和降雪过后因为气象条件不同而形成不同形态的雪沉积，雪的含水率、雪温、吸光颗粒物(黑炭、有机碳和沙尘是大气中三种主要的吸光性颗粒物)的变化导致雪质发生不同的变化<sup>[7-8]</sup>。滑雪爱好者选择滑雪场首先考虑雪道雪质量、滑雪体验感等问题。自然积雪的雪密度一般在 $250\sim300\text{ kg/m}^3$ ，这种粉状雪稳定性差，容易受高温、风沙侵蚀而变成烂泥<sup>[9]</sup>。人造雪是由水滴形成，晶核比自然雪更紧密，所以人造雪与自然雪相比，有含水率高、密度大、抗风沙侵蚀等特点。 $10\text{ cm}$ 的人造雪相当于 $40\text{ cm}$ 的自然雪。因此，滑雪场为保证雪质和雪量，以及延长滑雪营业期而普遍用人造雪。

气温变化过大，会使雪密度产生变化，雪质变硬(软)，滑雪摩擦力变化，导致运动员失去平衡发生摔伤等安全隐患。气温高，雪的含水率增多，雪质过软，滑雪摩擦力、推雪阻力变大，滑雪速度下降，影响比赛最后成绩。例如，对于完成跳台滑雪和自由式滑雪的着落或停止，需要滑雪摩擦力偏大的软雪质。但对于滑雪速度有要求的高山滑雪比赛，国际型赛道为比赛的公平性，赛道表面必须保持结晶状态，在近似于冰面的冰状雪上进行。冰状雪滑雪摩擦力小，雪质较硬，雪道不易被破坏。选手不论第几次出场，赛道雪质都保持良好。所以雪质关系到滑雪者的体验、安全等问题，也会影响到竞技赛的公平性。

### 1.2.1 不同级别滑雪场雪质要求分级讨论

雪质变化指的是雪的硬度和积雪的厚度产生变化，而雪硬度是由雪温、雪密度和雪的含水率决定。以休闲娱乐为主的中高级滑雪道要求坡度 $12^{\circ}\sim30^{\circ}$ 、雪密度一般 $450\sim500\text{ kg/m}^3$ <sup>[10]</sup>。不同等级滑雪场雪道标准要求见表2。

表2 不同等级的高山滑雪雪道标准<sup>[11-13]</sup>

Table 2 Different levels of alpine skiing standards

雪道	雪密度/( $\text{kg/m}^3$ )	坡度/ $^{\circ}$	宽度/m	长度/km
初级赛道	350~450	4~8	$>20$	$>1$
中级赛道	450~500	6~12	$>25$	$>2$
高级赛道	500~540	12~24	$>30$	$>10$
国际赛道	$>540$	一般 $<40$	$>60$	$>18$

初级雪道密度一般 $<450\text{ kg/m}^3$ ，雪质较松软，这

种雪质一般会在中午经过辐射和高温的影响导致表层雪融化,形成粘滞性较高、推雪阻力较大、安全系数较高的雪质。以休闲娱乐为目的的滑雪场雪密度一般在 $350\sim 500\text{ kg/m}^3$ ,滑雪者一般以娱乐为主,雪道密度不能太大,因为初学者由于速度、力量、技巧把握不当而容易擦伤或者摔伤。竞技型滑雪场要求雪道密度 $>500\text{ kg/m}^3$ ,赛道平均雪厚 $50\sim 60\text{ cm}$ ,而世界杯等级更高级别滑雪赛道用雪密度 $540\sim 560\text{ kg/m}^3$ 。

实际雪道厚度一般根据区域常年气候特征,结合不同级别滑雪场赛道标准来增加厚度。比如北京冬奥会和冬残奥会,高温、大风是影响造雪效率和后期保障雪质的主要因素。不同滑雪项目对赛道雪的厚度和密度要求也不尽相同。依据国际单项联合会不同雪上项目赛道的标准要求,结合不同赛区气象风险特征,北京冬奥会对赛道铺设要求主要分成三大类:一类是延庆赛区高山滑雪,包括速降雪道、超级大回转雪道、回转雪道、大回转雪道,雪道密度为 $650\text{ kg/m}^3$ ,厚度从 $1\text{ m}$ 增至 $1.5\text{ m}$ ,以应对气温上升形成的融雪损失;第二类是崇礼冬季两项、越野、跳台等场地,赛道厚度 $1\text{ m}$ 、造雪密度 $450\text{ kg/m}^3$ ;第三是崇礼云顶赛区自由式滑雪和单板滑雪,赛道厚度 $1.25\text{ m}$ ,造雪密度 $450\text{ kg/m}^3$ 。

目前因为对滑雪场的不同雪质的含水率没有标准化定义,对于根据不同滑雪人群和不同级别滑雪场雪道含水率应达到哪个标准更适宜无法量化。国际标准是根据含自由液态水百分率将积雪分为干雪( $0\%$ )、潮(微湿)雪( $<3\%$ )、湿雪( $3\%\sim 8\%$ )、非常湿( $8\%\sim 15\%$ )、雪浆( $>15\%$ )<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2.2 气象条件对雪质变化影响研究进展

气候变化对自然积雪面积以及消融特征研究的较多,关于气象条件对雪道雪质变化研究较少,尤其气象因素对人造雪雪质变化造成的负面影响量化分析较少<sup>[15-16]</sup>。雪量和雪质变化难以预判,历届冬奥会因为灾害性天气导致雪质和雪量的变化而延迟赛事,甚至有些项目被取消。赛道雪温一般要求 $<0\text{ }^\circ\text{C}$ ,当温度 $<-5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,人工造出的雪质较佳<sup>[17]</sup>。湿球温度和湿度越低,越适合人工造雪。从而开发人员一般考虑在冬季气温 $<0\text{ }^\circ\text{C}$ 的天数 $>90\text{ d}$ ,平均湿度 $<80\%$ ,最小坡度 $>7^\circ$ ,高度差 $>500\text{ m}$ 的地段建设滑雪场<sup>[18-19]</sup>。

不同的气温、湿度、辐射、风速综合影响雪温、雪硬度和雪密度,而雪硬度和雪密度的差异会给滑雪者带来不同的体验感。自然雪也叫粉雪,因为含水率低、密度小,舒适度高,滑雪爱好者们比较推崇这种雪质。人造雪因为晶核形成时间短,晶体生长快,雪片含水率高,雪质较硬,舒适度不如自然雪。但随着

造雪技术的提高,微风条件下,当湿球温度 $<-5\text{ }^\circ\text{C}$ ,湿度 $<50\%$ 时,能够造出接近自然雪质的粉雪<sup>[20-21]</sup>。根据不同气象条件,能够造出不同雪温、黏度、摩擦力、颗粒大小的雪晶。因为造雪的过程和造雪后容易受气象条件的影响而雪质发生变化。所以滑雪场造雪的同时还要用造雪机把雪压实、增加雪密度,使雪道滑起来更快,同时能有效抗高温、风沙,保证雪质雪量。

自然积雪容易受到气温、辐射和空气湿度的影响,雪质呈现出颗粒状、浆状、壳状或冰状等60多种形态。在气象预报中雪质划分成五大类,干粉雪、粉雪、软雪、湿雪和冰面雪,根据天气现象、湿球温度、风速、温度等综合气象条件预报雪质状态<sup>[22]</sup>。新下的雪,含水率低,密度小、雪质蓬松,触感舒适。经过午后太阳辐射、风沙侵蚀和雪板不断翻动下,雪的湿度变大、雪质发粘、摩擦力变大,起初雪质属于浆状,随着湿度变大、雪质失去粘滞性而变成泥状雪。壳状雪一般在北方因为不受海洋性气候的影响而湿度小,有一定厚度的自然雪长期被风吹后表面形成一层硬壳状的雪,密度很大,底层普遍发育雪下冰晶。冰状雪一般在昼夜温差大的地区容易形成,雪面经过午后辐射高温的影响导致雪的含水率增多,接近傍晚时分气温骤降导致水分结晶,近似于冰面

## 2 滑雪阻力研究进展

### 2.1 滑雪摩擦系数的确定

滑雪摩擦力是指滑行过程中滑雪板滑行面与雪面之间产生的阻力。摩擦系数是指两表面间的摩擦力和作用在其一表面上的垂直力之比。在无风条件下,滑雪摩擦力越小,滑行速度就越快。滑雪摩擦力与雪硬度、雪面粗糙度、雪温、雪含水率、雪板打蜡厚度和种类有关<sup>[23-25]</sup>。以跳台滑雪为例,跳台滑雪的起跳是关键动作,而助滑速度大小决定起跳的长度,助滑速度的大小会受到雪板与雪面之间的摩擦力的影响,以科学的方式达到最小摩擦力而获得最大的助滑速度是该领域研究的关注点。如果能测算出最小摩擦系数的打蜡方法,就可以获得最大的台端速度。

陈兢等<sup>[21]</sup>根据刚体动力学的理论,通过高速射影方法测算摩擦系数,由质心运动定理得摩擦系数,刚体力学是在比较理想的状态下预测滑雪摩擦系数,此计算方法是最基本的物理计算公式,类似于Kennedy等<sup>[23]</sup>曾提出的干摩擦计算模型。但是,Lozowski等<sup>[26]</sup>认为温度再低也不会存在理想的干摩擦力,因此提出湿摩擦理论,认为滑雪过程中产生的热量传递给雪,如果达到雪熔点,会产生水溶膜起到润滑剂的作用,

减少摩擦力。后来, Nachbauer等<sup>[27]</sup>提出混合模型, 滑雪过程中干(湿)摩擦不会单独存在, 在许多情况下, 雪面和滑雪板可能不会被水膜完全分开, 因此会发生固-固接触以及润滑接触, 即存在混合润滑条件。混合模式考虑了气象、生物力学等综合影响因素。该模型是通过大量的反复实操得出结论, 较符合实际滑行运动。该模型看似简单, 但混合摩擦系数的计算, 干混合怎么界定, 液态融膜厚度的计算等问题仍需要大量的采样, 结合3D模型与GIS技术推进和优化, 做出便于使用和推广的滑雪摩擦系数的预算模型。

## 2.2 空气阻力的确定

滑雪运动员在滑行的过程中受空气阻力(除了顺风滑行)的影响而滑行速度会变慢。普通高山滑雪速度 $>10\text{ m/s}$ 时, 空气阻力就会大于其他阻力<sup>[25]</sup>。空气阻力与迎风面积、形状和滑行速度有关。目前通用的空气阻力计算公式为:

$$F=1/2CPSV^2, \quad (1)$$

式中,  $C$ 为与物体形状有关的阻力系数,  $P$ 是空气的密度, 正常的干燥空气可取 $1.293\text{ g/L}$ , 特殊条件下可以实地监测,  $S$ 为滑行者迎风面积,  $V$ 为人体与气流的相对运动速度。滑雪者通过改变滑行的姿势来减小正面投影面积, 以达到减少空气阻力的效果。试验表明, 物体在空气中流动的形状接近“鸡蛋”形状, 也就是身体与气流接触面是有弧度的逐渐变方向而不是有棱角的方向突变, 这样就能降低空气阻力系数<sup>[28-29]</sup>。相关试验表明, 运动员把身体往前倾, 滑雪杖放在胸前保持低姿势, 既能减少迎风面积, 也达到了最有利的形态, 是最有效的降低空气阻力的姿势。如何减少空气阻力, 目前的研究重点是, 滑雪服怎么能达到紧身、透气、保暖、舒适, 以提高滑雪运动员成绩。试验表明, 穿宽松滑雪服空气阻力增加了40%, 所以滑雪服的设计和材质的选择考虑涂层、透气性、保暖、拉伸等问题<sup>[30-31]</sup>。

以上是空气阻力的基础计算模型, 但实际风速阻力的计算, 复杂程度远远超过理论计算模型, 因为每个滑雪场的地形地貌、气候特征不同。东北林业大学2019年的专利“一种滑雪场运动员风阻耗能评估方法”根据滑雪场地形地貌结合滑雪场风场分布函数特征, 按照运动员典型运动姿态, 通过GIS技术和高分辨率遥感影像数据处理技术, 建立了运动员风阻耗能评估模型<sup>[32]</sup>。

## 3 结论

1) 滑雪运动本身的性质决定了该项运动对气象条件敏感度远超其他运动项目。特别是竞技型的滑雪运动, 为保证比赛前后出场人的公平性, 对雪质、风向、

风速要求较高。大众娱乐型滑雪场、竞技型滑雪场对表征雪质参数的雪硬度、密度、厚度标准要求有差异。

2) 大量相关研究已证实, 全球气候变暖导致降雪量减少、雪线上升、雪期缩短, 冬季滑雪旅游或冰雪竞技体育场所面临规格标准不达标、运营成本加大、参与冰雪活动人数减少等问题, 这些都直接或间接影响到冰雪体育事业的普及与发展。研究气象条件-雪质-滑雪运动之间的联系成为该研究领域的关注点。近5年国内由于冬奥会的成功申办, 气象-滑雪之间的关系研究变得迫切, 越来越多的研究者投入该领域的工作, 逐渐从过去定性描述迈入科学量化阶段。

3) 从微观尺度上, 滑雪阻力有雪板摩擦力和空气阻力。提高滑雪速度, 除了运动员训练程度, 还需介入科学手段去尽量减少滑雪过程中产生的阻力。气象条件是雪板摩擦力、空气阻力产生变化的主要影响因素。提升相关研究领域的深入程度, 直接关系到气象服务智慧化、精细化、精准程度。

## 参考文献

- [1] 杨建英, 梁德栋, 史常青, 等. 滑雪道人造雪融雪产流产沙特征. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(3): 95-102.
- [2] 杨建明, 万春燕. 全球气候变化对冬季滑雪旅游的影响. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 356-361.
- [3] Shih C, Nicholls S, Holecek D F. Impact of weather on downhill ski lift ticket sales. Journal of Travel Research, 2008, 47(3): 359-372.
- [4] 段姮晗. 冰雪旅游气候舒适度评价研究. 上海: 上海师范大学, 2021.
- [5] 王天柱, 吴正兴, 喻俊志. 冰雪运动生物力学及其机器人研究进展. 自动化学报, 2019, 45(9): 1620-1636.
- [6] 闫乃鹏. 影响高山滑雪运动员滑行阻力的主要因素. 冰雪运动, 2006, (5): 18-20.
- [7] 高培, 魏文寿, 刘明哲. 新疆天山积雪稳定期不同下垫面雪物理特性对比. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 15-19.
- [8] 朱志强, 王飞, 王东海. 2022年北京冬奥会造雪关键问题研究. 体育科学, 2020, 40(10): 31-40.
- [9] 庄峰. 积雪硬度及其测试技术的实验研究. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [10] 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. 冰川冻土, 2017, 39(4): 902-909.
- [11] 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. 冰雪运动, 2016, 38(2): 78-82.
- [12] 陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 季节性森林积雪融雪期雪层含水率垂直廓线随时间变化特征. 地理研究, 2011, 30(7): 1244-1253.
- [13] 赵求东, 刘志辉, 秦荣茂, 等. 融雪模型研究进展. 新疆农业科学, 2007, (6): 734-739.
- [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. 哈尔滨体育学院学报, 2017, 35(6): 51-55.
- [15] 许启慧, 范引琪, 于长文, 等. 滑雪场建设气候条件分析. 气象科技, 2014, 42(5): 938-944.
- [16] 刘中新, 陶列. 大别山人造雪滑雪场选址气象条件分析及风险评估. 中低纬山地气象, 2018, 42(2): 81-84.
- [17] 杨占武. 北京冬奥会和冬残奥会人工造雪的研究. 冰雪运动, 2017, 39(1): 1-8.
- [18] 刘道平, 郇志敏, 华泽钊. 雪晶形成过程与人工造雪机技术. 制冷与空调, 2003, (2): 1-5.
- [19] 杨立祥. 造雪机的研究及分析. 机电产品开发与创新, 2010, 23(3): 43-45.
- [20] 曲庚新. 对高山滑降滑雪中身体稳定性的探讨. 冰雪运动, 1984,

- (2): 25-30.
- [21] 陈兢, 李润, 关佐恒. 跳台滑雪运动雪板与雪面间摩擦系数研究. 冰雪运动, 1992, (4): 43-45.
- [22] 张才成. 对影响高山滑雪滑行速度因素的分析. 冰雪运动, 2000, (4): 25-26.
- [23] Kennedy F E, Schulson E M, Jones D E. The friction of ice on ice at low sliding velocities. Philosophical Magazine A, 2000, 80(5): 1093-1110.
- [24] Rist M A. High-stress ice fracture and friction. Journal of Physical Chemistry B, 1997, 101(32): 6263-6266
- [25] 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. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 202-208.
- [26] Lozowski E, Szilder K, Poirier L. A bobsleigh ice friction model. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2014, 24(1): 52-60.
- [27] Nachbauer W, Kaps P, Mössner M, et al. Effects of ski and snow properties on the turning of Alpine skis—a computer simulation. Journal of Biomechanics, 2006, 39: S188.
- [28] You J, Tarboton D G, Luce C H. Modeling the snow surface temperature with a one-layer energy balance snowmelt model. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 10(12): 15071-15118.
- [29] Baeurle L, Kaempfer U, Szabo D, et al. Sliding friction of polyethylene on snow and ice: contact area and modeling. Cold Regions Science and Technology, 2007, 47(3): 276-289.
- [30] Steiger R, Mayer M. Snow making and climate change. Mountain Research and Development, 2008, 28(3): 292-298.
- [31] Hamilton L C, Brown C, Keim B D. Ski areas, weather and climate: time series models for New England case studies. International Journal of Climatology, 2010, 27: 2113-2124.
- [32] 王才勇, 曹立春. 全球变暖对雪上赛事的影响及对策. 冰雪运动, 2011, 33(3): 72-74.

(上接48页)

- 计与实现. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [10] 侯颀. 气象数据质量控制与监控系统的设计. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [11] 李涛, 郁美辰, 陆正邦, 等. 基于关联规则挖掘的气象观测设备一致性检测算法. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(10): 1568-1573.
- [12] 维克托·迈尔-舍恩伯格. 大数据时代: 生活、工作与思维的大变革. 杭州: 浙江人民出版社, 2013.
- [13] 沈文海. 再析气象大数据及其应用. 中国信息化, 2016, (1): 85-96.
- [14] Quinlan J R. C4.5 Programs for machine learning. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1992.
- [15] Breiman L, Friedman J H, Olshen R, et al. Classification and regression trees. Encyclopedia of Ecology, 1984, 40(3): 582-588.
- [16] Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [17] Anil K. Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters, 2010, 31 (8): 651-666.
- [18] 王千, 王成, 冯振元, 等. K-means聚类算法研究综述. 电子设计工程, 2012, 20(7): 21-24.
- [19] Rousseeuw P J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1999, 20(20): 53-65.
- [20] 刘华婷, 郭仁祥, 姜浩. 关联规则挖掘Apriori算法的研究与改进. 计算机应用与软件, 2009, 26(1): 146-149.
- [21] Onal A C, Sezer O B, Ozbayoglu M, et al. Weather data analysis and sensor fault detection using an extended IoT framework with semantics, big data, and machine learning// IEEE International Conference on Big Data. IEEE, 2018.
- [22] 张齐东, 熊雄. 空间回归检验方法在地面气象资料质量控制中的应用——以逐时气温资料为例. 内燃机与配件, 2017(10): 152-153.
- [23] 尹婧姣, 江志红, 吴息, 等. 空间差值检验方法在地面气象资料质量控制中的应用. 气候与环境研究, 2010, 15(3): 229-236.

(上接52页)

平均气温直减率排序为八仙观站>南岩站>太子坡站>紫霄宫站。

5) 武当山景区日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温垂直变化趋势同平均气温相近, 二者随着海拔升高而下降, 在低山地区更突出。

#### 参考文献

- [1] 管延龙, 王让会, 李成, 等. 天山北麓1963—2010年0 cm最高与最低地表温度变化特征. 干旱气象, 2015, 33(4): 587-594.
- [2] 王朋岭, 唐国利, 曹丽娟, 等. 1981—2010年青藏高原地区气温变化与高程及纬度的关系. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 313-319.
- [3] 王海军, 张勃, 靳晓华, 等. 基于GIS的祁连山区气温和降水的时空变化分析. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1196-1202.
- [4] 林之光, 安顺清, 吴其勋, 等. 武夷山区气温垂直梯度的研究. 气象, 1983, 9(4): 18-19.
- [5] 郑成洋, 方精云. 福建黄岗山东南坡气温的垂直变化. 气象学报, 2004, 62(2): 251-255.
- [6] 黄承标, 卢立华, 温远光, 等. 大青山林区不同海拔高度主要气象要素的变化. 贵州农业科学, 2011, 39(1): 90-95.
- [7] 丁焯毅, 高益波, 胡波, 等. 四明山区域气温的垂直变化特征分析. 浙江气象, 2017, 38(4): 42-44.
- [8] 田杰, 王庆伟, 于大炮, 等. 长白山北坡气温的垂直变化. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 65-69.
- [9] 张锦斌, 蔡志林, 姚健, 等. 雁荡山区气候垂直变化分析. 浙江农业科学, 2014, 55(3): 403-405.
- [10] 周礼华, 黄力, 钱深华, 等. 金佛山西坡气温的垂直变化特征. 山地研究, 2019, 37(6): 818-827.
- [11] 曾琦, 任国玉. 湖北省主要山系高影响天气指标空间特征分析与建模. 暴雨灾害, 2020, 39(2): 192-200.
- [12] 王海军, 杨志彪, 杨代才, 等. 自动气象站实时资料自动质量控制方法及其应用. 气象, 2007, 33(10): 102-109.
- [13] 任芝花, 张志富, 孙超, 等. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统设计. 气象, 2015, 41(10): 1268-1277.
- [14] 范宏飞. 自动气象站资料质量控制系统设计. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 33(4): 470-478.
- [15] 黄嘉佑. 气候状态变化趋势与突变分析. 气象, 1995, 21(7): 54-57.
- [16] 周淑贞. 气象学与气候学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 1997: 56-58.
- [17] 杨萍, 肖子牛, 刘伟东. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析. 大气科学, 2013, 37 (1): 101-112.
- [18] 王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 中国极端气温季节变化对全球变暖减缓的响应分析. 冰川冻土, 2016, 38(1): 36-46.
- [19] 熊敏述. 基于集合预报系统的日最高和最低气温预报. 气象学报, 2017, 75(2): 211-222.
- [20] 陈锋, 董美堂, 冀春晓. 综合分析法在复杂地形气温精细格点化中的应用. 高原气象, 2016, 35(5): 1376-1388.
- [21] 武丽梅, 陈璐, 王凯, 等. 中国大陆1983—2012年年极端气温时空变化特征. 干旱气象, 2016, 34(6): 945-951.
- [22] 段春锋, 缪启龙, 曹雯, 等. 以高山站为背景研究城市化对气温变化趋势的影响. 大气科学, 2012, 36(4): 811-822.
- [23] 汪凯, 叶红, 唐立娜, 等. 气温日较差研究进展: 变化趋势及其影响因素. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 417-423.
- [24] 董丹宏, 黄刚. 中国最高、最低温度及日较差在海拔高度上变化的初步分析. 大气科学, 2015, 39(5): 1011-1024.
- [25] 刘少华, 严登华, 翁白莎, 等. 近50 a中国 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温时空演变. 干旱区研究, 2013, 30(4): 689-696.