

积雪变化及其对北京冬奥会的潜在影响^①

钱昊^② 赵家锐 范宇宾 柯长青^③

(南京大学地理与海洋科学学院 南京 210023)

摘 要 第 24 届冬季奥林匹克运动会将于 2022 年在北京、张家口举行,因此监测和分析当地积雪时空变化特征对筹备冬奥会相关工作具有重要意义。本文选用气象观测资料, AVHRR、MODIS、SMMR/SSM/I/SSMIS 等遥感数据反演的积雪参数,以及区域气候模式的模拟预测结果来分析冬季积雪的时空变化特征及其对冬奥会的潜在影响。结果表明冬季积雪面积、深度、覆盖频率和积雪日数均呈现微弱增加趋势。张家口的积雪资源优于北京,“延庆-张家口市区-崇礼”方向积雪深度等参数高于周围地区,冬奥会比赛场地的布设比较科学、合理。但是各项积雪指标均处于较低水平,年际波动大,积雪稳定性差。而且未来 2 月份的气温呈上升趋势,降水反而呈减少趋势,这将进一步降低积雪的稳定性,对冬奥会有一定的负面影响。因此,需要做好人工造雪的准备,以保证充足的雪量和冬奥会赛事的正常举办。

关键词 积雪;气象观测;遥感;时空变化特征;北京冬奥会

0 引 言

积雪是由降雪形成的覆盖在地表的雪层,是自然界地表重要的要素之一,覆盖陆地表面约 33% 的面积^[1]。积雪特性敏感活跃,可以显示气候系统的变化,其低导热率和高反射率的特征对于区域尺度甚至于全球范围的能量平衡、气候变化、辐射以及人类活动都有重要影响^[2-6]。在全球气候变暖的背景下,积雪的时空变化日益成为科学界以及政府部门关注的热点。联合国政府间气候变化专门委员会 2013 年公布的评估报告显示,1880 - 2012 年,全球尺度地表平均温度升高 0.85 ℃,全球变暖趋势加剧^[7,8]。冰川处于持续萎缩的状态,海冰也呈持续减少的状态。自 20 世纪 50 年代以来,北半球积雪面积持续减小^[9]。

2022 年 2 月 4 日至 20 日北京市、张家口市将

承担冬奥会共计 7 大项、102 小项的所有冰雪项目。因此,监测和分析该区域积雪时空分布和变化特征对筹备冬奥会相关赛事具有重要意义^[10]。

传统的积雪监测方法依靠气象站工作人员在降雪季节每天进行实地测量^[11],获取数据的时间序列较长、准确性较高^[12]。但观测站受地形等自然条件因素的限制,分布并不均匀,因此气象观测数据也有局限性^[13],不能反映大尺度的积雪时空变化^[14]。20 世纪 60 年代发展起来的遥感技术解决了这一问题,人们利用卫星遥感对积雪分布及时空变化特征进行监测的历史也超过了半个世纪。高级超分辨率辐射计(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)、多光谱扫描仪(multispectral scanner, MSS)、专题成像仪(thematic mapper, TM)、增强型专题成像仪(enhanced thematic mapper, ETM+)以及中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)等可见光传感器和高级

① 国家重点研发计划项目(2018YFC1407203)资助。
② 男,1991 年生,硕士;研究方向:遥感及应用研究;E-mail: qianhao0823@126.com
③ 通信作者,E-mail: kecq@nju.edu.cn
(收稿日期:2018-12-25)

微波扫描辐射计 (advanced microwave scanning radiometer-EOS , AMSR-E)、多通道微波扫描辐射计 (scanning multichannel microwave radiometer,SMMR)、专用传感器微波成像仪 (special sensor microwave imager, SSM/I)、专用传感器微波成像仪/发声器 (special sensor microwave imager/sounder, SSMIS)等微波传感器的应用为积雪监测提供了丰富的数据资料^[15,16]。遥感技术具有探测面积广、获取方式多样等优点^[17]。并且人们也在逐渐减小云对光学遥感数据的影响^[18,19],改善空间、时间分辨率,从而提升遥感监测积雪的准确性。因此本文将遥感数据与气象站观测数据结合起来,多角度、多层次地监测和分析北京-张家口地区的积雪时空变化特征。

1 研究区与数据

1.1 研究区

由于降雪是大尺度的天气气候现象,所以本文的分析不局限于冬奥会的举办地北京市区、延庆和张家口市崇礼县,并从大尺度的区域气候背景进行

积雪的变化分析。研究区以北京市和张家口市为中心,周围包含内蒙古自治区、河北省、天津市和山西省的部分区县(图 1(a)),简称京张地区。研究区位于 113°08′~ 118°05′E,39°01′~ 42°20′N,面积约为 $1.06 \times 10^5 \text{ km}^2$,平均海拔为 928 m,最高海拔为 2 836 m。北京市和张家口市崇礼县在 2022 年冬季奥林匹克运动会比赛中分别承办冰上项目和雪上项目(延庆协办)。北京市约 62% 的地区属于山区,平均海拔较低。延庆隶属于北京市,与张家口市接壤,坐落于西北部,与市区的距离为 74 km,平均海拔 500 m 以上。延庆山区面积占总面积 70% 以上,境内最高峰海坨山海拔为 2241 m,具有较好的积雪覆存地形地貌特征,是北京冬奥会部分高山滑雪项目的举办地。张家口市位于河北省西北部,东南毗邻北京市,地势走向也满足“西北-东南”降低的态势(图 1(b))。崇礼县隶属于张家口市,境内 80% 为山地,海拔高度为 813 ~ 2 174 m,冬季降雪早,积雪厚、存雪期长,6 个冬奥会室外场馆中有 5 个设于此。

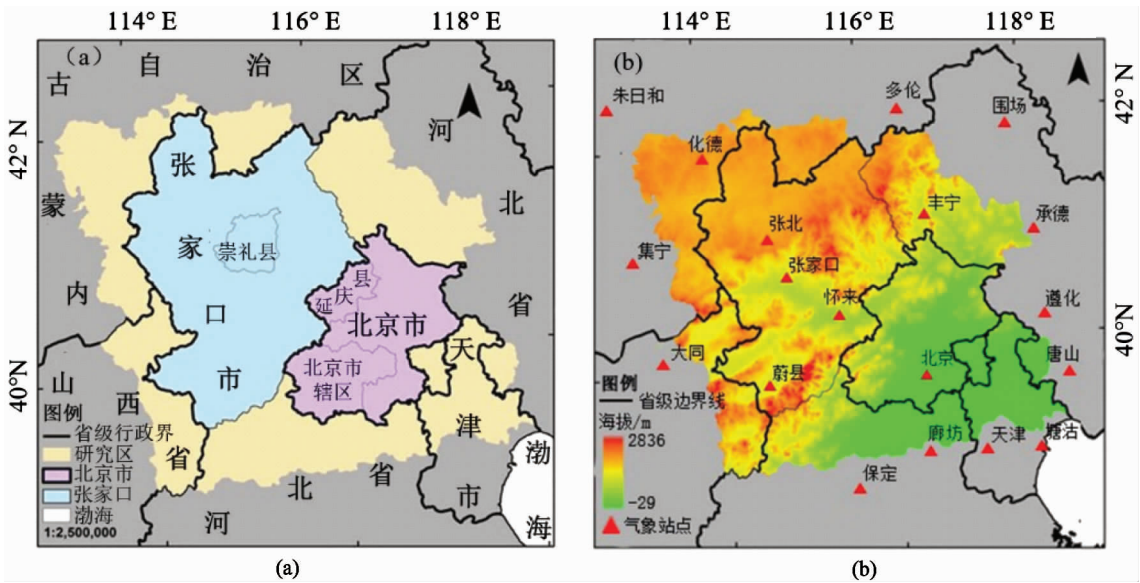


图 1 冬奥会举办地北京延庆区以及张家口崇礼县地理位置 (a)、研究区高程与气象站的分布图 (b)

1.2 数据

1.2.1 NOAA-AVHRR 积雪产品

自 1966 年以来,美国国家海洋和大气管理局 (National oceanic and atmospheric administration,

NOAA)开始采用卫星遥感技术在大尺度上监测积雪的分布情况,连续提供了基于 NOAA-AVHRR 的北半球每周积雪覆盖产品,空间分辨率为 $190 \text{ km}^{[20]}$ 。NOAA 系列气象卫星携带的主要传感器有高级超高

分辨率辐射计和泰罗斯垂直分布探测仪 (TIROS operational vertical sounder, TOVS), 为太阳同步轨道卫星, 至少有 2 颗系列卫星同时在轨运行, 轨道高度在 833 ~ 870 km (± 19 km) 之间, 周期在 101 min 左右。AVHRR 传感器的扫描角为 ± 55.4°, 扫描幅宽为 2 500 km, 星下点分辨率为 1.1 km。第 3 代 AVHRR 传感器 AVHRR/3 在 AVHRR/2 的基础上, 增加了新波段 3A, 用于冰、雪的区分和探测, 总共有 6 个波段。本文使用 1980 - 2000 年 12、1、2 月 NOAA-AVHRR 影像提取的积雪面积时间序列 (<https://data.noaa.gov/dataset>), 经投影转换和研究区裁剪, 最终得到研究区的积雪面积时间序列。

1.2.2 MODIS 积雪产品

MODIS 是 1999 年发射的 Terra 卫星和 2002 年发射的 Aqua 卫星的传感器, 共有 36 个通道, 波段范围为 0.41 ~ 14.5 μm, 空间分辨率为 1 000 m、500 m 和 250 m。该产品是由 MODIS 数据经归一化雪被指数^[21]运算得到。使用 2001 - 2014 年每年 12 月至次年 2 月每日积雪产品: MOD10A1 (Terra 星) 和 MYD10A1 (Aqua 星) 积雪产品来提取积雪面积和覆盖频率的时间序列, 空间分辨率为 500 m。并将 MODIS 积雪面积与 NOAA-AVHRR 积雪面积时间序列对接, 形成研究区 1980 - 2014 年的积雪面积时间序列。

1.2.3 被动微波积雪深度数据

目前有 3 种广泛使用的被动微波遥感数据 SMMR、SSM/I、SSMIS。它们服役时间分别为 1978 年 10 月 - 1987 年 8 月、1987 年 7 月 - 2008 年 12 月、2008 年 1 月至今。美国国家雪冰数据中心 (National Snow and Ice Data Center, NSIDC) 提供 SMMR、SSM/I-SSMIS 2 种格网化的亮度温度产品 (<https://nsidc.org/data>), 时间分辨率分别为 2 d 和 1 d, 空间分辨率为 25 km。根据积雪的亮度温度在不同频率下对积雪体散射的敏感程度不同^[22], 基于被动微波亮温数据, 利用决策树算法^[23]可以提取雪深参数。使用这 2 种亮度温度产品来反演研究区 1980 - 2014 年积雪深度的时间序列。

1.2.4 气象站数据

使用的气象观测数据为中国地面国际交换站气候资料日值数据集, 时间范围为 1961 - 2014 年。共选取 19 个气象站点 (图 1b), 温度的单位为 0.1 °C, 降水、积雪深度的数据单位为 cm。使用该数据集分析研究区积雪日数的时空变化。同时利用该数据集分析积雪面积、深度、覆盖频率变化与气温和降水的关系。

2 数据处理与分析方法

2.1 NOAA 数据处理

对 NOAA-AVHRR 1B 数据, 进行定标和订正, 再经过普朗克公式反演为亮度温度。定标后再进行几何校正, 即可根据式 (1) ~ (3) 判断像元是否为积雪。

$$CH_1 > 30 \tag{1}$$

$$CH_1 - CH_2 > 0 \tag{2}$$

$$CH_3 - CH_4 < \alpha \tag{3}$$

其中, CH_i 表示第 i 波段, α 为判定阈值, 与季节等条件有关。AVHRR/3 新增了用于区分冰雪的波段 3A, 因此针对此传感器增加一个条件 $CH_{3A} < 0.2$ 。满足所有条件的像元为积雪, 赋值为 1, 否则赋值为 0。最后统计出积雪面积, 并得到相应的时间序列。

2.2 MODIS 数据处理

选取位于研究区范围内轨道号为 h26v04、h26v05、h27v04、h27v05 的数据。对原始积雪产品进行拼接、重采样、投影变换和裁剪。MODIS 数据受云的影响大, 需要降低云覆盖率。采用黄晓东等人^[19]提出的双星去云法。该方法根据云移动的特性, 利用分别于上午和下午过境的 Aqua 星和 Terra 星的影像, 如果同一位置的像元在其中一景影像中为积雪, 则判断为积雪。在双星去云法的基础上, 对提取的积雪产品再进行临近日分析, 即产品的云像素相同位置前后两日内为积雪, 则将该像素改判定为积雪, 如果为其他要素, 则改判为相应的要素。经过这两步去云处理后云覆盖率大大降低, 有助于提高积雪面积的提取精度 (见表 1)。

表 1 MODIS 积雪产品的去云处理

日期	云量				去云处理后相对 Terra 星原始
	Terra	Aqua	双星去云法	临近日分析法	影像积雪覆盖提升比例
2002. 12. 8	53. 0%	46. 0%	40. 0%	9. 0%	67. 1%
2004. 12. 11	35. 0%	35. 0%	34. 0%	6. 0%	46. 5%
2005. 12. 08	63. 0%	54. 0%	53. 0%	16. 0%	143. 3%
2012. 02. 06	58. 0%	73. 0%	57. 0%	9. 0%	13. 6%

2.3 气象观测数据处理

对于气象站数据, 主要进行修正和插值处理。气象数据虽有个别天数缺失, 但总体连续性高, 因此采用平均值、线性插值和临近日补充的方法进行填充。对积雪深度数据, 如果缺测时间段前、后一天均有积雪, 则运用线性插值方法进行补充。如果缺测时间段前、后一天均无积雪, 则将缺失数据填补为无积雪(赋值 0)。如果缺失时间段前、后一天中仅有一天有积雪记录, 则需要比较积雪连续天数与非积雪连续天数, 若积雪连续天数多则采用线性插值方法进行填补, 反之则记录为无积雪。对气象数据中有明显错误的数据进行修正, 将微量积雪赋值为 0.5 cm。

2.4 区域气候模式 4

区域气候模式(regional climate mode, RegCM)是预测区域气候变化的重要工具, 在模拟和评估气候变化过程中扮演重要角色。RegCM 是近 40 年发展起来的气候模式, 理论基础由 Giorgi 等人^[24]提出。RegCM 4 运用 MM 5 动力框架进行未来气候估计, 水平分辨率为 50 km, 垂直方向有 18 层, 顶层气压为 50 hPa。本文采用耦合模式比较计划第 5 阶段(coupled model intercomparison project phase 5, CMIP 5)全球气候模式单向嵌套区域气候模式进行

模拟。模拟的初值驱动场所用数据资料来源于 [http:// users. ictp. it/~ pubregcm/RegCM4/globedat. htm](http://users.ictp.it/~pubregcm/RegCM4/globedat.htm), 边界采用指数松弛方案, 投影选择适合中纬度的兰伯特投影, 积分步长 150 s, 模拟的时间段为 2015 - 2022 年的冬季月份(12、1、2 月)。代表性浓度路径(representative concentration pathway, RCP) 4.5 和 8.5 分别为 CO₂ 排放的中间路径和高路径。这样来预测未来不同气候变化情景下研究区的气温、降水变化对积雪的影响, 以及对冬奥会的潜在影响。

3 京张地区积雪时空变化

3.1 积雪面积变化

利用遥感数据提取积雪面积, 并按季尺度和月尺度求平均值, 得到 1980 - 2014 年冬季 12、1、2 月平均积雪面积的时间序列(图 2)。1980 - 2014 年冬季积雪面积呈现微弱增加趋势, 拟合趋势为 $y = 210.99 \cdot x + 7\ 634.9$ 。积雪面积波动性变化, 年际变化范围为 239 ~ 59 417 km², 高值年份和低值年份交错出现。将冬季积雪面积与温度、降水要素进行对比, 可以看出积雪面积与温度成负相关关系, 与降水成正相关关系。

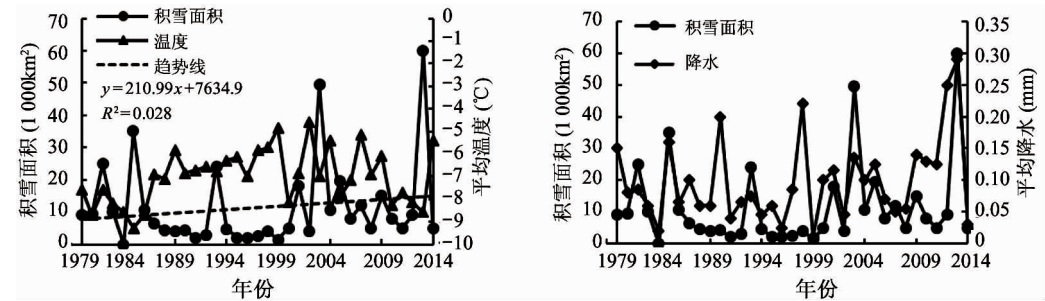


图 2 1980 - 2014 年冬季积雪面积变化及其与气温和降水的关系

从单个月份看,1980 – 2014 年 12、1 月积雪面积呈增加趋势,速度分别为 $230\text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $418\text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2 月积雪面积呈下降趋势,减小速率为 $16\text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ (图 3)。

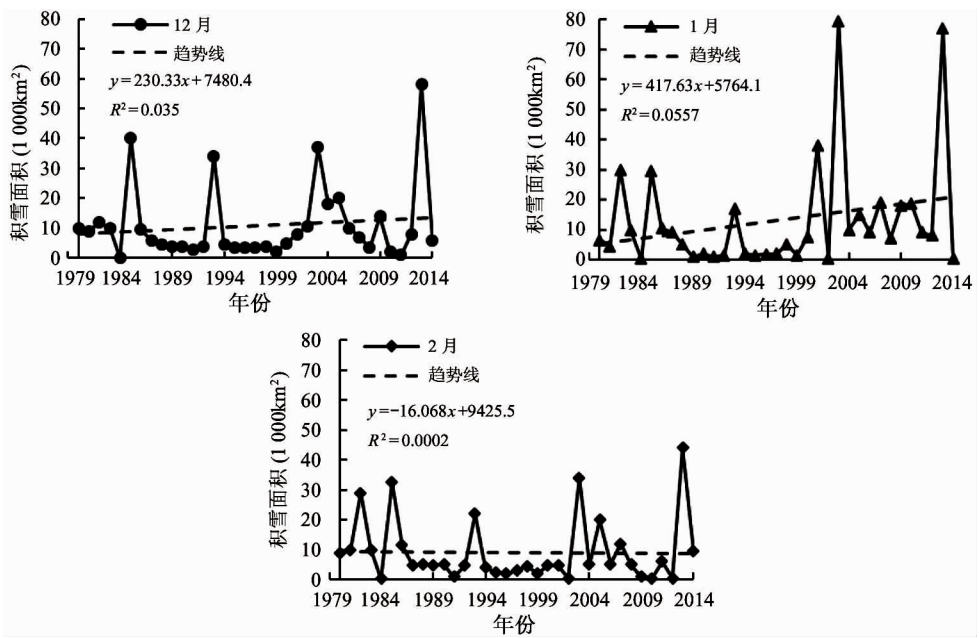


图 3 1980 – 2014 年冬季逐月积雪面积年际变化

3.2 积雪深度变化

1980 – 2014 年冬季平均积雪深度以微弱的趋势增加,增加速率仅为 $0.03\text{ cm}/10\text{ y}$ (图 4)。积雪深度变化呈现波动性,年际变化在 $0.05 \sim 6.50\text{ cm}$ 之间,平均值为 0.68 cm ,高值年份和低值年份交错出现,其中深度值最大的年份是 2013 年,最小的是

2014 年。35 y 中有 27 y 积雪深度记录在 1 cm 以下,约占总年份的 77%,积雪深度超过 2 cm 的年份仅有 2 年。将冬季的积雪深度分别与同时期温度和降水要素进行对比,可以发现积雪深度与平均温度的变化趋势基本相反,而与降水的变化趋势基本相同。

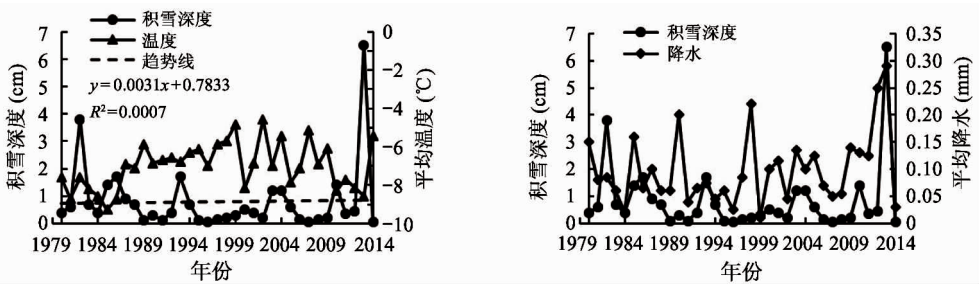


图 4 1980 – 2014 年冬季积雪深度变化及其与气温和降水的关系

积雪深度逐月的变化趋势与冬季的变化趋势相似。12 月积雪深度增加速度为 $0.03\text{ cm}/10\text{ y}$,深度变化在 $0.01 \sim 5.05\text{ cm}$ 之间,平均值 0.62 cm 。1 月增加速度为 $0.02\text{ cm}/10\text{ y}$,深度变化在 $0.03 \sim 6.26\text{ cm}$ 之间,平均值 0.83 cm 。2 月降低速度为 $0.03\text{ cm}/10\text{ y}$,深度变化在 $0.05 \sim 4.65\text{ cm}$ 之间,平

均值 0.57 cm 。12、1、2 月的积雪深度主要在 $0 \sim 1\text{ cm}$ 之间的年份,35 y 中分别有 28 y、28 y 和 26 y,而超过 2 cm 的年份分别有 2 y、2 y 和 3 y (图 5)。

将 1980 – 2014 年同一天的积雪深度进行平均得到冬季逐日的平均积雪深度时间序列 (图 6)。积雪深度逐日的时间序列呈倒 U 型,12 月初积雪深度

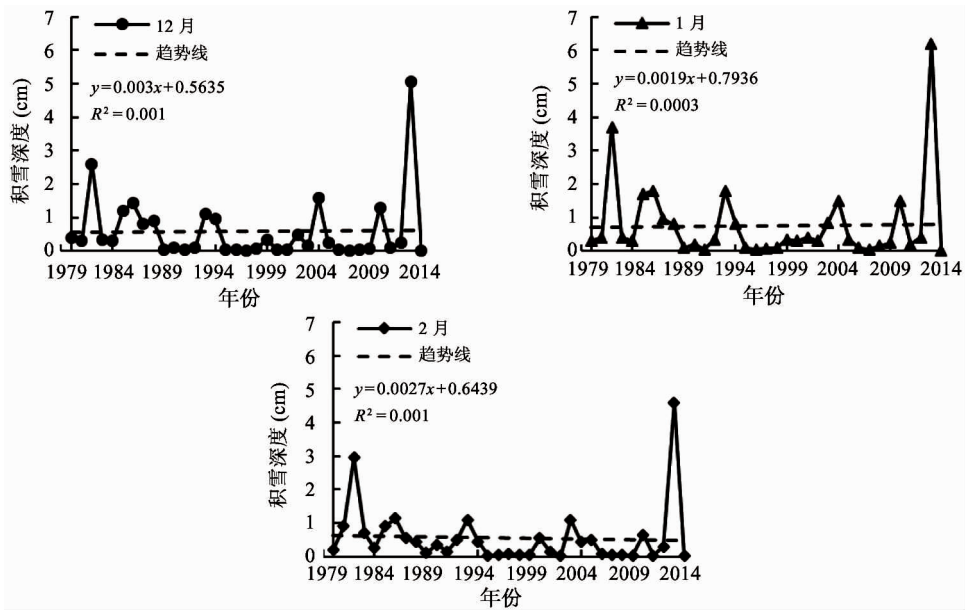


图5 1980 - 2014 年冬季逐月积雪深度年际变化

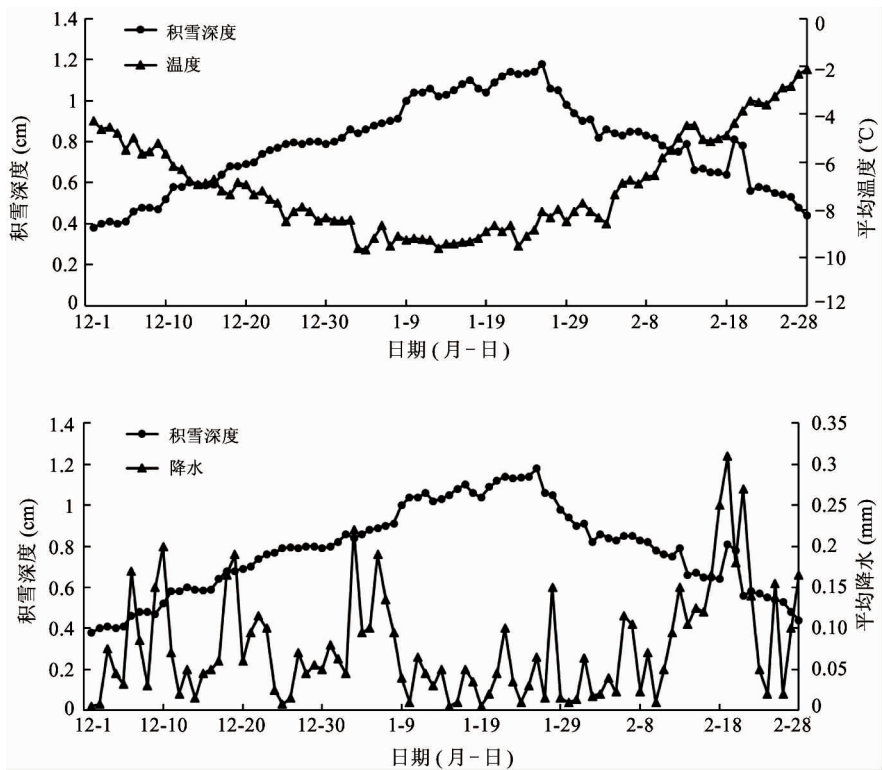


图6 冬季积雪深度与同时期温度和降水的日变化

从 0.4 cm 左右开始上升,到 1 月下旬深度达到最大值约为 1.2 cm,1 月 25 日之后直至 2 月底期间虽然偶有回升,但是总体趋势呈明显下降,2 月底积雪深度减少到 0.4 cm 左右。冬季平均雪深较低,以小于 1 cm 的值为主,仅在 1 月中旬和下旬超过 1 cm。综

合对比分析积雪深度和温度、降水的关系,可以发现冬季积雪深度变化可以分为 3 个过程。第 1 阶段属于积雪积累期,区间为 12 月初至 1 月上旬,平均温度低于 0℃ 且持续下降,降水相对较多,积雪开始累积,因此深度开始增大。第 2 阶段属于积雪维持期,

区间为 1 月中旬和下旬,平均温度是冬季内最低,利于积雪的保持,但是降水偏少,因此积雪深度以维持为主,没有加深的趋势。第 3 阶段是积雪消融期,区间为 2 月,温度明显上升,平均值高于 12 月,虽然降水相对第 2 阶段多,但是温度条件不适宜积雪的大量累积,仅能在一定程度上弥补消融量,无法改变积雪深度下降的总体趋势。

通过计算 1980 - 2014 共计 35 y 的冬季平均积雪深度,并使用克里金方法进行空间插值,得到冬季逐月积雪深度空间分布(图 7)。冬季积雪深度的平均值范围为 0 ~ 4 cm,并且以 0 ~ 2.4 cm 为主。研究

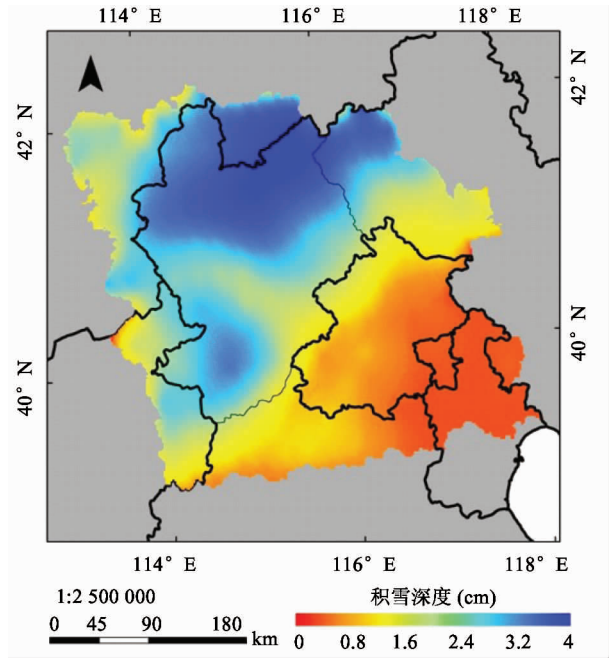


图 7 1980 - 2014 年冬季平均积雪深度的空间分布

区西北部的积雪深度大于东南部,高值区域主要分布在内蒙古太仆寺旗、河北丰宁、张家口崇礼县等北部地区,积雪深度平均在 2.8 cm 以上,最高为 3.72 cm。低值区域主要分布在东南部,包括天津和河北的部分地区,平均积雪深度范围是 0 ~ 0.4 cm。北京和张家口地区的积雪深度分布差异较大,并且张家口的平均值高于北京。北京的积雪深度值变化范围是 0.4 ~ 2.0 cm,东西差异较为明显。主城区所在地的积雪深度大约为 0.8 ~ 1.2 cm,低于延庆的 1.4 ~ 2.0 cm,而且越接近张家口市平均积雪深度值越大,其中最大值出现在小海坨山地区,也即奥运会室外滑雪场所在地之一。冬季奥运会室外场地主要分布在“延庆-张家口市-崇礼”这一线路上,图 7 显示从延庆至崇礼,积雪深度平均值从 1.4 cm 渐升至 3.2 cm,反映了冬奥会室外场地所处地区的积雪深度条件相对良好。

3.3 积雪覆盖频率变化

积雪覆盖频率指一段时间内,有积雪覆盖的天数与该段时间总天数的比值。2001 - 2014 年冬季平均积雪覆盖频率总体上呈现微弱增加趋势,增加的速率为 0.007/10 y(图 8)。积雪覆盖频率随时间波动变化,变化范围是 0.01 ~ 0.31,平均值为 0.08。研究区的积雪覆盖频率主要集中在 0.01 ~ 0.1。高出 0.1 的 4 年分别为 2001 年、2003 年、2005 年和 2013 年,说明这几年的积雪稳定性相对较好。积雪覆盖频率与平均温度之间存在着负相关关系,而与降水之间存在正相关关系(图 8)。

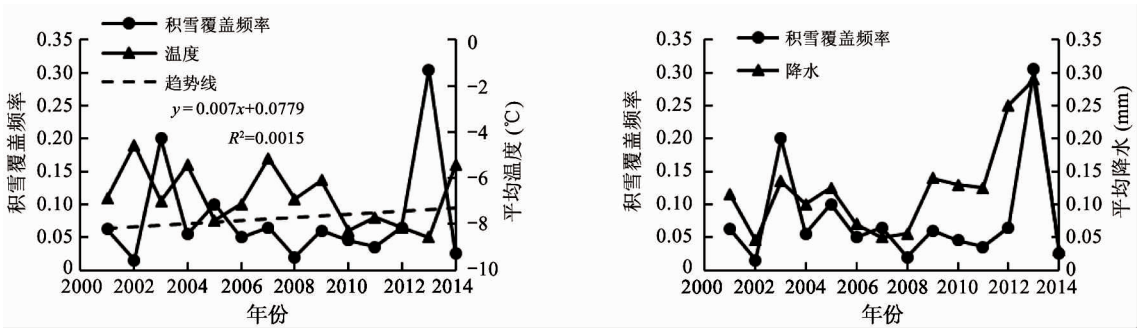


图 8 2001 - 2014 年冬季积雪覆盖频率及其与气温和降水的关系

冬季平均积雪覆盖频率整体较小,并且空间分布不均匀,以 0.1 以下的值为主(图 9)。南部地区

的积雪覆盖频率低于北部地区,东部地区低于西部地区。高值区域主要分布在北部,包含内蒙古太仆

寺旗、河北省丰宁市西部以及张家口市北部地区(包括崇礼县、张北县、沽源县和康保县),数值范围一般在0.4~0.9。蔚县的积雪覆盖频率普遍在0.2以上,最高值超过0.7。超过0.7的区域主要分布在小五台山地区,这是因为该区域海拔较高,适合积雪的积累和维持。

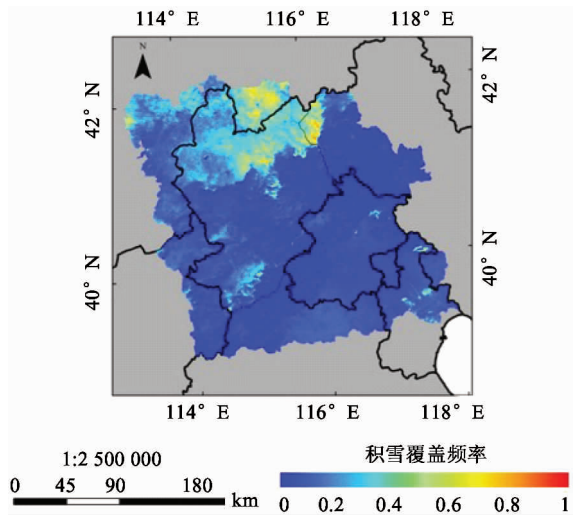


图9 2001-2014年冬季平均积雪覆盖频率的空间分布

张家口的积雪覆盖频率整体高于北京。北京市的高值区域主要出现在密云水库地区,这是由于冬季水库表面会出现结冰情况,寒冷干燥的环境中冰面很适宜积雪的积累和保持。北京西北的延庆积雪覆盖频率在0~0.2之间变化,其中数值较高的地区出现在小海坨山区域,该地区也是奥运会室外滑雪

场地所在地区之一。“延庆-张家口市-崇礼”方向上积雪覆盖率逐渐升高,从0.1左右逐渐升高至0.8左右,其中崇礼县东部地区积雪覆盖频率较高,该区域有数座高山滑雪场,是北京冬奥会室外比赛场地。

冬季逐月的平均积雪覆盖频率空间分布特征与冬季的空间特征相似。1月积雪覆盖频率相对最高,0.7以上的地区较为广泛,而且0值地区范围明显小于其他月份。2月相对最低,几乎不存在0.7以上的高值地区(图10)。积雪覆盖频率不仅可以反映积雪的稳定性,而且当某像元积雪覆盖频率大于0时,说明该像元在相应时间段内出现过积雪,从而可将影像中积雪覆盖频率大于0的地区视为积雪面积区域,监测积雪逐月的时空变化特征。时间上可以看出1月的积雪面积最大,12月居中,2月最小。因此积雪覆盖的发育过程是12月气温逐渐降低,并伴有降水发生,积雪开始逐渐积累。首先积累的地区是内蒙古地区,河北丰宁西部,张家口北部沽源县、崇礼县和张北县以及南部的蔚县。1月温度最低,降水较少,形成寒冷干燥的气候环境,利于积雪的维持,积雪面积在12月的基础上扩大,并且研究区东南部也开始出现积雪的累积。2月平均气温开始回升,积雪处于消退的状态,覆盖频率降低,面积也开始萎缩,小于12月的积雪范围。

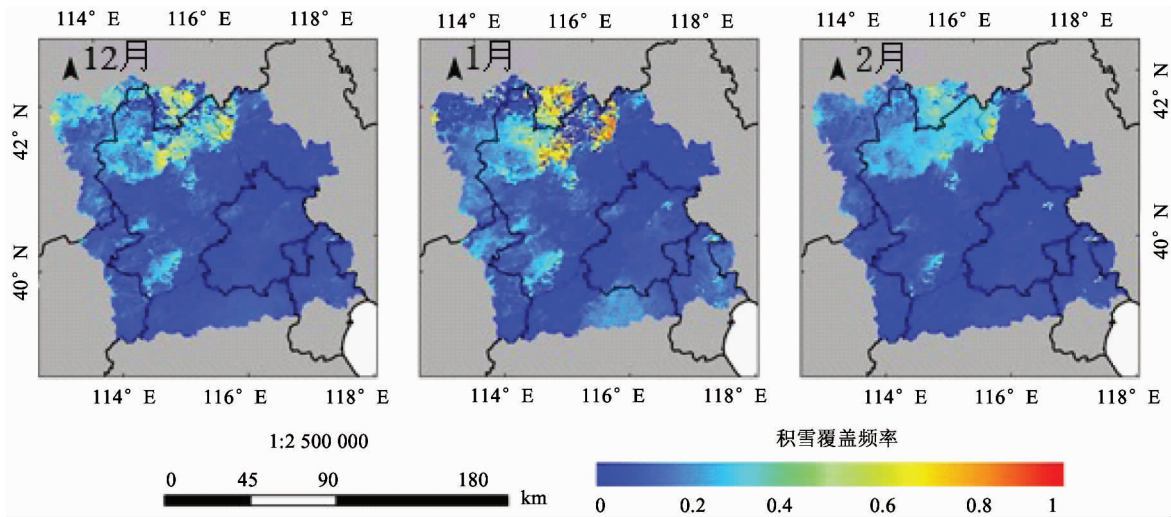


图10 2001-2014年冬季逐月平均积雪覆盖频率的空间分布

3.4 积雪日数变化

积雪日数定义为水文年中气象观测资料积雪深度记录大于0的总日数。统计 1962 – 2014 年研究区内 19 个站点共计 53 年的积雪日数,并对每个气象站共 53 年的积雪日数进行平均,计算结果作为研究区的年平均积雪日数。1962 – 2014 年年平均积雪日数在 6 ~ 46 d 之间波动,总体呈微弱增加的趋势。积雪日数波动较大的时间段为 1962 – 1966 年和 2009 – 2014 年。冬季逐月积雪日数的变化中,

12、1 月积雪日数微弱增加,变化范围是分别为 0 ~ 16 d、0 ~ 23 d。2 月积雪日数呈下降趋势,变化范围是 0 ~ 16 d(图 11)。基于气象站数据的冬季逐月积雪日数的变化印证了通过遥感监测得到的研究区冬季积雪覆盖发育过程的结论,即 12 月和 1 月是积雪累积月份,积雪趋于丰富,是冬季积雪的贡献月份,而 2 月积雪趋于减少。冬季及逐月的积雪日数变化波动较大,并且极值出现的年份均不相同,反映出研究区内的积雪并不稳定。

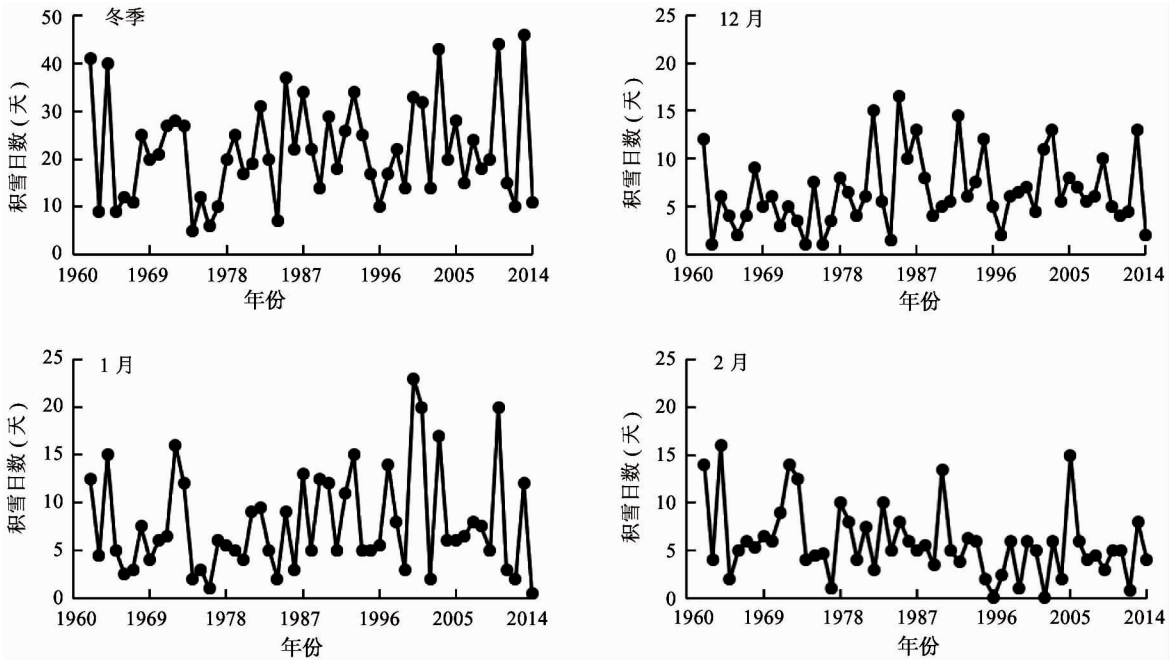


图 11 1962 – 2014 年年平均及逐月积雪日数变化

1962 – 2014 年各气象站积雪日数的空间分布大体上遵循“西北-东南”方向递减的规律,积雪日数高值气象站分布在研究区的西北部,低值气象站分布在东南部(图12)。大部分气象站的积雪日数集中在 10 ~ 30 d,北京的积雪日数低于 10 d,张家口平均积雪日数比北京高。张家口区域内各气象站积雪日数大小顺序为张北 > 蔚县 > 张家口 > 怀来,与各站点海拔高度大小顺序一致。

3.5 未来积雪变化对冬奥会的影响

RegCM 4 的模拟预测结果表明研究区 2019 – 2022 年冬季平均气温相比 2015 – 2018 年冬季有升高趋势。在 Rcp 4.5 情景下平均升高 0.13℃,在 Rcp8.5情景下,平均升高0.21℃。空间分布上,北

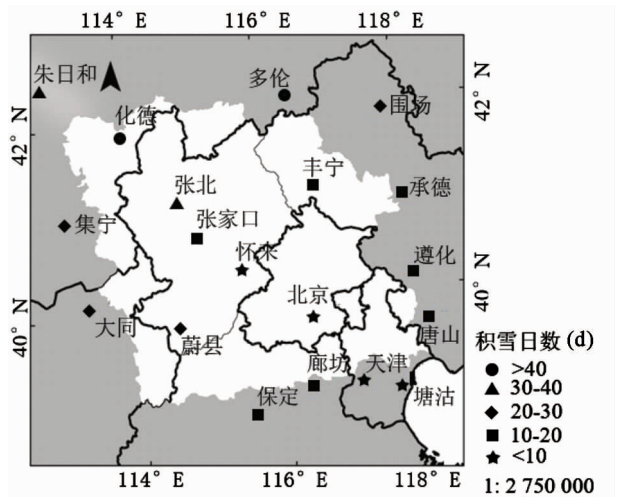


图 12 气象站积雪日数分布

京主城区、延庆,以及张家口崇礼县气温均呈现升高趋势。2月是积雪消融的月份,日最高温超过 0°C 的几率较大,在气温上升的背景下,2月积雪的消融趋势会加剧。因此,上升的气温对冬奥会举办地积雪的稳定性和丰富性均产生负面影响。

RegCM 4 的模拟结果同时表明 2019 – 2022 年冬季降水量比 2015 – 2018 年冬季增多,在 Rcp 4.5 情景下,降水量平均增加 0.38 mm,在 Rcp 8.5 情景下,平均增加 0.67 mm。12 月和 1 月的趋势与冬季相同,降水增加,2 月则相反,降水减少。1962 – 2014 年的冬季降水量呈微弱增加趋势,与模拟结果的趋势相吻合。冬季平均温度处于 0°C 以下,降水的增加有益于积雪覆盖的发育,因而可预见未来积雪趋于丰富的趋势将会维持。其中,12 月和 1 月依旧是冬季积雪的主要来源。但是 2 月降水的减少与上升的气温会加剧当月积雪的消融效果。因此冬奥会组委会需要做好人工造雪的准备,以保证届时拥有充足的雪量和冬奥会赛事的正常举办。

4 结 论

利用 NOAA-AVHRR 积雪产品、MODIS 积雪产品、SMMR-SSM/I-SSMIS 被动微波雪深数据、气象站数据,以及 RegCM 4 模拟预测结果,综合分析了京张地区积雪的时空变化特征及其对北京冬奥会的潜在影响。得到以下几点结论:

冬季积雪面积和深度均趋向于波动上升,12 月和 1 月的积雪面积和深度呈增加趋势,2 月呈降低趋势。积雪深度从 12 月初至 1 月上旬增加,1 月中下旬相对稳定,2 月下降。积雪日数也呈微弱增加趋势,12 月和 1 月的平均积雪日数呈增加趋势,而 2 月下降。积雪覆盖率年内变化特征与积雪深度相似。积雪面积、深度和覆盖频率与同时期的温度和降水均有较好的对应关系。这些都表明京张地区积雪资源丰富,有利于北京冬奥会的举办。无论是积雪面积、深度、覆盖频率还是积雪日数,在空间分布上,张家口的积雪资源优于北京延庆区和主城区,冬奥会将室内外场馆分开设置非常合理。而且包含奥运室外场馆的“延庆-张家口市区-崇礼”方向积雪深

度等参数高于周围地区,说明冬奥会比赛场地的选择具有合理性和科学依据。

尽管京张地区积雪资源趋于丰富,积雪面积、积雪深度、积雪日数呈微弱上升趋势,但各项指标均处于较低水平,且年际波动大,积雪稳定性差,与冬奥会的要求有较大差距。北京冬奥会将于 2022 年 2 月举行,2 月相比 12 月、1 月,降水减少,是积雪开始消融的月份。而且区域气候模式的预测结果表明,2019 – 2022 年京张地区 2 月份的气温呈上升趋势,降水呈减少趋势,这两个因素的叠加会进一步降低积雪的稳定性,对冬奥会有一定的负面影响。因此,届时北京冬奥会组委会需要做好人工造雪的准备,以保证充足的雪量和冬奥会赛事的正常举办。

本文使用的遥感数据时间和空间分辨率不统一,且早期的遥感数据空间分辨率低,整体精度也低。这些因素影响积雪指标提取的精度,影响对积雪时空变化特征的分析。未来可以采用更多遥感数据进行产品融合,提高分辨率,并结合地面观测数据使用改进的方法来反演积雪参数,以提高积雪反演参数的精度,更加准确反映积雪的时空变化特征。

参考文献

- [1] 李培基,米德生. 中国积雪的分布[J]. 冰川冻土, 1983, (04): 9-18
- [2] Madan N J. Snow ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems[J]. *The Quarterly Review of Biology*, 2001, 76(4): 1097-1098
- [3] Vernekar A D, Zhou J, Shukla J. The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon[J]. *Journal of Climate*, 1995, 8(2): 248-266
- [4] Frei A, Robinson D A. Northern hemisphere snow extent: regional variability 1972 – 1994[J]. *International Journal of Climatology*, 1999, 19(14): 1535-1560
- [5] Barnett T P, Dümenil L, Schlese U, et al. The Effect of Eurasian snow cover on global climate[J]. *Science*, 1988, 239(4839): 504
- [6] Brown R D. Northern hemisphere snow cover variability and change, 1915 – 97[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(13): 2339-2355
- [7] 张晓华,高云,祁悦,等. IPCC 第五次评估报告第一工作组主要结论对《联合国气候变化框架公约》进程的影响分析[J]. 气候变化研究进展, 2014(1): 14-19
- [8] 秦大河, Stocker T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014(1): 1-6

- [9] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013(5):1068-1076
- [10] 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(3):584-595
- [11] 黄晓东,张学通,李霞,等. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价[J]. 冰川冻土, 2007(5):722-729
- [12] Chen C, Lakhankar T, Romanov P, et al. Validation of NOAA-interactive multisensor snow and ice mapping system (IMS) by comparison with ground-based measurements over continental United States[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(5):1134-1145
- [13] Struzik P. Japan aerospace exploration agency GCOM-W1 satellite snow depth product: outcome of the first winter[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1):084686
- [14] Pu Z, Xu L, Salomonson V V. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(6):137-161
- [15] 刘羽,张显峰,于泓峰. 基于 MEMLS 的查找表法雪深反演[J]. 高技术通讯, 2014,24(9):915-921
- [16] Parajka J, Pepe M, Rampini A, et al. A regional snow-line method for estimating snow cover from MODIS during cloud cover[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(3-4):203-212
- [17] 陆平. 基于 MODIS 数据的新疆玛纳斯河流域积雪监测与融雪径流模拟[D]. 北京:中国地质大学(北京)水资源与环境学院,2005
- [18] Ackerman S A, Strabala K I, Menzel W P, et al. Discriminating clear sky from clouds with MODIS[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103(D24):32141-32157
- [19] 黄晓东,郝晓华,王玮,等. MODIS 逐日积雪产品去云算法研究[J]. 冰川冻土, 2012(5):1118-1126
- [20] Ramsay B H. The interactive multisensor snow and ice mapping system[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 12(10-11):1537-1546
- [21] Salomonson V V, Appel I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index[J]. *Remote sensing of environment*, 2004, 89(3):351-360
- [22] Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 49(1):145-154
- [23] Grody N C, Basist A N. Global identification of snow cover using SSM/I measurements[J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 1996, 34(1):237-249
- [24] Giorgi F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model[J]. *Journal of Climate*, 1990, 3(9):941-964

The potential impacts of spatiotemporal variation of snow cover on the Winter Olympic Games held in Beijing in 2022

Qian Hao, Zhao Jiarui, Fan Yubin, Ke Changqing

(School of Geography and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023)

Abstract

The 24th Winter Olympic Games will be held in Beijing-Zhangjiakou area in 2022. Therefore, monitoring and analyzing the spatial and temporal changes of local snow cover is of great significance for the preparation of the Winter Olympics Games. In this paper, the meteorological observation data and the AVHRR, MODIS, SMMR/SSM/I/SSMIS data are used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of winter snow cover in Jing-Zhang area and its potential impact on the Winter Olympics Games. The results show that the snow cover area, depth, coverage frequency and days with snow cover show a slight increase trend. The snow cover resources in Zhangjiakou are better than those in Beijing. The parameters such as the depth of snow along the line-Yanqing-Zhangjiakou City-Chongli are higher than the surrounding areas. The layout of the Winter Olympic Games venues is scientific and reasonable. However, all the snow cover indicators are at a low level, with large inter-annual fluctuations and poor snow stability. Moreover, the temperature in February will increase, and the precipitation will decrease. This will further reduce the stability of snow and have a certain negative impact on Winter Olympics Games. Therefore, it is necessary to prepare for artificial snow making to ensure sufficient snow and the normal holding of the Winter Olympic Games.

Key words: snow cover, meteorological observation, remote sensing, temporal and spatial variation characteristics, Beijing Winter Olympic Games