

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220016

五台山积雪变化趋势及其影响因素

范强, 刘楠, 任天晨

(太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:基于MODIS积雪产品与微波遥感数据,分析五台山2000—2019水文年积雪时空分布、变化趋势及与影响因素的Pearson相关性,结果表明:(1)五台山积雪期为10月至翌年4月,年内呈单峰型变化趋势,积雪集中于西北部。(2)积雪面积和积雪日数的年际变化呈显著减少趋势($p<0.05$)。(3)积雪面积和积雪日数与海拔正相关,积雪面积在北坡高于南坡。(4)积雪面积与气温相关程度高于降水量,积雪面积在年内与气温和降水量日值呈显著负相关($p<0.05$),在年际与气温年均值呈显著负相关($p<0.05$)。

关键词:积雪;时空分布;时空变化;地形因素;气象因素

中图分类号:P468.0*25

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)04-0111-05

0 引言

冰冻圈是气候系统五大圈层之一,其变化不仅会影响世界经济最发达的中高纬地区,而且对中纬度地区的影响亦不可低估^[1]。其中,积雪作为冰冻圈对气候变化最敏感的要害及气候变化指示器^[2],在水文循环、地表辐射和生态系统平衡等方面具有重要的反馈作用^[3]。随着遥感技术的发展,许多学者针对气候变暖背景下的积雪变化展开研究,并分析了其影响因素。结果表明积雪变化多呈下降趋势^[4-6],且与气象变化关系密切^[5, 7-8];地形因素是影响积雪的另一个重要因素^[6, 9-10],但研究多集中于北疆、青藏高原等典型积雪区。在五台山地区,已有学者开始对冰冻圈开展研究,但多以冻土为研究对象^[11-12],有关积雪变化及其影响因素的研究较为罕见。

近年来,五台山地区生态脆弱性整体呈中度状态,生态系统抗干扰与自我修复能力较弱,生态问题较为突出^[13],五台山作为华北寒冷湿润中心,是重要的水源涵养地^[14],该区积雪的积累与消融不仅是流域水循环中河流、地下水的重要补给源之一,更是关乎生态环境及其评估的重要自然指标,因此对于五台山积

雪变化趋势及其影响因素的研究具有重要意义。本文基于多源遥感数据建立五台山积雪时间序列,分析五台山积雪变化趋势及其影响因素,结果有助于掌握五台山积雪变化特点,加深对五台山区域冰冻圈、气候变化、水文循环的理解,以期对融雪水资源合理利用、区域水资源可持续发展以及生态环境评估等提供数据参考。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

五台山(北纬 $38^{\circ}25'30''\sim 39^{\circ}26'57''$,东经 $112^{\circ}43'57''\sim 114^{\circ}28'28''$),海拔3061.1 m,为华北最高峰,有“华北屋脊”之称。五台山位于暖温带湿润半湿润气候区,山顶属于高寒气候,年均气温为 -4.2°C ,极端最低气温为 -44.8°C ,全年无霜期仅有72 d左右,年均降水量966.3 mm,是华北山地气温最低、降水量最高,湿度和风力最大的地区。五台山水资源丰富,溪流众多,终年不竭,流域内主要河流为滹沱河、清水河,属海河水系。

1.2 研究数据和研究方法

基于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)

收稿日期:2022-01-11

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.1814.P.20230818.1605.011>

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31400618)

作者简介:范强(1997—),男,北京人,硕士,主要研究方向为遥感应用和积雪水文。E-mail:996264382@qq.com

通信作者:刘楠(1983—),男,河北石家庄人,副教授,博士,主要研究方向为水土保持、生态水文。E-mail:lntx617129@126.com

网络首发日期:2023-08-21

发布的 ASTER GDEM 数据获取五台山范围,面积为 6 690.25 km²,采用美国国家冰雪数据中心提供的 MODIS 积雪产品,结合从国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>) 获取的微波遥感数据集,定义以当年9月1日—翌年8月31日为一个水文年,生成2000年9月1日—2020年8月31日,共20个水文年的去云积雪二值图。气温和降水则通过 ArcGIS 分别从中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 发布的中国地面气温、降水日值 0.5°×0.5°格点数据集中进行提取。文中地面覆盖类型分类采用地球大数据科学工程网 (<https://data.casearth.cn>) 提供的 30 米地表覆盖精细分类产品,积雪参数和气象因素的变化趋势的研究采用 Mann-Kendall 趋势分析和一元线性回归分析,积雪参数与影响因素的相关性则采用 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 2000—2019 水文年五台山积雪变化特征

2.1.1 年内积雪分布及变化

图 1 表明,五台山积雪面积 (Snow Cover Area, SCA) 在年内呈单峰型周期变化趋势,从 10 月开始累积,SCA 迅速增大,在 1 月达到峰值 1 710.34 km² (占研究区总面积的 25.56%);伴随着 1 月天气转暖,气温逐渐升高,SCA 持续减小,在 5 月达到年内最小值 36.39 km² (占研究区总面积的 0.54%),5—9 月属年内低值期,均低于 110 km²。

五台山 SCA 年内变化与多年平均降水量、气温的年

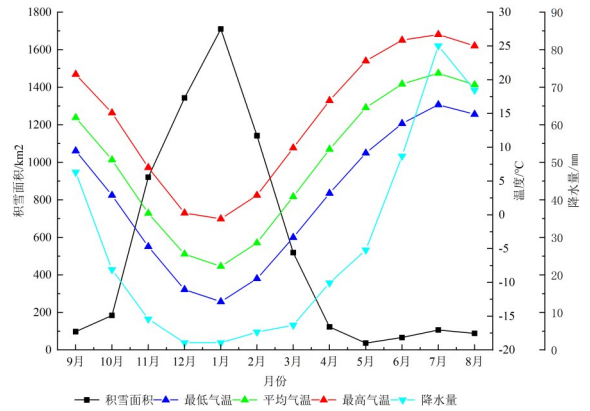


图 1 2000—2019 水文年积雪面积和气象因素的年内变化
Fig.1 Average month value of Snow Cover Area and meteorological factors variation of hydrological year 2000—2019

内变化趋势相反,降水量和气温在 SCA 低值期达到年内高值,而积雪期内最低气温和降水量降到年内低值(图 1),由此可以看出五台山 SCA 年内变化与气温、降水量关系密切。以 2012—2013 年为例,观察图 2 发现积雪期内积雪最先出现在高海拔区域,随着气温和降水量的降低沿海拔由高到低逐渐扩散,在气温触底回升后 SCA 也从峰值开始降低,最终恢复到五座台顶附近高海拔区有积雪;非积雪期的 5—9 月偶有降雪,且可以看出随着降水量在 5—7 月的迅速增加,提高了高海拔地区的降雪概率,SCA 也相应增大。因此结合图 3 可以看出,五台山积雪日数 (Snow Cover Days, SCD) 最多在其西北部,这也是该区海拔最高的地方,最长达 177 天,往东部、南部逐渐减少,约 95% 的地区低于 60 天。

2.1.2 年际积雪变化

由于五台山积雪存在周期性变化,且积雪期主要

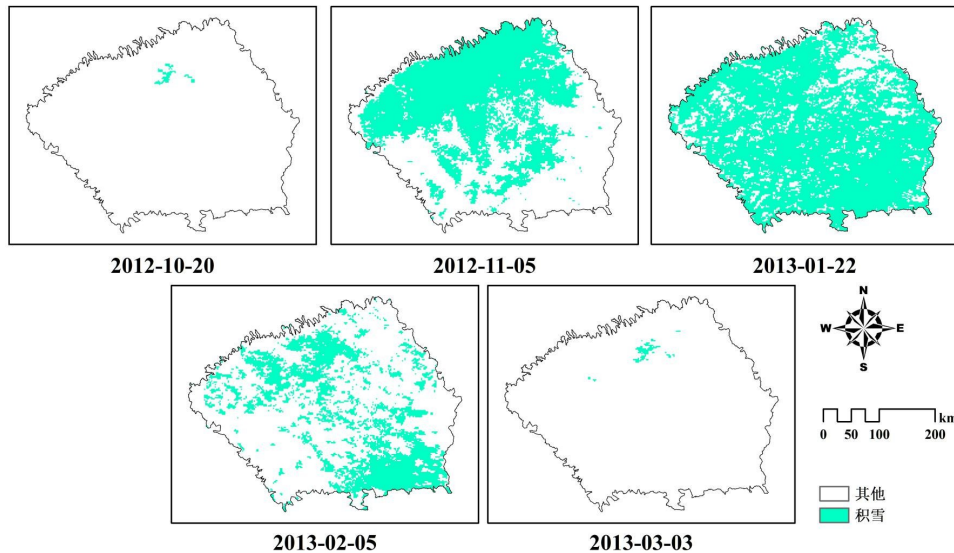


图 2 2012—2013 年积雪期积雪变化
Fig.2 The snow cover variation in a snow period from 2012 to 2013

集中在冬季,所以研究各季节年际变化的趋势可以更好地理解五台山的积雪变化。经 Mann-Kendall 趋势分析结果发现,五台山 SCA 和 SCD 在年际尺度下呈显著减少趋势($Z_{SCA}=-1.72$ 、 $Z_{SCD}=-1.91$, $p<0.05$),除 SCD 在春季呈微弱增加趋势外,SCA 和 SCD 在各季节表现为减少趋势,均未达显著。

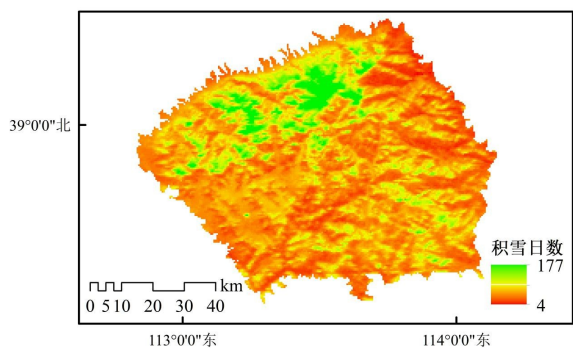


图3 2000—2019水文年多年平均积雪日数
Fig.3 Average Snow Cover Days of hydrological year 2000—2019

图4中呈显著减少趋势的区域面积为1269 km² (占研究区总面积的18.97%),该区内排名前四的地面覆盖类型分别为牧草地、落叶阔叶林、草、常绿针叶林。此外,不难看出草本植物(牧草地和草)对积雪日数年际变化的负影响最突出(占61.54%)。这可能是由于立枯物区域内地下生物量较高,土壤呼吸强,土温升高而导致积雪不易留存^[9],或是由于草地分布区域较为平坦、无遮挡,太阳辐射度较强。

五台山 SCD 的减少主要是由于积雪持续时间的缩短,结合图5可知,五台山地区2000—2019年水文年初雪时间介于9月18日—11月11日,以0.05天/a的速率显著延后;终雪时间介于3月11日—5月6日,以0.81天/年的速率提前;积雪持续时间等于终雪时间减去初雪时间,介于133~217天,因为初雪时间显著延后和终雪时间提前,积雪持续时间以0.74天/年的速率缩短。

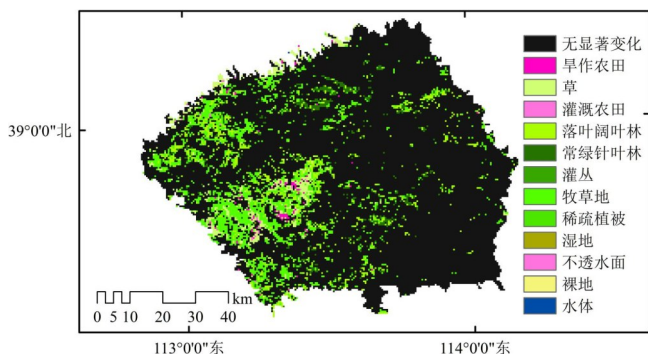


图4 积雪日数显著减少区域的地面覆盖类型
Fig.4 Ground cover types in areas with significantly reduced Snow Cover Days

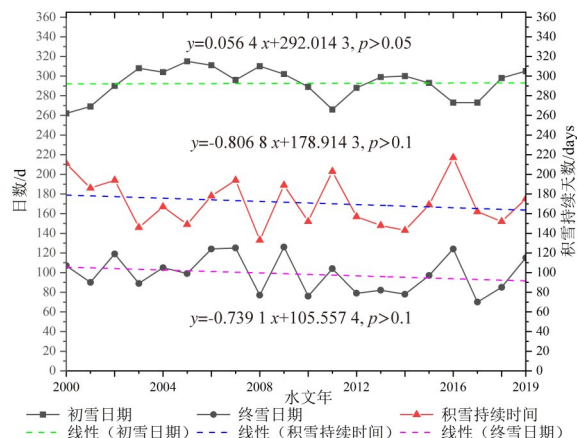


图5 初雪时间、终雪时间、积雪持续时间的年际变化
Fig.5 The annual variation of Start of Snow, End of Snow and Duration of Snow

2.2 地形因素对积雪的影响

地形是影响积雪分布的重要因素,为探究积雪分布和地形因素的关系,现将研究区按海拔分为236~1000 m、1000~1500 m、1500~2000 m、2000~2500 m、2500~3061.1 m,五个海拔分区;按坡度分为0~15°、15~30°、30~45°、45~60°,四个坡度分区;按坡向将研究区分为东(45~135°)、南(135~225°)、西(225~315°)、北(315~45°)四个坡向区域。

由图6可知,稳定积雪区(SCD达60天以上)面积和SCD随海拔升高而显著增大($p<0.05$),随着海拔的升高,积雪覆盖时间明显延长。

图7显示了海拔、坡度、坡向对SCA的影响,其中SCA具有明显的海拔差异性,随着海拔升高积雪覆盖率显著增大($p<0.05$),在海拔2500~3061.1 m区域积雪覆盖率达93.20%;坡度与SCA不相关,各年积雪覆盖率分布均不相同;坡向对SCA的影响体现为“北坡

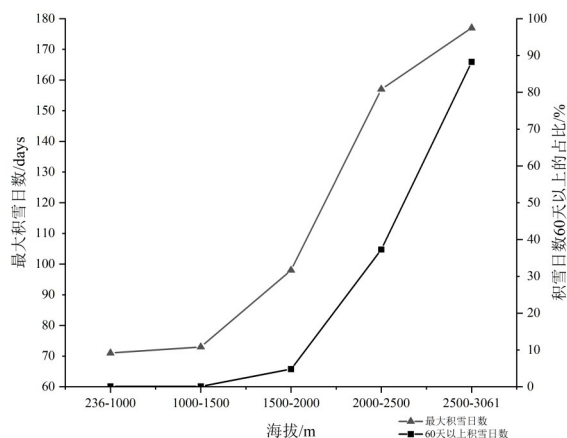


图6 不同海拔积雪日数60天以上的覆盖比率和最大积雪日数
Fig.6 The coverage proportion of Snow Cover Days longer than 60 days and maximum Snow Cover Days at different elevations

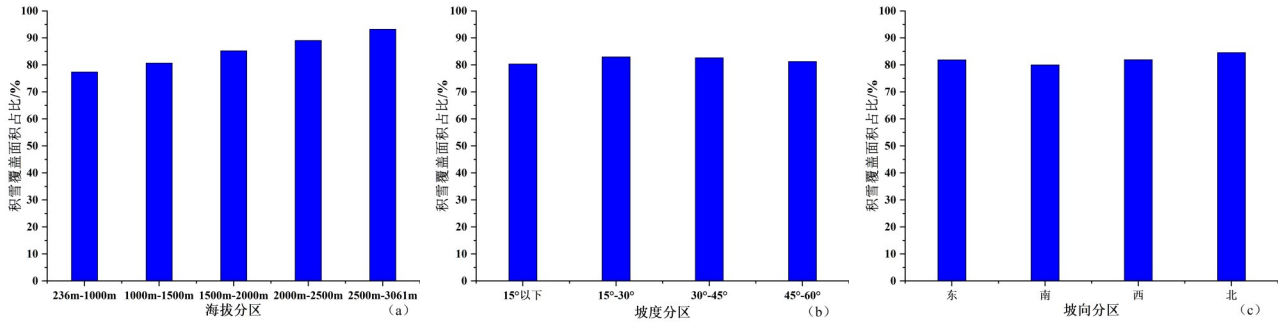


图7 海拔(a)、坡度(b)、坡向(c)分区的积雪覆盖率
Fig.7 The snow cover fraction in each altitude(a), slope(b), aspect(c) division

最多,南坡最少”的规律性,北坡、南坡的积雪覆盖率平均相差4.59%,最高相差9.46%,东坡、西坡的积雪覆盖率介于北坡和南坡之间。

2.3 气象因素对积雪的影响

气温和降水是影响积雪的重要气象因素,通过对2000—2019水文年五台山SCA与主要气象因素的Pearson相关性分析发现:在年内,SCA与气象因素呈显著负相关($p < 0.05$),SCA与气温的Pearson相关系数($r_{max} = -0.626$, $r_{mid} = -0.614$, $r_{min} = -0.591$)高于降水量($r = -0.391$)。年际上,由表1可知,平均SCA与最高气温显著负相关($p < 0.05$),特别是在春季,秋季和冬季相关性低于春季,秋季和冬季平均SCA与降水量显著正相关($p < 0.05$);春季和夏季SCD与最高气温呈显著负相关($p < 0.05$),SCD与降水量在春季显著正相关($p < 0.05$)。

3 讨论

2000—2019水文年,五台山SCA和SCD年际变化均呈显著减少趋势,其中SCD和DOS在全球乃至我国都存在不同程度的减少,主要是由于SOS延迟和EOS提前^[14]。而与本研究不同的是,杨倩等^[15]在东北地区的研究结果为SCA和SCD呈增加趋势,赵文宇等^[16]在天山地区研究得到SCD减少的多、增加的少的结论,刘畅宇等^[17]在北疆地区研究得出从1951—2018年,SCD变化趋势为“增加-减少-增加”,不难发现,不同研究区的积雪存在不同的变化趋势,可能是因为积雪的变化存在地域异质性,受区域气候变化影响,也与研究的时空尺

度选取有关。因此五台山研究区内SCA和SCD的显著减少不仅反映了积雪对区域气候变化的响应,也会对该区水文循环、气候和生态环境产生影响。

积雪的空间分布主要受地形因素影响。梁鹏斌等^[18]指出SCA在阴坡高于阳坡,迎风坡高于背风坡,本研究中五台山积雪主要分布在西北部高海拔区域,SCA在北坡最多,南坡最少,一方面是太阳辐射影响,另一方面五台山冬季受西北方向的西伯利亚干冷气流影响,使得其积雪多分布于迎风的北坡。五台山SCA随着海拔的升高而增大($p < 0.05$),可能是因为随海拔升高,气温降低,降水量增加。此外,五台山积雪与坡度无相关性,与本研究不同的是,周远刚等^[19]在博格达峰地区研究得出坡度与SCA非线性相关,可能是因为不同坡度太阳辐射度不同,以及该区积雪主要分布于坡度40°以下区域。可知在地形因素中,五台山SCA与海拔相关性最高,呈显著正相关($p < 0.05$),与坡度无明显相关性,而在坡向上呈现北坡最多、南坡最少的规律性分布。

积雪是降水和气温的综合产物,在适宜的气温下,降水才能形成积雪并得以发育^[20],因此在气象因素中,气温和积雪的相关性更为密切。五台山积雪年内变化与气温和降水量的相关性显著($p < 0.05$),受最高气温影响最为显著;五台山积雪的年际变化与最高气温呈显著负相关($p < 0.05$),与降水量呈正相关,表明降水增多有利于积雪的形成,但气温对积雪的影响更显著。经过各季节年际对比发现,SCA与白淑英等^[8]在西藏高原

表1 积雪参数与气象因素相关性

Table.1 Pearson's correlation coefficient between snow parameters and meteorological factors

皮尔森 相关系数	最高气温				降水量					
	春季	夏季	秋季	冬季	水文年	春季	夏季	秋季	冬季	水文年
SCA	-0.756*	-0.381	-0.535*	-0.474*	-0.696*	0.441	-0.114	0.572*	0.553*	0.212
SCD	-0.452*	-0.475*	-0.425	-0.026	-0.361	0.498*	0.045	0.321	0.335	0.344

注:*对应显著性水平0.05。

所得结论相似,在春季、秋季、冬季与最高气温呈显著负相关($p<0.05$),在秋、冬季与降水量呈显著正相关($p<0.05$),说明积雪期SCA受气温影响显著,且秋、冬季的降水因温度适宜而易形成积雪;SCD与最高气温在春、夏季呈显著负相关($p<0.05$),与降水量在春季呈显著正相关($p<0.05$),说明积雪融化时间受气温影响显著,且降水在春季的补足能一定程度上延长积雪覆盖时长。

4 结论

(1)五台山西北部积雪最多,年内变化呈单峰型周期性变化趋势,积雪期为10月—翌年4月,峰值在1月,5—9月为年内低值期,谷值在5月。

(2)2000—2019水文年际尺度下,SCA和SCD呈显著减少趋势($p<0.05$),SOS呈显著推迟趋势($p<0.05$)。SCD显著减少的区域中草本植物占比最大。

(3)SCA和SCD随海拔升高而显著增加($p<0.05$),SCA有北坡最多、南坡最少的规律,与坡向不相关。

(4)SCA与气温相关程度高于降水量。SCA的年内分布与气温和降水量显著负相关($p<0.05$)。年际尺度上,SCA与气温显著负相关($p<0.05$),在春、秋、冬季与最高气温显著负相关($p<0.05$),在秋、冬季与降水量显著正相关($p<0.05$);SCD在春、夏季与最高气温显著负相关($p<0.05$),在春季与降水量显著正相关($p<0.05$)。

参考文献:

- [1] 丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响研究的主要科学问题概论[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10):1067-1076.
- [2] 杨林, 马秀枝, 李长生, 等. 积雪时空变化规律及其影响因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6):96-102.
- [3] 王娟, 雷向杰, 卓静, 等. 秦岭主峰太白山积雪时空变化规律及驱动机制分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2):59-64.
- [4] 杨维, 王永前. 青藏高原积雪覆盖时空变化及其对气候的响应[J]. 成都信息工程学院学报, 2015, 30(4):396-402.
- [5] 何海迪, 李忠勤, 张明军. 基于MODIS数据中国天山积雪面积时空变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2):367-374.
- [6] 钟鼎杰, 孙梦鑫, 张岳, 等. 2001—2020年川西高原积雪时空变化及影响因素分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11):111-118.
- [7] 卢新玉, 谢国辉, 李杨, 等. 玛纳斯河流域积雪变化特征及其与气温、降水的关系[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(2):35-39.
- [8] 白淑英, 史建桥, 沈渭寿, 等. 卫星遥感西藏高原积雪时空变化及影响因子分析[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(6):954-962.
- [9] 郭雅蓉, 侯扶江. 祁连山北坡冬季牧场积雪盖度与植被、地形的关系[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2016, 42(3):255-261.
- [10] 郑淑文, 彭亮, 何英, 等. 基于MODIS的塔什库尔干河流域积雪覆盖时空变化及地形因子分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10):25-29.
- [11] 李嘉, 刘楠, 韩进斌, 等. 冻融对五台山典型林线植被土壤水稳性大团聚体的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(5):140-146.
- [12] 李杨波, 刘楠, 韩进斌, 等. 冻融循环对五台山典型植被土壤微团聚体的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5):21-27.
- [13] 张慧琳, 吴攀升, 侯艳军. 五台山地区生态脆弱性评价及其时空变化[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8):1026-1035.
- [14] 刘晓娇, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 黄河源区积雪变化特征及其对春季径流的影响[J]. 高原气象, 2020, 39(2):226-233.
- [15] 杨倩. 东北地区积雪时空分布及其融雪径流模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [16] 赵文宇, 刘海隆, 王辉, 等. 基于MODIS积雪产品的天山年积雪日数空间分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6):1510-1517.
- [17] 刘畅宇. 中国地区积雪时空异质性及其成因分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [18] 梁鹏斌, 李忠勤, 张慧. 2001—2017年祁连山积雪面积时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1):56-66.
- [19] 周远刚, 赵锐锋, 张丽华, 等. 博格达峰地区冰川和积雪变化遥感监测及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6):1395-1403.
- [20] 李晨昊. 蒙古高原积雪变化及对草地植被物候影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.

Variation Trend of Snow Cover in Wutai Mountain and Its Influencing Factors

FAN Qiang, LIU Nan, REN Tianchen

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on MODIS snow products and microwave remote sensing data, the temporal and spatial distribution, variation trend and Pearson correlation with influencing factors of snow cover in Wutai Mountain from 2000 to 2019 were analyzed. The results show that, (1) the snow cover period of Wutai Mountain is from October to next April, showing a single peak variation trend in the year, and the snow cover is concentrated in the northwest. (2) The interannual variation of Snow Cover Area and Snow Cover Days showed a significant decreasing trend ($P<0.05$). (3) The Snow Cover Area and Snow Cover Days are positively correlated with altitude. The Snow Cover Area on the north slope is higher than that on the south slope. (4) The correlation between Snow Cover Area and temperature is higher than that of precipitation. The Snow Cover Area has a significant negative correlation with the daily value of temperature and precipitation within the year ($P<0.05$), and has a significant negative correlation with the annual average value of temperature between years ($P<0.05$).

Keywords: snow cover; spatiotemporal distribution; spatiotemporal variation; terrain factors; meteorological factors