安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 689-697
Journal of Anhui Agricultural University [DOI] 10.13610/j.cnki.1672-352x.20260915.003

冯晓楠，何撼东，武黎黎，等. 白山市积雪物候时空演变特征及其影响因素分析[J]. 安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 689-697.
Feng Xiaonan, He Handong, Wu Lili, et al. Spatiotemporal variations of snow phenology and its influencing factors in Baishan city, Northeast China[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2026, 53(4): 689-697.

白山市积雪物候时空演变特征及其影响因素分析

冯晓楠，何撼东，武黎黎*，朱　龙，王凤文，牛国宝，谷承思
(安徽农业大学资源与环境学院，安徽 合肥 230036)

摘　要：【目的】积雪物候是寒区水文过程与气候变化响应研究中的关键参数，其时空变化直接影响山区水资源调配与生态安全评估，本研究旨在定量探讨气温、降水及地形因子对积雪变化的驱动作用及其交互效应。【方法】基于 NIEER AVHRR/MODIS 融合积雪数据集，结合气象与地形数据，采用趋势分析、皮尔逊相关分析与地理探测器方法，系统分析了 2000—2020 年吉林省白山市积雪初日（SCS）、积雪终日（SCM）及积雪日数（SCD）的时空演变特征及其影响因素。【结果】1）空间分布上，积雪物候呈现显著空间异质性，＞1 300 m 海拔区域表现为更明显的积雪初日提前、终日推迟、持续时间更长，表明海拔是控制积雪形成与消融时序的主要地形因子。2）时间变化上，近 20 年白山市 SCD 年际变化以波动特征为主，并整体呈弱下降趋势，年变化速率主要分布在－1.0～0.5 d·a^{-1} 区间，SCS 与 SCM 变化趋势整体不显著。3）驱动因子方面，在地形因子中，海拔对积雪空间分异的解释力最强，坡度与坡向对积雪物候具有一定调节作用，其中＞1 300 m 海拔区域西坡积雪持续时间相对较长，但整体影响程度弱于海拔；气温在各物候阶段的解释力均高于降水，对积雪物候变化的影响更为突出，且气温与降水、气温与地形之间普遍存在双因子增强效应。【结论】研究结果量化了复杂地形下气候因子对积雪的影响，可为东北山地水资源评估提供科学依据。

关键词：积雪物候；时空演变；地形效应；地理探测器；白山市
中图分类号：P426.635　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-352X (2026)04-0689-09

Spatiotemporal variations of snow phenology and its influencing factors in Baishan city, Northeast China

Feng Xiaonan, He Handong, Wu Lili, Zhu Long, Wang Fengwen, Niu Guobao, Gu Chengsi
(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: [Objective] Snow phenology is a critical parameter in studies of hydrological processes and climate change responses in cold regions, and its spatiotemporal variations directly impact water resource allocation and ecological security assessments in mountainous areas. This study aimed to quantitatively investigate the driving effects of temperature, precipitation, and topographic factors on snow phenology changes, as well as their interactive effects. **[Method]** Based on the NIEER AVHRR/MODIS blended snow cover dataset, combined with meteorological and topographic data, this study employed trend analysis, Pearson correlation analysis, and the geographical detector method to systematically analyze the spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of the start of snow cover (SCS), the melt of snow cover (SCM), and snow cover days (SCD) in Baishan city, Jilin Province, from 2000 to 2020. **[Result]** 1) In terms of spatial distribution, snow phenology exhibits significant spatial heterogeneity across the study area. Regions with elevations >1 300 m show earlier snow cover start dates, later snow cover melt dates, and longer snow cover days, indicating that elevation is the primary topographic factor controlling the timing of snow formation and ablation. 2) In terms of temporal variation, over the past 20 years the interannual variation of SCD in Baishan has been dominated by fluctuations and shows an overall weak decreasing trend. The annual rate of change is mainly distributed within the range of −1.0 to 0.5 d·a^{-1}, while the trends of SCS and SCM are generally not

收稿日期: 2026-01-07；录用日期：2026-03-31；网络出版日期：2026-09-16
基金项目：国家自然科学基金项目（42171333，42542122）；油气藏地质及开发工程全国重点实验室 2025 年度开放基金（PLN2025-25）；自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室 2025 年度开放课题（ARPE-2025-KF03）
作者简介：冯晓楠，硕士研究生，E-mail：13061560516@163.com
* 通信作者：武黎黎，博士，副教授，E-mail：wulili@ahau.edu.cn

significant. 3) Regarding driving factors, among topographic factors, elevation shows the strongest explanatory power for the spatial differentiation of snow phenology. Slope and aspect also play certain regulatory roles. In areas with elevations >1 300 m, west-facing slopes tend to have relatively longer snow cover duration, although their overall influence is weaker than that of elevation. Among climatic factors, air temperature shows higher explanatory power than precipitation for all phenological stages, indicating a stronger influence on snow phenology variation. Moreover, interactions between temperature and precipitation, as well as between temperature and topography, generally exhibit a bivariate enhancement effect. **[Conclusion]** These findings quantify the effects of climatic factors on snow cover under complex topographic conditions and provide a scientific basis for water resource assessment in the mountainous regions of Northeast China.

Keywords: snow phenology; spatiotemporal evolution; topographic effects; geographical detector; Baishan city

积雪是中高纬度寒区最活跃和敏感的水文和环境因素，是冰冻圈系统中最重要的组成部分之一，在调节地表能量平衡、水文循环及生态过程方面发挥着关键作用[1-2]。积雪具有明显的季节性变化，其高反射率和低导热率特性不仅能够调节地—气能量交换过程，还会影响土壤理化性质和水热平衡关系，是气候变化背景下水文响应研究的重要组成部分。积雪物候指标能够有效刻画积雪过程的时间结构特征[3-4]。其中，积雪初日（start of snow cover，SCS）、积雪终日（melt of snow cover，SCM）和积雪日数（snow cover days，SCD）被广泛用于分析积雪变化特征及其环境响应的研究[5]。随着全球变暖趋势的加剧，不同区域积雪物候表现出不同的时空变化特征，积雪物候已成为气候变化研究中重要参数[6]。

近年来，多源遥感数据为全球尺度的积雪动态变化监测提供了重要技术手段[7]。在全球变暖背景下，高山地区和极区冰冻圈普遍退缩，未来将持续消融，并进一步加剧高山地区的灾害风险。Brown 等[8]发现过去约 90 年北半球春季积雪范围显著减少，且近 40 年减少速率加快。Hori 等[9]发现北半球积雪范围与持续时间整体呈下降趋势，积雪开始日期推迟是主要因素，而积雪持续日数在不同地区呈现不同的变化特征。在中国范围内，积雪覆盖面积和积雪日数整体呈减少趋势，且积雪日数减少的区域大于增加的区域[10]。

在国内积雪研究方面，青藏高原、新疆北部与东北地区是我国三大典型积雪区。魏挪巍等[11]对青藏高原积雪的研究发现，不同海拔高度下积雪物候具有显著的空间差异，整体表现为积雪初日推迟、终日提前、积雪期显著缩短，且其变化受气温、降水及海拔、纬度等地理因子的共同影响。黄晓东等[12]利用遥感数据进一步证实，青藏高原地区积雪面积和积雪日数总体呈减少趋势，但高海拔山区（5 200 m 以上）存在局部积雪覆盖日数显著增加的现象。张博等[13]发现，新疆天山积雪覆盖呈逐年减少趋势；高海拔地区积雪初日较早、积雪终日较晚，低海拔地区积雪初日较晚、积雪终日较早，积雪日数呈增长趋势。相比之下，东北地区作为典型的季风积雪区，积雪物候变化相对复杂。郭慧等[14]针对东北地区 2001—2017 年的研究发现，该地区积雪分布呈现“山区高、平原低”的典型格局，积雪日数整体呈增加趋势，积雪消融时间略有推迟，这与青藏高原和新疆北部地区积雪日数普遍减少的趋势形成区域差异。

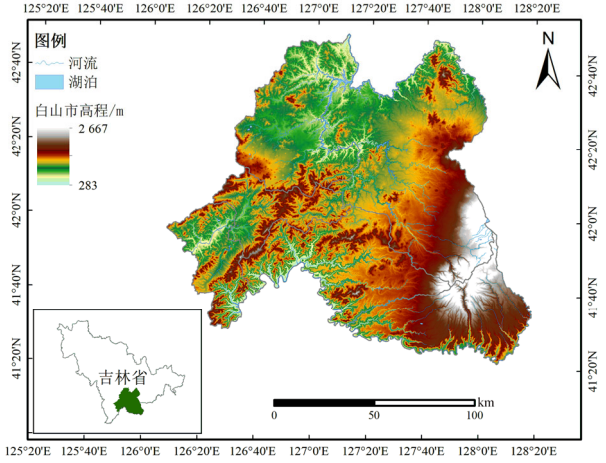
总体来看，国内外关于积雪物候变化的研究已取得较为丰富的成果，但在区域尺度积雪物候变化规律及其影响因素方面仍有进一步研究空间[15]。对地形因子（如海拔、坡度、坡向）及其与气候因子之间的交互作用关注较少，难以全面揭示区域山地积雪变化规律。因此，本文以白山市为典型研究区。该区域位于长白山脉西坡，地形起伏显著、海拔梯度明显，是松花江上游重要的水源涵养区[16]。在寒冷气候与复杂地形的共同作用下，冬季积雪覆盖稳定，其变化对春季融雪径流及区域水资源调配具有重要影响[17]；且高海拔区域积雪的年际波动往往在流域尺度上被进一步放大，进而影响径流过程的稳定性与连续性[18]。基于此，本研究结合多源遥感数据与气象、地形要素，系统分析 2000—2020 年白山市积雪物候的时空演变特征，并引入地理探测器模型，定量探讨气温、降水及地形因子对积雪变化的驱动作用及其交互效应，以期为东北山地积雪水资源评估与适应性管理提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

白山市位于吉林省东南部，长白山脉西坡（126°07′E～128°38′E，41°32′N～42°42′N），总面积约 174 万 hm^2，是松花江与鸭绿江两大水系的重要水源涵养区（图 1）。区域地貌以山地为主，兼有丘陵与盆地，海拔高差超过 2 000 m，地势总体呈东

南高、西北低的分布格局。该区属温带大陆性季风气候，冬季漫长寒冷，积雪期通常从 11 月初持续至次年 4 月，积雪具有覆盖度高、稳定性强及对气候变化敏感的特点。积雪消融作为东北春季径流的重要补给来源，在区域水资源供给、生态安全维系及流域水资源调配中发挥着关键作用。



审图号：GS（2024）0658，底图无修改。

图 1　研究区示意图

Figure 1　Schematic map of the study area

1.2　数据来源与预处理

1.2.1　*积雪数据*　积雪数据选用国家冰川冻土沙漠科学数据中心（http://www.ncdc.ac.cn）发布的 MODIS 中国积雪物候数据集（2000—2020 年）。该数据集通过多源数据融合及时空过滤算法，有效去除了云层干扰，时间跨度为 2000—2020 年，空间分辨率为 500 m。相较于传统光学遥感产品，该数据集在复杂山地的积雪识别精度显著提升，经地面观测验证，其总体精度超过 93%[5,19]，积雪日数（SCD）的均方根误差（RMSE）控制在 12 d 以内，积雪初日和积雪终日的识别精度亦处于较高水平，能够满足复杂地形区积雪过程的长期监测需求。

基于 Python 批处理平台，对原始 GeoTIFF 数据进行投影转换与裁剪处理。在此基础上，定义积雪初日（SCS）为水文年内首次出现连续 5 日积雪覆盖的首个日期，积雪终日（SCM）为水文年内最后一次连续 5 日积雪覆盖的终止日期，积雪日数（SCD）为水文年内像元处于积雪覆盖状态的累积总天数。依据水文年划分标准（当年 9 月 1 日至次年 8 月 31 日），以 9 月 1 日作为积雪物候计算的第 1 天。通过逐像元提取上述积雪物候指标，构建了白山市长时间序列的积雪物候数据集，为后续地形效应分析提供数据支撑。

1.2.2　*气象数据*　气象数据选用国家青藏高原科学数据中心发布的中国 1 km 分辨率逐月平均气温与降水量数据集（https://data.tpdc.ac.cn/home）。该数据集融合地面观测、遥感反演及数值模拟结果，具有良好的时空连续性与精度。采用双线性插值法将气象栅格重采样至 500 m 分辨率，构建了与积雪数据像元严格匹配的气象数据库。依据积雪形成与消融过程，将气象要素重组为冬季（12 月至次年 2 月）和春季（3 月至 5 月），分别计算同期的平均气温与降水量，用于分析不同物候阶段气候因子对积雪演变的差异化影响。

1.2.3　*地形数据*　地形数据来源于地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn/search），该数据集源自美国地质调查局（USGS）的 SRTMGL1 V003 全球数字高程模型（DEM），空间分辨率为 90 m。为与积雪及气象数据实现像元级匹配，首先将其重采样至 500 m，并利用空间分析工具提取坡度与坡向信息。为量化地形对积雪的影响，结合研究区垂直地带性与地貌特征，对地形因子进行分级处理：1）高程：依据海拔梯度划分为＜500 m、[500，900）m、[900，1 300）m、[1 300，1 800）m 及≥1 800 m 5 级；2）坡度：依据自然资源部《第三次全国国土调查技术规程》[20]，将坡度划分为平坡（＜2°）、缓坡[2°，6°）、斜坡[6°，15°）、陡坡[15°，25°）；3）坡向：重分类为东[45°，135°）、南[135°，225°）、西[225°，315°）、北[315°，360°）与[0°，45°）4 个基本方位。在此基础上，采用渔网采样法在研究区内均匀布设 4 680 个基准样本点。基于样本点提取长时间序列的积雪物候、气象要素及地形信息，实现了数据的空间一致性匹配，为后续地理探测及影响因素分析提供数据支撑。

1.3　研究方法

1.3.1　*趋势分析*　本文采用 Theil-Sen（Sen）斜率估计法与 Mann-Kendall（MK）非参数检验法[21]相结合的方法进行分析。该组合方法对数据分布无特殊要求，且对异常值不敏感，是遥感与水文气象长时间序列分析中公认的稳健方法。

Sen 斜率计算公式为：

$$\beta = \mathrm{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), j > i \qquad (1)$$

式（1）中：x_j 和 x_i 分别为第 j 年和第 i 年的积雪指标。$\beta>0$ 表示增加趋势，反之则为减少趋势。

MK 检验通过计算序列内部的秩次相关性来构建统计量 S 及其方差 Var（S），并最终构建标准化的检验统计量 Z。各计算公式如下：

统计量 S

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(s_j-s_i) \quad (2)$$

式（2）中，

$$\mathrm{sgn}(S_j-S_i)=\begin{cases}1, S_j-S_i>0\\0, S_j-S_i=0\\-1, S_j-S_i<0\end{cases} \quad (3)$$

方差 Var(S)

$$\mathrm{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

趋势检验统计量 Z 的计算公式：

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S>0\\0 \quad S=0\\\dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S<0\end{cases} \quad (5)$$

本研究设定置信水平为 95% （α=0.05）。当|Z|＞1.96 时，表示趋势通过可信度为 95%显著性检验。

1.3.2 *皮尔逊相关性分析* 为了定量表征积雪物候指标在空间上的耦合关系，本文采用皮尔逊相关系数（Pearson correlation coefficient）。该方法通过计算相关系数（r）来衡量两个变量之间的线性相关程度[15]。计算公式如下：

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (6)$$

式（6）中：r_{xy} 代表皮尔逊相关系数，其取值范围为[－1, 1]；x_i，y_i 为相关分析的两个变量，$\bar{x}$、$\bar{y}$ 分别为研究时段内各指标的多年平均值。n 代表样本年份数。

1.3.3 *地理探测器* 本研究引入地理探测器模型分析白山市积雪时空差异的影响因素。该方法基于空间分异理论，能够有效探测因变量与多个解释变量之间的关联强度，且在处理多源异构数据时无须线性假设，具有较强的稳健性。因子探测器通过 q 统计量来度量各驱动因子对积雪指标空间分布的解释能力，其取值范围为[0, 1]，q 值越大，说明该因子（如海拔、气温等）对积雪时空分布的影响越显著[22-23]。本研究以 P＜0.05 作为显著性判别标准，用以确保各驱动因子的可靠性。交互探测器用于评估不同环境因子在共同作用时对积雪要素解释力的变化情况。通过对比双因子交互 q 值与单因子 q 值的大小关系，识别其交互作用类型是增强（双因子增强或非线性增强）还是削弱。由于地理探测器模型要求自变量必须为离散的类别型数据，因此，在运行模型前，需对相关连续变量进行离散化处理。本研究基于自然断点法并结合区域物理实际，对连续因子进行划分。

2 结果与分析

2.1 积雪物候指标的时空分布特征

白山市近 20 年积雪物候表现出显著的空间分异特征（图 2），整体呈现东部山区积雪期较长、西部河谷积雪期较短的分布格局，其空间分布形态与区域地貌特征高度一致。积雪初日（SCS）整体呈现由东部高海拔山区向西部低海拔河谷逐渐推迟的空间变化趋势（图 2A）。东部高海拔山区积雪形成时间较早，多集中在 50～70 d。西部河谷及低洼区域主要出现在 70～90 d，局部地区可延迟至 100 d 以后。积雪终日（SCM）大部分区域积雪消融集中在 200～220 d（图 2B）。东部高海拔地带消融时间呈推迟趋势，多持续至 220 d 以后，而西北与西南部区域积雪终日相对提前，消融过程普遍小于 200 d。积雪日数（SCD）空间分布与区域地形起伏高度一致（图 2C）。其中，东部海拔较高区域积雪维持时间最长，普遍超过 140 d，长白山天池周边可达 160 d 以上。中西部及低海拔区域积雪日数相对较少，多低于 120 d。

2.2 积雪物候的时间变化特征

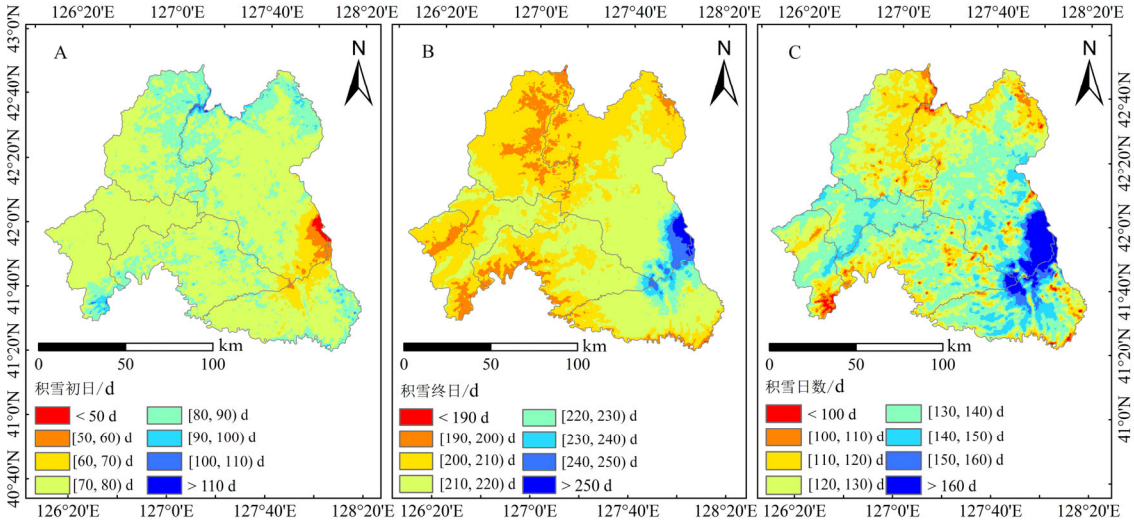
2.2.1 *积雪物候的年际波动特征* 白山市积雪物候指标表现出明显的年际波动特征，未呈现稳定的单调演变趋势（图 3）。研究期内，积雪日数（SCD）主要分布在 120～150 d，不同年份间差异较大，达 67 d，呈现出明显的丰枯交替特征。积雪日数的极小值往往对应积雪初日推迟与积雪终日提前的双重叠加。积雪初日多集中在水文年的第 65～85 天，而终日主要分布在第 200～220 天。总体来看，白山市积雪物候在年际尺度上波动显著，但长期演变趋势尚不明显。

2.2.2 *积雪物候变化趋势的空间分布特征* 基于 Sen 斜率估计与 Mann-Kendall 检验结果，白山市积雪物候整体呈现微弱变化、局部显著的时空演变特征，大部分区域的变化趋势未通过 95%显著性检验（图 4）。积雪初日以不显著提前为主要特征，占研究区面积的 75.01%，变化幅度主要集中在－0.8～－0.3 d·a^{-1}，广泛分布于中西部及河谷地带；不显著推迟区域占 24.64%，显著变化区域面积占比不足 1%，呈零散分布。

积雪终日无显著提前与无显著推迟的区域面积占比接近，分别为 54.59%和 45.22%，整体变化幅度较小，多数区域年变化率介于－0.6～0.2 d·a^{-1}。

显著变化区域分布零散，研究期内白山市积雪消融时间的整体变化趋势不明显。

积雪日数全区 61.24%的区域 SCD 呈减少趋势，速率多介于－1.0～0.5 d·a^{-1}。36.96%的区域呈增加趋势。值得注意的是，虽然整体趋势不显著，但在北部及部分河谷地带出现了零星的显著减少斑块（占比 1.75%），这些区域可能是未来积雪衰退的潜在风险区。



审图号：GS（2024）0658，底图无修改。

图 2　白山市近 20 年积雪初日、终日及积雪日数的空间分布特征

Figure 2　Spatial distribution characteristics of SCS, SCM, and SCD in Baishan over the past two decades

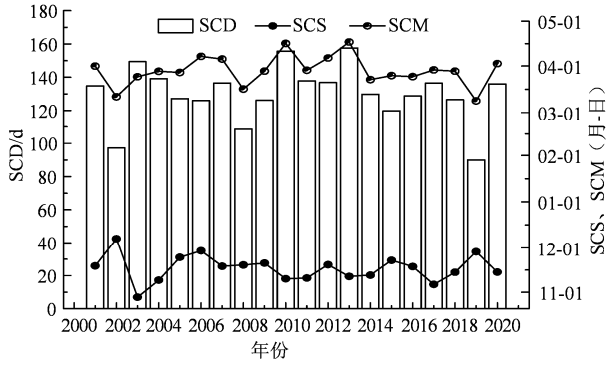


图 3　白山市 2000—2020 年积雪初日、终日及积雪日数的年际变化

Figure 3　Interannual variations of SCS, SCM, and SCD in Baishan from 2000 to 2020

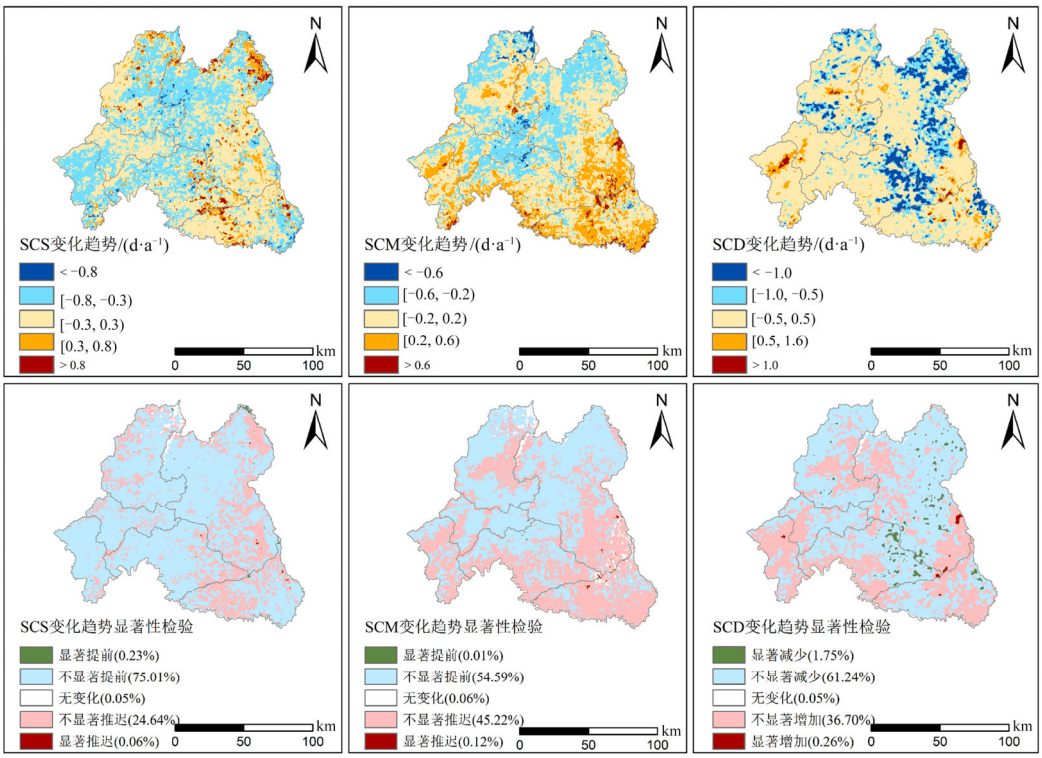
2.3　地形分区下积雪物候的空间分异特征

为揭示地形因子对积雪物候的调控作用，基于高程、坡度和坡向三维地形指标的统计分析结果如图 5、图 6 和图 7 所示。

2.3.1　*海拔分区特征*　研究以海拔 1 300 m 为界分别对积雪物候进行线性回归分析，发现积雪物候对海拔的响应存在明显的两段式特征（表 1，图 5）：随海拔升高，积雪日数（SCD）与积雪终日（SCM）显著增加，而积雪初日（SCS）显著提前，且这种变化速率在海拔＞1 300 m 区域显著增大。SCD 的递增速率由低海拔的 2.75 d·100 m^{-1} 增至 7.14 d·100 m^{-1}，SCS 的提前速率与 SCM 的推迟速率亦成倍增加。这表明高海拔区域的低温环境对积雪的累积与维持具有非线性放大效应，凸显了海拔作为积雪物候首要驱动因子的关键作用，尤其在高海拔敏感区表现出更强的线性响应特征[24]。

2.3.2　*坡度分区特征*　研究区积雪物候对坡度的响应存在明显的海拔依赖性（图 6）。从坡度变化来看，在海拔＜1 300 m 区域内，各坡度等级之间的积雪物候差异相对较小，SCD 整体维持在 120～135 d，SCS 和 SCM 变化幅度也较为有限，说明低海拔地区积雪物候对坡度变化的响应较弱。而在海拔＞1 300 m 区域，坡度对积雪物候的影响相对更加明显，其中[2°，6°）和[6°，15°）坡度范围内 SCD 相对较高，表明高海拔下中等坡度条件更有利于积雪积累与保持。箱线图结果进一步显示，在＜15°坡度区间内积雪物候整体较为稳定，而当坡度增至[15°，25°）时，积雪稳定性有所减弱，SCD 中位数略有下降，高海拔区域 SCM 出现一定程度的提前。

2.3.3　*坡向分区特征*　不同海拔梯度下，坡向对积雪物候同样产生一定影响，表现出明显的高低海拔差异特征（图 7）。在各坡向条件下，海拔＜1 300 m 区域，各坡向间积雪物候差异微弱，箱体分布基本持平；但在海拔＞1 300 m 区域，西坡表现为积雪保持的最优环境，SCD 中位数最高，且对应最早的 SCS 和最晚的 SCM。相比之下，东坡受晨间辐射升温较快影响，积雪消融略有提前，SCD 相对较短。



审图号：GS（2024）0658，底图无修改。

图 4 2000—2020 年白山市积雪物候变化趋势及其显著性空间分布

Figure 4 Spatial distribution of snow phenology variation trends and significance tests in Baishan from 2000 to 2020

表 1 不同海拔梯度下的积雪物候参数

Table 1 Snow cover phenology across different elevation gradients

海拔/m	SCD/d	SCS/d	SCM/d
＜500	114.84	83.00	198.96
[500，900）	126.27	78.50	206.82
[900，1 300）	133.36	76.11	214.14
[1 300，1 800）	161.42	66.21	232.59
≥1 800	192.15	53.09	250.88

2.4 区域的气候响应关系分析

2.4.1 单因子解释 地理探测器分析结果表明（表2），除坡度在各积雪物候指标中均未通过显著性检验外，其余 6 项因子至少在一个积雪物候指标中通过显著性检验（$P<0.05$），其中气温和海拔对 SCD、SCS、SCM 均呈显著影响。各因子对积雪物候的解释力总体呈现气温＞海拔＞降水＞坡向＞坡度的分异规律，说明气候因子对积雪物候的控制作用显著强于地形因子，其中气温是白山市积雪演变的主要驱动力。

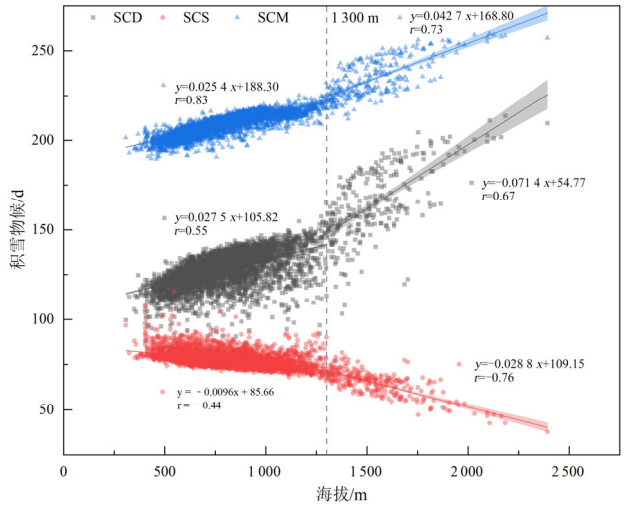


图 5 不同海拔梯度下积雪物候指标的线性回归分析

Figure 5 Linear regression analysis of snow cover phenology indicators across different elevation gradients

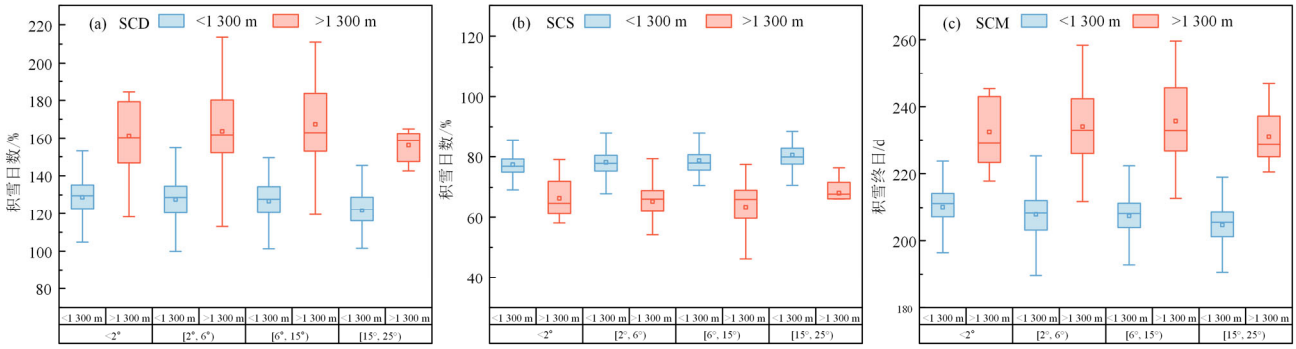


图 6　不同海拔梯度下坡度对积雪物候的影响对比

Figure 6　Comparison of the impact of slope on snow phenology across different altitude gradients

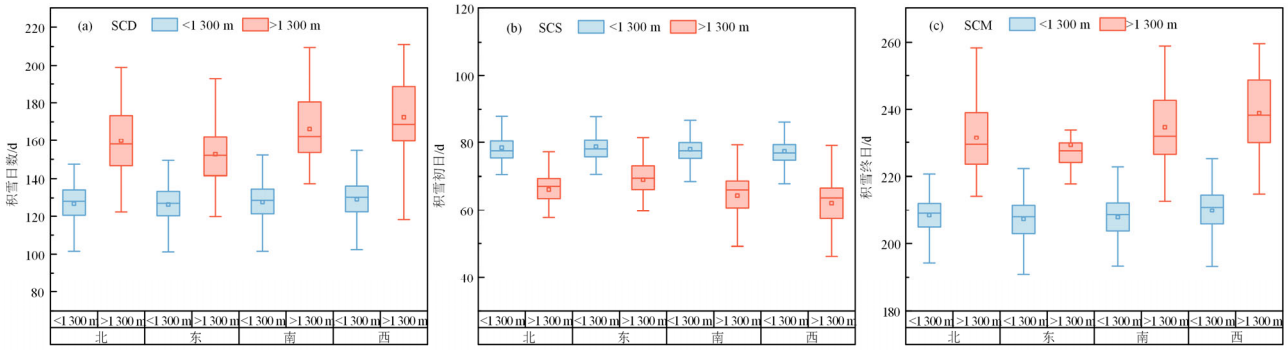


图 7　不同海拔梯度下坡向对积雪物候的影响对比

Figure 7　Comparison of aspect impact on snow phenology under different altitude gradients

表 2　积雪空间分异影响因子的地理探测器分析结果

Table 2　Results of geographical detector analysis for influencing factors of snow cover spatial differentiation

影响因素	SCD（q）	SCS（q）	SCM（q）
春季气温	0.544**	0.436**	0.747**
冬季气温	0.566**	0.483**	0.626**
海拔	0.427**	0.366**	0.544**
春季降水	0.328**	0.309**	0.265
冬季降水	0.036**	0.030	0.130**
坡向	0.016**	0.019**	0.025**
坡度	0.004	0.002	0.005

注：q 表示驱动因子的解释力；表示在 0.05 水平上显著。

2.4.2　**因子交互增强效应**　交互探测结果表明，白山市积雪物候的演变中，任意两个因子间的交互作用均表现为双因子增强或非线性增强，不存在独立或减弱现象（图 8）。多因子的协同效应显著增强了对积雪物候的解释力。图中 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7 分别代表春季降水、冬季降水、春季气温、冬季气温、坡向、坡度、海拔。对于 SCS，春、冬季气温与降水的交互作用解释力相对较强，海拔次之；冬季气温与春季气温组合的 q 值明显高于单因子。SCM 的交互效应较强，多数组合 q 值超过 0.6，其中气温相关因子之间的交互贡献最大，表明积雪消融过程对气温变化更为敏感。相比之下，SCD 的交互作用强度介于 SCS 与 SCM 之间，气温与降水的交互效应明显强于地形因子的单独作用，但在与海拔、坡度叠加后仍呈增强特征，说明积雪持续时间主要受气候控制，同时受地形条件调节。

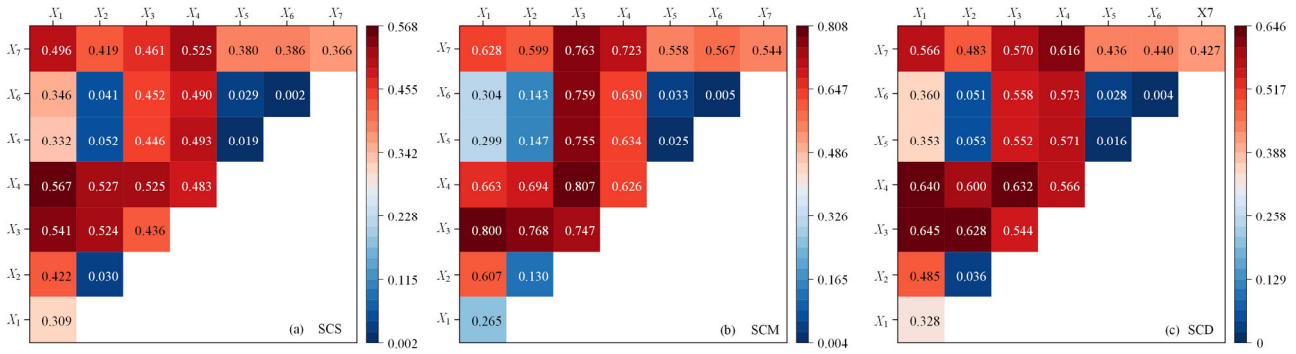


图 8　各影响因子对积雪空间分异影响的交互探测结果

Figure 8　Interaction detector results of influencing factors on the spatial differentiation of snow cover

3 讨论

3.1 积雪物候年际波动及异常年份特征

研究结果表明，2000—2020 年白山市积雪日数整体呈弱下降趋势，但变化趋势未达到显著水平，年际变化以波动为主，表明研究期内区域积雪物候并未表现出稳定的单向变化，而是更多受到气候年际波动的影响。从时间序列变化可见，部分年份积雪日数明显偏高或偏低，表现出较为突出的异常波动特征。这类异常年份通常与冬季气温偏高或偏低以及降雪过程异常有关[25]。当冬季气温偏高或春季升温提前时，积雪消融过程加快，容易导致当年积雪持续时间明显缩短；而在冷冬或降雪偏多年份，积雪覆盖时间则可能显著延长。因此，在气候变暖背景下，积雪物候变化不一定表现为持续的线性趋势，而可能通过个别异常年份集中体现其对气候变化的响应。这种以异常波动为主的变化特征在中高纬度山区积雪研究中也较为常见[13,26]。

3.2 地形条件对积雪变化波动的调节作用

研究表明，地形因子通过调节气候要素的作用过程，对白山市积雪物候年际波动产生重要影响。这与东北积雪研究中地形对积雪分布的调控作用的结论一致[27]。其中，海拔不仅控制积雪空间分布格局，还影响区域对气温变化的敏感性。高海拔区域气温较低且降雪稳定，积雪形成与维持条件相对稳定，年际波动幅度较小；而中低海拔地区处于雨雪转换临界区，对气温异常响应更加敏感，在暖冬或春季升温提前的年份易出现快速融雪，从而放大积雪日数的年际差异[28]。坡度与坡向主要通过影响太阳辐射与能量收支，对局地积雪消融过程产生调节作用，该影响在高海拔区域更为明显，但整体解释力低于海拔[29]。结合地理探测结果可知，气温对积雪物候的解释力显著高于地形因子，而地形与气温之间普遍存在增强效应，说明地形通过调节气候因子的作用强度，间接影响积雪变化。整体来看，白山市的积雪变化呈现出“气候主导、地形调控”的作用机制。

本研究采用中等分辨率遥感数据，对微地形条件下积雪过程的刻画存在一定不足[30]，未来可结合高分辨率遥感数据与地面实测资料，区分干雪、湿雪等不同积雪类型，开展积雪物候演变的精细化研究，进一步完善复杂山地积雪物候驱动因素的分析。

4 结论

本文基于多源遥感积雪数据与气象、地形资料，系统分析了 2000—2020 年白山市积雪物候的时空演变特征及其影响因素，主要结论如下：

1）研究期内，白山市积雪物候整体呈现显著年际波动特征，长期变化趋势不明显。积雪日数主要分布在 120～150 d，表现为弱下降趋势。积雪初日与终日变化幅度较小，区域积雪对气候变化的响应更多体现在年际尺度波动而非持续性演变趋势。

2）白山市积雪物候空间分异显著，整体表现为高海拔山区积雪初日提前、终日推迟、持续时间延长。海拔是积雪空间变化的关键因子，并在 1 300 m 以上区域表现出更强的调控作用。SCD 的递增速率在海拔小于 1 300 m 时为每 100 m 增加 2.75 d，在海拔大于 1 300 m 时为每 100 m 增加 7.14 d。坡度方面，在＜15°坡度区间内积雪物候整体较为稳定；坡向方面，西坡最稳定。坡度与坡向对积雪分布具有一定影响，但整体作用较弱。

3）气温是驱动积雪物候变化的核心气候因子，其解释力显著高于降水，尤其是对积雪消融期的影响（约 0.75）。地理探测结果表明，气温与地形因子之间存在显著的双因子增强效应，说明地形通过调节气温的作用强度，进一步放大了积雪变化的空间差异。

参考文献：

[1] Brown R D, Mote P W. The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate[J]. J Clim, 2009, 22(8): 2124-2145.

[2] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. Nature, 2005, 438(7066): 303-309.

[3] Wang L, Jie F L, He B. Analysis of snow cover variability and spatial difference in the High Mountain Asia[J]. Res Cold Arid Reg, 2025, 17(3): 184-194.

[4] 汪箫悦, 王思远, 尹航, 等. 2002—2012 年青藏高原积雪物候变化及其对气候的响应[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(11): 1573-1579.

[5] 赵琴, 郝晓华, 王建, 等. 2000—2020 年 MODIS 中国积雪物候数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2022, 7(3): 55-64.

[6] Almagioni C D, Manara V, Diolaiuti G A, et al. Snow cover variability and trends over karakoram, western Himalaya and Kunlun Mountains during the MODIS era (2001–2024)[J]. Remote Sens, 2025, 17(5): 914.

[7] Notarnicola C. Overall negative trends for snow cover extent and duration in global mountain regions over 1982–2020[J]. Sci Rep, 2022, 12: 13731.

[8] Brown R D, Robinson D A. Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty[J]. Cryosphere, 2011,

5(1): 219-229.

[9] Hori M, Sugiura K, Kobayashi K, et al. A 38-year (1978–2015) Northern Hemisphere daily snow cover extent product derived using consistent objective criteria from satellite-borne optical sensors[J]. Remote Sens Environ, 2017, 191: 402-418.

[10] Zhao Q, Hao X H, Wang J, et al. Snow cover phenology change and response to climate in China during 2000–2020[J]. Remote Sens, 2022, 14(16): 3936.

[11] 魏挪巍, 王明田, 赵金鹏, 等. 1961—2019 年青藏高原积雪时空变化特征及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(6): 1072-1084.

[12] 黄晓东, 马英, 李雨馨, 等. 1980—2020 年青藏高原积雪时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2023, 45(2): 423-434.

[13] 张博, 李雪梅, 秦启勇. 中国天山积雪物候演变及驱动因素辨析[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(6): 1350-1360.

[14] 郭慧, 郭泽呈, 陈思勇, 等. 中国东北地区 2001—2017 水文年积雪物候时空变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(4): 502-509.

[15] 李虹, 李忠勤, 陈普晨, 等. 近 20 a 新疆阿尔泰山积雪时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1040-1051.

[16] 于恩逸, 齐麟, 代力民, 等. “山水林田湖草生命共同体”要素关联性分析: 以长白山地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8837-8845.

[17] 鄢康, 李文龙, 次旦央宗, 等. 白山水库春季径流模拟中的积雪遥感数据同化研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(S2): 11-18.

[18] 朱景亮, 齐非非, 穆兴民, 等. 松花江流域融雪径流及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 125-130.

[19] Hao X H, Huang G H, Zheng Z J, et al. Development and validation of a new MODIS snow-cover-extent product over China[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2022, 26(8): 1937-1952.

[20] TD/T 1055-2019 第三次全国国土调查技术规程[S].

[21] 左合君, 王嫣娇, 刘宝河, 等. 锡林郭勒积雪日数时空分布规律研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 255-263.

[22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.

[23] 肖瑶, 赵林, 邹德富, 等. 基于地理探测器的青藏高原多年冻土分布影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 311-321.

[24] 宝乐尔其木格. 中国东北北部地区雪面雨日数变化及其影响因素[J]. 地理研究, 2024, 43(7): 1850-1861.

[25] 李双双, 胡佳岚, 段克勤, 等. 基于遥感监测的秦岭南北积雪日数时空变化及影响因素[J]. 地理学报, 2023, 78(1): 121-138.

[26] 唐志光, 邓刚, 胡国杰, 等. 亚洲高山区积雪物候时空动态及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1400-1411.

[27] 张晓闻, 臧淑英, 孙丽. 近 40 年东北地区积雪日数时空变化特征及其与气候要素的关系[J]. 地球科学进展, 2018, 33(9): 958-968.

[28] 卢新玉, 陈仁升, 刘艳, 等. 我国新疆北部地区雪面雨日数时空变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1446-1457.

[29] 赵静毅, 陈继, 吴青柏, 等. 天山胜利达坂地区积雪分布特征[J]. 山地学报, 2018, 36(1): 98-106.

[30] 梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述[J]. 遥感学报, 2020, 24(6): 618-671.