

引用格式: Zhao Qin, Hao Xiaohua, He Dongcai, *et al.* The Relationship between the Temporal and Spatial Changes of Snow Cover and Climate and Vegetation in Northern Xinjiang from 1980 to 2019[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1247-1258. [赵琴, 郝晓华, 和栋材, 等. 1980~2019年北疆积雪时空变化与气候和植被的关系[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1247-1258.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.6.1247

1980~2019年北疆积雪时空变化与气候和植被的关系

赵 琴^{1,2}, 郝晓华², 和栋材¹, 王 建^{2,3}, 李弘毅², 王旭峰²

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000;

3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

摘要: 利用1980~2019年中国长时间序列的AVHRR逐日无云积雪面积产品和气象站实测雪深资料计算积雪日数、积雪初日、积雪终日、积雪期、雪深等积雪物候参数, 研究积雪物候的时空分布变化, 同时结合ECMWF-ERA5再分析资料和GIMMS NDVI3g数据集分别提取气象因子(气温、降水)和植被因子(返青期、枯黄期、生长期), 探究北疆积雪物候变化对气象因子和植被因子的响应。结果表明: 北疆近40 a间的平均积雪日数为81.62 d/a, 73%的区域为稳定积雪区, 积雪初日在11月、终日在3月, 积雪期为每年11月初至次年3月底4月初; 空间上呈现不均匀分布, 其中阿勒泰山地区、天山地区、大部分塔城盆地和额尔齐斯谷地区为主要积雪区, 1980~2019年间北疆积雪覆盖面积比例、积雪日数和积雪期逐年降低, 积雪初日基本没变, 但积雪终日显著提前; ECMWF-ERA5再分析资料表明1980~2019年北疆积雪期降水量无明显变化, 但积雪覆盖面积比例显著降低, 说明降雪区雪深可能增加, 这与北疆气象站实测雪深逐渐增加结果相吻合; 平均气温与积雪期积雪覆盖面积比例、积雪日数、积雪期长度相关性较大, 呈现显著负相关, 积雪期降水量与积雪物候参数呈现正相关; 积雪物候及其气候效应引起北疆自然植被返青期显著提前, 植被生长期延长的特征。

关键词: AVHRR; 积雪面积; 积雪物候; 气象因子; 植被因子

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)06-1247-12

1 引言

积雪作为冰冻圈的重要组成部分之一^[1], 在北半球积雪期分布范围广泛, 陆地积雪覆盖面积比例高达40%^[2], 我国是中低纬度地区积雪分布最为广泛的国家^[3-4], 冬季积雪大约相当于 $7.4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的水量, 对农业、林业、气候及环境等产生直接或者间接的重要影响^[5-10]。积雪与气候存在相互反馈作用, 一方面, 由于其积累消融的周期性变化影响其特有的高反射率、高相变潜热、低热传导等属性, 进而影

响气候系统^[11]; 另一方面, 由于积雪对环境变化的敏感性, 气候变化引起的气温降水变化也会对积雪产生相应的反馈作用^[12], 近年来随着气温和降水等气候因子的变化, 积雪参数也在逐年变化。同时, 积雪的变化与近地表气候相互作用, 影响着植被物候, 同样植被返青期枯黄期等的提早或者推迟通过其蒸发蒸腾作用和光合作用等影响植被生产力, 进而影响生态系统及水循环等^[13]。

近年来国内外众多学者对积雪参数时空变化分析及相关因素响应研究^[14]。Hori等^[15]用JASMES

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1510503), 国家自然科学基金项目(41971325、42171391), 中国科学技术基础资源调查计划(2017FY100502), 青海省基础研究项目(2020-ZJ-731)。

作者简介: 赵 琴(1995—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事积雪遥感研究。E-mail: zhaoqin21@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 郝晓华(1979—), 男, 山西原平人, 副研究员, 主要从事光学积雪遥感研究。E-mail: haoxh@lzb.ac.cn

产品进行北半球积雪变化研究表明积雪覆盖面积逐年减少。Peng等^[16]利用北半球636个气象站数据分析发现欧亚大陆在过去27年积雪终日提前了 2.60 ± 5.60 d/a。中国积雪主要分布在东北(包括东北和内蒙古北部)、北疆和青藏高原。也有不少学者对中国主要积雪区进行了研究。王云龙等^[17]对中国2000~2018年积雪变化进行分析发现积雪深度年际变化略有不同,中国在春季、秋季和冬季平均积雪深度呈增加趋势。Wang等^[18]利用中分辨率成像光谱(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)的每日积雪和交互式多传感器积雪和冰图系统(Interactive Multi-sensor Snow and Ice Mapping System, IMS)数据发现气温和降水对积雪的影响随着海拔升高而增强。罗银建等^[19]研究了汶川县部分年份植被和积雪特征,李晨昊等^[13]讨论了内蒙古高原2000~2017年积雪对不同植被的影响。

先前的研究已表明,气温和降水是影响积雪的主要气象因子,且气温、降水、积雪和植被^[20]都存在相互反馈作用。北疆位于中国西北部,纬度较高,冬季漫长,因而也有不少学者基于实测资料对北疆进行积雪及其相关影响因素的研究分析,而利用长时间序列遥感影像数据探究积雪变化的研究还比较少^[21],尤其是北疆植被与积雪的关系。因此本研究通过使用基于先进的超高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)1980~2019年中国逐日无云积雪面积产品^[22]及

1980~2019年站点数据提取北疆的积雪物候参数雪深(Snow Depth, SD)、积雪面积覆盖比例(Snow area Coverage Ratio, SCR)、积雪日数(Snow Cover Days, SCD)、积雪初日(Start of Snow Cover days, SCS)、积雪终日(Melt of Snow Cover days, SCM)和积雪期长度(Length of Snow Period, SPL)^[3],使用欧洲中期天气预报中心第五版本再分析资料(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v5, ERA5)提取气候因子气温、降水及使用第三版本的植被归一化指数产品(Global Inventory Modeling and Mapping Studies, GIMMS NDVI3g)^[23]提取植被因子返青期(The Start of Growing Season, SOS)、枯黄期(The End of Growing Season, EOS)和生长期长度(Length of Growing Season, LOS),探究北疆积雪区近40 a的积雪分布及积雪、气候因子和植被因子的年际变化及季节性变化规律,分析比较北疆主要积雪区积雪物候参数与不同时间段(全年、积雪期、消融期)气候因子及植被因子的相关性大小,以期在北疆生产及灾害预警等方面提供信息服务。

2 研究区概况

北疆位于 $76^{\circ}52' \sim 93^{\circ}03' \text{ E}$, $40^{\circ}36' \sim 50^{\circ}47' \text{ N}$, 面积约为 $5.95 \times 10^5 \text{ km}^2$, 地形复杂, 地势东高西低, 海拔从193~4 695 m分布, 如图1(a)所示, 平均海拔约为900 m^[24]。处于我国内陆西北干旱区, 典型的温带大陆性气候, 夏季炎热干燥, 冬季严寒多雪, 年降水量较少^[25]。

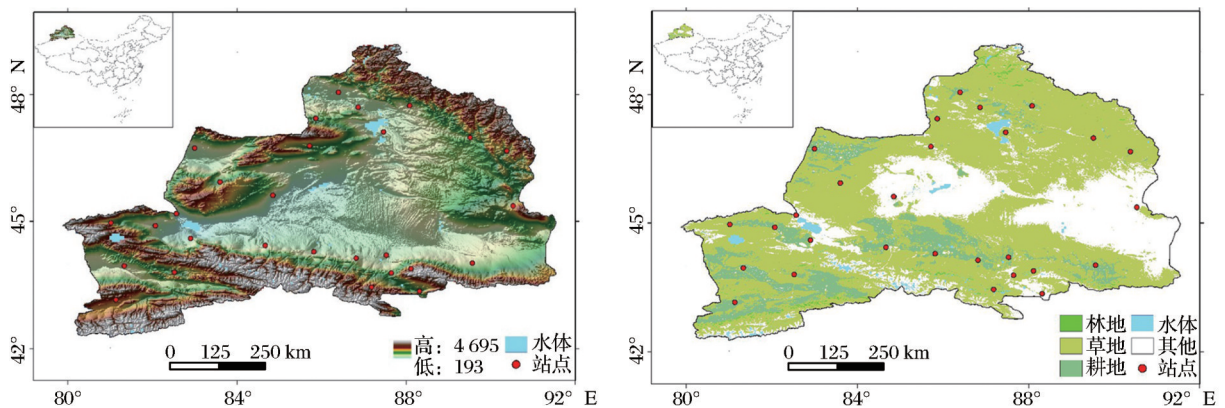


图1 研究区

审图号:GS(2019)1815

Fig.1 Study area

北疆水资源极其匮乏但同时又作为我国蕴藏着丰富积雪资源的三大主要积雪区之一^[25],积雪融水是重要的河流补给资源,适量的降雪有助于植物

顺利越冬^[13],缓解早春,对当地的生产生活有极大的正面意义。但是过量的积雪也可能对植被生长产生抑制作用,甚至造成次年融雪性洪涝灾害等,

对人们产生不利影响。

北疆 72.78% 的区域被植被覆盖,主要包括自然植被(林区和草地)和人工植被(耕地),其中自然植被占 62.39%,多集中在阿尔泰山地区、额尔齐斯谷地区、塔城盆地区、天山山地区。研究其植被变化规律,不仅可以反映生态的动态变化情况,还可以揭示植被的恢复和退化情况^[26]。因此探究北疆的积雪变化以及积雪与气象因子和植被因子的响应至关重要^[2, 27]。

3 数据与方法

3.1 数据

3.1.1 积雪面积数据

实验中积雪面积数据使用王轩等^[28-29]根据美国 NOAA-AVHRR 地表反射率数据结合 Landsat5TM、SRMT 数字高程数据、SMR、SSM/I 和 SSMIS 被动微波亮度温度数据反演雪深信息数据、温度数据,使用积雪阈值法和隐马尔可夫时空建模去云技术制备的 1980~2019 年中国长时间序列逐日无云积雪面积产品(分辨率为 5 km)。在北疆,该产品 Landsat TM 影像验证总体精度为 87.1%,漏分误差为 10.0%,多测误差为 2.9%;站点验证总体精度为 85.1%,漏分误差为 9.3%,多测误差为 5.6%^[22]。

3.1.2 积雪深度数据

雪深数据使用中国气象局提供的地面气候积雪资料日值数据集数据,记录数据主要包括气象台站区号、经纬度、海拔、年月日以及雪深、平均气温、雪压、平均风速以及最大风速风向等信息,时间从 1978 年至 2019 年。根据 Zheng 等^[30]站点分级方法,台站级别分为 0~6 级,其中 1、2 级较好,实验使用北疆台站级别较好的 1、2 等级站点雪深数据,共 29 个。

3.1.3 气象数据

气象数据使用 ECMWF-ERA5 数据^[31],定期使用其预测模型和数据同化系统来“重新分析”已存档的观测值,从而创建描述大气、陆地和海洋近期历史的全球数据集,包括最高气温、最低气温、平均气温、降水量在内的 7 个参数,时间从 1979 年 1 月 2 日起至 2020 年 7 月 9 日结束,空间分辨率为 25 km,本研究使用平均气温和降水量两个指标获取 1980~2019 年的气候因子。

3.1.4 植被数据

植被数据使用来自美国国家航天局(NASA)提供的全球植被数据集 GIMMS NDVI3g 数据集,

Wang 等^[23]根据该数据集通过使用 Logistic 函数最大合成等五种方法计算得到。实验采用了 1982~2014 年植被返青期和植被枯黄期数据,其中 NDVI<0.1 的区域不讨论植被情况,数据空间分辨率为 8 km。

3.2 方法

首先通过中国逐日无云积雪产品数据、地面台站积雪资料日值数据集提取 1980~2019 年积雪物候参数,利用 GIMMS NDVI3g 产品提取 1982~2014 年植被参数,以及 ECMWF-ERA5 提供的 1980~2019 年气象参数,分析其各自在北疆的变化趋势并进行显著性检验;分析并探讨北疆积雪时空变化规律及与气象因子、植被因子的相关性。

3.2.1 积雪、气象与植被参数获取及变化分析

将一个水文年定义为 9 月 1 日到次年 8 月 31 日,对积雪面积产品进行预处理,将有雪栅格值(t)赋为 1,无雪赋为 0。积雪覆盖面积比例(SCR)定义为北疆区域内积雪像元个数占该区域内总像元个数的百分比,如式(1)所示:

$$SCR = S_1 / (S_1 + S_2) \quad (1)$$

其中: S_1 为 t 为 1 的栅格数; S_2 为 t 为 0 的栅格数。

积雪日数定义为一个水文年上观测到积雪的次数之和,公式如式(2):

$$SCD = \sum_{t=1}^n (t=1) \quad (2)$$

其中: n 为一个水文年的总天数,为 365 d 或者 366 d。

积雪初日定义为一个水文年中第一次出现连续 5 d 是雪的首日对应日期,积雪终日定义为一个水文年中最后出现连续 5 d 是雪的终日对应日期,积雪期长度则定义为积雪终日与积雪初日的差值,积雪期为:

$$SPL = SCM - SCS \quad (3)$$

实验认为一个区域内的积雪物候参数为该区域内相应值的均值,文中北疆雪深为 29 个站点的平均雪深。所使用的平均气温和区域降水量是先在该区域内计算栅格的均值,然后在时间上计算其相应的平均值和总值。植被返青期、枯黄期在区域内栅格求均值,生长期长度为枯黄期与返青期的差值。

$$LOS = EOS - SOS \quad (4)$$

3.2.2 积雪、气候与植被分析方法

(1)平均值。逐年逐像元统计北疆积雪物候参数,计算各自在时间上的平均值,用式(5)计算:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m X_i}{m} \quad (5)$$

其中: $i=1, 2, 3 \cdots n$,为年变量; X_i 为第 i 年的积雪

物候参数; m 为年份。

(2)趋势分析法。分别计算积雪物候参数、气象因子、植被因子等参数线性变化趋势并用 Mann-Kendall 进行显著性检验^[32]。

3.2.3 积雪、气候与植被相关性分析

Pearson 评价法是一种准确度量两个变量之间的关系密切程度的统计学方法,可以用 Pearson 相关系数进行积雪物候和气候因子、植被因子之间的相关性分析:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

其中: r 为 x 、 y 两变量的相关系数; x_i 为第 i 年的积雪物候参数; y_i 为第 i 年的年降水量或平均气温;为多年积雪物候的平均值;为多年降水量或平均气温的平均值; m 为监测时段的年数,其中 $r>0$ 表示两个变量之间呈现正相关, $r<0$ 表示负相关。对于遵循双变量正态分布的数据,正态双变量样本相关系数 r 的精确密度函数 $f(r)$ 为^[33-34]:

$$f(r) = \frac{(n-2)\Gamma(n-1)(1-\sigma^2)^{\frac{n-1}{2}}(1-r^2)^{\frac{n-4}{2}}}{\sqrt{2\pi}\Gamma(n-\frac{1}{2})(1-\sigma^2)^{n-\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

其中: Γ 是伽马函数; ${}_2F_1(a, b; c; z)$ 是高斯超几何函数;在特殊情况下 $\rho=0$,精确的密度函数 $f(r)$ 可以写成:

$$f(r) = \frac{(1-r^2)^{\frac{n-4}{2}}}{B(\frac{1}{2}, \frac{n-1}{2})} \quad (8)$$

其中: B 是 Beta 函数,是一种 t 分布密度的一种方法;对于具有相关系数 r 的给定样本, p 值是从具有零相关性的总体中抽取的随机样本 x' 和 y' 的 $\text{abs}(r')$ 大于或等于 $\text{abs}(r)$ 的概率。其中 $P<0.1$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 分别表示通过了置信度90%、95%和99%的显著性检验。

4 结果分析

4.1 积雪时空分布

4.1.1 积雪物候的空间分布

北疆积雪分布具有明显的空间异质性。1980~2019年间北疆的平均积雪日数为81.62 d/a,空间上显示平均积雪日数从0到大于150 d·a⁻¹不均等分布(如图2(a))。根据李培基等^[35]的积雪划分方法,北

疆大部分区域为稳定积雪区($\text{SCD}>60$ d),约占北疆总面积的73.02%,其次为年周期不稳定积雪区($30\text{ d}<\text{SCD}<60$ d),约占总面积的24.04%。北疆整体平均积雪初日在11月(图2(b)),积雪终日在2月(图2(c)),积雪期长度约为88.89天(图2(d))。其中阿勒泰山地区、天山地区、大部分塔城盆地、和将近一半的额尔齐斯谷地区积雪日数基本都在90 d以上,且相对积雪初日更早,基本都在9、10月,终日越晚,在3~5月积雪期长度越长,在90 d以上。而准格尔盆地、伊犁谷地区、部分塔城盆地地区和额尔齐斯谷地区则积雪日数为60~90 d,零星部分地区在30 d以下,初日在12月、终日则大部分在2、3月,积雪期长度为60~90 d。北疆积雪分布主要呈现海拔越高积雪日数越多,积雪初日越早、积雪终日越晚、积雪期长度越长的特征。

4.1.2 积雪物候的时空变化

积雪在时间上具有明显的季节性变化规律和时空异质性,如图3表示了北疆1980~2019年的多年平均积雪覆盖面积比例和雪深在整个水文年内的变化图,图4表示积雪期积雪覆盖面积比例、积雪期雪深、积雪日数、积雪初日、积雪终日、积雪期长度等积雪物候参数的平均值在年际间变化规律,图5表示了积雪日数、积雪初日、积雪终日、积雪期长度年际变化的空间分布图。由图3可以看出,北疆每年从秋季9月开始各地陆续开始下雪,冬季持续积累,达到最大后逐渐消融,春季末夏季初除永久积雪区外基本没有雪。北疆积雪期主要在11月至次年3月底4月初,消融期为3月至5月。在积雪期内,北疆1980~2019年月平均积雪覆盖面积比例都大于20%,雪深都大于2 cm,其中12月~2月大于8 cm,积雪覆盖面积比例都超过50%。北疆积雪覆盖面积比例在1月达到最大,为69.51%,雪深在2月达到最大,为15.92 cm。北疆近40 a间的平均积雪期积雪面积比例为42.95%,以 $-0.69\% \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.48$, $P<0.01$)的速率明显减少。29个气象站点观测数据(如图4(b))表明,1980~2019年北疆积雪期平均雪深为8.14 cm,在这个时间段内呈逐渐加深的($\text{slope}=0.11\text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, $R^2=0.16$, $P<0.01$)的变化趋势。近40 a北疆整体平均积雪日数为81.62 d·a⁻¹,以 $-1.41\text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.55$, $P<0.01$)的速率明显减少,且通过了99%的显著性检验。北疆91.35%的区域积雪日数呈现减少趋势,减少趋势速率主要为 $0\sim 2\text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,减少速率大于 $2\text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域约占北疆总面积的

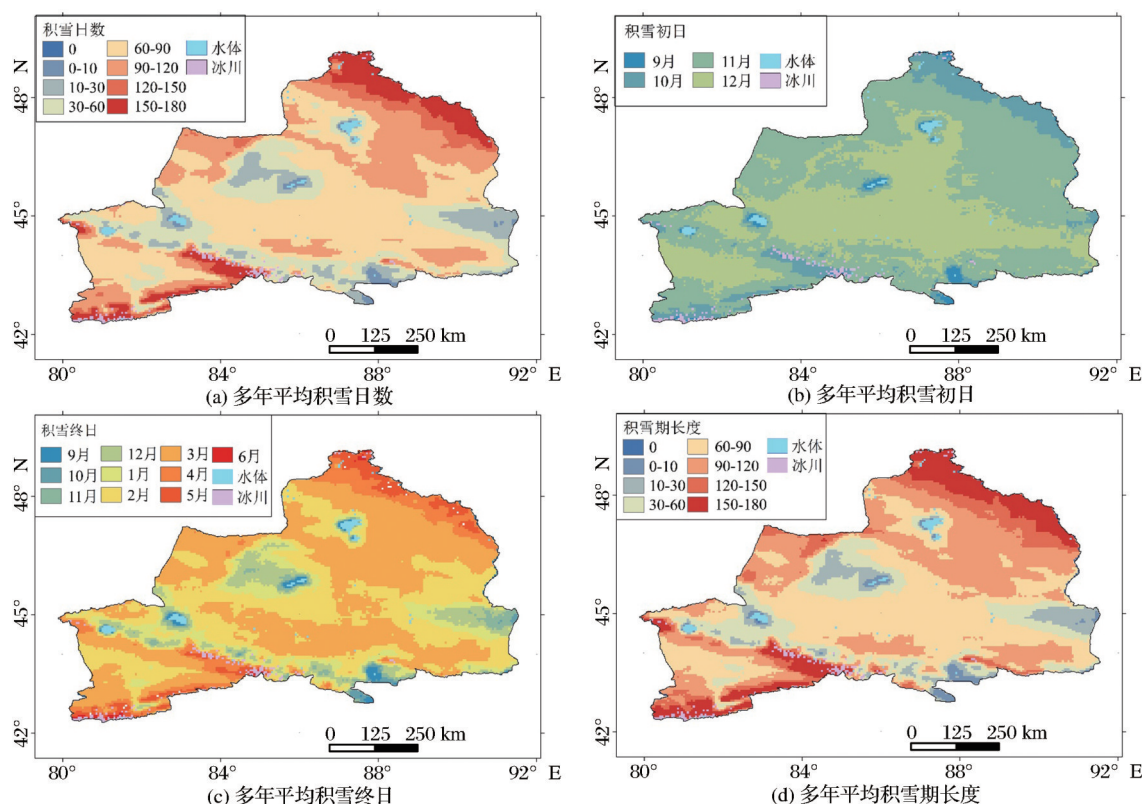


图2 北疆1980~2019年多年平均积雪物候参数

审图号:GS(2019)1815

Fig.2 Multi-year average snow phenological parameters of northern Xinjiang from 1980 to 2019

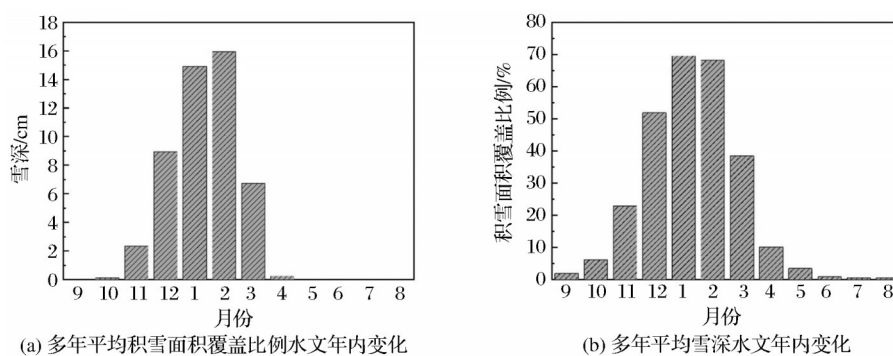


图3 积雪物候水文年内变化

Fig.3 Changes of snow phenology in hydrological years

12.03%, 主要分布在天山山地区; 呈现增加趋势的区域则只占5.36%, 且增加速率都不超过 $1 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, 零星分布在尔齐斯谷地区和塔城盆地区。整个北疆积雪初日则相对来说变化不是很大, 以 $0.08 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率呈现略微推迟的趋势 ($R^2=0.00, P<0.05$), 积雪终日则以 $-1.49 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.27, P<0.01$) 的速率提前, 积雪期长度等于积雪终日减去积雪初日, 由于初日基本不变, 终日提前, 积雪期逐渐缩短, slope 为 $-1.53 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.51, P<0.01$)。北疆78.97%区域的积雪初日呈现推迟趋势, 且主要推迟速率为 $0 \sim 1 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, 此外北疆9.96%的区域积雪初日提前;

积雪终日和积雪期长度呈现提前趋势的区域在北疆分别占比为88.74%和88.65%。天山、阿尔泰山等高海拔地区, 积雪物候参数变化速率都相对较大, 部分区域变化速率在 $2 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上。

综上所述, 北疆地区1980~2019年积雪变化特征主要表现为: 在时间趋势上积雪日数减少, 积雪初日略微推迟, 积雪终日提前、积雪期明显缩短; 在空间分布上呈现海拔越高年变化速率越大的特征规律。此外, 虽然积雪覆盖面积比例减少, 但是气象站观测表明, 雪深呈增加的趋势。

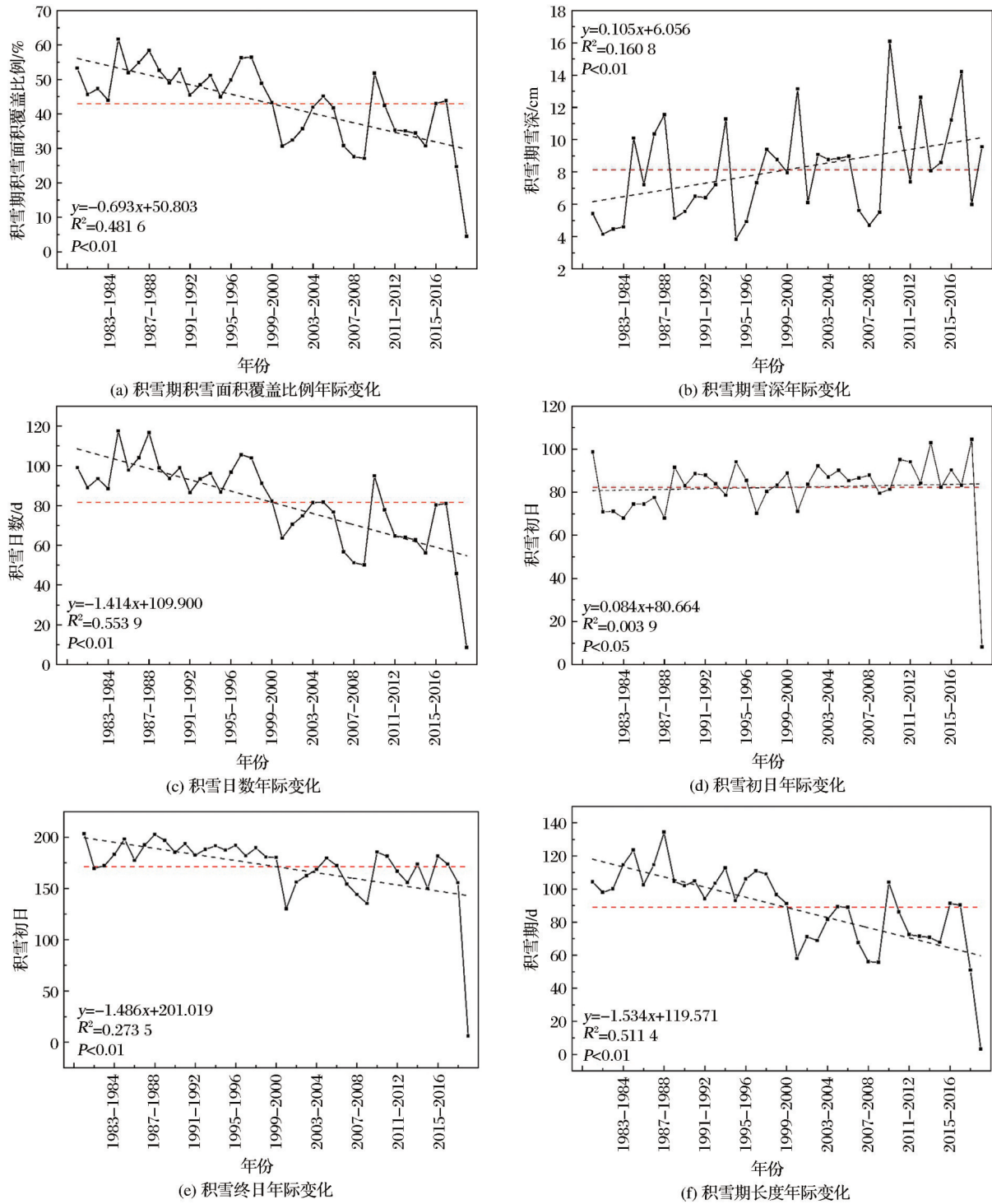


图4 平积雪物候年际变化时间分布

Fig.4 Interannual variation of snow phenology

4.2 积雪与气象因子的相关性

气温和降水是主要影响积雪的气象因子,图6展示了利用ECMWF-ERA5再分析资料统计的北疆地区1980~2019年多年平均气温和多年降水量的水文年内分布图。图中显示,北疆地区积雪期气温较低,降水主要以夏季降水为主,积雪期的固态降

水量总体低于夏季降水量。北疆1980~2019年平均气温为5.16℃,积雪期年平均降水量为130.82 mm。

为了研究积雪物候对气候因子的响应,根据积雪和气候的反馈作用,统计了北疆1980~2019年的平均气温和降水量在全年、积雪期(每年的11月份至次年4月份)和融雪期(每年3月份至5月)的变

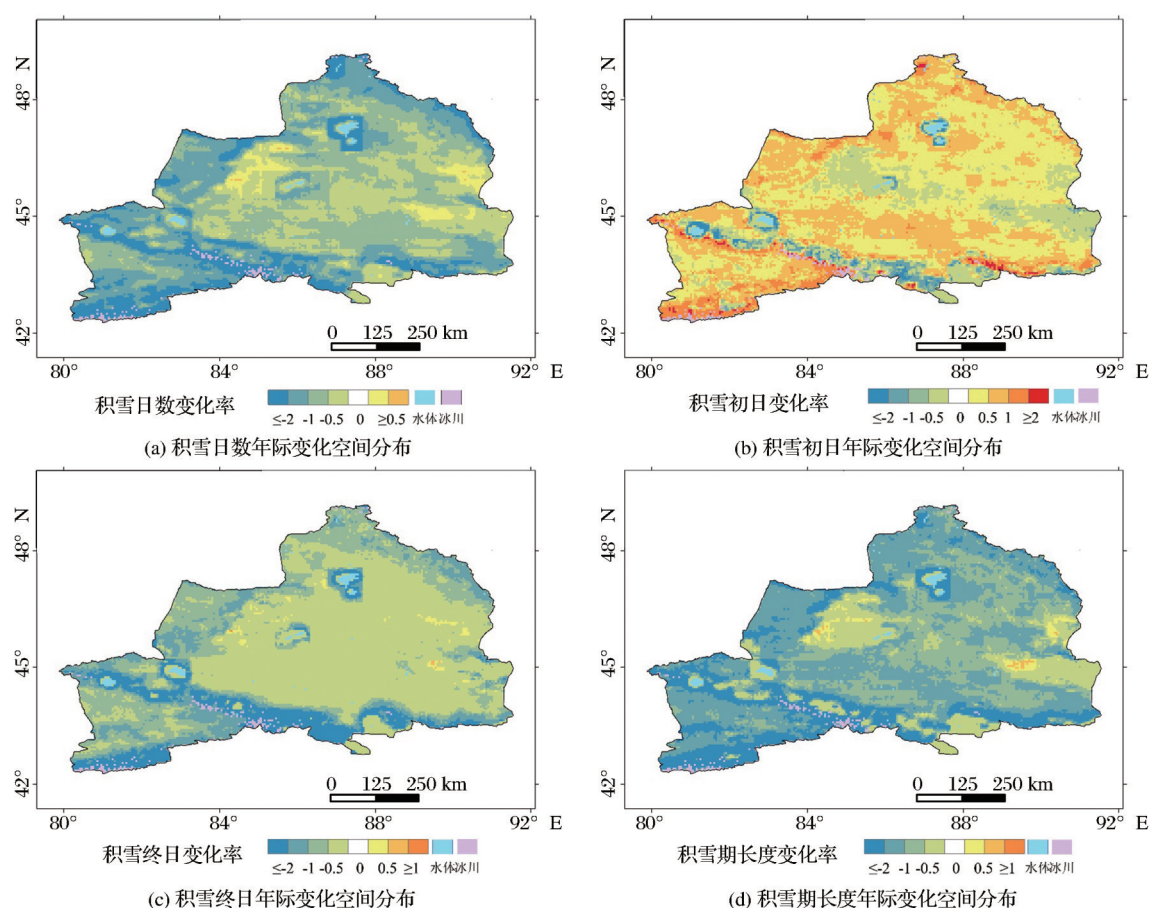


图5 积雪物候年际变化空间分布

审图号:GS(2019)1815

Fig5 Spatial distribution map of the interannual variation of snow phenology in northern Xinjiang from 1980 to 2019

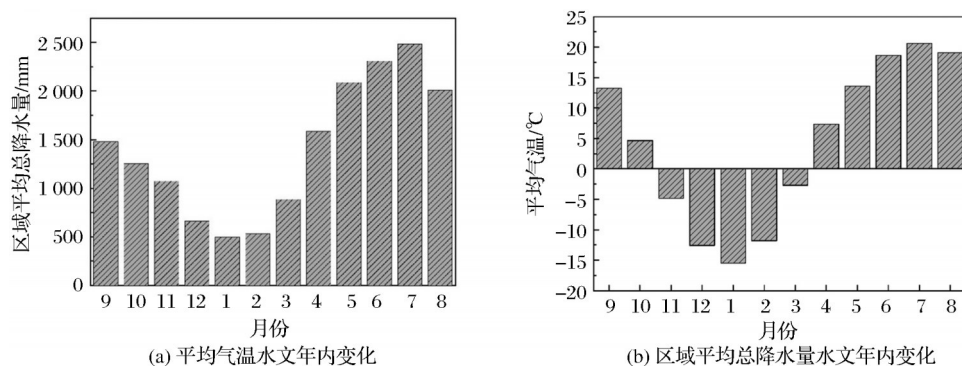


图6 积雪物候水文年内变化

Fig.6 Changes of meteorological factors in hydrological years

化,如图7所示。从图7(a)气温年际变化曲线来看,北疆1980~2019年全年、积雪期和融雪期平均气温均呈现升高趋势,分别以 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ ($R^2=0.27$, $P<0.01$)、 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ ($R^2=0.10$)和 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ ($R^2=0.28$, $P<0.01$)的速率变化,根据变化率可以看到,变化速率最大的是融雪期平均气温。图7(b)降水年际变化曲线来看,1980~2019年北疆平均降水呈现微弱的降低趋势($\text{slope}=-0.43\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, $R^2=0.01$),

而积雪期年平均降水量呈现略微增加的趋势,增加速率为 $0.48\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ($R^2=0.06$)。北疆位于西北干旱区,积雪期降水量主要为融雪水,北疆降水量无明显变化,但由于积雪面积覆盖比例显著降低,说明可能降雪区雪深增加,这与北疆气象站观测地面雪深逐渐增加结果相吻合。

为了分析北疆积雪空间变化对于不同气候因子的影响程度,计算主要积雪期积雪面积和积雪期

雪深与平均气温和降水的相关性。如表1所示,可以看到在气温因子方面,积雪期积雪面积覆盖比例与年平均气温,积雪期年平均气温,融雪期年平均气温有很好的负相关,相关性分别为-0.48、-0.42、-0.49,且都通过了99%的检验,积雪期雪深与年平均气温、积雪期年平均气温有较好的负相关,相关性分别为-0.27、-0.43,与融雪期年平均气温相关性较弱,说明融雪期的气温主要与积雪面积覆盖比例有关,这是由于积雪面积大范围降低使得地表反照率明显降低,从而引起的气候效应反馈造成的。对于降水因子方面,积雪期积雪面积覆盖比例与年降水量和积雪期降水量呈现微弱的正相关,相关性分别为0.27和0.12,积雪期雪深与年平均降水量和积雪期年平

均降水量呈现显著正相关,相关系数分别为0.42、0.68,比积雪面积覆盖比例相关性较高,说明北疆地区雪深受积雪期降水量的影响比积雪面积更大。

为了进一步分析气候因子和积雪物候的关系,表1分析了主要积雪物候参数(积雪日数,积雪初日,积雪终日和积雪期)与年平均气温,积雪期年平均气温,融雪期年平均气温,年降水量和积雪期年降水量的相关性,结果表明,融雪期年平均气温和积雪终日相关性高达-0.44($P<0.01$),表明积雪面积降低会使得融雪期气温显著升高,而融雪期气温升高又反过来加速了积雪融化,使得积雪终日提前,这种增温和积雪之间的反馈作用,会导致区域的气候产生深刻的影响。

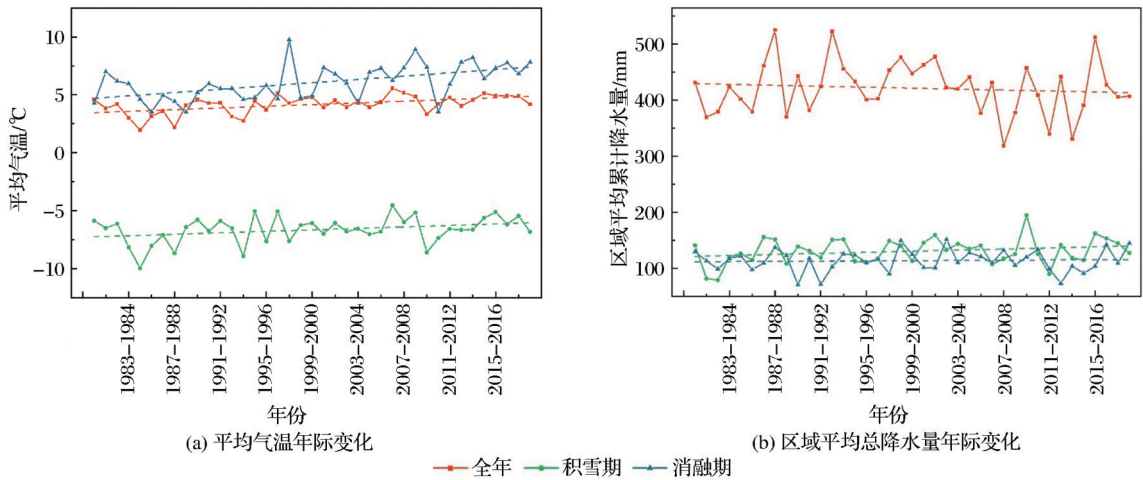


图7 气象因子的年际变化

Fig.7 Interannual variation of meteorological factors

表 1 积雪物候与气象因子在时间上的相关性

Table 1 Correlation analysis of snow phenology and meteorological factors in year

积雪参数	积雪期积雪 面积覆盖比例	积雪期 雪深	积雪 日数	积雪 初日	积雪 终日	积雪 期长度
全年平均气温	-0.48***	-0.27*	-0.52***	0.29*	-0.27*	-0.53***
积雪期平均气温	-0.42***	-0.43***	-0.43***	0.25	-0.21	-0.44***
消融期平均气温	-0.49***	0.18	-0.51***	-0.14	-0.44***	-0.48***
全年降水量	0.27	0.42***	0.31*	-0.09	0.19	0.31*
积雪期降水量	0.12	0.68***	0.12	0.04	0.09	0.10
消融期降水量	-0.02	0.16	-0.01	-0.16	-0.10	-0.03

注: *、**、***分别表示在0.1,0.05,0.01水平上显著相关

4.3 积雪与植被因子的相关性

北疆积雪面积覆盖比例逐年降低,积雪期缩短,积雪终日提前,这种积雪变化会导致相应的年平均气温升高,特别是融雪期的年平均气温升高,北疆地区降雪深度增加。在这种积雪变化趋势下,为了研究北疆植被变化特征,首先利用GIMMS

NDVI3g数据集提取了1982~2014年植被因子,包括植被返青期、枯黄期和生长期。通常来说,非自然植被(耕地)更多的受人工影响,利用MODIS土地覆盖分类数据统计结果表明北疆植被区耕地所占面积高达10.39%,由于化肥等的使用缩短农作物生长周期,非自然植被的种植呈现不确定状态。为

排除耕地的干扰,选择2000年MODIS土地覆盖分类数据,对自然植被区域进行相关统计。图8展示了北疆所有植被和自然植被物候参数返青期、枯黄期、生长期长度年际变化趋势,可以看到,自然植被返青期呈逐年提前的趋势,而包含耕地的植被返青期呈现推迟的趋势。实验主要考虑积雪物候变化对于自然植被的影响特征。结果表明,北疆自然植被1982~2014年返青期在4月16日,枯黄期为10月19

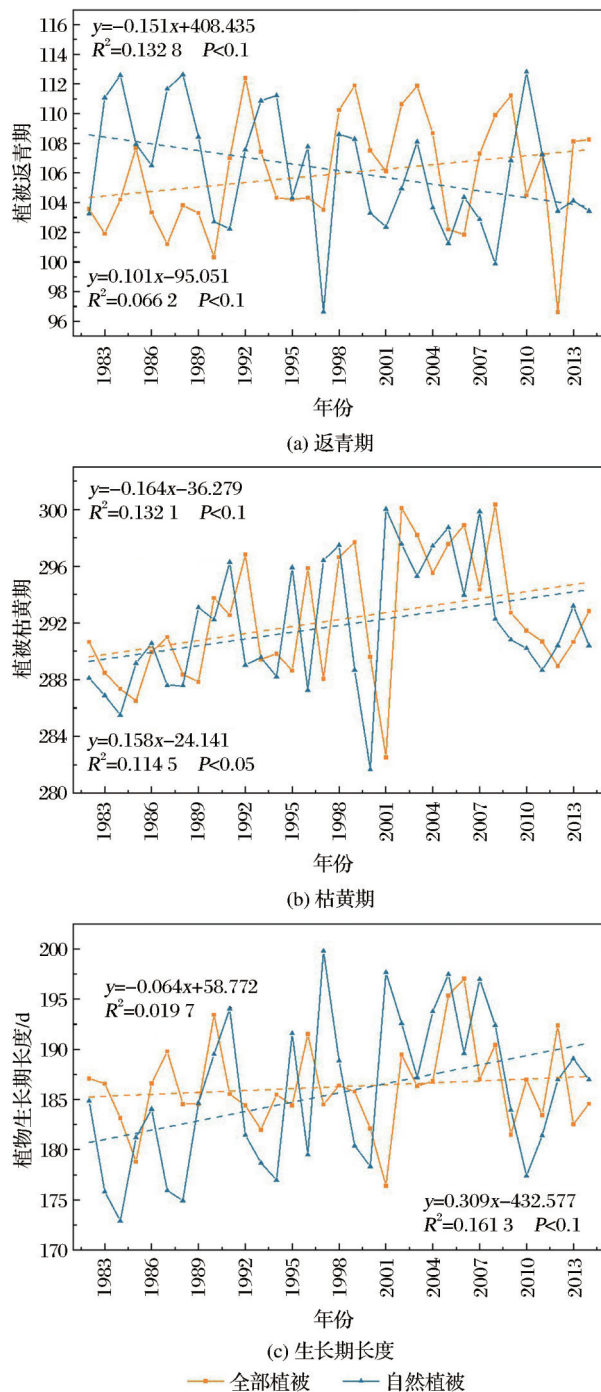


图8 植被因子年际变化

Fig.8 Interannual variation of vegetation factors

日,生长期长度为186 d·a⁻¹,自然植被返青期总体呈现提前的特征(Slope=-0.15 d·a⁻¹, R²=0.16, P<0.1),枯黄期总体呈现推迟的特征(Slope=0.16 d·a⁻¹, R²=0.11, P<0.05),推迟比较显著,由于返青期的提前和枯黄期的推后,整体自然植被生长期呈现增加的变化趋势(slope=0.31 d·a⁻¹, R²=0.16, P<0.1),年际波动明显。

影响植被生长特征的主要因素是气温和降水,由于北疆积雪物候特征及对气候因子的响应,实验对北疆自然植被物候参数与积雪期积雪面积覆盖比例、积雪期雪深、积雪日数、积雪初日、积雪终日、积雪期、年平均气温、融雪期平均气温、年平均降水量及积雪期平均降水量等指标进行相关性分析,结果如表2所示。北疆自然植被返青期与积雪期呈显著正相关,且通过了99%的显著性检验,全年平均气温、积雪期平均气温和返青期则呈现显著负相关,表明影响植被返青期变化的主要原因是气温,特别是年平均气温和积雪期平均气温,此外同一个地区积雪期越长,返青期呈现更早的趋势。相对返青期来说,影响植被枯黄期的因素更多,表2计算表明,相关参数中仅积雪终日、积雪期和全年平均气温与植被返青期在95%的水平上相关。生长期长度与积雪终日、积雪期、年平均气温和积雪期平均气温显著相关。结合积雪的变化特征及对气候因子的响应可知积雪物候,特别是积雪期和积雪终日以及由于积雪和气候反馈导致的年平均气温和积雪期平均气温会引起自然植被返青期提前、生长期延长。

表2 积雪、气象因子对植被因子的响应

Table 2 The correlation of snow phenology, meteorological factors and vegetation factors in time

	返青期	枯黄期	生长期
积雪期积雪面积覆盖比例	0.39**	-0.28	-0.38**
积雪期雪深	0.26	0.05	-0.11
积雪日数	0.43**	-0.29	-0.41**
积雪初日	-0.28	0.18	0.26
积雪终日	0.43**	-0.38**	-0.46***
积雪期	0.50***	-0.41**	-0.52***
全年平均气温	-0.66***	0.38**	0.59***
全年平均降水	0.42**	0.02	-0.22
积雪期平均气温	-0.56***	0.33*	0.51***
积雪期平均降水	0.32*	0.20	-0.05
融雪期平均气温	-0.14	0.28	0.25
融雪期平均降水	0.12	-0.10	-0.13

注:*, **, ***分别表示在0.1、0.05、0.01水平上显著相关

5 结 论

通过对北疆1980~2019年近40 a的积雪物候参数进行时空分析,并探究其与气象因子、植被因子在时间上的相关性,得出以下结论:

(1)北疆近40 a间平均积雪日数为81.62 d·a⁻¹,73%的区域为稳定积雪区,积雪初日在11月、终日在3月,积雪期为每年11月初至次年3月底4月初。

(2)北疆积雪在空间上呈现不均匀分布,其中阿勒泰山地区、天山地区、大部分塔城盆地和额尔齐斯谷地区为主要积雪区,1980~2019年间北疆积雪面积覆盖比例、积雪日数和积雪期逐年降低,积雪初日基本没变,但积雪终日显著提前,气象站观测数据表明,虽然北疆积雪面积覆盖比例逐年下降,但是气象站雪深逐年升高。

(3)ECMWF-ERA5再分析资料表明北疆1980~2019年平均气温为5.16℃,积雪期年平均降水量为130.82 mm,1980~2019年平均气温、积雪期和融雪期平均气温均呈现升高趋势,积雪期降水量无明显变化。气温与积雪期积雪面积覆盖比例、积雪日数、积雪期长度相关性较大,呈现显著负相关,积雪期降水量与积雪物候参数呈现正相关。

(4)北疆自然植被呈现返青期提前,枯黄期推迟,生长季延长的特征。北疆返青期与积雪面积覆盖比例、积雪日数、积雪终日、积雪期、降水呈现显著的正相关,全年平均气温和返青期则呈现负相关,枯黄期与生长期与积雪期积雪面积覆盖比例、积雪日数、积雪终日、积雪期呈现负相关,与平均气温呈现显著正相关。

参考文献(References):

- [1] Wu X, Naegeli K, Premier V, *et al.* Evaluation of snow extent time series derived from Advanced Very High Resolution Radiometer global area coverage data (1982–2018) in the Hindu Kush Himalayas[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(9):4261–4279.
- [2] Cao Meisheng, Jin Rui. Remote sensing technology to monitor sea ice concentration[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 20(3):259–264.[曹梅盛, 晋锐. 遥感技术监测海冰密集度[J]. *遥感技术与应用*, 2006, 20(3):259–264.]
- [3] Liu Jinping, Zhang Wanchang, Deng Cai, *et al.* Spatiotemporal variations of snow cover over Yarlung Zangbo River basin in Tibet from 2000 to 2014 and its response to key climate factors [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(4):643–654.[刘金平, 张万昌, 邓财, 等. 2000~2014年西藏雅鲁藏布江流域积雪时空变化分析及对气候的响应研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(4):643–654.]
- [4] Qin Dahe, Ding Yongjian. Research on cryospheric changes and their impacts: current status, trends and key issues [J]. *Climate Change Research Progress*, 2009(4):187–195.[秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题[J]. *气候变化研究进展*, 2009(4):187–195.]
- [5] Fyfe J C, Derksen C, Mudryk L, *et al.* Large near-term projected snowpack loss over the western United States [J]. *Nature Communications*. 2017, 8:14996.
- [6] Li W, Guo W, Qiu B, *et al.* Influence of Tibetan Plateau snow cover on East Asian atmospheric circulation at medium-range time scales[J]. *Nature communications*, 2018, 9(1):1–9.
- [7] McGowan H, Callow J N, Soderholm J, *et al.* Global warming in the context of 2000 years of Australian alpine temperature and snow cover[J]. *Scientific Reports*. 2018, 8(1):4394.
- [8] Batrak Y, Müller M. On the warm bias in atmospheric reanalyses induced by the missing snow over Arctic sea-ice[J]. *Nat Commun* 10.4170(2019).DOI:10.1038/s41467-019-11975-3
- [9] Fu Q, Hou R, Li T, *et al.* Effects of soil water and heat relationship under various snow cover during freezing-thawing periods in Songnen Plain, China[J]. *Scientific Reports*. 2018, 8(1):1325.
- [10] Hirofumi H, Yu N. Evidence for Ussurian tube-nosed bats (*Murina ussuriensis*) hibernating in snow [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):12047. DOI:10.1038/s41598-018-30357-1
- [11] Yue Shanna, Che Tao, Dai Liyun, *et al.* Temporal and spatial distribution and variation characteristics of snow depth in the Northern Hemisphere and typical areas [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(6):1263–1272.[岳珊珊, 车涛, 戴礼云, 等. 北半球及典型区雪深时空分布与变化特征[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(6):1263–1272.]
- [12] Lei Jun, Fang Zhifang. A comparison study on snow cover of the conventional meteorological observation and its variational tendency in Qinghai region [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(1):58–67.[雷俊, 方之芳. 青海地区常规观测积雪资料对比及积雪变化趋势研究[J]. *高原气象*, 2008, 27(1):58–67.]
- [13] Li Chenhao. Study on the variation of snow cover and its impact on grassland vegetation phenology in Mongolia Plateau [D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2019.[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]
- [14] Xia Jingwen, Liao Yuhua, Xu Yueting. Analysis of the characteristics and influencing factors of snow cover changes in Yinzhou district, Ningbo city from 1953 to 2016 [C]// The 34th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S8 Observations Promoting Urban Meteorological Development—The 6th Urban Meteorological Forum Proceedings. 2017.[夏静雯, 廖桦桦, 许岳庭. 1953~2016年宁波市鄞州区积雪变化特征及其影响因素分析[C]// 第34届中国气象学会年会 S8 观测推动城市气象发展——第六届城市气象论坛论文集. 2017.]

- [15] 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 Sensing of Environment*. 2017, 191: 402–418.
- [16] Peng S, Piao S, Ciais P, *et al.* Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades[J]. *Environmental Research Letters*. 2013, 8(1): 1880–1885. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014008
- [17] Wang Yunlong. Snow remote sensing monitoring and spatiotemporal variation characteristics in typical regions in China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. [王云龙. 中国典型区积雪遥感监测及其时空变化特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.]
- [18] Wang X, Wu C, Wang H, *et al.* No evidence of widespread decline of snow cover on the Tibetan Plateau over 2000–2015 [J]. *Scientific Reports*. 2017, 7(1): 1–10.
- [19] Luo Yinjian. Study on the change of vegetation and snow cover in Wenchuan County based on RS and GIS [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2017. [罗银建. 基于遥感和GIS的汶川县植被与积雪覆盖变化研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2017.]
- [20] Bi Zerui. Temporal and spatial changes of snow depth on the Mongolian Plateau and its response to climate change [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2020. [毕哲睿. 蒙古高原雪深时空变化及其对气候变化的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.]
- [21] Wang Hongwei, Huang Chunlin, Hao Xiaohua, *et al.* Analyses of the spatiotemporal variations of snow cover in North Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 508–516. [王宏伟, 黄春林, 郝晓华, 等. 北疆地区积雪时空变化的影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 508–516.]
- [22] Wang Xuan. Preparation and application of AVHRR snow cover products in China [D]. Lanzhou: Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, 2018. [王轩. 中国 AVHRR 长时间序列积雪范围产品的制备与应用[D]. 兰州: 西北生态环境资源研究院, 2018.]
- [23] Wang X, Xiao J, Li X, *et al.* No trends in spring and autumn phenology during the global warming hiatus [J]. *Nat Commun* 10. 2389 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-10235-8.
- [24] Wei Yarui, Hao Xiaohua, Wang Jian, *et al.* Analysis of inversion and temporal changes of snow black carbon and snow particle size in northern Xinjiang based on MODIS data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 184–196. [魏亚瑞, 郝晓华, 王建, 等. 基于 MODIS 数据的北疆积雪黑碳和雪粒径反演及时空变化分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 184–196.]
- [25] Qiao Haiwei, Zhang Yanli. FY-3C and FY-4A satellite data were combined to study the variation of snow cover area: a case study of Qilian Mountains [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(6): 1320–1328. [乔海伟, 张彦丽. 融合 FY-3C 号和 FY-4A 号卫星数据的积雪面积变化研究—以祁连山区为例[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1320–1328. [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1320.]
- [26] Wang Jiping, Guo Zhongjun, Cheng Fu, *et al.* Spatiotemporal variation of precipitation and temperature in the ecological function zone of northern Xinjiang and its correlation with NDVI [J]. *Forest Resources Management*, 2017(1): 110–117. [王计平, 郭仲军, 程复, 等. 北疆生态功能区降水气温时空变化及其与 NDVI 相关性分析[J]. 林业资源管理, 2017(1): 110–117.]
- [27] Senafi F A, Anis A, Menezes V. Surface heat fluxes over the Northern Arabian Gulf and the Northern Red Sea: evaluation of ECMWF-ERA5 and NASA-MERRA2 reanalyses [J]. *Atmosphere*. 2019, 10(9): 504.
- [28] Wang Xuan, Hao Xiaohua, Wang Jian, *et al.* Accuracy evaluation of long time series AVHRR snow cover area products in China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(6): 994–1003. [王轩, 郝晓华, 王建, 等. 中国地区 AVHRR 长时间序列积雪范围产品精度评估[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(6): 994–1003.]
- [29] Hao Xiaohua, Zhao Qin, Zhao Hongyu, *et al.* China's snow cover area of 5 kilometers from 1980 to 2019 is a daily cloud-free product [DB]. National Glacier and Permafrost Desert Science Data Center (www.ncdc.ac.cn). 2020. DOI: 10.12072/ncdc.I-SNOW.db0005.2020. [郝晓华, 赵琴, 赵宏宇, 等. 中国 1980~2019 年积雪面积 5 公里逐日无云产品 [DB]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (www.ncdc.ac.cn), 2020. DOI: 10.12072/ncdc.I-SNOW.db0005.2020.]
- [30] Wang Y, Zheng Z. Spatial representativeness analysis for snow depth measurements of meteorological stations in Northeast China [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21(4): 791–805.
- [31] Napoli C D, Barnard C, Prudhomme C, *et al.* ERA5-HEAT: a global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis [J]. *Geoscientific Data Journal*, 2021, 8(1): 2–10.
- [32] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. *Journal of Hydrology Amsterdam*. 1998, 204(1). DOI: 10.1038/s41467-019-10235-8.
- [33] Hotelling H. New light on the correlation coefficient and its Transforms [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1953, 15(2): 193–232.
- [34] Kenney J F, Keeping E S. (1951). *Mathematics of Statistics* [M]. Princeton, NJ: Van Nostrand, 1939.
- [35] Li Peiji, Mi Desheng. Distribution of snow cover in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(4): 9–18. [李培基, 米德生. 中国积雪的分布[J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 9–18.]

The Relationship between the Temporal and Spatial Changes of Snow Cover and Climate and Vegetation in Northern Xinjiang from 1980 to 2019

Zhao Qin^{1,2}, Hao Xiaohua², He Dongcai¹, Wang Jian^{2,3}, Li Hongyi², Wang Xufeng²

(1.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences,
Lanzhou 730000, China;

3.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and
Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: Using the AVHRR daily cloud-free snow cover products of China's long-term series from 1980 to 2019 and the measured snow depth data from weather stations to calculate snow phenology parameter such as snow cover days, snow start days, melt out of snow cover days, length of Snow Period, snow depth, etc. to study the temporal and spatial distribution of snow phenology. At the same time, combined with ECMWF-ERA5 reanalysis data and GIMMS NDVI3g data set to extract meteorological factors (temperature, precipitation) and vegetation factors (The start of growing season, the end of growing season, and the length of growing season), and explore the response of snow phenology changes in northern Xinjiang to meteorological factors and vegetation factors. The results show that the average snow cover days in northern Xinjiang in the past 40 years is 81.62 days/year, 73% of the area is stable snow cover, the snow start days is in November, the melt out of snow cover days is in March, and the length of Snow Period is early November every year to the end of March and early April of the following year; the spatial distribution is uneven, of which the Altay Mountains, the Tianshan Mountains, most of the Tacheng Basin and the Irtys Valley are the main snow-covered areas. From 1980 to 2019, the proportion of snow cover, snow cover days and the length of Snow Period in northern Xinjiang decreased year by year, the snow start days remained basically unchanged, but the snow start days was significantly advanced. ECMWF-ERA5 reanalysis data showed that there was no significant change in precipitation during the snow cover period in northern Xinjiang from 1980 to 2019, but the significant decrease in the proportion of snow cover indicates that the snow depth in the snowfall area may increase, which is consistent with the gradual increase in snow depth measured by the Northern Xinjiang Meteorological Station. The average temperature is highly correlated with the proportion of snow cover during the snow cover period, the snow cover days, and the length of the snow period, showing a significant negative correlation. The precipitation during the snow cover period is positively correlated with snow cover phenology parameters; snow phenology and its climatic effects have caused the start of growing season to be significantly earlier, and the length of growing season is extended in Northern Xinjiang.

Key words: AVHRR; Snow cover area; Snow phenology; Meteorological factors; Vegetation factors