

2000—2020年北疆地区积雪时空变化趋势及影响要素

张永宏¹, 宋凯达¹, 王剑庚², 朱灵龙³, 田丰¹

1. 南京信息工程大学自动化学院, 南京 210044
2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044
3. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044

摘要 基于北疆地区29个气象站点2000—2020年积雪数据集, 分析了北疆地区20个水文年的积雪天数、年最大雪深、年均雪深、降雪次数、雪物候和气象要素变化, 并对其影响要素进行了分析。结果表明, 北疆地区近20年来冬季的积雪天数呈显著上升趋势, 超过58%的气象站点降雪次数下降趋势显著, 这与最低气温和降水量的显著增加密切相关。有72%的站点表现出了温度升高的趋势, 近20年北疆地区降水量出现显著增加。雪物候方面, 积雪持续天数呈现弱下降趋势, 初雪日的出现时间明显推迟, 增幅为0.17 d/a。终雪日的推迟并不显著。地理和气象因素与积雪密切相关, 尤其是气温和降水量的变化会导致积雪深度发生显著变化, 海拔对雪物候的影响程度比气象因素更加明显。

关键词 新疆北部; 积雪; 地面观测; 时空变化; 结构方程模型

积雪具有高反照率, 低导热性和融雪的水文作用^[1], 积雪对地表和大气热状况会产生显著影响, 并且对气候和环境变化非常敏感。积雪和当地气候系统之间的关系和反馈可用于预测全球和区域气候变化^[2]。积雪的变化也与当地水资源密切相关, 检测和评估当地积雪的时空变化可以为农业、生

态、防灾和其他相关研究领域提供信息^[3]。雪是一种重要的淡水资源, 降雪是冬季降水的主要形式^[4], 降雪的变化对供水和经济发展有重要影响^[5]。然而, 过多或过早的降雪也会造成雪灾, 给生命财产造成重大损失。因此, 监测和识别积雪变化对全球气候变化研究具有重要意义^[6]。

收稿日期: 2021-12-18; 修回日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41875027); 国家自然科学基金项目(41871238); 科技部重点研发计划项目(2018YFC1506502)

作者简介: 张永宏, 教授, 研究方向为大气遥感检测, 遥感图像处理, 电子信箱: zyh@nuist.edu.cn; 宋凯达(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为遥感图像处理, 大数据分析, 电子信箱: 751842279@qq.com

引用格式: 张永宏, 宋凯达, 王剑庚, 等. 2000—2020年北疆地区积雪时空变化趋势及影响要素[J]. 科技导报, 2023, 41(3): 72-80; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.03.008

新疆维吾尔自治区是典型的干旱半干旱地区,水资源匮乏,积雪是该地区的主要淡水资源。同时,降雪的变化对当地的供水和经济发展有重要影响^[7]。北疆地区是我国少数的几个具有稳定积雪过程和消融过程的区域。目前随着全球气候的变暖,北疆地区在西北地区升温相对较快,积雪储量减少也最显著。对北疆地区积雪的研究有助于了解该地区的水资源状况,对该地区农牧业和社会经济发展以及人们生命财产安全都具有十分重要的意义。

目前,关于北疆地区积雪的时空变化问题已有不少研究。过去几十年里积雪物候经历了显著变化,例如年积雪覆盖面积呈缓慢减少趋势,积雪覆盖周期变短及积雪开始日期推迟,积雪结束日期提前等。这些现象在文献中有详细记载,并通过卫星数据和地面观测进行了评估^[8-9]。关于北疆气候变化的影响也有学者进行了大量研究。李奇虎等^[10]表明,1956—2005年间,新疆气温以 $0.28^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速度上升。张强等^[11]研究表明,1960—2005年期间,新疆年降水量呈增加趋势为 $9.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 。目前国内外的研究大多利用遥感数据对积雪覆盖面积,积雪天数等展开研究,而关于降雪次数,积雪持续时间等重要积雪参数缺乏进一步探讨,基于气象站点区域性的积雪期时空特征变化规律及其与气象因子的相关性需要进一步分析,以更好地确定影

响积雪参数变化的因素。本研究利用北疆地区地面站观测点20年来的站点气象资料,采用线性回归, MK趋势分析方法并构建SEM结构方程模型,分析了温度、降水、湿度、风速等气象要素以及海拔高度、经纬度等地理要素对初雪日、终雪日、积雪总天数、降雪次数、最大雪深、年均降雪量等积雪参量的影响。

1 研究区概况

由天山山脉将新疆地区分为南北两大部分,新疆南北地区有较大的气候差异性。北疆是本文主要的研究区域(图1),位于纬度 $42^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$,经度 $79^{\circ}\text{E}\sim 92^{\circ}\text{E}$ 之间。北疆是中国西北典型的干旱半干旱地区,也是一个水资源短缺地区。约20%~70%的地表水来自融雪和冰川融化^[12]。研究区位于温带大陆性气候的欧亚腹地中纬度深处,气候干燥,降水稀少,生态环境脆弱,沙漠广阔。冬天很冷,而夏天又短又热,春天和秋天不易辨别^[13]。该地区的地貌多种多样,从平坦的盆地到起伏很大的山脉,海拔从191 m到6067 m不等。由于该地区特殊的地理特征、有限的气象信息以及降雪的时空变化较大,冬春季节大规模雪灾频繁发生^[14]。北疆地区的雪灾通常发生在冬季和春季,原因是来自北

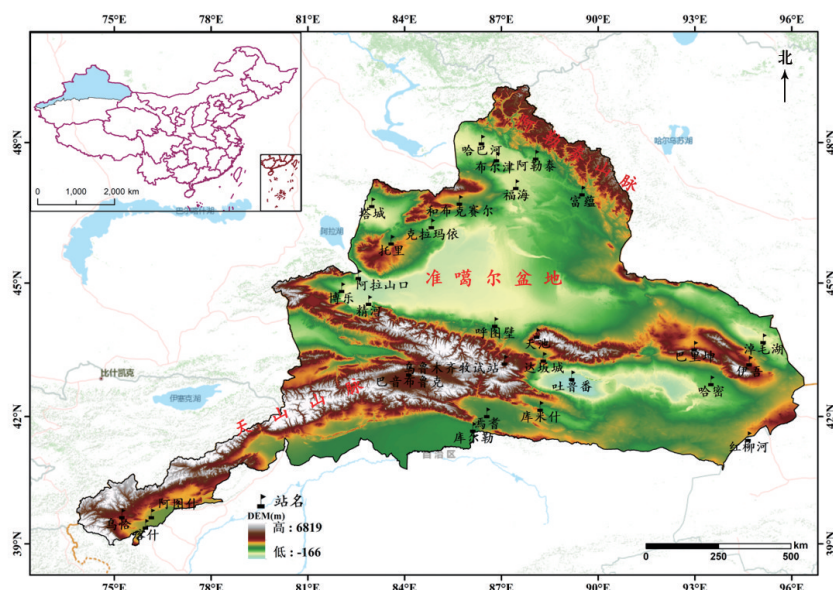


图1 研究区站点分布

冰洋的寒冷潮湿气流^[15]。北疆地区的径流来自高山,主要由冰川融化、融雪和降雨组成。北疆的降雪在供水和生态系统中起着重要的作用。北疆在经济和文化方面更为发达,在研究全球气候变化的区域过程时,分别研究北疆的变化是切实可行的,以便更好地应对未来气候灾害的风险和影响^[16]。

2 数据与方法

2.1 气象数据

本文数据是由国家气象信息中心提供的2000年1月1日至2020年12月31日中国地面气候包括降水(PRE),气温(TEM),湿度(RH),风速(WS)和积雪深度(SD)的日值数据集。本次研究将水文年定义为从当年的6月1日到次年的5月31日,用以观测整个季节性的降雪周期。选取了自2000年6月1日至2020年5月31日北疆地区29个基准站气象数据,总共包括20个季节性降雪周期。积雪参数计算了包括年平均积雪深度(annual mean snow depth, SDOverall),最大积雪深度(maximum snow depth, SDmax),积雪天数(snow cover days, SCDs),初雪时间(snow onset date, SOD),终雪时间(snow end date, SED),积雪持续时间(snow duration days, SDDs)和降雪次数(snow frequency, SF)。降雪次数(SF)的定义如下:地面站雪深记录比前一天增加;在当天有降水记录且当日气温低于零度;若连续降雪天数大于等于3 d则算为2次降雪事件,否则算为1次降雪事件。关于积雪参数的定义见表1。

2.2 研究方法

2.2.1 气候倾向率

采用一元线性回归^[17]描述气候要素的变化趋势: $y=kt+b$,式中 y 为气象要素数据, t 为时间序列, k 为趋势变化率,当 k 为正表示气象要素有增加的趋势,当 k 为负表示气象要素有减小的趋势。 k 为气候倾向率。

2.2.2 Mann-Kendall突变检验

国际气象组织建议的曼-肯德尔检验用于检测元素序列中的任何气候突变,并确定突变年份和

表1 积雪参数

名称(简写)	定义
积雪天数(SCDs)	每个水文年地面有雪深记录的总天数
初雪时间(SOD)	水文年中前3天有连续降雪记录的第一天
终雪时间(SED)	水文年中后3天有连续降雪记录的最后一天
积雪持续时间(SDDs)	SED与SOD的差值
年平均积雪深度(SDOverall)	年总降雪量与当年水文年天数的比值
最大积雪深度(SDmax)	一个水文年当中出现的最大雪深记录
降雪次数(SF)	降雪次数

气候变化趋势。MK的优点是数据序列不需要遵从一定的分布,也不受少数异常测定值的干扰。统计量 S :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(X_j - X_k) \quad (1)$$

式中, $\text{sign}(X_j - X_k)$ 为符号函数,取值为

$$\text{sign}(X_j - X_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0 \\ 0, & x_j - x_k = 0 \\ -1, & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_1, x_2, \dots, x_n 代表 n 个数据点, x_j 代表时间 j 的数据点。当在单个时间段内存在多个数据点时,将使用中间值。当统计变量 Z 值大于0时,表示时间序列的气象要素数据在随着时间的推移呈增加趋势, Z 值小于0时,呈减少趋势。 Z 值的表达式见式3。

$$\begin{cases} Z = \frac{(S-1)}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & S > 0 \\ Z = 0 & S = 0 \\ Z = \frac{(S+1)}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

对时间序列进行MK突变检验时,构造秩序列 r_i 表示 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的样本累计数,定义 s_k 为

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j (j = 1, 2, \dots, i) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

假定时间序列随机独立,定义统计变量为:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{Var(s_k)}} (k = 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中, UF_k 为标准正态分布统计量, $\sqrt{Var(s_k)}$ 为 s_k 的方差, $E s_k$ 为 s_k 的方差。

将时间序列 x 按逆序排列,再重复(4)和(5),同时使:

$$UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1) \quad (6)$$

式中, $UB_1=0$,取一般性的显著性水平为0.05,对应 Z 的绝对值为1.96,当 Z 的绝对值大于1.96时在统计学中称为显著。

通过分析统计序列 UF_k 和 UB_k ,可进一步分析序列 X 的趋势变化,而且可明确突变的时间,指出突变的区域。若 UF_k 值大于0,则表明序列呈上升趋势;小于0则表明呈下降趋势;当它们超过临界直线时,即 UF_k 的值超出 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 的区间时表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k 和 UB_k 这两条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻^[18]。

2.2.3 结构方程模型

结构方程模型(SEM)是一种基于变量协方差矩阵的统计方法,用于分析变量之间的关系^[19]。SEM区别于当前大多数其他数据建模方法的一点是,它强调通过研究路径关系来估计因果效应^[20]。本文中主要使用IBM SPSS Amos 26工具对变量进行路径分析,使用的分析方法是最大似然法,路径系数的模型输出是标准化回归系数。

3 结果与分析

3.1 积雪参数变化

积雪受地形和气温影响很大,阿勒泰在2010年1月18日观测到94 cm雪深为近年来地面站观测到的最大雪深,北疆地区20年来平均最大雪深为16 cm。图2展示了阿勒泰地区20年来积雪深度的变化分布图。

通过对北疆地区20年积雪数据分析,结合线

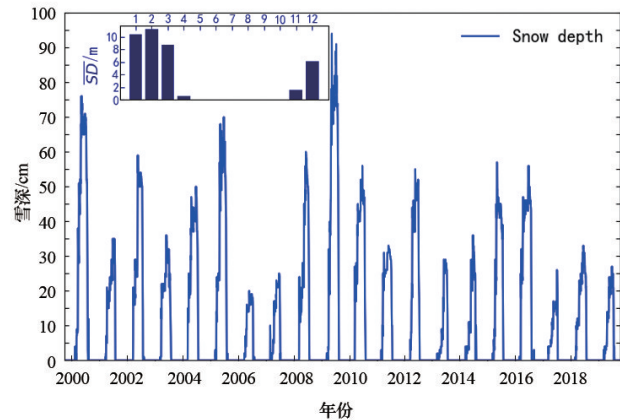


图2 阿勒泰地区20年积雪深度变化分布

性回归和MK趋势检验可以看出积雪天数整体呈减小趋势(图3(a)),但并不显著(图3(b))。北疆地区的年均积雪天数为77 d,最大的积雪天数出现在天池,平均每年为149 d。积雪天数呈下降趋势的气象站点比例为58%,显著下降的气象站点比例为10%。就季节差异性而言,冬季积雪天数呈显著上升趋势,春季和秋季均呈不显著下降趋势。最大雪深和年均雪深自2000年之后开始减少(图3(d),(f)),到2004年和2005年经历短暂增加之后继续减少,2008年为两者下降突变点,自此之后开始出现缓慢上升趋势,呈减少趋势的气象站点比例分别为72%和58%(图3(c),(e)),呈显著减少趋势的站点比例为24%。其中年均雪深呈显著增加的站点比例为17%,在阿勒泰地区出现的最大年平均雪深为7.6 cm。北疆地区近20年降雪次数整体呈减少趋势(图3(g),(h)),其中降雪次数减少的气象站点比例为62%,呈显著减少的气象站点所占比例为58%。北疆地区年均降雪次数为8.5次/a,最大降雪次数发生在乌鲁木齐平均每年为16次。

雪物候方面,通过分析发现(图4),北疆地区近20年来积雪持续天数呈现不显著减少趋势,其中呈减少趋势的站点比例为58%,显著减少的站点比例为13%。积雪持续天数的减少主要表现为初雪日的显著延迟(图4(d)),且初雪日相对终雪日的趋势变化更为显著。这与目前很多研究结果相一致^[21-22]。

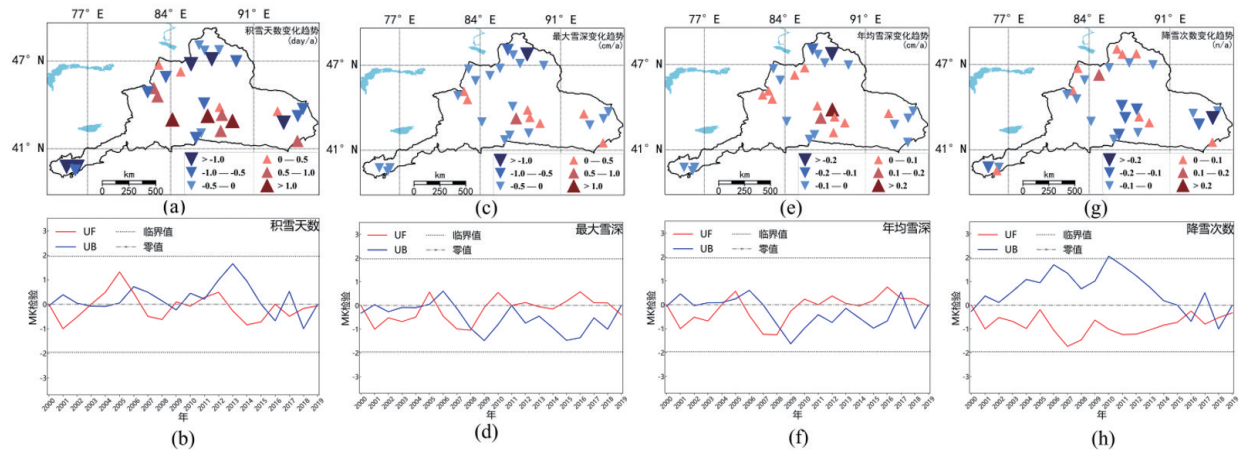


图3 积雪天数、最大雪深、年均雪深、降雪次数线性变化趋势和MK检验特征分布

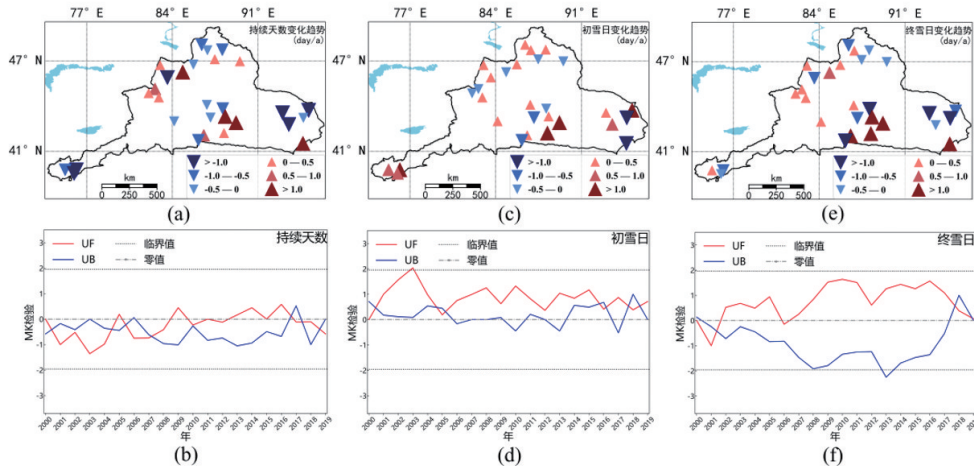


图4 积雪持续天数、初雪日、终雪日线性变化趋势和MK检验特征分布

3.2 气象要素变化

2000—2020年间北疆地区的气象要素变化主要表现为最低气温的显著升高(图5(b)),约有72%的站点表现出了温度升高的趋势(图5(a)),最高气温和平均气温也展现了不同程度的升高,但并不显著。春夏两季的气温显著性升高或许是全年气温升高的主要原因,在冬季,气温出现显著性降低。此外北疆地区20年来降水量也呈现显著性增加(图5(d)),55%的气象站点显示出降水量增加趋势(图5(c))。北疆地区气温和降水量显著增加,在之前的研究中也说明了这一点^[23]。随着气温

的升高,新疆北部的降水量也在显著增加。以巴音布鲁克站点为例,图6反映了该站点20年来月平均降水量和气温的变化。平均风速出现了显著性减小(图5(f)),这与我国大部分地区一致^[24]。就季节性而言平均风速的显著减小主要是由于春季和夏季平均风速的显著减小,而秋季和冬季平均风速的减小对此贡献不大。北疆地区的相对湿度呈明显下降趋势(图5(h))。相对湿度是表示空气中水分含量的物理参数。相对湿度下降意味着空气中含水量变化。研究表明在过去20年里,空气变得越来越干燥^[25]。

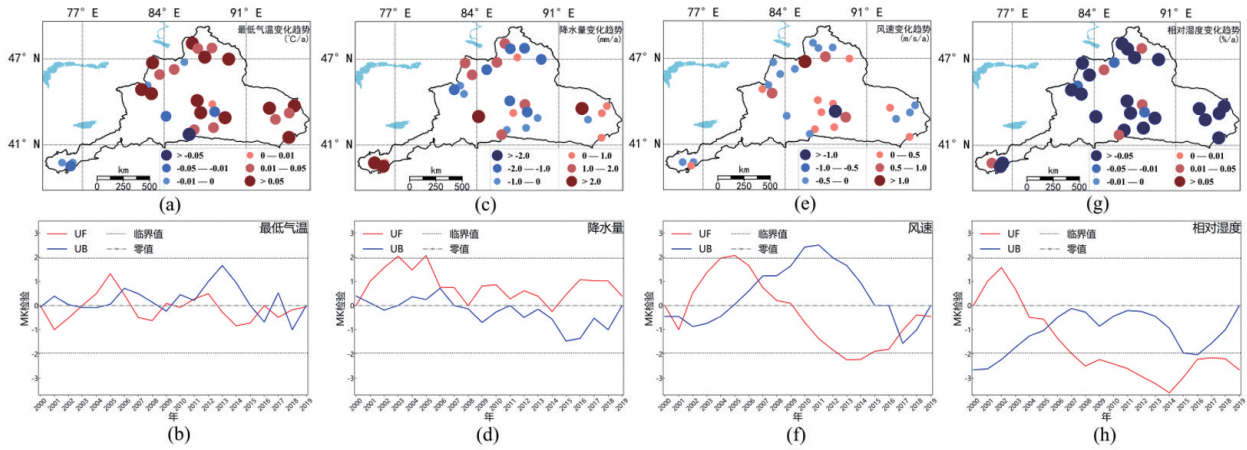


图5 最低气温、降水量、风速和相对湿度变化分布

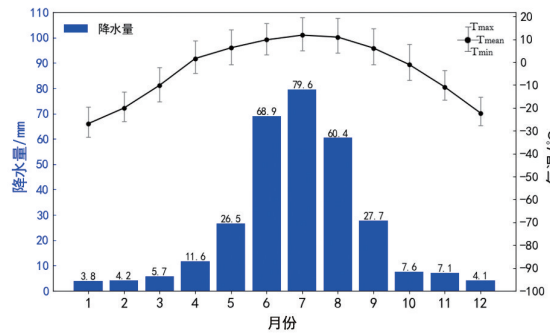


图6 巴音布鲁克月平均降水量和气温变化分布
(注:误差棒上限两条线分别代表气温最大值和最小值)

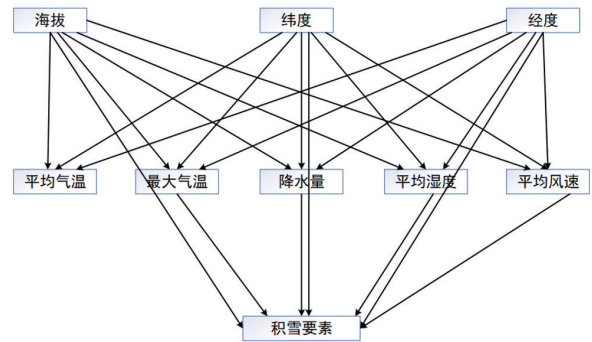


图7 地理和气象变量对积雪直接和间接影响的模型

3.3 影响因子分析

影响积雪要素变化的因子有很多,本文从地理要素和气象要素2个方面考虑。地理要素主要有海拔,经纬度。气象要素包括气温、降水量、风速和湿度。利用IBM SPSS Amos 26构建结构方程模型,为了避免变量之间出现共线性,对变量的选择进行因子重要性筛选,最终筛选出海拔、纬度、经度、平均气温、最高气温、降水量、平均湿度和平均风速8个影响因子。得出最终的关系模型(图7)。

图8表明积雪参量的变化受多种因素影响。气温和降水对积雪天数的影响是主要的,其中温度的路径系数为-0.58,温度的升高使得积雪天数开始缩短。研究发现积雪天数的变化受空气温度的影响更大,这可能是由于寒冷季节的空气温度使短时积雪容易融化^[26]。地理因素和气象要素都在影响最大雪深的时空分布,主要影响因素为降水量,

路径系数为-0.684。对于降雪次数来说,对其最关键的影响因子是气温和降水,地理因素对此的影响可以忽略。年均雪深的下降主要受气温和降水量影响。本文研究发现过去20年,北疆地区气温和降水量都出现了显著性增加。随着气温的升高,更多的雪以降水的形式落下来,融雪性变得更强。研究表明随着全球变暖,中、高纬度地区的降水量增加,北半球的平均雪深和最大雪深都出现了广泛的下降^[27]。大气环流异常通常被认为是导致温度异常的直接原因。西风环流指数的变化揭示了自1980年以来,中纬度500 hPa以上地区的经向环流减弱,带状环流加强,这减少了冷空气的南下,导致中国大部分地区的温度上升^[28]。新疆北部位于西风的上游,对西风的变化非常敏感,与其他地区相比,造成了更严重的气候变化。研究表明^[29]中国西北地区的降水主要由西风环流和南亚季风提供。

前者从西部地带进入,后者则来自印度洋。有学者认为,加强的西风和南风从海洋携带了更多的水汽,增加了中国西北地区的降水^[30]。此外,近20年北疆地区平均风速和相对湿度都出现了显著性下降趋势,风速减小的可能原因通常归因于亚洲纬向环流的加强,以及经向环流、亚洲冬季风和夏季风的减弱^[31]。这与中国大部分地区^[32]和世界同纬度其他地区^[33]的风速一致。新疆北部的相对湿度在统计学上呈现出显著的下降趋势。温度升高提高了饱和蒸气压。在相对湿度变小的情况下,空气中

蒸气压增加,这与中国大部分地区变化一致^[34]。本研究表明,积雪天数整体呈现弱下降趋势,在冬季出现显著增加趋势,积雪持续天数缩短,这可能跟初雪日的显著缩短有关,终雪日并无明显提前趋势。以前的研究表明欧亚大陆的雪深在冬季显著增加。冬天,欧亚大陆的雪深显著增加,但雪盖期却显著缩短^[35]。地理因素和气象因素都对初雪日有影响,但初雪日对海拔最敏感。海拔越高,积雪开始时间越早。温度和海拔高度是影响终雪日变化的2个主要因素。

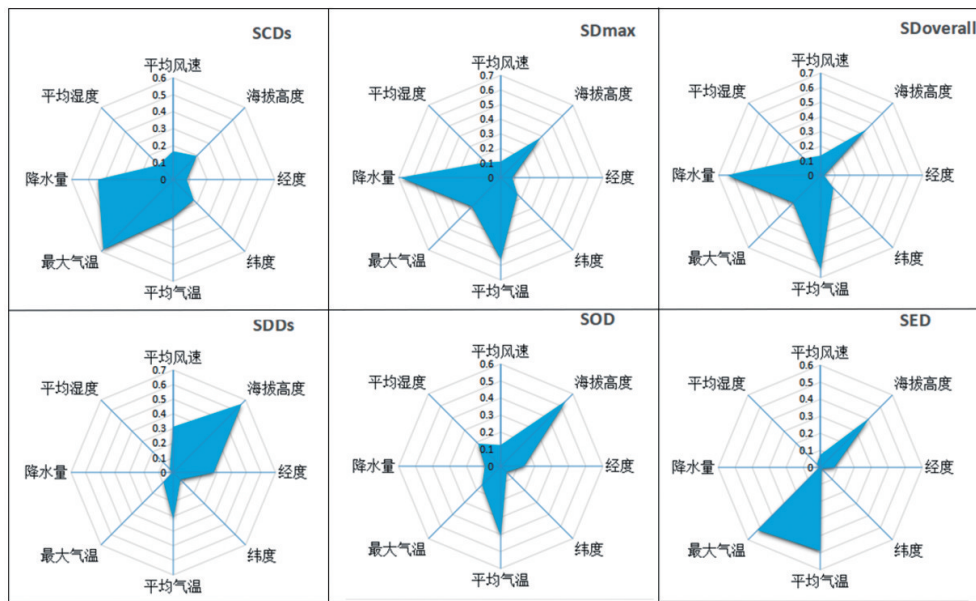


图8 地理和气象因素对积雪参量的标准化总体影响分布

4 结论

以北疆地区2000—2020年的29个站点为基础,考察了积雪要素和气象要素的变化,并分析了其影响因素。

1) 北疆地区积雪天数总体变化呈微弱下降趋势,主要下降的站点出现在阿尔泰山脉附近。从季节的差异性而言,冬季积雪天数呈显著上升趋势,积雪天数的季节变化主要受温度和降水的控制,一个主要原因是空气温度的抬升使短时积雪容易融化。最大雪深和年平均雪深的下降趋势自2008年之后有缓慢增加的趋势,但并不显著。近62%的气象站点降雪次数出现下降趋势,其中显著下降的

站点超过58%。北疆地区近20年降雪次数变得越来越少。降雪次数下降主要归因于气温和降水的增加,更多的雪以降水的形式降下来,气温的升高使融雪性变得更强。

2) 约有72%的站点表现出了温度升高的趋势,最低平均气温出现了显著性的升高,同时降水量也呈现显著性增加趋势。春夏两季的气温出现显著性升高,气温升高推迟了秋季积雪的开始日期,导致春季融雪事件提前。由于大气环流的异常,南下的冷空气减少,导致北疆地区温度升高。此外平均风速和相对湿度都呈现显著性增加。这与我国大部分地区变化一致。

3) 雪物候表明,北疆地区积雪持续时间有轻

微的缩短趋势,初雪日出现显著延迟,终雪日也有所推迟。初雪日的延迟可能是积雪持续时间缩短的主要原因。海拔是积雪开始和结束日的主要影响因素。海拔越高,积雪开始时间越早。

4) 气温和降水对积雪天数、年均雪深、降雪次数和最大雪深的变化影响是主要的。海拔等地理因素则是影响初雪日、终雪日和积雪持续时间变化的主要因素。多项研究证明气温与积雪密切相关。然而,很少有研究为积雪正反馈效应提供数据支持。本文采用了结构方程模型,提供了更科学合理的证据,验证了积雪覆盖的正反馈效应和地理因素对积雪覆盖时间维度的间接影响。

参考文献(References)

- [1] Barnett T P, Dümenil L, Schlese U, et al. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1989, 46(5): 661–686.
- [2] Kim Y, Kimball J S, Robinson D A, et al. New satellite climate data records indicate strong coupling between recent frozen season changes and snow cover over high northern latitudes[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(8): 084004.
- [3] Seidel F C, Rittger K, Skiles S M K, et al. Case study of spatial and temporal variability of snow cover, grain size, albedo and radiative forcing in the Sierra Nevada and Rocky Mountain snowpack derived from imaging spectroscopy[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(3): 1229–1244.
- [4] Fang S, Qi Y, Han G, et al. Meteorological drought trend in winter and spring from 1961 to 2010 and its possible impacts on wheat in wheat planting area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(9): 1754–1763.
- [5] Chen Y, Li Z, Fang G, et al. Large hydrological processes changes in the transboundary rivers of Central Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(10): 5059–5069.
- [6] Ge Y, Gong G. North American snow depth and climate teleconnection patterns[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(2): 217–233.
- [7] Zhang Y, Liu S, Ding Y. Glacier meltwater and runoff modelling, Keqıcar Baqi glacier, southwestern Tien Shan, China[J]. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(180): 91–98.
- [8] Choi G, Robinson D A, Kang S. Changing northern hemisphere snow seasons[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(19): 5305–5310.
- [9] 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): 014008.
- [10] Li Q, Chen Y, Shen Y, et al. Spatial and temporal trends of climate change in Xinjiang, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(6): 1007–1018.
- [11] Zhang Q, Li J, Singh V P, et al. Changing structure of the precipitation process during 1960–2005 in Xinjiang, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 110(1): 229–244.
- [12] Kong Y, Pang Z. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 434: 121–129.
- [13] Liang S, Yi Q, Liu J. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 64–76.
- [14] Liu X, Liang T, Guo Z. Assessment and monitoring of snow disaster effect on grassland livestock industry in the Aletai region using remote sensing technology[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(6): 115–120.
- [15] Wang S P, Jiang F Q, Hu R J, et al. Temporal and spatial variability of extreme snowfall indices over northern Xinjiang from 1959/1960 to 2008/2009[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2013, 1(6): 7059–7092.
- [16] He B, Sheng Y, Cao W, et al. Characteristics of climate change in Northern Xinjiang in 1961–2017, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2020: 1–17.
- [17] Xu W, Ma L, Ma M, et al. Spatial-temporal variability of snow cover and depth in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(4): 1521–1533.
- [18] Gavrillov M B, Markovi S B, Janc N, et al. Assessing average annual air temperature trends using the Mann-Kendall test in Kosovo[J]. *Acta geographica Slovenica*, 2018, 58(1): 7–25.
- [19] Bagozzi R P, Yi Y. Specification, evaluation, and interpretation of structural equation models[J]. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 2012, 40(1): 8–34.
- [20] Grace J B, Anderson T M, Ollif H, et al. On the specification of structural equation models for ecological systems[J]. *Ecological Monographs*, 2010, 80(1): 67–87.
- [21] Huang X, Liu C, Wang Y, et al. Snow cover variations across China from 1952–2012[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2019: 1–21.
- [22] 王慧, 王梅霞, 王胜利, 等. 1961—2017 年新疆积雪期时空变化特征及其与气象因子的关系[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 61–69.
- [23] He B, Sheng Y, Cao W, et al. Characteristics of climate

- change in Northern Xinjiang in 1961–2017, China[J]. Chinese Geographical Science, 2020: 1–17.
- [24] Zheng C W, Li S X, Wang G, et al. Chang trend study on surface wind speed in global from 1988 to 2009[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2012, 35: 7–9.
- [25] Yao J, Zhao Y, Yu X. Spatial–temporal variation and impacts of drought in Xinjiang (Northwest China) during 1961–2015[J]. Peer J, 2018, 6: e4926.
- [26] Zhong X, Zhang T, Kang S, et al. Spatiotemporal variability of snow cover timing and duration over the Eurasian continent during 1966–2012[J]. Science of the Total Environment, 2021, 750: 141670.
- [27] Collins M, Knutti R, Arblaster J, et al. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility[M]//Climate Change 2013–The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2013: 1029–1136.
- [28] Chen S Y, Guo J Y, Guo Z X, et al. Discipline of temporal and spatial variation of annual mean air temperature in arid and semiarid region in northwest China in the recent 46 years[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 364–372.
- [29] Zhenyao L, Du Z. The tracks of moisture transportation and its vapour geocological characteristics on the Qinghai–Xizang Plateau[J]. Arid Zone Research, 1992, 9(2): 1–7.
- [30] Wu W, Wang S. Tendency change of cloud cover over Northern China and its relation with regional climate[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(3): 651–658.
- [31] Guoyu R, Jun G, Mingzhi X, et al. Climate changes of China’s mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942–956.
- [32] Ren G Y. Climate changes of China’s mainland over the past half century[J]. Acta Meteor Sinica, 2005, 63: 942–955.
- [33] Zheng C W, Li S X, Wang G, et al. Chang trend study on surface wind speed in global from 1988 to 2009[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2012, 35: 7–9.
- [34] Ren G Y, Guo J. Change in pan evaporation and the influential factors over China: 1956–2000[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 31–44.
- [35] Bulygina O N, Razuvaev V N, Korshunova N N. Changes in snow cover over Northern Eurasia in the last few decades[J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(4): 045026.

The temporal and spatial variation trends and influencing factors of snow cover in northern Xinjiang from 2000 to 2020

ZHANG Yonghong¹, SONG Kaida¹, WANG Jiangeng², ZHU Linglong³, TIAN Feng¹

1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

3. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract To better study the inter-annual change characteristics of snow cover in northern Xinjiang, snow cover days, annual maximum snow depth, annual snow depth, snow frequency, snow weather and meteorological elements of 20 hydrological years in northern Xinjiang were analyzed based on the snow cover data set from 2000 to 2020, and the influencing factors were also investigated. The results showed that both numbers of snow day in northern Xinjiang in recent 20 years and numbers of snowfall at more than 58% of meteorological stations decreased significantly, which was closely related to the significant increase of minimum temperature and precipitation. 72% of the sites showed a trend of increasing temperature and the precipitation in northern Xinjiang increased significantly in the past 20 years. In terms of snow phenology, continuous days of snow showed a weak downward trend and the appearance time of the first snow day was significantly delayed, with an increase of 0.17 days annually, and the delay of the last snow day was not significant. Geographic and meteorological factors were closely related to snow cover, especially changes of temperature and precipitation would lead to significant change in snow depth, and influence of altitude on snow phenology was more obvious than those of the meteorological factors.

Keywords northern Xinjiang; snow cover; ground observation; temporal and spatial changes; structural equation model ●



(责任编辑 祝叶华)