

1961~2021年北疆冬季积雪日数时空变化特征分析

祝小梅, 乔丽盼·别肯, 美丽侃·克尔买买提

新疆伊犁州气象局, 新疆 伊宁

收稿日期: 2022年12月20日; 录用日期: 2023年1月22日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

利用北疆38个气象台站1961~2021年冬季积雪日数观测资料, 较系统地分析了近61a北疆冬季积雪日数的时空变化特征。主要结论如下: 1) 近61年内北疆冬季年平均积雪日数为82.89 d, 主要为积雪深度<20 cm的积雪, 积雪日数占到了70.33%; 2) 在空间上, 位于阿勒泰东部、昌吉中部及东部、塔城东部出现了不显著的减少趋势之外, 北疆78.95%的气象站点观测的年积雪日数呈增加趋势; 3) 在全球气候变暖的背景下, 北疆气候也在经历着显著变暖, 但极端天气过程频发, 表现在近61a, 北疆冬季积雪日数出现了非常显著的增加趋势, 增幅达 $0.95 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 其中20~30 cm积雪日数增加幅度最为明显, 为 $1.37 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 其次是 $\geq 30 \text{ cm}$ ($1.13 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$); 4) 61年间, 北疆冬季积雪日数较少的年份多数出现在20世纪60年代至80年代初, 且1967年、1969年、1973年是异常偏少年, 积雪日数在1982年发生了少到多的气候突变; 5) 由于受到气象台站的地理位置、海拔高度等影响, 同一区域不同台站之间的积雪日数差别也很大。

关键词

北疆地区, 积雪日数, 时空变化, 冬季

Analysis of the Spatio-Temporal Variation Characteristics of Snow Cover Days in Winter in Northern Xinjiang during 1961~2021

Xiaomei Zhu, Qiaolipan·Bieken, Meilikan·Kemaimaiti

Yili Meteorological Bureau, Yining Xinjiang

Received: Dec. 20th, 2022; accepted: Jan. 22nd, 2023; published: Jan. 31st, 2023

文章引用: 祝小梅, 乔丽盼·别肯, 美丽侃·克尔买买提. 1961~2021 年北疆冬季积雪日数时空变化特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(1): 136-149. DOI: 10.12677/ccrl.2023.121015

Abstract

Based on the observation data of winter days with snow cover from 38 meteorological stations in northern Xinjiang during 1961~2021, the spatio-temporal variation characteristics of winter days with snow cover in northern Xinjiang during the past 61 years were systematically analyzed. The main conclusions are as follows: 1) In the past 61 years, the annual average winter days with snow cover in northern Xinjiang were 82.89 days, mainly with snow depth less than 20 cm, accounting for 70.33%; 2) In terms of space, 78.95% of meteorological stations in northern Xinjiang observed an increasing trend of days with snow cover, except for the non-significant decreasing trend in eastern Altay, central and eastern Changji, and eastern Tacheng. 3) Under the background of global warming, the climate in northern Xinjiang is also experiencing significant warming, but extreme weather processes are frequent, which is manifested in the recent 61 years. The number of days with snow cover in winter in Northern Xinjiang showed a very significant increasing trend, with an increase of $0.95 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, and the increase of 20~30 cm days with snow cover was the most obvious and was $1.37 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, followed by $\geq 30 \text{ cm}$ ($1.13 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$); 4) During the 61 years, most of the years with fewer days with snow cover in winter in northern Xinjiang occurred in the 1960s to the early 1980s, and 1967, 1969 and 1973 were unusually young years. The number of days with snow cover in winter changed dramatically in 1982; 5) Due to the influence of geographical location and altitude of meteorological stations, the number of days with snow cover varies greatly among stations in the same region.

Keywords

Northern Xinjiang, Snow Cover Days, Spatial-Temporal Variation, Winter

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

积雪是气候系统中冰冻圈的一部分, 地球陆地上有四分之三的淡水资源以冰雪形式存在, 在冬季北半球积雪覆盖面积约占地表总面积的 34% [1]。积雪覆盖和积雪融化分别会对地气间的热量分配和水分平衡等产生显著影响, 进而影响局地气象条件, 产生重要的气候效应[2]。对于我国积雪的长期变化及其影响因子以及对气候的响应已有不少学者进行了研究, 总体来看北半球积雪有减少的趋势, 而中国积雪却有弱的增加趋势。冬、春季高原积雪与欧亚积雪对中国夏季降水的影响是相反的[3]。王春学等[4]研究表明近 50a 来, 春、秋季中国积雪日数和最大积雪深度呈现整体缓慢减少的趋势, 冬季呈现增加趋势。但由于区域不同、资料、时间等不同, 我国不同区域的积雪变化规律也不同。青藏高原作为同纬度海拔最高的地区, 在全球变暖的背景下其积雪所受影响最为直接与显著, 姜琪等[5]利用气象站点发现 1961~2014 年青藏高原积雪深度和积雪日数均呈缓慢下降趋势, 气温与积雪深度和积雪日数均有较好的相关性, 冬季的降水与积雪深度和积雪日数高度相关。东北地区也是我国三大主要积雪区之一[6], 也是我国典型的季节性积雪区之一, 研究表明东北地区年均雪深总体呈减少趋势[7], 而积雪日数呈增加趋势[8]。吉林省[9]积雪增量和积雪日数 60~80 年代末期以增加趋势

为主; 90 年代有所减少; 2000 年以年积雪迅速增多。李玉婷等[10]研究发现 2003~2012 年四川积雪覆盖面积呈现出微弱的下降趋势, 积雪覆盖率与气温和降水的关系最为密切, 气温的影响大于降水的影响。秦岭山区冬季积雪日数也是呈现显著减少趋势, 在 20 世纪末到 21 世纪初发生了由积雪日数偏多到偏少的突变[11]。

站点和卫星遥感资料都表明, 中国的积雪主要分布在新疆、东北和青藏高原[3] [12] [13] [14]。因此对于新疆及新疆不同区域的积雪[15]-[21]学者也做了相当多的研究, 并取得了一些优秀成果。随着全球变暖, 新疆积雪并未出现持续减少的现象, 积雪长期变化表现为显著的年际波动过程叠加在长期缓慢的增加趋势之上。积雪年际波动是冬季降水量和气温两者年际波动共同作用的结果[22]。研究表明新疆冬春季积雪主要分布在天山山区及天山以北[23] [24], 积雪厚度和最大积雪深度呈轻微增加趋势[25], 但北疆、天山山区冬季最大积雪深度呈显著增加趋势[23]。年内变化显示新疆积雪面积总体呈减少趋势, 其中春季和冬季为减少趋势, 夏季的积雪由于基本上都是高海拔的永久性积雪, 变化趋势不明显, 而秋季为上升趋势[26]。赵琴[27]利用遥感和气象站实测雪深资料发现 1980~2019 年新疆北部积雪覆盖面积比例、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。通过 EOF 分析发现北疆最大积雪深度空间分布具有一致性[28], 并呈显著增趋势, 积雪日数和稳定积雪日数也呈加趋势, 增加主要发生在 1960~1980 年代, 1990 年代有所减少[29]。研究表明在反映积雪类型与分布特征时, 积雪日数更有代表性[30]。可以看出由于资料、时间序列、方法的不同, 积雪日数的变化趋势并不一致[27] [29]。目前对于积雪日数的研究多趋于遥感资料, 但卫星遥感资料序列较短, 同时由于云的遮挡, 不能很好地刻画积雪的分布特征, 而气象台站积雪观测资料数据序列较长, 能够较为客观准确地记录积雪特征, 仍然是分析积雪长期变化的主要资料[30] [31]。王慧等[23]研究表明, 1961~2017 年新疆区域、北疆地区以及天山山区积雪日数总体呈减少趋势, 其中 ≤ 10 cm 积雪日数减少, > 20 cm 积雪日数显著增加。而随着新疆由冷干转为暖湿的气候条件下, 新疆积雪日数呈略微降低趋势[24], 而位于天山以北的北疆以及不同区域的积雪日数是如何变化的? 是否也是减少趋势, 而不同雪深的积雪日数又是如何变化的? 目前还没有太多的研究。基于以上问题, 本文选取北疆具有完整观测数据的 38 个气象站 1961~2022 年积雪观测资料, 系统分析北疆积雪日数的时空变化特点, 旨在揭示新疆由暖干转为暖湿的气候条件下, 北疆积雪在时间和空间上如何发生变化, 旨在为研究新疆积雪的时空分布及年代际变化特征提供基础。

2. 研究区概况

研究区位于新疆北部(天山山脉以北, 传统上称为北疆), 总面积约为 $59.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 海拔 185~5694 m。北疆地形主要由山脉、丘陵和盆地组成, 南北两侧为天山山脉和阿尔泰山山脉, 中部为准噶尔盆地, 地势呈南北高中部低, 西低东高。地处欧亚大陆腹地, 属于典型的大陆性干旱气候区, 夏季炎热, 冬季寒冷, 全年降水量 200 mm 左右。绿洲农业、畜牧业是新疆北部的重要经济支柱, 积雪融水作为主要水源, 对该地区生态环境有重大影响。本文选用了北疆区域 1961~2021 年 61 年间有完整观测纪录的所有台站, 共计有 38 个站, 其中伊犁 10 个站(伊宁站、霍城站、霍尔果斯站、察布查尔站、伊宁县站、巩留站、尼勒克站、新源站、特克斯站、昭苏站)、阿勒泰 6 个站(阿勒泰站、布尔津站、富蕴站、哈巴河站、吉木乃站、青河站)、博州 4 个站(阿拉山口站、博乐站、精河站、温泉站)、昌吉 8 个站(蔡家湖站、昌吉站、呼图壁站、吉木萨尔站、木垒站、奇台站、北塔山站、天池站)、塔城 7 个站(额敏站、和布克赛尔站、沙湾站、塔城站、托里站、乌苏站、裕民站)、乌鲁木齐 3 个站(达坂城站、乌鲁木齐站、小渠子站)(图 1)。

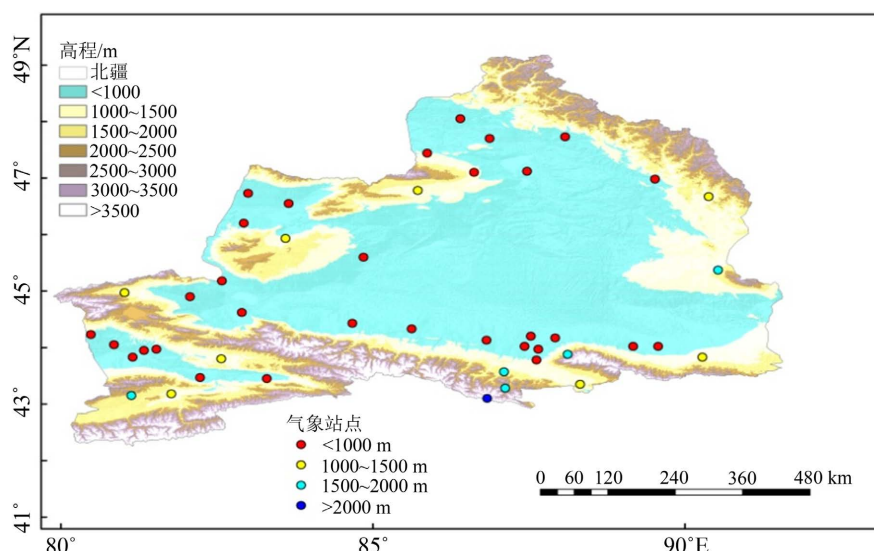


Figure 1. Overview of the study area

图 1. 研究区概况

3. 数据来源、处理

3.1. 积雪日数据

研究所用的积雪数据为研究时段冬季(当年 12 月至次年 2 月)的降雪日数、积雪日数、平均气温。积雪观测数据由中国气象局国家气象中心和新疆气象局信息中心提供,为天气现象定义的积雪日,即当观测场上视野范围内一半以上被积雪覆盖,就记为积雪日[32] [33]。

3.2. 方法

积雪日数变化趋势分析采用了下面的一元线性趋势方程:

$$y = a_0 + a_1 t$$

式中: y 为积雪日数; t 为年; a_1 为线性趋势率, 其值正负表示积雪日数增加或减少。

积雪日数的突变检测采用了 Mann-Kendall 方法。MK 检验法是一种非参数统计方法,能够有效区分某一自然过程是处于自然波动还是存在确定的变化趋势,主要用于趋势检验[34]。用原气象序列构造统计量 UF , 用原气象序列的反序列构造统计量 UB , 取 $\alpha = 0.05$ ($u_{0.05} = \pm 1.96$) 的信度水平。

4. 分析与结果

4.1. 积雪日数空间分布特征

从表 1 可以看出, 1961~2021 年北疆冬季年平均积雪日数为 82.89 d, 其中 <20 cm 积雪日数占 70.3%, ≥20 cm 积雪日数占 29.7%。可以看出北疆冬季积雪日数主要为积雪深度 <20 cm 的积雪, 积雪日数占到了 58.29 d。积雪日数的空间分布海拔高度呈正相关, 相关系数为 0.64 ($\alpha = 0.001$), 这与王宏伟等[35]的研究是一致的, 地形因素中海拔高度对积雪各变量的影响程度是最大的。北疆积雪日数有二个高值中心点: 一个位于新疆北部的阿勒泰地区, 年平均积雪日数达 88.59 d; 一个位于天山北麓、准噶尔盆地东南缘的昌吉地区, 年平均积雪日数达 88.53 d。李如琦研究表明[36]阿勒泰东北部、塔额盆地和伊犁河谷-天山山区一线是暴雪频次较高的区域, 其中伊犁河谷和天山山区是北疆暴雪的主要发生区, 但伊犁河谷年平

均积雪日数只有 79.87 d，远远低于北疆的年平均积雪日数，可能与伊犁河谷年平均气温相对较高有关，气温较高不利于积雪维持。

Table 1. Winter days with snow cover and days with different snow depths in Northern Xinjiang during 1961~2021 (Unit: d)
表 1. 北疆区域 1961~2021 年冬季积雪日数及不同雪深积雪日数(单位: d)

	年平均积雪日数	<10 cm	10~20 cm	20~30 cm	≥30 cm
北疆	82.89	28.85	29.44	15.55	9.05
伊犁河谷	79.87	25.42	28.63	16.74	9.08
阿勒泰	88.59	27.17	26.82	17.79	16.81
博州	79.35	54.13	22.85	2.28	0.09
昌吉	88.53	24.00	40.24	19.02	5.27
塔城	84.96	30.30	28.58	15.09	10.98
乌鲁木齐	66.44	19.48	19.39	16.64	10.92

各区域积雪日数分布，伊犁河谷平均积雪日数为 79.87 d，<10 cm 积雪日数占 31.83%，10~20 cm 积雪日数占 35.86%，20~30 cm 积雪日数占 20.97%，≥30 cm 积雪日数占 11.37%；阿勒泰地区平均积雪日数为 88.59 d，<10 cm 积雪日数占 30.67%，10~20 cm 积雪日数占 30.27%，20~30 cm 积雪日数占 20.08%，≥30 cm 积雪日数占 18.97%；博州平均积雪日数为 79.35 d，<10 cm 积雪日数占 68.22%，10~20 cm 积雪日数占 28.80%，20~30 cm 积雪日数占 2.87%，≥30 cm 积雪日数占 0.11%；昌吉地区平均积雪日数为 88.53 d，<10 cm 积雪日数占 27.12%，10~20 cm 积雪日数占 45.45%，20~30 cm 积雪日数占 21.48%，≥30 cm 积雪日数占 5.95%；塔城地区平均积雪日数为 84.96 d，<10 cm 积雪日数占 35.67%，10~20 cm 积雪日数占 33.64%，20~30 cm 积雪日数占 17.77%，≥30 cm 积雪日数占 12.93%；乌鲁木齐地区平均积雪日数为 66.44 d，<10 cm 积雪日数占 29.32%，10~20 cm 积雪日数占 29.19%，20~30 cm 积雪日数占 25.04%，≥30 cm 积雪日数占 16.44%。从积雪深度≥30 cm 积雪日数分布来看，阿勒泰地区最多，占到 16.81 d，伊犁河谷、塔城、乌鲁木齐占到 9.08~10.98 d，是由于这些区域是暴雪频次较高的区域[35] [36]。从图 2 可以看出，

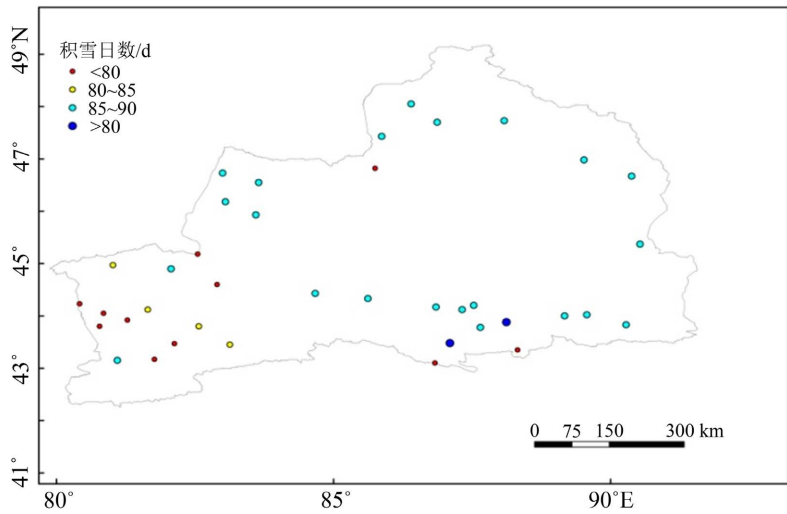


Figure 2. Spatial distribution of winter days with snow cover in northern Xinjiang during 1961~2021
图 2. 1961~2021 年北疆冬季积雪日数空间分布

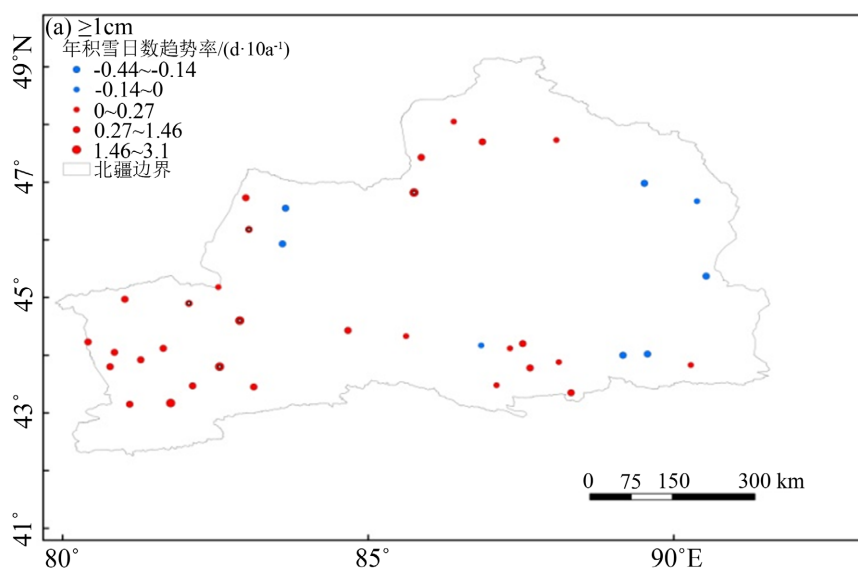
冬季积雪日数最多的是乌鲁木齐的小渠子站,年平均积雪日数达 90.15 d,其次是昌吉的天池站,为 90.05 d,最少的站点位于乌鲁木齐的达坂城站,只有 20.8 d。平均年积雪日数大部在 85~90 d,占台站总数的 57.9%。积雪日数在 80 d 以下的共有 10 个站,占台站总数的 26.3%,主要分布在伊犁河谷西部平原地区(77.05 d)、博州的阿拉山口(72.56 d)、塔城的和布克赛尔站(68.41 d)以及乌鲁木齐的达坂城站(20.8 d)。乌鲁木齐的达坂城站近 61a 没有 20 cm 以上积雪日数,博州的阿拉山口站、塔城的和布克赛尔站没有 30 cm 以上积雪日数。

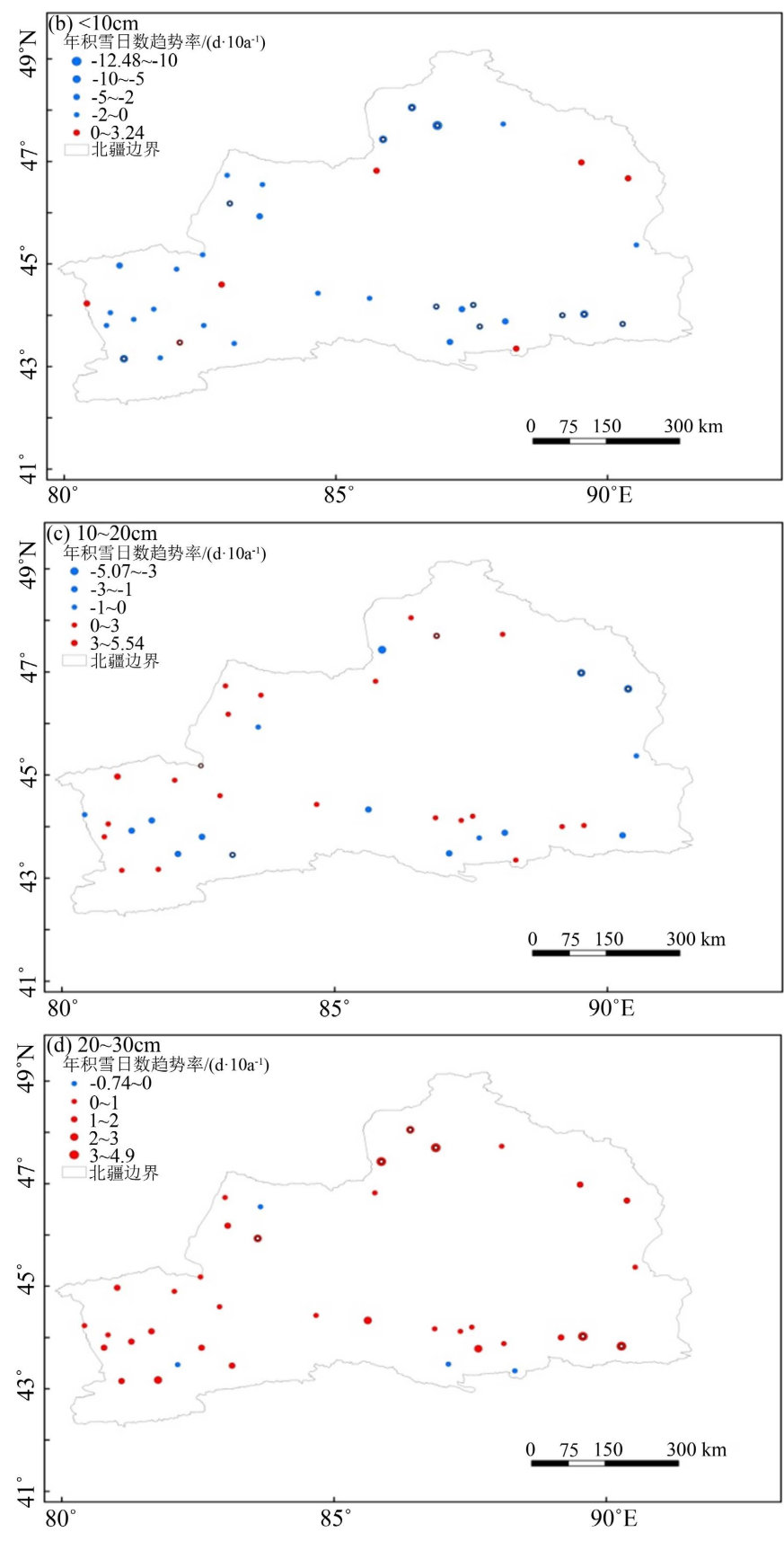
4.2. 各站点积雪日数的变化趋势

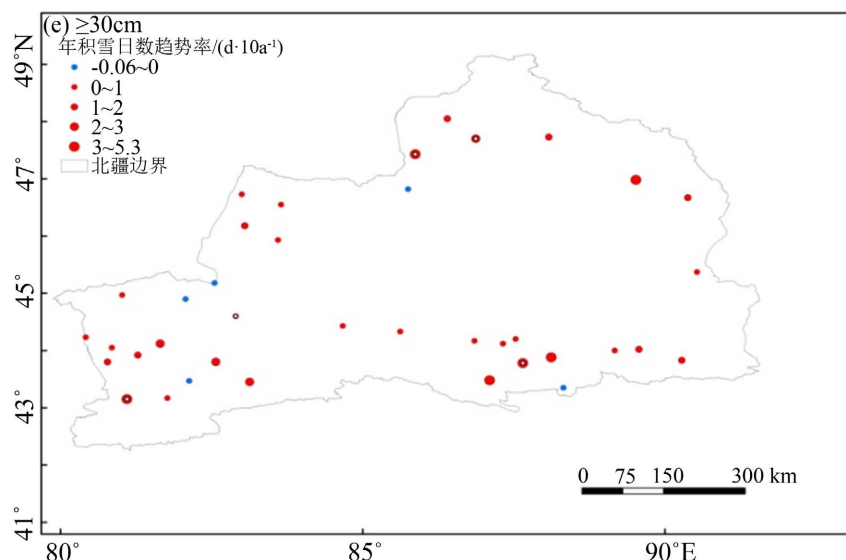
1961~2021 年,北疆地区冬季除 8 个站年积雪日数呈减少趋势外(图 3(a)),其余 30 个站均呈增加趋势。积雪日数呈减少的气象站主要位于阿勒泰地区、昌吉地区和塔城地区,但减少幅度都在 $1 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,都没有通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验,说明减少趋势是不明显的。

61 年内冬季年积雪日数呈增加趋势的站点共有 30 个,占站点总数的 78.95%,增幅范围在 $0.01 \sim 3.10 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,平均 $0.75 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,只有 5 个站通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验,2 个站通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。30 个气象站中,年积雪日数增加明显(每年平均增幅在 1 d 以上)的总共有 6 个站,有 3 个站通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,主要分布在博州、塔城地区和伊犁河谷。

从各站点不同雪深积雪日数变化来看, <10 cm 积雪日数只有 8 个站点呈增加趋势(图 3(b)),只有巩留站增加明显,增幅为 $3.24 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。减少的 30 个站中,其减少趋势幅度在 $0.14 \sim 12.45 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,平均 $2.79 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,其中有 11 个站通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性检验,6 个站通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,主要分布在阿勒泰、昌吉和伊犁河谷; 10~20 cm 积雪日数有 23 个站点呈增加趋势(图 3(c)),其中,布尔津和阿拉山口两个站相对增加最为明显,增幅各为 $5.54 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $2.41 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。减少的 15 个站中,其减少趋势幅度在 $0.31 \sim 5.07 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,平均 $2.06 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,只有 3 个站通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性检验,阿尔勒的富蕴站通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验; 20~30 cm 积雪日数有 33 个站点呈增加趋势(图 3(d)),增加范围在 $0.03 \sim 4.9 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,有 5 个站通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,主要分布在阿勒泰、昌吉和塔城。减少的 4 个站的减少幅度非常有限,均在 $1 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 以下; $\geq 30 \text{ cm}$ 积雪日数也是有 33 个站点呈增加趋势(图 3(e)),增加范围在 $0.02 \sim 5.31 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,有 5 个站通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性检验,2 个站通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,其中吉木乃和昭苏两个站增加相对明显,增幅各为 $5.31 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $3.64 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。博乐和巩留两个站呈减少趋势,但减少幅度不明显,减幅分别为 $0.06 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $0.04 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。







(≥ 1 cm (a)、 < 10 cm (b)、 $10 \sim 20$ cm (c)、 $20 \sim 30$ cm (d)、 ≥ 30 cm (e); 图中空心圆表示通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验)

Figure 3. Variation trend of winter days with snow cover in Northern Xinjiang during 1961~2021

图 3. 1961~2021 年北疆冬季积雪日数变化趋势

4.3. 年际变化特征

1961~2021 年, 北疆冬季积雪日数呈增加趋势, 其线性趋势率通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验, 表明这一增加趋势是非常显著的, 增加幅度为每 10 年 0.95 d (表 2), 这与全国的冬季积雪日数的变化趋势是一致的[4]。从北疆冬季平均年积雪日数的年际变化特点来看(图 4(a)), 20 世纪 60 年代到 80 年代初期积雪日数相对较少, 多数年份为负距平, 1961~2021 年标准偏差为 4.27 d, 根据世界气象组织规定, 如果距平绝对值大于 2 倍的标准偏差作为气候异常标准来决断[37], 1967 年、1969 年、1973 年是北疆冬季异常偏少年, 可以看出异常偏少年多出现在 20 世纪 70 年代初期前。1983~2019 年, 积雪日数显著增多, 绝大多数年份出现正距平, 只有 8 年积雪日数低于 61 年平均值, 其中 1993 年积雪日数最多, 为 82.89 d, 其次是 2012 年, 为 82.82 d, 这些偏多年份都未达到积雪异常的水平, 属于相对正常的年际波动。从图 5(a)中可以看出北疆冬季年积雪日数虽然整体呈增加趋势, 但 2001 年以前增加是缓慢的, 并没有通过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验。但 2001 年后增加趋势均超过显著性水平 0.05 临界线, 表明近 20a 北疆冬季积雪日数上升趋势是十分显著的。根据 UF 与 UB 曲线交点的位于 1982 年, 并处在 0.05 信度区间, 说明北疆冬季积雪日数在 20 世纪 80 年代初, 存在由少到多的突变, 具体是从 1982 年开始的。从图中还可以看出, 积雪日数增加到 2004 年达到一个峰值, 随后开始略有些减少, 直至 2008 年, 随后又呈现出增加 - 减少的波动状态。但整体来说从 1982 年后北疆冬季积雪日数是显著增加的。

4.3.1. < 10 cm 的积雪日数

北疆冬季 < 10 cm 的积雪日数呈显著减少趋势($\alpha = 0.01$), 减幅为 $1.80 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (表 2)。积雪日数在 60 年代到 80 年代初期是北疆冬季积雪较多的时期(图 4(b)), 大多数年份为正距平, 其中 1969 年积雪日数最多, 为 53.74 d, 达到了异常偏多的标准。1984 年后积雪明显减少, 其中 2012 年积雪日数最少, 为 9.39 d, 其次为 1993 年, 为 12.63 d, 但都属于相对正常的年际波动。从图 5(b)可发看出北疆冬季 < 10 cm 的积雪日数是从 1983a 开始减少, 并且在 1997a 以后显著减少, 并通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验, 甚至在 2002 年后减少趋势超过了 0.01 显著性水平($u_{0.01} = \pm 2.58$), 表明在 20 世纪末期北疆冬季 < 10 cm 积雪日数减少趋势是非常显著的。

4.3.2. 10~20 cm 的积雪日数

10~20 cm 积雪日数也是呈减少趋势, 减幅为 $0.19 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (表 2), 但并没有通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 表明北疆冬季 10~20 cm 积雪日数近 61 年来有所减少, 但是从数理统计意义上该趋势并不明显。从年际变化来看 60 年代初期积雪较多(图 4(c)), 1962 年积雪日数最多, 为 25.97 d, 达到了异常偏多的标准。1965~1974 年积雪明显减少, 最小值出现在 1966 年, 为 18.08 d, 未达到异常偏少的标准。1975~2007 为积雪偏多期, 最大值出现在 1975 年, 为 45.82 d, 达到了异常偏多年标准, 其次是 1985 年, 为 43.26 d。2008~2017 年, 北疆冬季积雪开始出现了显著减少趋势, 最小值出现在 2012 年, 为 12.74 d, 且达到异常偏少年的标准。近 5a 积雪又出现增多趋势。从图 5(c)可以看出近 61 年 10~20 cm 积雪日数在 70 年代末期到 80 年代初期有增加的趋势, 但这种增加趋势是不显著的($\alpha = 0.05$), 而到 2013 年以后又略有减少趋势, 减少趋势也是不显著的($\alpha = 0.05$), 而近两年又有增加的趋势。从 UF 和 UB 的交点位置来看, 这种增加趋势是一突变现象, 具体是从 1983 年开始的。

4.3.3. 20~30 cm 的积雪日数

20~30 cm 积雪日数呈显著增加趋势(表 2), 增幅为 $1.33 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($\alpha = 0.05$)。在 20 世纪 60 年代至 90 年代初期积雪相对较少(图 4(d)), 1969 年积雪日数最少, 只有 1.05 d, 达到了异常偏少年的标准, 其次为 1967 年, 为 3.61 d。1993 年之后积雪明显增多, 最大值出现在 2015 年, 为 30.05 d, 达到异常偏多年的标准。从图 5(d)可以看出北疆冬季 20~30 cm 积雪日数在 21 世纪初期增加趋势超过显著性水平 0.05 临界线, 并且在 2015 年后甚至超过了 $\alpha = 0.01$ 显著性水平, 从 UF 和 UB 的交点位置来看, 这种增加趋势是一突变现象, 具体是从 1984 年开始的。

4.3.4. $\geq 30 \text{ cm}$ 的积雪日数

$\geq 30 \text{ cm}$ 积雪日数也呈增加趋势(表 2), 增幅为 $1.31 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 但增加趋势是不显著的。从图 4(e)可以看出, 近 61 年 $\geq 30 \text{ cm}$ 积雪日数的负距平多于正距平, 但积雪日数减少的年份并不显著, 属于正常的年际波动, 近 61 年积雪日数偏多的年份只有 25 年, 积雪日数最多的年份位于 2012 年, 为 37.24 d, 其次为 2000 年, 为 30.21 d, 第三为 2009 年, 为 29.13 d, 且都达到异常偏多年的标准。从图 5(e)可以看出 $\geq 30 \text{ cm}$ 积雪日数也是在 21 世纪初期增加趋势超过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 临界线, 并且在 2012 年后超过了 $\alpha = 0.01$ 显著性水平, 从 UF 和 UB 的交点位置来看, 这种增加趋势是一突变现象, 具体是从 1999 年开始的。

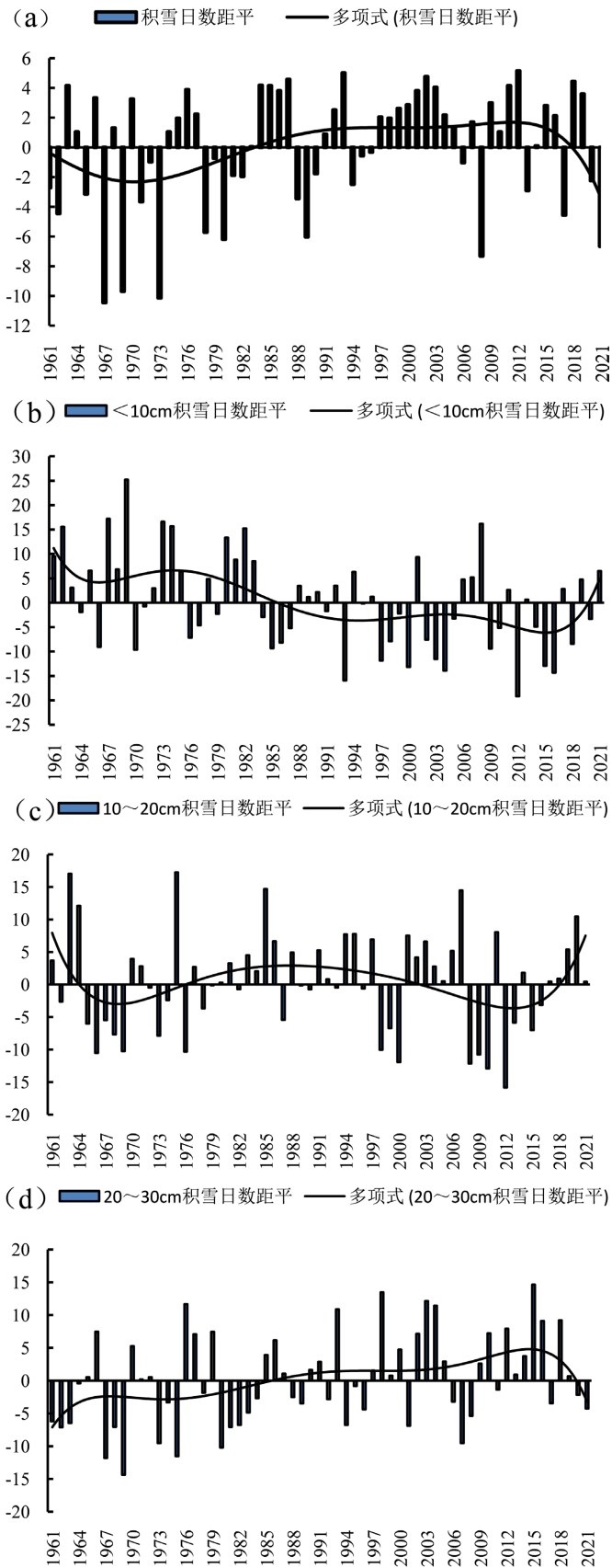
经过统计近 61a 北疆冬季降雪日数呈减少趋势, 减少幅度为 $0.3 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 多年平均气温呈增加趋势, 增幅为 $0.45 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 而北疆冬季积雪日数整体呈略增加趋势, 尤其是 20 cm 以上积雪日数是呈显著增加趋势的, 这也证实了在全球气候变暖的背景下新疆极端降水的频次及降水量也呈增加趋势[38] [39] [40]。

Table 2. Temporal variation characteristics of winter days with snow cover and analysis results of Mann-Kendall mutation test in northern Xinjiang during 1961~2021

表 2. 1961~2021 年北疆冬季积雪日数时间变化特征及 Mann-Kendall 突变检验分析结果

	趋势率($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$)	标准差	异常偏多年份	异常偏少年份	突变点
年积雪日数	0.09*	4.27	1969	1967、1969、1973	1982
<10 cm	-0.18*	7.22			1983
10~20 cm	0.02	6.49			1983
20~30 cm	0.13*	8.62	2015	1969	1984
$\geq 30 \text{ cm}$	0.11	8.80	2000、2009、2012		1999

其中带*的为通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验。



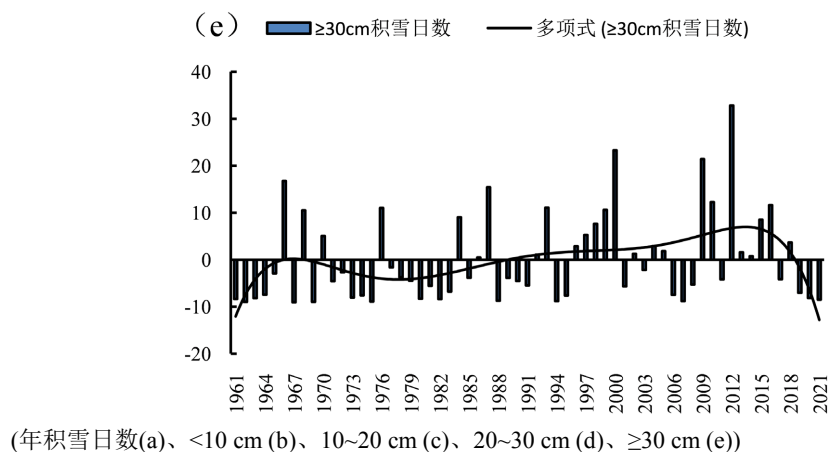
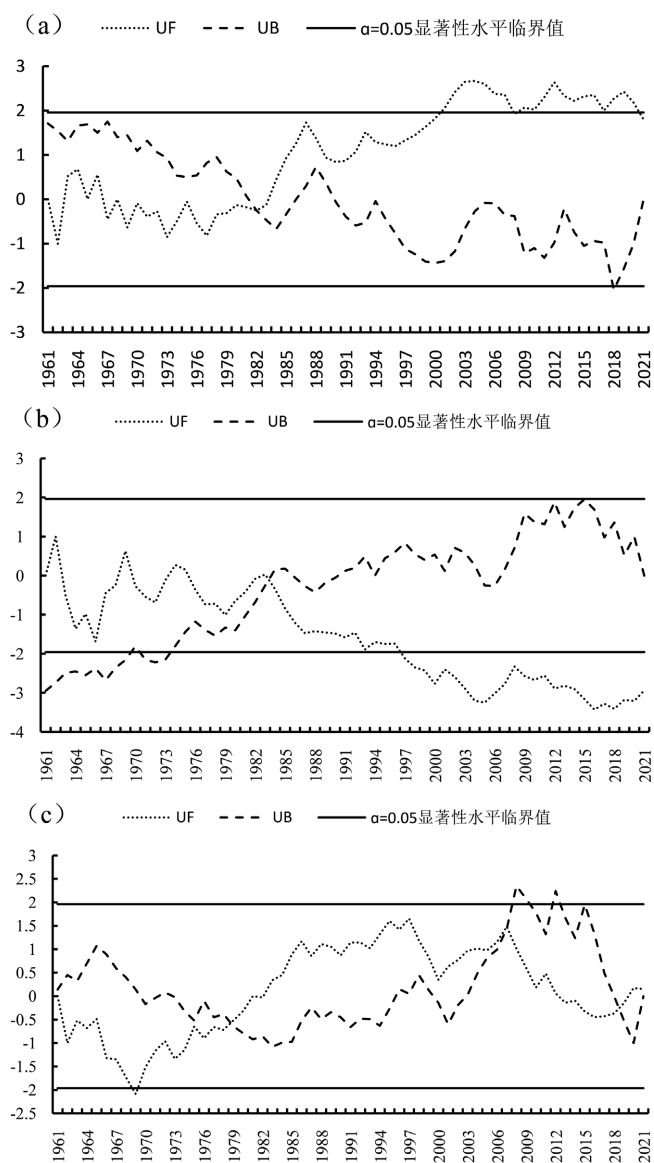
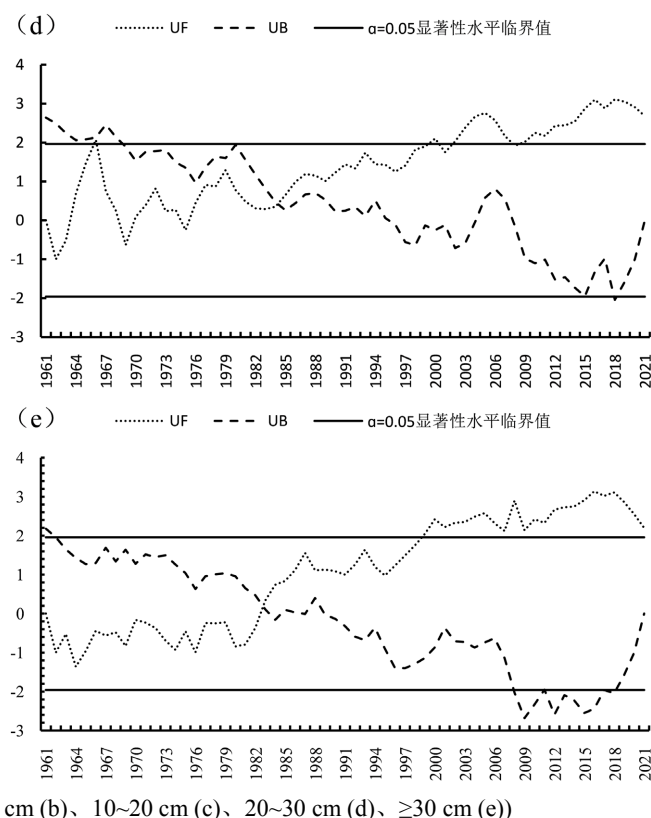


Figure 4. Anomaly variation of days with snow cover in winter in Northern Xinjiang during 1961~2021

图 4. 1961~2021 年北疆冬季积雪日数距平变化





(≥1 cm (a)、<10 cm (b)、10~20 cm (c)、20~30 cm (d)、≥30 cm (e))

Figure 5. MK statistical curve of winter days with snow cover in northern Xinjiang during 1961–2021
图 5. 1961~2021 年北疆冬季积雪日数 MK 统计量曲线

5. 结论

1) 1961~2021 年, 北疆冬季年平均积雪日数为 82.89 d, 其中<10 cm 积雪日数占 34.81%, 10~20 cm 积雪日数占 35.52%, 20~30 cm 积雪日数占 18.76%, ≥30 cm 积雪日数占 10.91%。北疆冬季积雪日数主要为积雪深度<20 cm 的积雪, 积雪日数占到了 70.33%。积雪日数的空间分布海拔高度呈正相关。北疆积雪日数有二个高值中心点: 一个位于新疆北部的阿勒泰地区, 年平均积雪日数达 88.59 d; 一个位于天山北麓、准噶尔盆地东南缘的昌吉地区, 年平均积雪日数达 88.53 d。

2) 61 年间, 位于阿勒泰东部、昌吉中部及东部、塔城东部 8 个台站积雪日数出现了不显著的减少趋势之外, 占北疆 78.95% 的气象站点观测的年积雪日数都呈增加趋势, 且增幅最为明显的台站为精河站、和布克赛尔站和尼勒克站。

3) 在全球气候变暖的背景下, 北疆气候也在经历着显著变暖, 但极端天气过程频发, 表现在近 61 年, 北疆冬季积雪日数出现了非常显著的增加趋势, 增幅达 $0.95 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 其中 20~30 cm 积雪日数增加幅度最为明显, 为 $1.37 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 其次是 ≥30 cm ($1.13 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$), 10~20 cm 最小 ($0.23 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$)。对北疆而言, 20 世纪 60 年代到 80 年代初期积雪日数相对较少, 之后有较显著的增加, 1982 年是北疆冬季积雪日数由少到多的转折点。过去 61 年间, 北疆冬季积雪日数较少的年份多数出现在 20 世纪 60 年至 80 年代初, 且 1967 年、1969 年、1973 年是异常偏少年, 偏多年份多数出现在近 40 年, 这些偏多年份都未达到积雪异常的水平, 属于相对正常的年际波动。

4) 北疆冬季积雪日数空间分布极不均匀, 区域差异较大。总体上, 天山山区、阿勒泰山地区、大部分塔城盆地是积雪日数最长的地区, 一般在 88 d 以上, 代表站包括小渠子站和天池站, 而天山北麓、准

噶尔盆地南段、部分塔城盆地日积雪日数低值区,在 70 d 以下,代表站点有和布克赛尔和达坂城站。由于受到气象台站地形、海拔高度和局地气候等条件的差异影响,同一区域不同台站之间的积雪日数差别也很大。

6. 讨论

本文利用天气现象定义的积雪日数资料讨论了北疆地区积雪日数的特征,通过研究在全球气候变暖大背景下,北疆冬季雪深大于 20 cm 积雪日数的显著增加特征,以及区域和时间尺度上的差异填补了以往学者对北疆积雪的研究。同时也揭示了,新疆由暖干转为暖湿的气候条件下,极端降水的频次及降水量也呈增加趋势。当然,所用资料时间序列长短、类型、研究范围、研究时间和方法都直接影响研究结果。娄梦筠等[26]采用了 2002~2011 年 MODIS 卫星遥感资料、赵琴等[28]采用的是卫星遥感和气象站实测雪深资料,所得出的结论是北疆 1980~2019 年积雪日数是减少的,但并没有对分季节讨论积雪日数的变化趋势。王慧等[23]选取了新疆 1961~2017 年 89 个气象站资料,研究表明 89 个气象站中 20 个显著增加,主要分布在天山以北地区。可见,利用同一种资料在相近的时间尺度内研究得出的积雪变化趋势是基本一致的。而王慧等也得出了 1961~2017 年新疆积雪日数也是呈减少趋势,但也没有分季节讨论。因此对于北疆积雪日数在其他季节的变化趋势也待于进一步深入研究。而且北疆海拔的差异,站点的分布的局限性,高海拔地区的积雪日数并不能用气象站点的数据来划画,但卫星遥感数据序列较短,同时由于云的遮挡,对于积雪的研究也有一定的局限。因此对于积雪的研究有待利用精度更高、时间序列更长和空间尺度更细的最新资料进一步深入研究。

参考文献

- [1] Armstrong, R.L. and Brodzin, M.J. (2001) Recent Northern Hemisphere Snow Cover Extent: A Comparison of Data Derived from Visible and Microwave Satellite Sensors. *Geophysical Research Letters*, **28**, 3673-3676. <https://doi.org/10.1029/2000GL012556>
- [2] Wang, J. and Li, S. (2006) Effect of Climatic Change on Snowmelt Runoffs in Mountainous Regions of Inland Rivers in Northwestern China. *Science in China (Earth Sciences)*, **49**, 881-888. <https://doi.org/10.1007/s11430-006-0881-8>
- [3] 李栋梁, 王春学. 积雪分布及其对中国气候影响的研究进展[J]. 大气科学学报, 2011, 34(5): 627-636.
- [4] 王春学, 李栋梁. 中国近 50a 积雪日数与最大积雪深度的时空变化规律[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 247-256.
- [5] 姜琪, 罗斯琼, 文小航, 等. 1961-2014 年青藏高原积雪时空特征及其影响因子[J]. 高原气象, 2020, 39(1): 24-46.
- [6] 刘洵, 金鑫, 柯长青. 中国稳定积雪区 IMS 雪冰产品精度评价[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 500-507.
- [7] 路倩, 李宝富, 王志慧, 等. 1979-2014 年东北地区雪深时空变化与大气环流的关系[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 907-915.
- [8] 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.
- [9] 徐士琦, 傅帅, 张小泉, 等. 1961-2016 年吉林省积雪增量与积雪日数时空变化特征[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(2): 44-51.
- [10] 李玉婷, 柳锦宝, 王增武, 等. 2003-2012 年四川省积雪时空动态变化与气候响应研究[J]. 冰川冻土, 2012, 38(6): 1491-1500.
- [11] 李茜, 魏凤英, 雷向杰. 1961-2016 年秦岭山区冷季积雪日数变化特征及其影响因子[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 72-80.
- [12] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 1-14, 180-198.
- [13] 李培基, 米德生. 中国积雪的分布[J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 9-18.
- [14] 王建, 车涛, 李震, 等. 中国积雪特性及分布调查[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 12-26.
- [15] 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.

- [16] 候小刚, 李帅, 张旭, 等. 基于 MODIS 积雪产品的中国天山山区积雪时空分布特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(3): 9-16.
- [17] 张文博, 肖鹏峰, 冯学智. 基于地面观测数据的天山典型区积雪时间特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(3): 27-33.
- [18] 秦艳, 丁建丽, 赵求东, 等. 2001-2015 年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 249-260.
- [19] 唐志光, 王建, 王欣, 等. 近 15 年天山地区积雪时空变化遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3): 556-563.
- [20] 卓越, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 新疆阿勒泰克兰河中游地区冬季积雪分布及特性分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 979-988.
- [21] 陈春艳, 李毅, 李奇航. 新疆乌鲁木齐地区积雪深度演变规律及对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 587-594.
- [22] 李培基. 新疆积雪对气候变暖的响应[J]. 气象学报, 2001, 5(4): 491-497.
- [23] 王慧, 王胜利, 余行杰, 等. 1961-2017 年基于地面观测的新疆积雪时空变化研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 72-80.
- [24] 胡列群, 李帅, 梁凤超. 新疆区域近 50a 积雪变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 793-800.
- [25] 崔彩霞, 杨青, 王胜利. 1960-2003 年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 486-490.
- [26] 娄梦筠, 刘志红, 娄少明, 等. 2002-2011 年新疆积雪时空分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1095-1102.
- [27] 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.
- [28] 王秋香, 魏文寿, 王金民. 新疆北疆最大积雪深度 EOF 展开场的时间变化规律[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 244-249.
- [29] 王秋香, 张春良, 刘静, 等. 北疆积雪深度和积雪日数的变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 39-43.
- [30] 王澄海, 王芝兰, 崔洋. 40 余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 301-310.
- [31] 李亚丽, 雷向杰, 李茜, 等. 1953-2016 年华山积雪变化特征及其与气温和降水的关系[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 791-800.
- [32] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 61-63.
- [33] 国家气象中心. 全国地面气候资料(1961-1990)统计方法[Z]. 1990.
- [34] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 43-47.
- [35] 杨莲梅, 杨涛, 贾丽红, 等. 新疆大-暴雪气候特征及其水汽分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 389-396.
- [36] 李如琦, 唐冶, 肉孜·阿基. 2010 年新疆北部暴雪异常的环流异常的环流和水汽特征分析[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 155-162.
- [37] 除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. 1981-2010 年青藏高原积雪日数时空变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1461-1472.
- [38] 杨莲梅, 刘雯. 新疆北部持续性暴雪过程成因分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 507-519.
- [39] 李佳秀, 杜春丽, 杜世飞, 等. 新疆极端降水事件的时空变化及气候预测[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1103-1112.
- [40] 高婧, 井立红, 井立军, 等. 北疆地区极端降水事件气候特征分析[J]. 陕西气象, 2017(3): 23-28.