

基于MODIS数据的西天山积雪时空分布特征研究

乔丽盼·别肯, 祝小梅*, 美丽侃·克尔买买提

新疆伊犁州气象局, 新疆 伊犁

收稿日期: 2022年6月7日; 录用日期: 2022年7月5日; 发布日期: 2022年7月18日

摘要

本文基于2001~2020年MODIS积雪产品, 通过对积雪覆盖面积、积雪日数分析了西天山积雪的时空分布特征。结果表明: 1) 年内积雪覆盖面积分布呈单峰型, 1月份面积最大, 7月份最少。西天山积雪覆盖面积呈略微减少趋势, 主要体现在海拔1500~3000 m区域内。2) 春季和冬季的积雪覆盖面积明显减少, 秋季略微增加, 夏季变化不大。3) 西天山积雪日分布差异较大, 最大年平均积雪日数为214 d, 总积雪日主要集中在31~60 d, 其比例约为西天山总面积的37.4%。4) 积雪日数为0d和91~120 d的所占面积比例无变化; 积雪日数为31~60 d、≥121 d的呈减少趋势; 积雪日数为1~30 d、31~60 d呈增加趋势。5) 20 a内西天山积雪日减少的面积占西天山总面积的52.9%, 稳定区占46.9%, 增加的区域只有0.18%。西天山积雪日数增加或减少的趋势是不明显的($P > 0.1$)。

关键词

积雪覆盖面积, 积雪日数, MODIS, 西天山

Temporal and Spatial Distribution of Snow Cover in the Western Tianshan Snow Based on the MODIS Data

Qiaolipan·Bieken, Xiaomei Zhu*, Meilikan·Kemaimaiti

Ili Meteorological Bureau, Ili Xinjiang

Received: Jun. 7th, 2022; accepted: Jul. 5th, 2022; published: Jul. 18th, 2022

Abstract

Based on MODIS snow products from 2001 to 2020, through the snow cover area and the snow

*通讯作者。

文章引用: 乔丽盼·别肯, 祝小梅, 美丽侃·克尔买买提. 基于 MODIS 数据的西天山积雪时空分布特征研究[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(4): 437-447. DOI: 10.12677/ccrl.2022.114045

days, this paper analyses the space-time distribution features of the Western Tianshan snow. The results showed that: 1) Year distribution of snow cover area is unimodal type, and the biggest areas were in January and in July at least. The snow cover area in the Western Tianshan showed a slight decreasing trend, mainly in the area from 1500 m to 3000 m above sea level. 2) The snow cover area significantly reduced in winter and spring, increased slightly in autumn, and slightly changed in summer. 3) The distribution of snow cover days varies greatly in the Western Tianshan. The maximum average snow cover days is 214 days, and the total snow cover days are mainly concentrated in 31~60 days, accounting for 37.4% of the total area in the Western Tianshan. 4) The snow days 0 d and 91~120 d: no change of area ratio; Snow days in 31 to 60 d, 121 d showed a trend of decrease; Snow days in 1~30 d and 31 to 60 d showed a trend of increase. 5) During the past 20 years, the area with snow cover decreased 52.9%, the area with stable cover increased 46.9%, and the area with snow cover increased 0.18%. The increasing or decreasing trend of days with snow cover in Western Tianshan was not obvious ($P > 0.1$)

Keywords

Snow-Covered Area, Snow Cover Days, MODIS, The Western Tianshan

Copyright © 2022 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

积雪是冰冻圈的重要组成部分,对气候系统有很大的影响,而气候的变化也将引起积雪数量、面积和持续时间变化[1]。因此积雪变化和监测对研究全球气候变化具有重要意义。对于积雪的变化已有许多研究,研究表明,新疆、东北和青藏高原是中国积雪分布的三个大值区[2] [3] [4]。对于积雪的监测,主要有积雪日数、积雪面积和积雪深度三个方面,由于区域、时间等不同,积雪变化规律也不同。一此研究表明西北地区[5] [6] [7]和青藏高原[8]的积雪日数趋势呈减少趋势,而东北地区积雪日数有增加趋势[9] [10]。王春学等[4]研究表明近 50 a 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,冬季积雪日数为增加趋势,气温是影响积雪产生和维持的重要因素。李茜等[11]等发现 1961~2016 年秦岭地区冷季积雪日数呈现显著减少的趋势,海拔越高积雪日数减少的越多。西北太平洋海温阶段性增暖是导致秦岭冷季积雪日数减少的外强迫因素,而冷季平均气温的显著增暖和降水量的显著减少直接造成积雪日数的减少。

新疆地处欧亚大陆腹地,属于温带大陆性气候,积雪空间分布极不均匀,北疆积雪分布明显多于南疆,山区为积雪覆盖频次的高值区,盆地为积雪覆盖频次的低值区[12]。天山山脉是新疆三山系积雪最多的地区,也是我国三大稳定积雪中心。作为中国积雪分布的三大值区,许多学者从不同的研究方法、不同的时间序列对天山积雪的空间分布、变化趋势、与一些气候因子的关系方面开展了研究,并得出了一些研究成果。秦艳等[13]采用 MODIS 积雪和陆表温度数据、中同高时空分辨率降水数据,基于趋势分析和相关分析方法,分析了 2001~2015 年天山山区积雪时空变化,指出天山山区积雪面积呈略微减少趋势,积雪覆盖频率与年平均温度呈负相关,与降水呈低度正相关,且温度对积雪覆盖频率变化的贡献大于降水。胡列群等[14]利用新疆 91 个气象台站的观测资料,研究了 1960~2011 年积雪变化特征,得出新疆冬春季积雪主要分布在天山以北,积雪日数呈略微降低趋势。积雪深度与冬春年降水量的变化有很好的一致性,与平均气温呈低的负相关。积雪日数与冬春年降水量变化没有明显相关关系,但均与气温呈较好

的负相关。赵文学等[15]基于 MODIS 积雪产品研究了 2002~2014 年天山积雪日数的空间分布特征。高卫东等[16]研究表明 2001~2015 年天山山区和积雪呈略微减少趋势, 其中秋季略微增加, 春季变化不大, 冬季和夏季明显减少。还有许多学者对天山积雪进行了研究[17] [18] [19] [20]。

目前对天山积雪的特征研究的较多, 但中国境内的天山东西长 1700 km, 面积约为 $4.98 \times 10^5 \text{ km}^2$, 而天山不同区域的积雪特征及变化趋势研究的较少。新疆天山西段伊犁河谷山区(以下称西天山)的积雪是伊犁河流域重要的水资源补给来源, 同时也是雪崩、融雪洪水等积雪灾害的频发地区。因此, 及时准确的监测西天山的积雪具有重要的意义。本文利用 MODIS 遥感数据, 在已有研究基础上研究 2001~2020 年西天山积雪的特征, 试图对积雪的空间分布规律和时间演变特征有一个全面的认识。

2. 研究区概况

本文所研究的区域为新疆天山西段位于伊犁河谷境内的天山区域(以下称西天山), 位于 $80^\circ\sim 85^\circ\text{E}$ 、 $42^\circ\sim 45^\circ\text{N}$ 之间, 且自西向东分为南北两段, 然后在东面汇合, 海拔也是自中部向南北逐渐升高, 海拔最高为 5807 m、最低为 755 m。总面积约为 4.98 万 km^2 , 占天山山区总面积的 13.6%。在冬季受西伯利亚反气旋环流的影响较弱, 西南气旋带来较多的暖湿空气, 使得最大降水发生在冬季, 夏季降水较少[21], 见图 1。

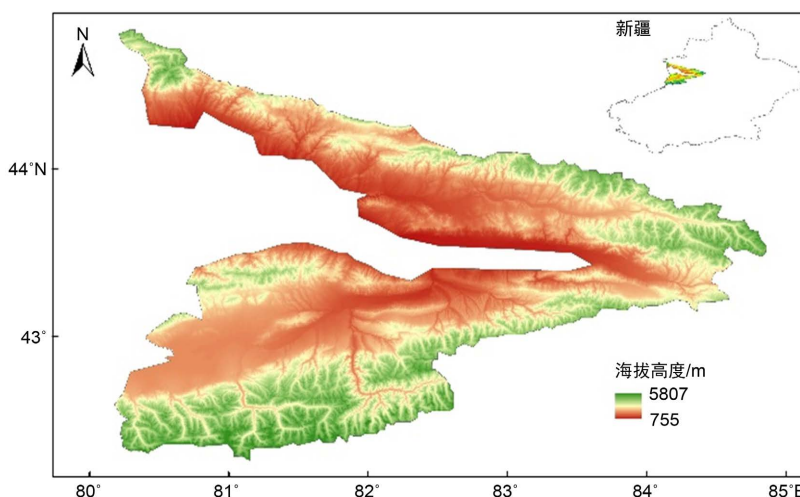


Figure 1. Map showing the general condition of the study area

图 1. 研究区概况

3. 数据来源、处理

3.1. 积雪

本文使用的积雪资料来自美国国家冰雪数据中心 NSIDC (The National Snow & Ice Data Center) 提供了 MODIS/Terra 积雪 8 d 合成数据(MOD10A2), 空间分辨率为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$, 数据存储格式为 HDF-EOS, 此数据可以在最大程度上减少云对积雪的影响, 但不能完全避免云的影响[20], 并能够提供长序列、高精度的空间积雪分布信息, 相关研究表明, MOD10A2 在新疆区域和积雪识别精度为 87.5%~94.0% [20] [22]。MOD10A2 所表示的是 8 d 积雪覆盖的最大值, 具体表现为: 该产品在 8 d 内只要有一天显示有积雪, 就表示该像元被积雪覆盖, 并不是在 8 d 中像元每天都被积雪覆盖才定义为有雪, 如果 8 d 像元没有一天被积雪覆盖则定义为无雪。

选用 2001~2020 年新疆天山所涉及的影像, 轨道号为 h23v04、h23v05、h24v04、h24v05、h25v04 和 h25v05 的 6 块数据, 通过 MRT (MODIS Reprojection Tools) 软件及 ArcGIS 对数据进行镶嵌、格式转换、

重投影, 提取出天山积雪最大覆盖(Maximum Snow Extent)及积雪日数(Eight Day Snow Cover), 共得到两个波段各 916 幅影像(2001 年缺两幅、2002 年和 2016 年分别缺一幅), 并基于伊犁河谷的边界进行裁剪, 得到 20 a 逐 8 d 积雪覆盖时空序列。

将提取的“Maximum Snow Extent”波段(该波段记录积雪覆盖最大值)在 ArcGIS 里进行处理, 图像中像元值代表不同的地物覆盖类型, 根据表 1 中 MOD10A2 产品的编码的分类, 其中值为 200 的为积雪, 值为 25、37、39、50、100、255 为无雪区域, 对上述两类数据进行重分类, 在 ArcGIS 进行二值化处理, 编码分别为 1 和 0, 其中 1 代表积雪像元, 把编码为 200 和 100 赋为积雪, 经过处理得到天山 918 幅遥感影像, 以 TIF 格式输出, 并且统计研究区域在不同时期的积雪像元数, 获得天山的积雪覆盖面积。同样方法处理提取的“Eight Day Snow Cover”, 图像中像元值(为十进制)代表观察到的积雪日数, 将属性表中的 Value 值(0~255)转为二进制数还原出 8 d 内的积雪日数的监测信息, 此数据域用 0 或 1 从右到左排列(0~7), 当观测到当前区域有雪的时候就用 1 表示, 无雪则用 0 表示, 第 0 位表示第一天看到雪, 第 1 位表示第 2 天看到雪, 以此类推, 如果某一位设置为“关状态”, 则说明这一天数据丢失, 或被云覆盖或没有积雪[23]。例如, 如果一个区域用 255 表示, 因为 255 的二进制表示为 11111111, 则表示这个区域 8 天全部观测为云, 如果一个区域表示为 63, 二进制位 00111111, 则表示在 1~6 天都观测到雪了。

Table 1. MOD10A2 products feature coding classification

表 1. MOD10A2 产品的地物编码的分类

MODIS 编码	地表类型及意义
25	无积雪覆盖的陆地
37	内陆水体或湖泊
39	海洋
50	云
100	湖冰
200	积雪
255、1	填充数据(Fill)

3.2. DEM

数字高程(DEM)数据来自 CGIAR-CSI 提供的 90 m 分辨率的 SRTM 数据集。为使高程数据和积雪数据相匹配, 将 DEM 数据重采样成 500 m 空间分辨率, 投影转换为与 MOD10A2 一致的 Albers 投影。

4. 西天山积雪面积变化特征分析

研究区内一年内 8 d 合成的积雪图像共有 46 幅(2001 年缺少 2 幅, 2002 年缺少 1 幅、2016 年缺少 1 幅), 为了能够详细的反映新疆积雪覆盖面积的变化趋势, 本文对每幅影像图提取积雪覆盖面积后, 计算平均值, 得到当月和当年的积雪覆盖面积。

4.1. 年内变化特征

图 2 显示了西天山近 20 a 平均积雪覆盖面积年内变化图。其年内分布呈单峰型, 年内积雪变化呈单峰型。1 月份积雪覆盖面积最大, 7 月份积雪面积最少, 积雪主要分布在高海拔永久积雪区域。积雪年内变化特征为: 10 月份积雪面积开始积累, 积雪从 1.0 万 km² 增加到 2.2 万 km²。10 月份至 11 月份积雪面

积快速增加,短短一个月里积雪覆盖面积由 2.2 万 km^2 增加到 3.3 万 km^2 。11 月份至 12 月份积雪面积持续增加,至 12 月份天山积雪面积达到 4.05 万 km^2 ,到次年的 1 月份达到峰值。积雪持续到 3 月份,随着气温的回升,在 3 月末到 4 月初,大部分低海拔的区域积雪开始融化,积雪大面积减少,到 5 月份积雪减少到 1.2 万 km^2 ,积雪面积减少直至 7 月份达到最低,为 0.4 万 km^2 。

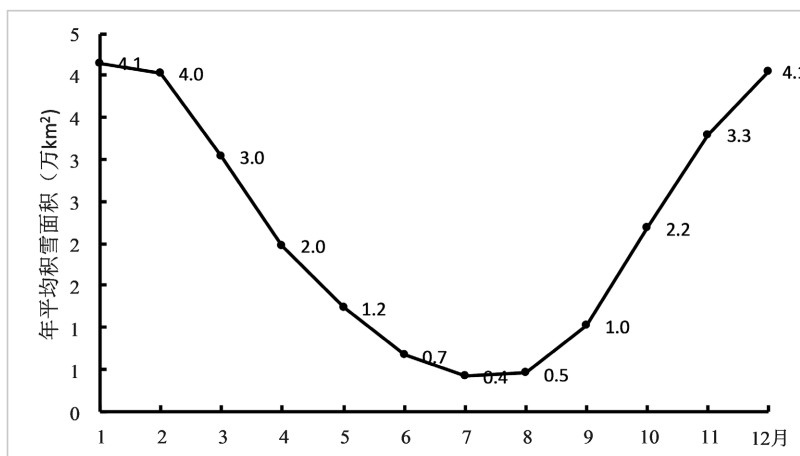


Figure 2. Monthly mean snow area of variation from 2001 to 2020

图 2. 2001~2020 年月平均积雪面积变化图

4.2. 年际变化

图 3 为西天山年平均积雪覆盖面积变化图。从图中可以看出,近 20 a 西天山积雪覆盖面积在 2.0~2.4 万 km^2 之间,最大积雪覆盖面积在 2001 年(2.4 万 km^2)和 2003 a (2.4 万 km^2),最小覆盖面积在 2007 a (2.0 万 km^2)。通过对积雪覆盖面积时间序列做线性趋势拟合,得出其线性趋势为 -0.0048 ,说明近 20 a 西天山积雪面积整体呈略微减少趋势,但之间呈减少—增加的波动变化。近 20 a 西天山积雪覆盖面积减少了 0.3 万 km^2 。

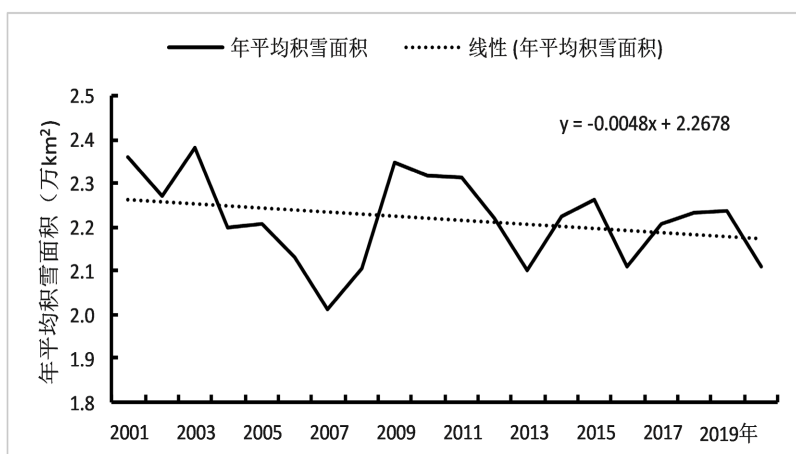


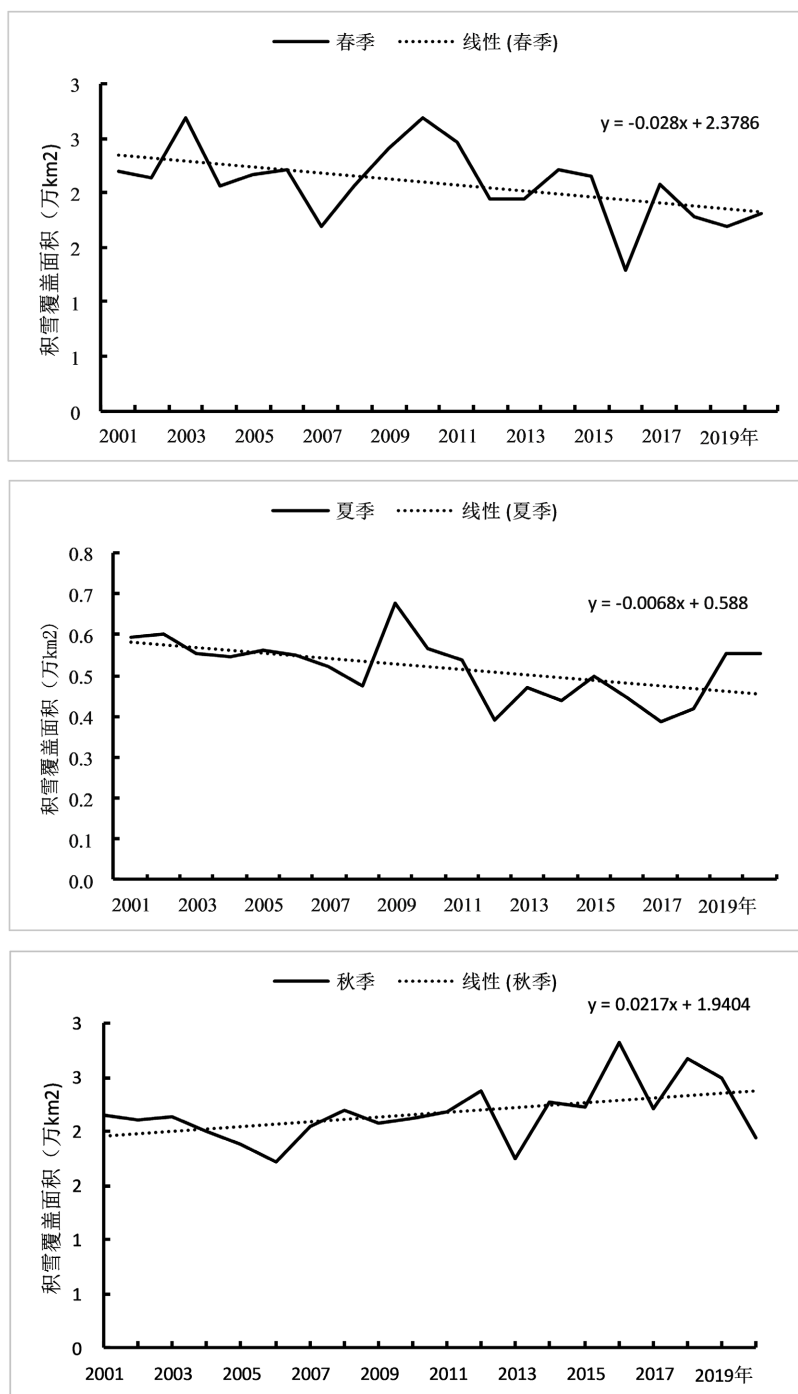
Figure 3. Annual variations of snow cover area from 2001 to 2020 in Western Tianshan

图 3. 2001~2020 年西天山积雪覆盖面积年际变化

4.3. 季节变化特征

本文一年四季的划分为:春季 3、4、5 月,夏季 6、7、8 月,秋季 9、10、11 月,冬季为 12 月和次

年 1、2 月。对近 20 a 每一个季节所有数据分别求平均值，作为该季节的积雪面积覆盖值，从而分析西天山季节的积雪覆盖面积变化状况(图 4)。近 20 a 中，春、夏、秋、冬四个季节的积雪面积的平均值分别为 2.1 万 km²、0.5 万 km²、2.2 万 km²、4.1 万 km²，可以看出，平均积雪面积在冬季最高，秋季次之，夏季最少，冬季的积雪覆盖面积相当于夏季的 8 倍多。图 4 显示了 2001~2020 年西天山春、夏、秋、冬季积雪覆盖面积的变化动态，可以看出，近 20 a 春季积雪减少趋势最大，线性趋势率为-0.028，积雪覆盖面积最大值出现在 2003 a 和 2010 a，达到 2.7 万 km²，最小积雪面积出现在 2016 年，仅为 1.3 万 km²。



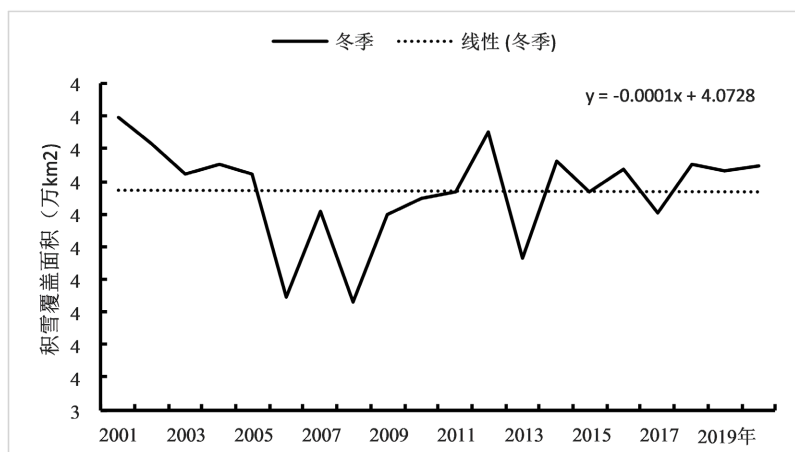


Figure 4. Annual variations of seasonal snow cover area from 2001 to 2020
图 4. 2001~2020 年季节平均积雪覆盖面积变化图

冬季的积雪近 20 a 呈略减少趋势，最大值出现在 2001 年，为 4.3 万 km^2 ，最小值出现在 2006 和 2007 年，为 3.7 万 km^2 。秋季的积雪整体呈略增加趋势，线性趋势率为 0.0217，2016 年积雪覆盖面积达到近 20 a 秋季最大值，为 2.8 万 km^2 ，比 2001 年增加了 0.6 万 km^2 。夏季的积雪覆盖面积变化幅度也不大，基本维持在 0.5 万 km^2 左右。春季和冬季的积雪覆盖面积都呈线性下降趋势，导致近 20 a 积雪覆盖面积整体呈下降趋势。

4.4. 积雪随海拔分布特征

基于前面的研究，发现西天山的积雪覆盖面积整体呈略减少的趋势，这一减少趋势是整体趋势，还是不同的海拔有所不同。将整个研究区划分为四个高程带： $\leq 1500\text{ m}$ 、 $1500\sim 3000\text{ m}$ 、 $3000\sim 4500\text{ m}$ 、 $\geq 4500\text{ m}$ ，各带面积分别占总面积的 18.95%、57.46%、23.37%、0.22%。图 5 显示了 2001~2020 年研究区不同高程带多年平均积雪面积年际变化情况，可以看出 $\geq 4500\text{ m}$ 的积雪是常年稳定性积雪，近 20 a 是没有变化的。 $3000\sim 4500\text{ m}$ 的积雪面积呈略减少趋势，线性趋势率为 -0.025 ，近 20 a 减少了 0.68 万 km^2 。 $1500\sim 3000\text{ m}$ 的积雪面积也呈减少趋势，近 20 年减少了 1.35 万 km^2 。海拔 1500 m 以下的积雪面积变化也不是很大，近 20 a 只减少了 0.36 万 km^2 。因此可以看出西天山积雪面积减少主要体现在海拔在 $1500\sim 3000\text{ m}$ 内的积雪。

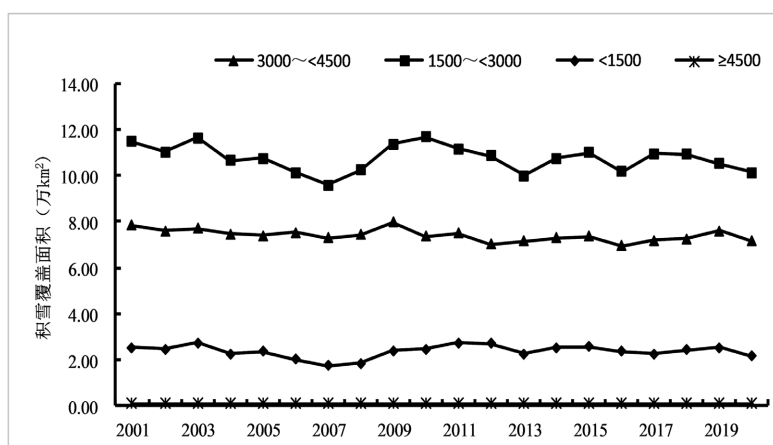


Figure 5. Annual variations of different altitudes snow cover area from 2001 to 2020
图 5. 2001~2020 年不同海拔积雪覆盖面积变化图

5. 西天山积雪日数的分布及变化情况

5.1. 积雪日数的空间分布特征

为了分析空间上不同区域的积雪日数特征, 本文按照 0 d、1~30 d、31~60 d、61~90 d、91~120 d、 ≥ 121 d, 6 个等级对积雪日数进行分级, 并分别计算各等级对应的面积比例来分析积雪日数的空间分布特征。

图 6 所示为西天山在 2001~2020 年间的多年平均积雪日, 从图中可以看出多年平均积雪日分布差异较为明显, 积雪日数最多日为 214 d, 最少日仅有 1 d。积雪日数在 30 d 以下的面积占西天山的地区的 10.3%, 主要分布在昭苏县、特克斯县南部海拔在 1500~3000 m 的区域, 特克斯县北部海拔在 1000~1500 m 的区域, 以及河谷东部海拔 1500 m 以下区域。积雪日数在 31~60 d 面积占西天山的地区的 37.4%, 主要分布在西天山海拔在 1000~2000 m 的区域。积雪日数在 61~90 d 面积占西天山的地区 24.3%, 主要集中在西天山海拔 2000~3000 m, 以及西天山南段海拔 1500~2000 m 的区域。积雪日数在 91~120 d 面积占西天山地区的 18.7%, 主要分布在西天山海拔为 2500~3000 m 区域。积雪日数大于 121 d 的面积占西天山地区的 9.2%, 主要分布在海拔 3000 m 以上区域。

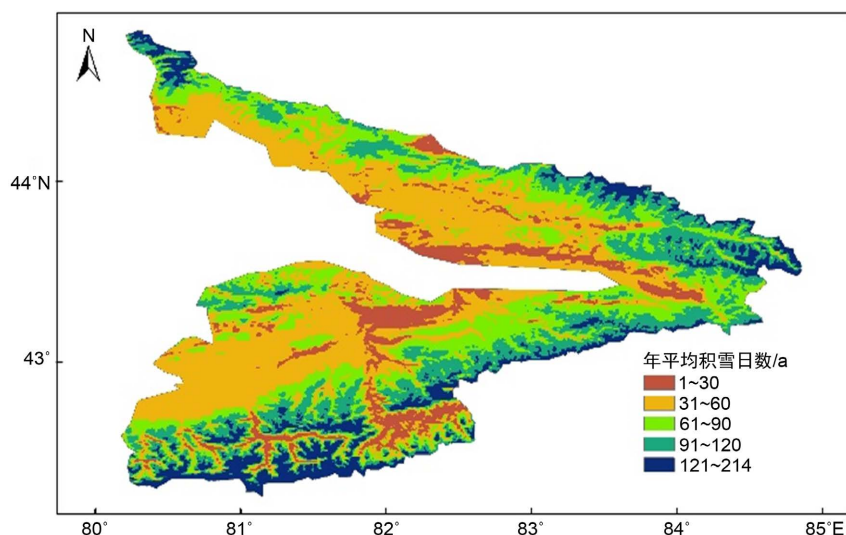


Figure 6. Annual average snow days from 2001 to 2020

图 6. 2001~2020 年西天山年平均积雪日数

分析近 20 a 西天山各段积雪日数所占研究区面积(图 7), 并对各段积雪日数所占面积时间序列做线性拟合。研究表明: 积雪日数为 0 d 的面积变化不大; 积雪日数 1~30 d, 其变化斜率为 0.0236, 说明 2001~2020 年其所占面积呈略微增加趋势, 并由 2001 a 的 7.8% 增加到 2020 a 的 15.2%; 积雪日数 31~60 d, 其变化斜率为 -0.211, 呈减少趋势, 由 2001 a 的 37.8% 减少到 2020 a 的 30.6%; 积雪日数 61~90 d, 其所占面积变化最明显, 变化斜率为 0.34, 呈明显增加趋势, 由 2001 a 的 21.9% 增加到 2020 a 的 25.2%; 积雪日数在 91~120 d, 其所占研究区面积的比例也变化不大。积雪日数 ≥ 121 d, 其变化斜率为 -0.138, 呈减少趋势, 由 2001 a 的 14.7% 减少到 2020 a 的 11.0%。

总体来说, 西天山总积雪日数主要集中在 31~60 d, 这与天山总积雪日数主要集中在 30 d 以内的情况是不同的。其中积雪日数为 0 d 和 91~120 d 的所占面积比例无变化; 积雪日数为 31~60 d、 ≥ 121 d 的呈减少趋势; 积雪日数为 1~30 d、61~90 d 呈增加趋势。

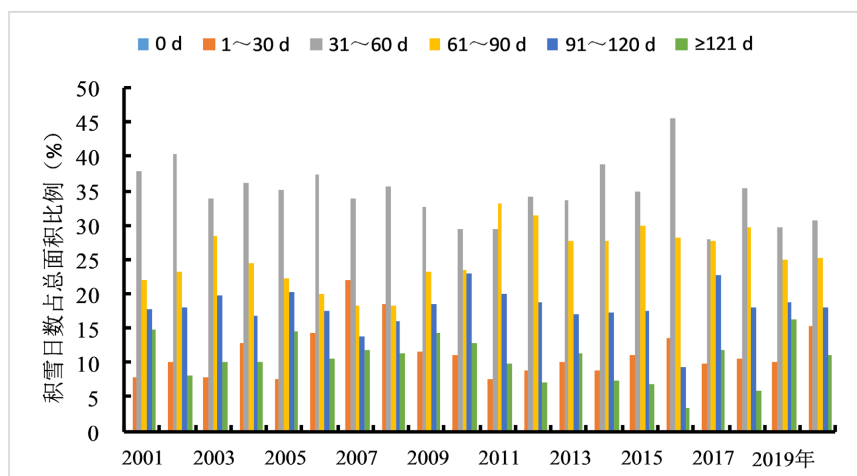


Figure 7. Different levels of snow area distribution from 2001 to 2020

图 7. 2001~2020 年西天山不同等级积雪日面积分布

5.2. 积雪日数的空间变化趋势

为反映积雪日数的变化趋势，利用 Stow 等[24]提出的绿色变化率公式，计算积雪日数最小二乘线性拟合变化率，以下用 Slope 表示。Slope > 0 表示积雪日数在 2001~2020 年间具有增加趋势；Slope < 0 表示积雪日数在 2001~2020 年间具有减少趋势，绝对值越大表明这种增加或减少的趋势越明显。图 8 为 2001~2020 年间积雪日的变化趋势，20 a 间西天山大部分区域积雪日呈现减少趋势(占西天山总面积 52.9%)；积雪日数稳定区占西天山总面积的 46.9%；而积雪日数增加的区域只有 0.18%，主要分布在西天山南段昭苏县及特克斯县境内。通过对变化趋势进行显著性检验(P 值)，发现西天山积雪日数增加或减少的趋势是不明显的(P > 0.1)。

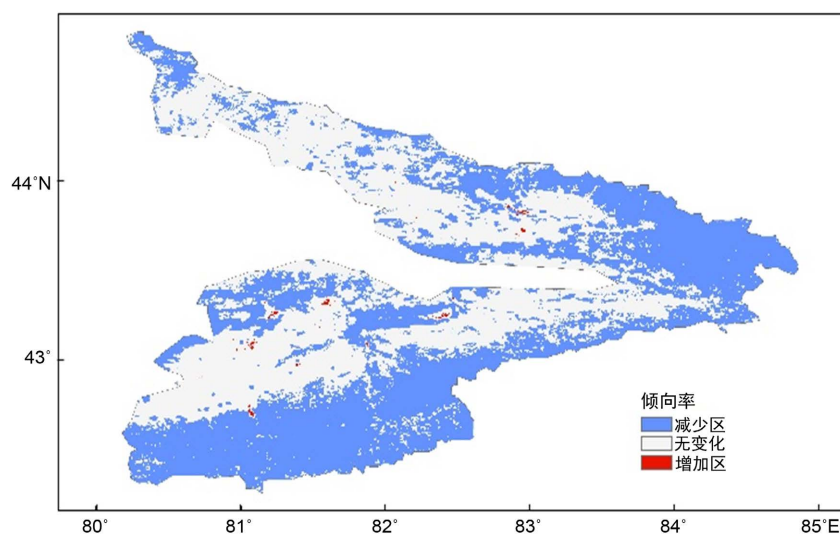


Figure 8. The trends of snow days from 2001 to 2020

图 8. 2001~2020 年西天山积雪日数变化趋势

6. 结论

通过对西天山积雪覆盖面积、积雪日数的时空分布特征分析，得到以下结论：

1) 年内积雪覆盖面积年内分布呈单峰型, 1 月份面积最大, 7 月份最少主要分布在高海拔永久积雪区域。20 a 间西天山积雪覆盖面积整体呈略微减少趋势, 但之间呈减少 - 增加的波动变化, 且西天山积雪覆盖面积减少主要出现在海拔 1500~3000 m 内的积雪。

2) 平均积雪覆盖面积在冬季最高, 夏季最少, 冬季的积雪覆盖面积相当于夏季的 8 倍多。近 20 a 春季和冬季的积雪覆盖面积呈线性下降趋势。秋季的积雪整体呈略增加趋势, 夏季的积雪覆盖面积变化幅度也不大。

3) 西天山积雪日分布差异较为明显。其中高值区分布在南北两段的海拔 3000 m 以上区域; 最大年平均积雪日数为 214 d, 总积雪日主要集中在 31~60 d, 其比例约为西天山总面积的 37.4%, 这与天山总积雪日数主要集中在 30 d 以内的情况是不同的。其中积雪日数为 0 d 和 91~120 d 的所占面积比例无变化; 积雪日数为 31~60 d、 ≥ 121 d 的呈减少趋势; 积雪日数为 1~30 d、31~60 d 呈增加趋势。

4) 西天山积雪日呈现减少趋势面积占西天山总面积的 52.9%; 稳定区占 46.9%; 而增加的区域只有 0.18%, 主要分布在西天山南段昭苏县及特克斯县境内。西天山积雪日数增加或减少的趋势是不明显的 ($P > 0.1$)。

基金项目

新疆气象科技创新发展指导性基金项目(MS202218); 新疆气象局引导性计划项目(YD202218)。

参考文献

- [1] 白淑英, 王莉, 赵巧华, 等. 博斯腾湖流域积雪变化及影响因素[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 487-493.
- [2] 张人禾, 张若楠, 左志燕. 中国冬季积雪特征及欧亚大陆积雪对中国气候影响[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 513-526.
- [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] 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.
- [6] 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(3): 780-790.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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(3): 780-790.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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] 高卫东, 魏文寿, 张丽旭. 近 30a 来天山西部积雪与气候变化: 以天山积雪雪崩研究站为例[J]. 冰川冻土, 2005,

- 27(1): 68-73.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 张文博, 肖鹏峰, 冯学智. 基于 MODIS 数据的我国天山典型区积雪特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 746-753.
- [21] 王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹, 等. 近 20 年天山地区冰湖变化特征[J]. 遥感技术与应用, 2013, 68(7): 983-993.
- [22] 黄晓东, 张学通, 李霞, 等. 北疆牧区 MODIS 积雪产品 MOD10A1 和 MOD10A2 的精度分析与评价[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 722-729.
- [23] 吕京国, 张小咏, 蒋玲梅, 等. MODIS 地表产品数据的相关算法及处理过程[J]. 遥感应用, 2009(8): 25-30.
- [24] Stow, D.A., Hope, A. and McGuire, D. (2004) Remote Sensing of Vegetation and Land-Cover Change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, **89**, 281-308. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.018>