

引用格式: Zhang Bo, Li Xuemei, Qin Qiyong. Evolution and Driving Factors of Snow Phenology in the Chinese Tianshan Mountainous Region[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(6): 1350–1360. [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.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.6.1350

中国天山积雪物候演变及驱动因素辨析

张 博^{1,2,3}, 李雪梅^{1,2,3}, 秦启勇^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070;

3. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:厘清中国天山积雪物候时空演变特征对冰冻圈气候变化适应、生态文明建设以及固体水资源可持续发展具有重要意义。研究基于2002—2017年MODIS逐日无云积雪面积产品,采用逐像元统计方法计算每个水文年内中国天山积雪持续时间(Snow Cover Duration, SCD)、开始日期(Snow Onset Date, SOD)及结束日期(Snow End Date, SED),并结合气象资料采用趋势分析方法分析了积雪物候时空格局及其对地形和气候变化的响应。结果表明:天山积雪物候的空间格局及变化趋势存在差异性,SCD呈西高东低、北高南低的分布格局,且高海拔地区SOD较早,SED较晚。中部和西部的SOD呈提前趋势,巴音布鲁克大草原的SOD提前趋势较为明显,西南部、北部及东部地区的SOD呈推迟趋势;中部地区的SED呈推迟趋势。海拔5 000 m以下,SCD、SOD及SED随海拔变化的平均梯度分别为4.93 d/100 m、-1.64 d/100 m和2.94 d/100 m,SCD的增长趋势在2 500—3 000 m达到最大,随海拔的升高SCD增长的趋势逐渐缩减,SED对地形变化的响应与SCD基本相似,但海拔对SED的影响较SCD弱。天山秋季增温和变湿是SOD推迟的主要原因,春季增温可促进SED提前,而春季变湿有助于SED推迟。

关键词:积雪物候;地形变化;气候变化;中国天山

中图分类号: P407;P426.635 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)06-1350-11

1 引言

积雪是冰冻圈的主要组成部分,年内和年际变化较大^[1]。积雪物候(SCD、SOD、SED)的变化对山区生态环境起着至关重要的作用,并与下游地区水资源供应息息相关。积雪融化导致的水资源变化会影响农业、旅游业、水电生产等多个部门^[2-4],研究积雪物候变化对区域供水及生态系统至关重要。

在气候变暖形势下,全球积雪物候发生了较大变化,不同地区差异明显。Bulygina等^[5]调查了1966—2007年820个测站观测到的SCD变化趋势,并指出欧洲俄罗斯北部地区和西伯利亚南部山区

SCD减少,而雅库特和远东地区SCD增加。Choi等^[6]利用来自NOAA卫星数据获取的每周积雪数据集,发现1972—2007年间北半球的SCD以平均5.3 d/10 a的速度减少。Peng等^[7]分析了过去27 a(1980—2006年)北半球636个气象站的SOD和SED变化趋势,发现SED在北美地区保持稳定,而在欧亚大陆呈提前趋势。Chen等^[8]发现2001—2014年期间,北部中纬度地区SCD增加了9.74 d,高纬度地区SCD减少了5.57 d。不难发现先前发表的积雪物候研究主要集中在北半球的高纬度地区^[8-9],且结论较多是根据现场观测并结合模型模拟得出。

收稿日期:2021-10-27;修订日期:2022-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41761014),兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”,兰州交通大学优秀平台支持(201806)资助。

作者简介:张 博(1996—),男,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要从事积雪遥感研究。E-mail:18235118550@163.com

通讯作者:李雪梅(1983—),女,山东菏泽人,副教授,主要从事气候变化与积雪遥感研究。E-mail:lixuemei@lzu.edu.cn

近年来国内对于积雪面积、积雪深度等物理参数的研究较为常见,而对于积雪物候的研究相对较少。目前针对青藏高原的积雪物候研究走在了前列,汪箫悦等^[10]发现青藏高原积雪物候变化存在明显的空间差异,18.1%的区域SOD呈明显提前趋势,23.2%的区域SED呈显著推迟趋势。Wang等^[11]利用MODIS积雪产品计算青藏高原2000—2015年SCD、SOD及SED并得出结论:青藏高原海拔低于3 500 m的地区SCD较短(SOD推迟和SED提前),而中部和西南部地区SCD较长(SOD提前和SED推迟)。乔德京等^[12]基于长时间序列逐日雪深被动微波遥感数据发现青藏高原积雪物候变化存在明显的空间和年代际差异,1980 s高海拔山区SOD呈提前趋势,SED呈推迟趋势;1990 s中部腹地SOD呈显著提前趋势,高原高海拔地区SED呈提前趋势,高原中部腹地SED呈推迟趋势,进入21世纪初后部分地区SOD推迟,SED提前。由此可见不同区域不同海拔带的积雪物候分布存在明显差异性,在天山这样复杂的地形环境中,除海拔影响外气候变化亦是影响积雪物候变化的重要因素。近期部分学者陆续开展了对天山积雪物候的研究,Tang等^[13]采用2001—2015年MODIS积雪面积比例产品发现天山中部和东部的SCD值分别减少11.88%和8.03%,而天山北部和西部的SCD值分别增加了9.36%和7.47%,同时指出影响积雪变化的主要因素是气温。Yang等^[14]基于被动微波遥感资料研究天山积雪物候,结果表明高海拔地区的SCD呈减少趋势,伊犁河谷、楚河及阿克苏河上游的SCD呈增加趋势。因天山融雪季增温幅度较大,积雪在短时间内迅速融化,积雪结束期提前,从而导致积雪期变短。然目前专门探讨中国天山积雪物候长期变化及其影响的研究并不完善^[8],迫切需要深入开展天山积雪物候对地形和气候变化的响应机制研究,为天山气候显著增暖条件下积雪水资源变化、气候变化适应研究以及区域可持续发展提供科学理论基础。

本研究旨在达到以下目的:

(1)基于中国天山高寒、地势高差大和区域内气候差异显著的特点,分析中国天山积雪物候时空变化格局。

(2)结合数字高程和气象资料揭示积雪物候对地形和气候变化的响应,以期为农业、生态以及防灾减灾等领域提供大量信息服务。

2 研究区概况

中国境内天山山脉横亘于新疆中部,东西横跨1 700 km,山脊线平均高度位于4 000 m以上^[15]。天山地区属于温带大陆性气候,四季分明且气温变化剧烈^[16],降水呈现不均匀分布,北坡降水多于南坡^[17]。天山作为中亚地区的水塔和重要生态屏障,为其主要河流(锡尔河、伊犁河和塔里木河等)的冰川和积雪融水提供了丰富水源^[18],而独特的地理位置及山脉走向促使冬季降雪丰沛,使其成为新疆三大山系中降雪量最多山区^[19]。中国天山地理位置见图1。

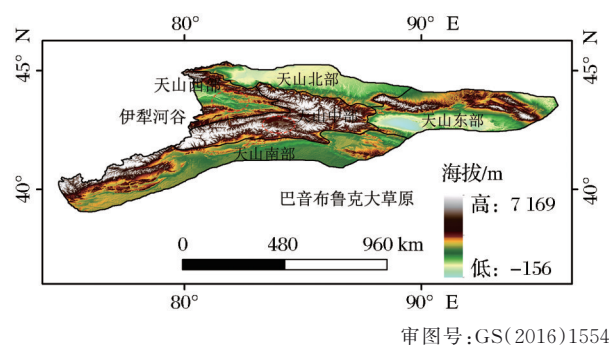


图1 研究区地形图

Fig.1 Topographic map of the study area

3 数据与方法

3.1 数据来源

使用2002年9月1日—2017年8月31日青藏高原MODIS逐日无云积雪面积数据集^[20]。该数据采用拟合预期雪线方法去除全部云污染,从而获得MODIS逐日无云积雪产品^[21]。

数字高程(DEM)数据来自地理空间数据云提供的90 m分辨率的SRTM数据集。本文采用国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdac.ac.cn>)提供的中国1 km分辨率逐月平均气温数据集(1901—2017)^[22-26]与中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2017)^[23-27]。其中逐月平均气温数据单位为0.1℃,逐月降水量数据单位为0.1 mm。对该数据进行投影、格式转换、重采样等预处理工作后,使其与积雪数据相匹配。

3.2 研究方法

基于2002/2003—2016/2017年每个水文年(当年9月1日至次年8月31日)的逐日无云积雪面积产品,采用Wang等^[28]提出的积雪物候参数算法,逐像元计算每个像素的积雪物候参数。本研究将积

雪数据中雪像元(编码为 200)赋值为 1,其他像元赋值为 0,在逐日积雪影像叠加的基础上计算各水文年积雪物候参数。

$$SCD = \sum_{i=1}^n is_snow(i) \quad (1)$$

其中: $is_snow(i)=1$ 表示像素被积雪覆盖; $is_snow(i)=0$ 表示像素没有被积雪覆盖, n 代表水文年内总天数。值得注意的是,SOD可能出现太晚或太早的情况,从而导致时间序列上的中断,因此,大于 365 DOY 的 SOD 被统一归类为下一年,而小于 1 DOY 的 SOD 被统一归类为上一年。

$$SOD = D_1 - SCD_1 \quad (2)$$

其中: D_1 是 1 月 21 日的儒略日,代表天山积雪面积达到最大值的日期; SCD_1 表示该年 9 月 1 日至次年 1 月 21 日期间 SCD。

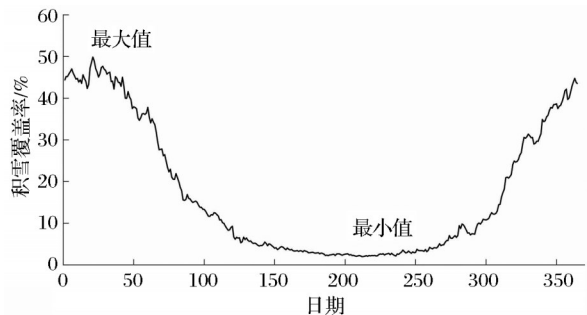
$$SED = D_2 + SCD_2 \quad (3)$$

其中: D_2 是 1 月 22 日的儒略日; SCD_2 表示 1 月 22 日至 8 月 31 日期间 SCD。

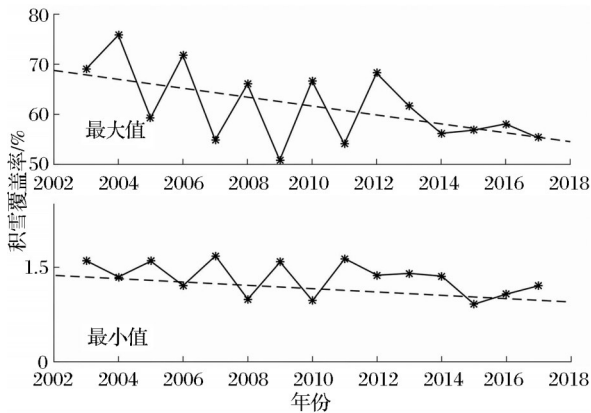
4 结果分析

4.1 积雪覆盖变化分析

图 2(a)显示了天山整体 2002—2017 年平均积



(a) 积雪覆盖率年内变化



(b) 积雪覆盖率年际变化

图 2 积雪覆盖率的变化

Fig.2 The change of snow cover rate in the CTMR

雪覆盖率的年内变化,其年内分布呈单峰型。从时间上看,积雪自 9 月初开始积累,于次年 1 月 21 日积雪覆盖率达到最大值(51.4%)。积雪消融速率在夏季最快,随着积雪的融化逐渐减少,于 8 月积雪覆盖率降到最小值(1.1%),随后逐步上升至 50% 左右。图 2(b)显示天山平均积雪覆盖率最大值和最小值的年际变化趋势,2002—2017 年间积雪覆盖率最大值均位于 50% 以上,最小值波动于 1.5% 左右。从总体变化趋势上看,积雪覆盖率的最高值与最低值均呈下降趋势。为计算天山积雪物候参数,将 1 月 21 日的儒略日设置为固定日 D_1 ,1 月 22 日的儒略日设置为固定日 D_2 。

4.2 积雪物候时空格局

2002—2017 年平均 SCD 的空间分布(图 3(a))中显示 SCD 的空间分布差异较大,天山北部和中部 SCD 较长,而南部区域 SCD 较短。从 SCD 变化趋势(图 3(b))上看,天山中部的巴音布鲁克大草原地区 SCD 年际间变化较大,呈增加趋势,其中表现为显著增加的区域仅占山区面积的 5.71% 左右。天山约 59.6% 的区域 SCD 呈减少趋势,主要分布在天山北部、东部及南部低海拔区域,其中呈显著减少的区域仅占山区面积的 1.63% 左右。整体上看天山 SCD 呈西部高东部低、北部高南部低的分布格局,这种分布格局的形成主要与天山水汽来源和地形分布格局有关。由于自西向东的水汽,遭遇天山高大山体阻隔向上抬升,在西部和北部迎风坡产生大量降水,而南部背风坡以下沉气流为主,降水量较少。另一方面海拔也是影响 SCD 分布的主要因素,随着海拔的改变水热状况发生明显变化,进而对山区的 SCD 分布格局产生重要影响。

根据 SCD 的长短,将研究区分为稳定积雪区与不稳定积雪区,SCD 阈值设置为 60 d,其中不稳定积雪区可继续划分为不稳定(周期)积雪区和不稳定(非周期)积雪区^[29]。两者之间的区别在于不稳定(周期)积雪区($10 < SCD < 60$ d)内基本上每年都有积雪出现,不稳定(非周期)积雪区($SCD < 10$ 天)内积雪随时间变化无规律^[1]。

由表 1 可得天山的不稳定(非周期)积雪区覆盖比例占 17.52% 左右,平均海拔为 1 839 m,处于天山低海拔区域,主要散落分布在天山西南部以及东部地区。不稳定(周期)积雪区总覆盖比例约占 17.63%,平均海拔位于 2 159 m,集中分布在天山南部。天山稳定积雪区的海拔普遍高于不稳定积雪

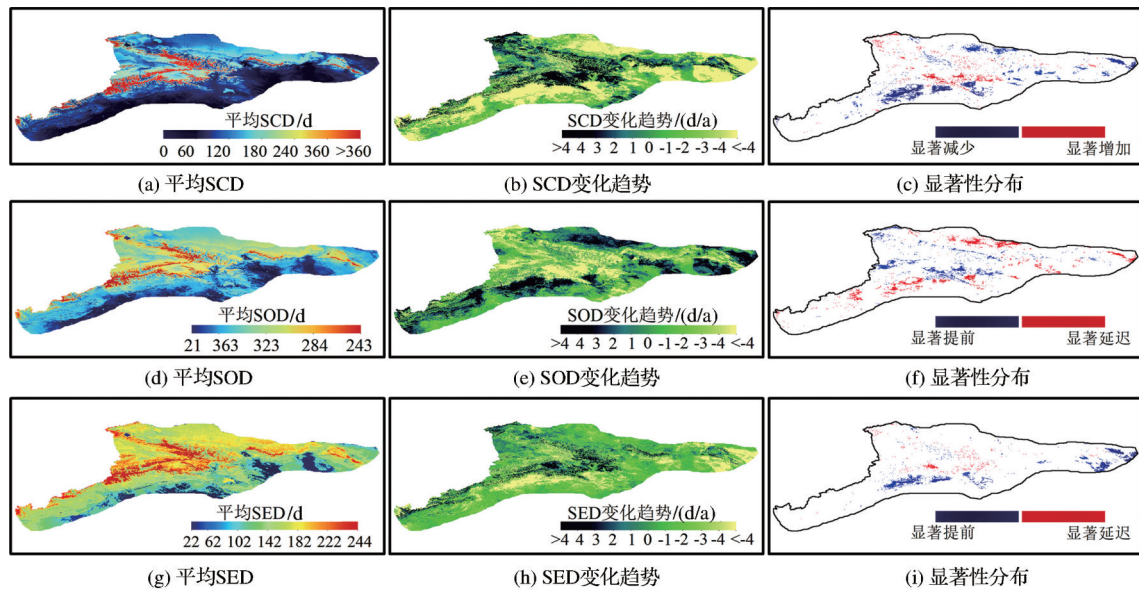


图3 天山积雪物候参数的时空分布、变化趋势及显著性分布

Fig.3 Temporal and spatial distribution, change trend and significance distribution of snow cover phenology parameters in the CTMR

区,稳定积雪区海拔处于2 333—4 555 m范围之间,而不稳定积雪区处于海拔1 839—2 159 m之间。

表1 不同SCD区域的属性、覆盖比例及平均海拔

Tab.1 The property, coverage ratio and average altitude of regions with different SCD in the CTMR

SCD	属性	覆盖比例/%	平均海拔/m
0—10	不稳定(非周期)	17.52	1 839
11—60	不稳定(周期)	17.63	2 159
61—120	稳定	18.49	2 333
121—180	稳定	14.31	2 907
181—240	稳定	10.19	3 454
241—290	稳定	6.81	3 885
291—330	稳定	6.27	4 044
331—365	稳定	8.78	4 555

天山 SOD 的分布呈现明显的空间异质性(图3(d))。具体表现为中部高海拔地区 SOD 较早,海拔 5 000 m 以上山脊线区域最早于 9 月初开始出现积雪,随着海拔逐渐降低,SOD 逐渐推迟,山区内大部分区域 SOD 集中在 9—11 月。南部低海拔区域 SOD 普遍较晚,最晚推迟到次年 1 月下旬左右。从 SOD 变化趋势的空间分布上看,山区内 42.03% 的区域呈提前趋势,主要分布在天山中部和西部地区,其中天山中部巴音布鲁克大草原的提前趋势较为明显,呈显著提前的区域仅占山区面积的 2.65%。山区内 40.67% 的区域呈推迟的趋势,主要集中在南部、北部及东部地区,其中呈显著推迟的区域仅占山区面积的 3.55%,包括北部及南部地区。

天山 SED 在空间上的分布同样具有异质性,天山中部高海拔地区普遍较晚,在 6 月之后开始消融。随着海拔逐渐降低 SED 逐渐提前,最早于 3 月左右开始消融,相较于低海拔区域,整体上高海拔区域的 SED 普遍较晚。从 SED 近 16 a 的变化趋势上看,山区内 8.50% 的区域呈提前趋势,其中呈显著提前的区域占整个山区面积的 3.4%,约 21.38% 的区域没有显著变化趋势。山区内 20.02% 的区域呈推迟趋势,主要分布在天山中部以及高海拔山脊线地区,呈显著推迟趋势的区域仅占山区面积的 0.56% 左右。

4.3 积雪物候对地形异质性的响应

天山积雪物候与海拔密切相关,通过计算 2002/2003—2016/2017 年 SCD、SOD 及 SED 的均值及变化趋势探讨积雪物候参数与海拔之间的响应关系。由于海拔 5 000 m 以上的地区可能受到全年积雪(冰川)的影响,为避免季节性积雪和冰川混合带来的虚假结果,海拔 5 000 m 以上地区被排除在考虑范围之外。

图 4(a) 显示在海拔 5 000 m 以下,随着海拔升高,SCD 增加,SOD 提前,SED 推迟。SCD、SOD 及 SED 随海拔变化的平均梯度分别为 4.93 d/100 m、-1.64 d/100 m 和 2.94 d/100 m。趋势分析结果表明:不同海拔地区的 SCD、SOD 及 SED 对地形变化的响应有所差异。在海拔 1 500 m 以下,SCD 呈现出减少趋势,但在海拔 1 500—4 500 m 之间,SCD

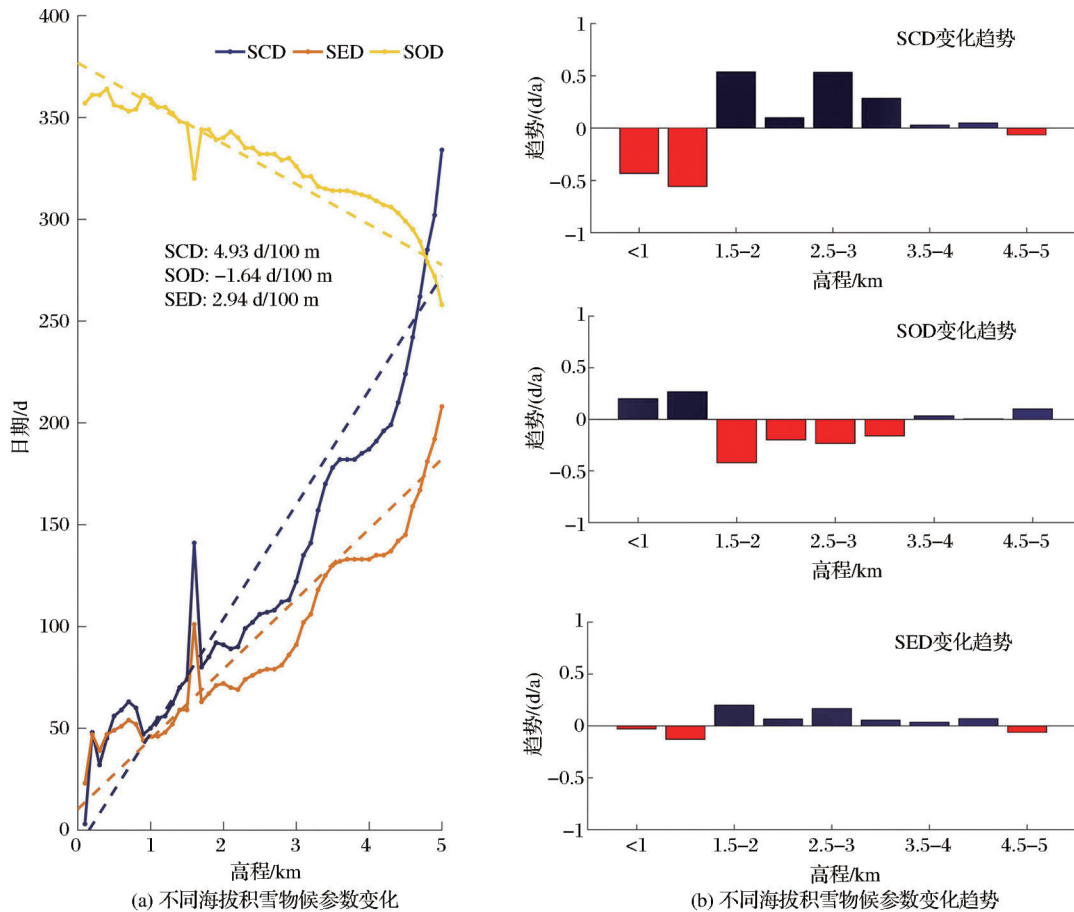


图 4 不同海拔的积雪物候参数变化及趋势

Fig. 4 Changes and trends of snow cover phenology parameters at different altitudes in the CTMR

呈现出增加趋势。SCD 的增加趋势在 2 500—3 000 m 达到最大值,随着海拔的升高 SCD 增加的趋势逐渐缩减。由图可见不同海拔区域的 SCD 变化趋势不同,SCD 在不同海拔区域间的差异可能由于不同的气候作用导致,如 Hüsler 等^[30]指出高海拔地区的积雪对降水的依赖性更强,较低海拔地区的积雪对气温的敏感性更高。SOD 恰与其相反,在 1 500 m 以下呈推迟趋势,在海拔 1 500—3 500 m 之间呈提前趋势,随着海拔的升高 SOD 提前的趋势不断减小。SED 对气候变化的响应与 SCD 基本相似,但相较于 SCD 而言,SED 在 1 500—4 500 m 之间的变化幅度较小,即海拔对 SED 的影响较 SCD 弱。

除海拔因素以外,坡向可以通过改变太阳辐射及水分条件影响积雪物候。为研究坡向对不同海拔带上积雪物候的影响,将天山分为 5 个海拔带:(A:0—1 000 m、B:1 000—2 000 m、C:2 000—3 000 m、D:3 000—4 000 m、E:4 000—5 000 m)。如图 5(a)所示,天山不同海拔带上各坡向间的积雪物候存在较大差异。天山高海拔地区相较于低海拔地区,

SCD 更长、SOD 更早、SED 更晚。就 SOD 而言,各坡向之间区别较小。在海拔 4 000—5 000 m 之间,SOD 最晚,在海拔 5 000 m 以上次之。就 SED 而言,北方向晚于南方向,西方向晚于东方向。整体上天山北坡比南坡有更高的 SCD 值,这与北坡 SOD 相对较早 SED 较晚现象一致。由于南坡接收更多的太阳辐射,积雪融化速率较快,故 SCD 值相对较小。此外,由于西部和西北部斜坡对北风和西北风的冷空气流入开放,且受到来自北大西洋的西风湿气流的影响,大部分降水落在北部区域,形成对积雪积累的有利条件。地形是影响天山积雪物候的关键因素,其中海拔与坡向对天山积雪物候的分布产生重要影响。本研究中处于海拔 5 000 m 以下的 SCD 与海拔具有较强的线性关系,表明 SCD 的变化依赖于山区海拔。高海拔和低海拔的 SCD 对气候变化的响应呈相反现象,具体表现为在海拔 1 500 m 以下,SCD 呈减少趋势,但在海拔 1 500 m 以上,SCD 转变为增加的趋势(图 5(b)),这种差异可能由于高海拔地区的气温上升速率快于低海拔

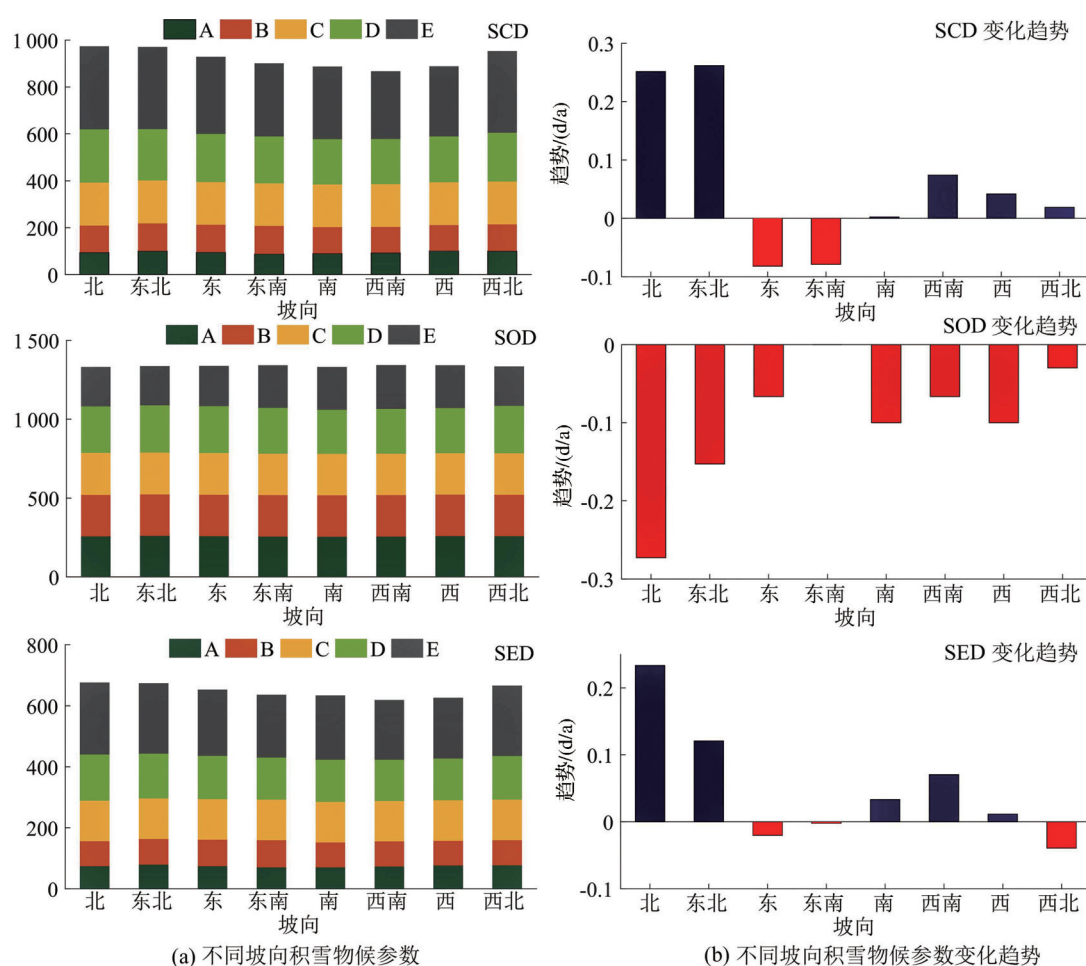


图5 不同坡向的积雪物候变化及趋势

Fig.5 Changes and trends of snow cover phenology at different aspect in the CTMR

地区,此外由于相较于低海拔地区高海拔地区的平均气温较低,故SOD和SED的变化在高海拔和低海拔地区表现不同。

4.4 积雪物候对气候变化的响应

基于1970—2017中国逐月平均气温数据和逐月降水量数据,计算得到天山不同季节气温和降水的空间分布及变化趋势图(图6)。从春季气温的空间分布上来看,天山中部山脊线地区气温较低,北部及南部低海拔区域气温较高,最高值 18.55°C ,最低值 -32.02°C 。秋季气温与春季气温空间分布大体上一致,但秋季气温最高值相较于春季气温最高值偏低。春季降水量高值区分布在西北部迎风坡,天山西部伊犁河谷地区降水量比较充沛,最高值可达 66.84 mm ,而天山南部和天山东部吐鲁番和哈密地区降水量相当稀少,最低达 0.31 mm 。秋季降水量最高值(55.55 mm)相较于春季降水量最高值(66.84 mm)有所下降。总体上看,高海拔地区气温偏低,低海拔地区气温偏高。天山西部和西北部迎

风坡气温普遍较低,全区大部分降水尤其是固体降水(降雪)集中分布于此,这些气候条件对积雪的形成提供了极为有利的条件,从而对积雪物候产生了积极影响。天山中部地区春季气温变化趋势明显,整体上春季气温均呈升高趋势。天山中部及西部迎风坡春季降水增加趋势明显,东部地区春季降水呈减少趋势;而秋季降水量变化趋势的空间分布与春季不同,除天山西北部降水呈明显增加趋势,其他地区均呈减少趋势。

积雪物候与气候变化之间存在密切相关关系,气温和降水是积雪产生—维系—消融过程中的关键因素^[10]。研究不同季节的气温和降水与积雪物候参数之间的关系可以更好地揭示年内气候变化对积雪物候的影响。由于北半球中纬度地区SOD和SED所对应的时间节点多为秋季和春季,研究基于像元尺度求相关系数并结合显著性检验获取了积雪物候参数(SOD与SED)与春秋两季气温和降水量之间的相关关系空间分布(图7)。SOD与秋季

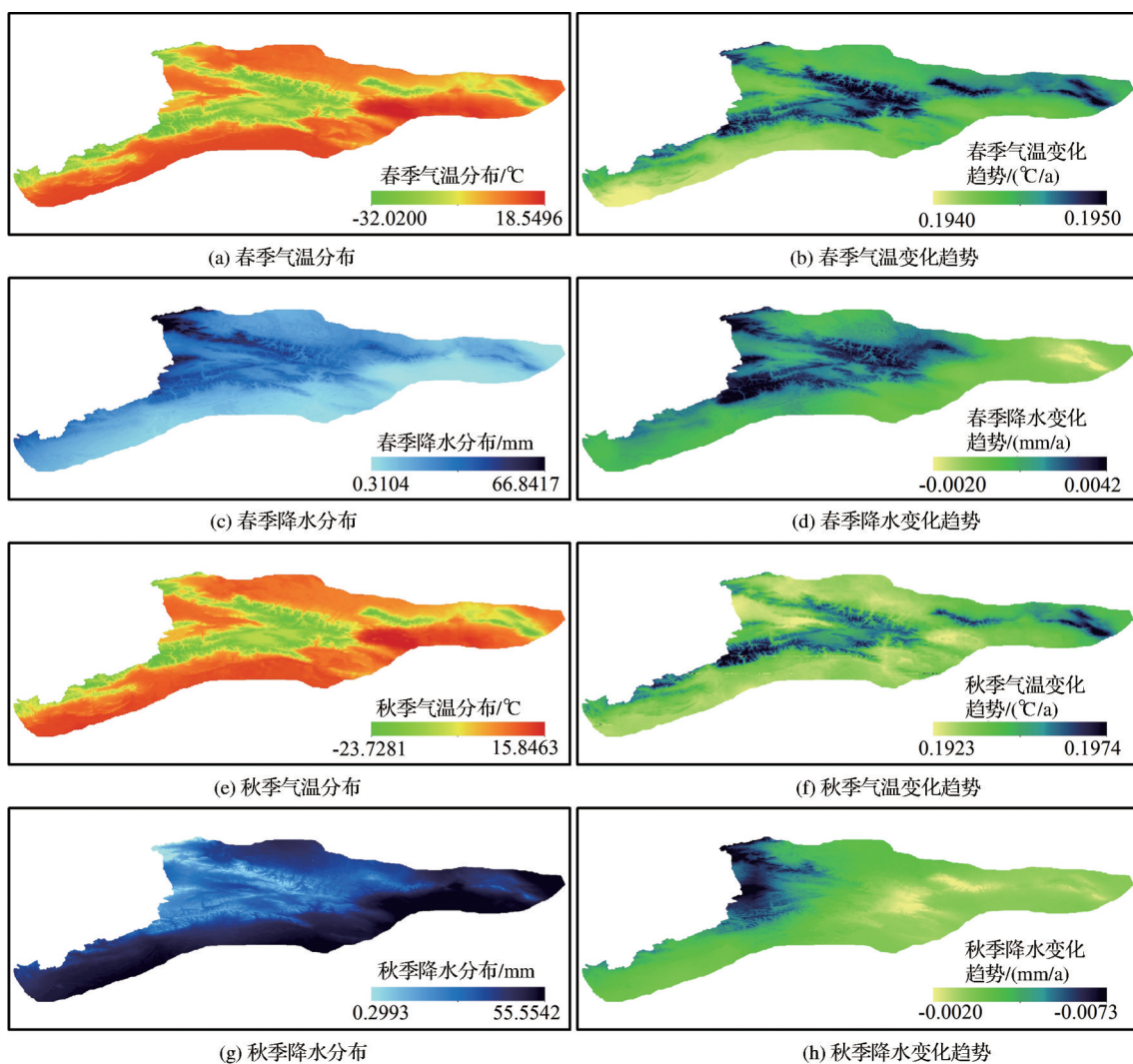


图 6 1970—2017 年天山平均气温和降水空间分布及变化趋势

Fig.6 Spatial distribution and trend of average temperature and precipitation in the CTMR from 1970 to 2017

气温的相关关系具有空间异质性,天山西部和中部 SOD 与气温表现为正相关关系,南部表现为负相关关系(图 7(a))。天山中部及西部伊犁河谷地区呈显著正相关关系,约占整个山区面积的 10.9%,而显著负相关区域极其稀少(0.2%)。SOD 与秋季降水的相关关系同样表现出空间异质性,天山南部呈正相关关系,东部和西部伊犁河谷呈负相关关系(图 7(e))。其中约 7.0% 的区域呈显著负相关关系,仅 1.6% 的区域呈显著正相关关系(图 7(f)),表明降水量的增加有利于 SOD 的提前。根据 SED 与春季气温的相关关系可得,天山北部、西部迎风坡和东部地区呈显著负相关关系,约占整个山区面积的 12.8%(图 7(d)),而显著正相关区域极其稀少(0.7%)。根据 SED 与春季降水的相关关系可得天山中部区域呈正相关关系,东部天池呈负相关关系(图 7(g)),约 3.0% 的区域呈显著负相关关系,

2.3% 的区域呈显著正相关关系(图 7(h))。天山积雪物候的变化是气温和降水综合作用的结果,气温和降水对不同区域的积雪物候影响不同,气温与天山中部、西部伊犁河谷及东部天池区域 SOD 呈显著正相关关系,与同地区 SED 呈显著负相关关系。降水与天山中部 SED 呈显著正相关关系,却与中部地区 SOD 呈显著负相关关系。由此可见,天山中部地区 SOD 和 SED 对气温和降水因素的响应呈相反机制。

5 讨 论

中国天山气候整体增暖显著^[15],气候变暖势必会引起积雪物候的相应变化^[31]。研究基于 2002—2017 年 MODIS 逐日无云积雪产品,结合逐月气温、降水资料以及 DEM 数据对天山积雪物候演变规律进行了探索。中国天山积雪覆盖面积呈减少趋势,

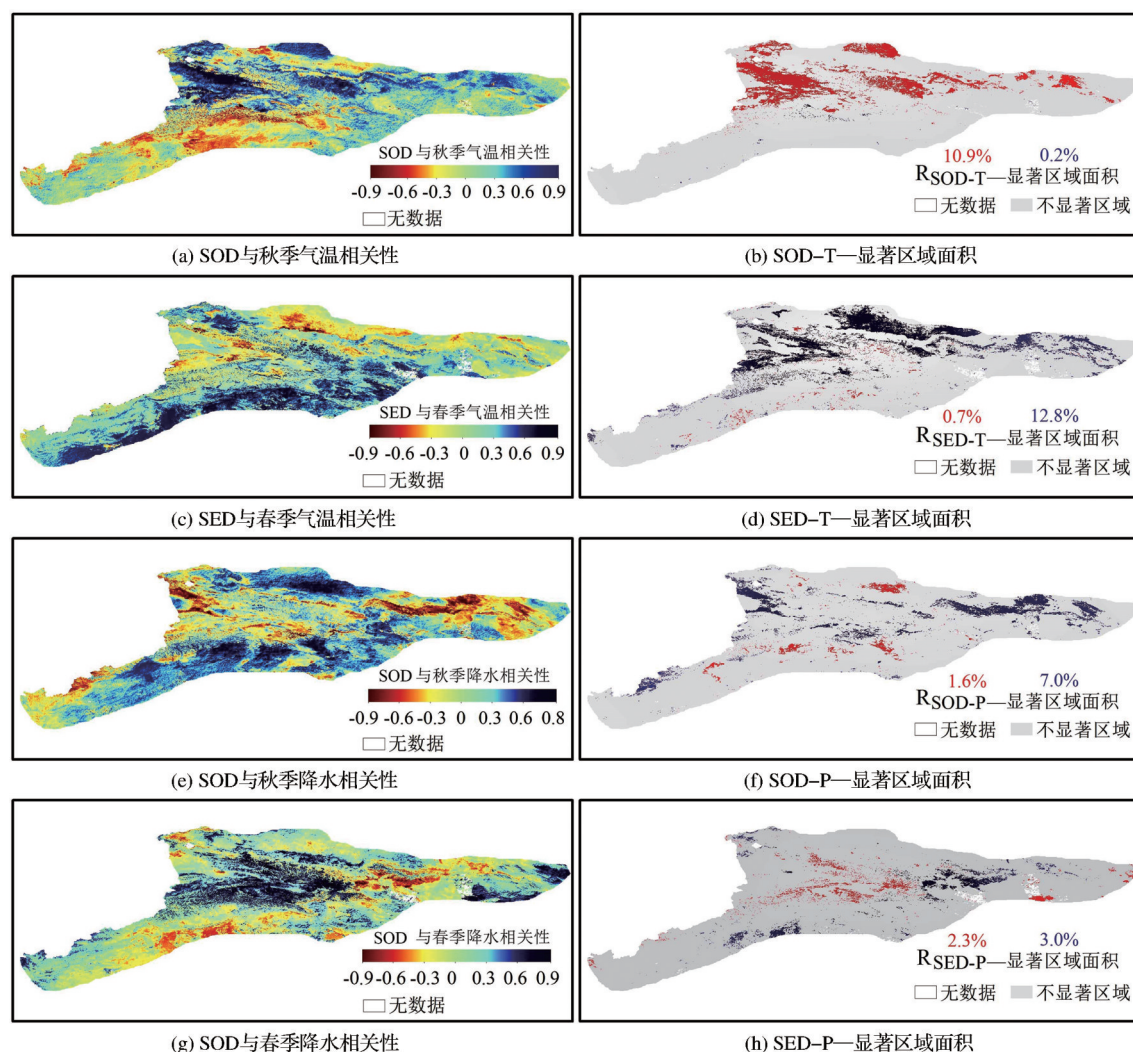


图 7 天山积雪物候参数与气象因素的相关性及显著性面积分布

Fig.7 Correlation and significant area distribution of snow cover phenology parameters and meteorological factors

且年内积雪覆盖历时缩短^[32]。研究结果也表明近 16 a 来中国天山积雪覆盖率呈逐年减少趋势,最大积雪覆盖率递减速度较快,这是因为天山山区升温加速,使得山区积雪的融化速度加快^[33-34]。近 48 a 来中国天山春秋两季平均气温均呈上升趋势,而此气候变暖趋势与降雪逐渐减少的趋势均可对积雪物候产生复杂的影响。Yang 等^[14]利用被动微波遥感数据计算了天山地区 1979—2016 年的积雪深度和积雪物候,结果表明整个天山的 SCD 明显减少,SED 明显提前,且 SED 主导了雪季的变化。考虑到不同时间尺度积雪物候变化特征,本文所得结论与 Yang 等^[14]的研究并不冲突。本研究时间跨度为 2002—2017,结果表明整体上天山积雪物候空间格局呈现较强异质性,SCD 在天山中部巴音布鲁克大草原呈显著增加趋势,在天山南部呈显著减少趋势。SOD 在天山中部巴音布鲁克大草原的提前趋

势较为明显,在北部及南部地区呈显著推迟趋势。这是因为在不同气候条件下积雪物候对气温和降水变化的响应不同^[35]。为检验气象因素对积雪物候的影响,又进一步分析了气温降水与积雪物候参数之间的相关性关系。研究结果表明,秋季气温升高会促使 SOD 推迟,而秋季气温的降低和降水量的增加均有利于积雪的形成,这可能会延长降雪的时间,从而增加积雪持续时间。由此可得天山 SCD 的增加和 SOD 的提前均与秋季降温有关,青藏高原^[36]和中国大陆地区^[37]也呈现相似的现象。此研究虽对天山积雪物候进行了较为详细的分析,但局限于现有积雪产品空间覆盖范围不完整、空间分辨率低及时间序列跨度较低,在统计学上显著性检验结果不佳,不能够完全诠释气候变化对积雪物候的影响,在未来的研究工作中需要更长时间序列积雪产品来探讨积雪物候对气候变化的响应机制。

6 结 论

以中国天山为研究区,基于2002—2017年青藏高原逐日无云积雪面积产品,逐像元计算了天山积雪物候参数SCD、SOD及SED,并采用数字高程和气象资料系统地分析了天山积雪物候时空变化及其对地形变化和气候变化的响应。结论如下:

(1)天山积雪覆盖率呈单峰型分布,在冬季(1月)达到最大值,夏季(8月)达到最小值,就总体变化趋势而言,积雪覆盖率呈逐年减少趋势。

(2)天山积雪物候的空间分布及变化趋势存在异质性。高海拔地区的SOD较早,低海拔地区的SOD较晚,SED与SOD呈相反的空间分布特征,高海拔地区的SED较晚,低海拔地区的SED较早。SCD总体上呈西高东低,北高南低,大致沿山脉走向分布的格局。

(3)天山不同海拔的积雪物候对地形异质性的响应不同。在海拔1 500 m以下和4 500 m以上区域,SCD呈减少趋势,在海拔1 500—4 500 m之间,SCD呈增长趋势。SED和SCD对地形变化的响应机制基本相似,二者之间的区别是海拔对SED的影响较SCD弱。SOD对地形变化的响应机制与其二者呈相反状态。

(4)气温和降水对积雪物候的影响存在差异性。春季气温升高有助于SED提前,秋季气温降低则有助于SOD提前。秋季降水量增加促进SOD推迟,春季降水量增加则促进SED推迟。

参考文献 (References):

- [1] Allchin M I, Déry Stephen J. A spatio-temporal analysis of trends in Northern Hemisphere snow-dominated area and duration, 1971–2014[J]. *Annals of Glaciology*, 2017, 58(75pt1): 21–35. DOI:10.1017/aog.2017.47.
- [2] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impact of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303–309.
- [3] Huss M, Bookhagen B, Huggel C, *et al.* Toward mountains without permanent snow and ice[J]. *Earth's Future*, 2017, 5(5): 418–435.
- [4] Bormann K J, Brown R D, Derksen C, *et al.* Estimating snow-cover trends from space[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8:924–928. DOI:10.1038/s41558-018-0318-3.
- [5] Bulygina O N, Groisman P Y, Razuvaev, *et al.* Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966[J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6: 045204. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045204.
- [6] Choi G, Robinson D A, Kang S. Changing Northern Hemisphere Snow Seasons[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(19): 5305–5310.
- [7] 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.
- [8] Chen X, Liang S, Cao Y, *et al.* Observed contrast changes in snow cover phenology in northern middle and high latitudes from 2001–2014[J]. *Scientific report*, 2015, 5(1):16820. DOI: 10.1038/s41558-018-0318-3.
- [9] Chen X, Liang S, Cao Y. Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(8): 084002. DOI: 10.1088/1748-9326/11/8/084002.
- [10] Wang Xiaoyue, Wang Siyuan, Yi Hang, *et al.* Snow phenology variability in the Qinghai-Tibetan Plateau and its response to climate change during 2002–2012[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(11):1573–1579.[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.]
- [11] 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): 14645. DOI:10.1038/s41598-017-15208-9.
- [12] Qiao Dejing, Wang Nianqin, Li Zhen, *et al.* Spatial-temporal changes of snow phenology in the Qinhai-Tibetan Plateau during the hydrological year of 1980–2009 [J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(2): 137–143.[乔德京, 王念秦, 李震, 等. 1980–2009水文年青藏高原积雪物候时空变化遥感分析[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(2): 137–143.]
- [13] Tang Z, Wang X, Wang J, *et al.* Spatiotemporal variation of snow cover in Tianshan Mountains, Central Asia, based on cloud-free MODIS fractional snow cover product, 2001–2015 [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10):1045. DOI:10.3390/re 9101045.
- [14] Yang T, Li Q, Ahmad S, *et al.* Changes in snow phenology from 1979 to 2016 over the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 499. DOI: 10.3390/rs 11050499.
- [15] Li Xuemei, Gao Pei, Li Qian, *et al.* Multi-paths impact from climate change on snow cover in Tianshan Mountainous Area of China[J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(4):303–312.[李雪梅, 高培, 李倩, 等. 中国天山积雪对气候变化响应的多途径分析[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(4):303–312.]
- [16] Qin Yan, Ding Jianli, Zhao Qiudong, *et al.* Spatial-temporal variation of snow cover in the Tianshan Mountains from 2001 to 2015, and its relation to temperature and precipitation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 249–260.[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气温和降水的关系[J]. *冰川冻土*, 2018,

- 40(2): 249-260.]
- [17] Ren Rui, Li Xuemei, Li lanhai, *et al.* Discrimination of driving factors of precipitation forms in Tianshan Mountains area of China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(3): 112-117.[任瑞, 李雪梅, 李兰海, 等. 中国天山山区降水形态转变的驱动因子辨析[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(3): 112-117.]
- [18] Chen Y, Li W, Deng H, *et al.* Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 35458. DOI:10.1038/srep35458.
- [19] Zhao Wenyu, Liu Hailong, Wang Hui, *et al.* A study of spatial distribution of snow cover days in the Tianshan Mountains based on MODIS snow products[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(6): 1510-1517.[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.]
- [20] Qiu Yubao, Guo Huadong, Chu Duo, *et al.* MODIS daily cloud-free snow cover product over the Tibetan Plateau[EB/OL]. V2. 2016. 2016-03-03. DOI: 10.11922/sciencedb.55; <http://www.doi.org/10.11922/sciencedb.55>.[邱玉宝, 郭华东, 陈多, 等. 青藏高原MODIS逐日无云积雪面积数据集[EB/OL]. V2. 2016. 2016-03-03. DOI: 10.11922/sciencedb.55; <http://www.doi.org/10.11922/sciencedb.55>.]
- [21] Qiu Yubao, Guo Huadong, Chu Duo, *et al.* MODIS daily cloud-free snow cover product over the Tibetan Plateau[EB/OL]. *China Scientific Data*, 2016(1): 7-17.[邱玉宝, 郭华东, 陈多, 等. 青藏高原MODIS逐日无云积雪面积数据集(2002-2015年)[EB/OL]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2016(1): 7-17.]
- [22] Peng Shouzhong. (2019). 1-km monthly mean temperature dataset for china(1901-2017)[EB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, DOI: 10.11888/Meteoro.tpd. 270961. CSTR: 18406.11.Meteoro.tpd.27096.[彭守璋 (2019). 中国1km分辨率逐月平均气温数据集(1901-2017)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, DOI: 10.11888/Meteoro.tpd. 270961. CSTR: 18406.11.Meteoro.tpd.270961.]
- [23] Peng S Z, Gang C, Cao Y, *et al.* Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100[J]. *International Journal of Climatology A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018. 38(5): 2250-2264.
- [24] Peng S Z, Ding Y X, Liu W, *et al.* 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [25] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z, *et al.* Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011 - 2100[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233(Complete): 183-194.
- [26] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901-2100 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(2): 477. DOI:10.3390/su12020477.
- [27] Peng Shouzhong. (2020). 1-km monthly precipitation dataset for China (1901-2017) [EB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, DOI: 10.5281/zenodo.3185722.[彭守璋. (2020). 中国1km分辨率逐月降水量数据集(1901-2017) [EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, DOI: 10.5281/zenodo.3185722.]
- [28] Wang X, Xie H. New methods for studying the spatiotemporal variation of snow cover based on combination products of MODIS Terra and Aqua[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 371(1-4): 192-200.
- [29] 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.]
- [30] Hüsler F, Jonas T, Riffler, *et al.* A satellite-based snow cover climatology (1985-2011) for the European Alps derived from AVHRR data[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8: 73-90. DOI: 10.5194/tc-8-73-2014.
- [31] Peng S S, Piao S L, 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(014008): 1-8. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014008.
- [32] Deng Haijun, Chen Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of Central Asia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1309-1323.[邓海军, 陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1309-1323.]
- [33] Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, *et al.* Impact climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 18-26.[陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 18-26.]
- [34] Chen Y N, Li W D, Deng H J, *et al.* Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35458. DOI:10.1038/srep35458.
- [35] Li Y P, Chen Y N, Li Z. Climate and topographic controls on snow phenology dynamics in the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2019, 236: 104813. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104813.
- [36] Chen X N, Long D, Hong Y, *et al.* Climatology of snow phenology over the Tibetan Plateau for the period 2001-2014 using multisource data[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(6): 2718-2729.
- [37] Chen X, Liang S, Cao Y, *et al.* Distribution, attribution, and radiative forcing of snow cover changes over China from 1982 to 2013[J]. *Climatic Change*, 2016, 137(3-4): 363-377.

Evolution and Driving Factors of Snow Phenology in the Chinese Tianshan Mountainous Region

Zhang Bo^{1,2,3}, Li Xuemei^{1,2,3}, Qin Qiyong^{1,2,3}

(1. *Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;*

2. *Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;*

3. *National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: Due to the lack of studies on phenological evolution and driving factors of snow cover in the Chinese Tianshan Mountainous Region (CTMR), this study calculated the number of Snow Cover Days (SCD), Snow Onset Date (SOD) and Snow End Date (SED) in the CTMR in each hydrological year on a pixel-by-pixel basis based on the daily cloud-free snow area products of MODIS from 2002 to 2017. Then combined the temperature and precipitation data to analyze the temporal and spatial characteristics of snow phenology and its response to topography and climate change. The results were followed: The spatial distribution of snow phenology in the CTMR was different. SCD presented a distribution pattern of high in the west and low in the east, high in the north and low in the south. In high-altitude areas, SOD was earlier and SED was later. SOD in the central and western regions showed an advance trend, in which the advance trend in Bayinbulak prairie was obvious. The delayed SOD happened in southwest slope, north slope and eastern region. And the delayed SED occurred in the middle and ridgeline areas. Below 5 000 m asl, the average gradients of SCD, SOD and SED with altitude were 4.93 d/100 m, -1.64 d/100 m and 2.94 d-1.64 d/100 m, respectively. The growth trend of SCD reached the maximum at 2 500-3 000 m, and that of SED gradually decreased with the increase of altitude. The response of SED to topographic change was similar to that of SCD, but the impact of altitude on SED was weaker than that of SCD. The warming and wetting in autumn were the main reason for the postponement of SOD in the CTMR. And the warming in spring can promote the advance of SED, while wetting in spring can contribute to the postponement of SED. This study can effectively monitor the SOD and SED, reveal the climate change, and provide significant information support for the prediction of river runoff and the early warning of natural disasters such as flood and debris flow.

Key words: Snow Phenology; Topography; Climate Change; Chinese Tianshan Mountainous Region