

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0092

TANG Zhiguang, DENG Gang, HU Guojie, et al. Spatiotemporal dynamics of snow phenology in the High Mountain Asia and its response to climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5):1400–1411. [唐志光, 邓刚, 胡国杰, 等. 亚洲高山区积雪物候时空动态及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5):1400–1411.]

亚洲高山区积雪物候时空动态及其对气候变化的响应

唐志光^{1,2}, 邓刚^{1,2}, 胡国杰³, 王欣^{2,3}, 蒋宗立², 桑国庆^{1,2}

(1. 湖南科技大学 测绘遥感信息工程湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以亚洲高山区为研究区, 在对2000—2020年逐日MODIS积雪产品进行去云处理的基础上提取了每一水文年的积雪日数(snow-covered days, SCD)、积雪开始日期(snow onset date, SOD)、积雪结束日期(snow end date, SED)和积雪持续日数(snow duration days, SDD)等积雪物候参数, 并分析了积雪物候时空动态特征及其与气候变化的响应关系。结果表明: 亚洲高山区积雪物候空间差异较大, 并呈现出主要受海拔影响的垂直地带性分布规律。研究区SED主要集中在3—6月, 在低海拔区SED出现在3月份及以前, 而高海拔山区则推迟到6月份及以后; SOD主要集中在9—12月, 高海拔山脉及高纬度地区的SOD出现较早, 而低海拔区的SOD多出现在11月及以后。近20年, 研究区SDD主要呈缩短趋势, 在13.5%的区域呈显著缩短, 而仅7.4%的区域为显著延长; SED主要呈提前趋势, 在15.8%的区域显著提前, 而仅8.8%的区域为显著推迟; SOD主要呈推迟趋势, 在11.4%的区域表现为显著推迟, 在8.2%的区域为显著提前。亚洲高山区积雪物候年际变化对气候变化的响应关系明显, 积雪累积期气温是影响SOD年际变化的主导因子, 而融雪期气温是影响SED年际变化的主导因子; 气温的上升, 导致了SOD的推迟、SED的提前和SDD的缩短。

关键词: 亚洲高山区; 积雪; 积雪物候; MODIS; 气候变化

中图分类号: P468.0*25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1400-12

0 引言

积雪是冰冻圈的重要组成要素, 是地球表层上地域分布最广泛、季节变化最明显、对气候异常变化最敏感的覆盖物^[1]。在气候变化研究中, 积雪的季节变化能导致地表反照率变化, 进而引起地气能量收支平衡和区域水平热力差异。在全球水循环过程中, 积雪的积累和消融过程起到水的年内再分配作用, 是干旱半干旱地区春季最重要的淡水资源^[2]。积雪影响着地球陆地上中高纬度地带和高海拔地区的生态地理环境, 关系着农牧业生产、生态系统和社会经济的发展。

亚洲高山区(又称高海拔亚洲)是地球上除南

北两极之外的第三大冰冻圈, 被称为地球的第三极, 是全球气候变化研究的热点区, 也被称为“亚洲水塔”^[3], 是诸多大江大河的发源地, 也是“一带一路”的核心区。在全球气候变暖背景下, 亚洲高山区的冰冻圈(冰川、积雪等)正经历着快速的变化, 但这种变化及其对全球变化的响应在不同时空尺度表现出明显差异^[2,4-12]。亚洲高山区冰冻圈的变化将引发水资源减少、极端天气事件增多、灾害频发等生态和环境问题, 深刻影响相关国家和地区的经济社会可持续发展, 已受到各国的广泛关注^[7,13-14]。亚洲高山区积雪的时空变化是全球气候变化的敏感指示器, 同时也影响着全球气候变化。

收稿日期: 2021-06-26; 修订日期: 2021-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871058); 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SK LCS-OP-2020-08); 湖南省教育厅科研项目(20B227)资助

作者简介: 唐志光, 副教授, 主要从事冰冻圈遥感研究. E-mail: tangzhg11@hnust.edu.cn

开展亚洲高山区积雪变化的时空差异性研究,可为全球气候变化研究、区域水资源的管理和经济社会可持续发展等提供科学依据。

冰冻圈遥感技术最大的优势在于获取大范围冰冻圈要素的时空分布信息,已成为“三极”大科学计划的重要技术手段^[15-16]。近年来,不少学者利用遥感技术的优势,分析了不同时空尺度下的积雪变化特征,主要包括积雪范围、雪深以及积雪物候的变化。积雪物候信息是衡量积雪变化特征的重要指标,是寒区水文模型中融雪径流模拟的重要参数,能为干旱区河川径流预测提供重要数据支撑。同时积雪物候变化对陆地生态系统产生重要影响,尤其是显著影响着高寒植被的物候期^[17-18]。Peng等^[19]发现 1980—2006 年欧亚大陆大部分气象站的积雪结束日期提前,开始日期推后,积雪持续时间降低,并且这些变化与气温升高密切相关。Ke等^[20]和 Ma^[21]分别采用 1952—2010 年和 1970—2014 年的中国气象台站数据,得出了中国的积雪物候总体上呈现结束日期提前,开始日期推后的结论。汪箫悦等^[22]采用 MODIS 积雪产品分析了 2002—2012 年青藏高原积雪物候的时空变化特征,发现 18.1% 的地区积雪开始期明显提前(推迟占 8.5%),23.2% 的地区积雪结束期明显推迟(提前占 6.9%)。乔德京

等^[23]利用 1980—2009 水文年的被动微波遥感雪深数据从 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪初三个时间段分别分析了青藏高原积雪物候变化特征和异常分布。

本文基于 2000—2020 年的逐日 MODIS 积雪产品,在对其进行去云处理的基础上提取了亚洲高山区每一水文年的积雪物候参数(积雪日数、积雪开始日期、积雪结束日期和积雪持续日数)。并对研究区积雪物候变化的时空差异及其对气温、降水变化的响应关系进行了分析。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

亚洲高山区(High Mountain Asia)位于亚洲中部(25°~51° N、65°~105° E),是以青藏高原为核心的亚洲高海拔区域,由各大山脉(阿尔泰山、天山、希萨尔—阿莱山、昆仑山、祁连山、横断山和喜马拉雅山等)及周边高原区组成^[6](图 1)。该地区地形和气候模式复杂,拥有多种不同类型的独特地貌和生态系统。作为地球上除两极之外最大的冰雪资源分布区,亚洲高山区是许多国际性大江大河的发源地,也被称为“亚洲水塔”,其冰雪变化关系着该地区及周边区域的生活和灌溉用水,是生态环境变化

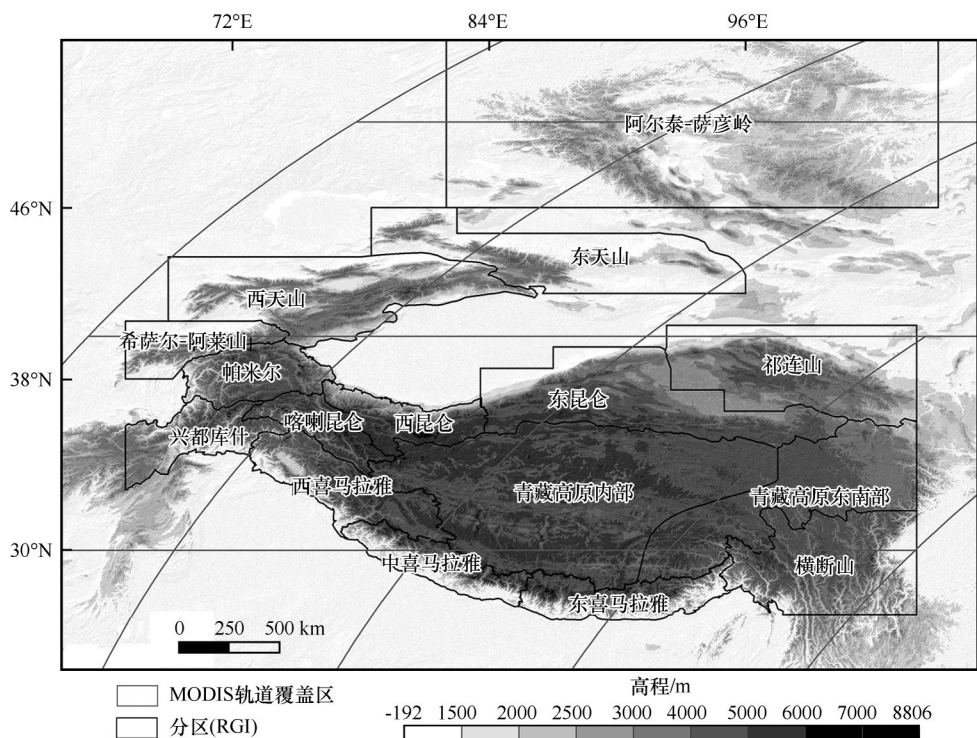


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Sketch map of the study area

中的关键环节^[24-26]。本研究以亚洲高山区(海拔大于1 500 m的区域)作为研究区,总面积约为5.14×10⁶ km²,并按照全球冰川编目(Randolph Glacier Inventory, RGI 6.0^[27])的分区开展区域性差异研究(图1)。

1.2 数据源及预处理

1.2.1 MODIS 积雪数据及去云处理

MODIS 积雪产品(MOD10A1, V006版)来源于美国冰雪数据中心(<https://nsidc.org/data/MOD10A1/>),空间分辨率为500 m,时间分辨率为1 d,文件格式为HDF,投影方式为正弦曲线投影(sinusoidal projection)。V006版积雪产品较V005版具有质量和精度的提升,并采用归一化积雪指数(Normalized Snow Index, NDSI)代替了V005版的积雪覆盖率(Fractional_Snow_Cover)。利用MRT工具(MODIS Reprojection Tools)^[28]对研究区2000—2020年的逐日积雪产品进行预处理,主要包括:影像拼接、投影转换、数据裁剪、格式转换等;转换后投影为Geographic Lat/Lon,输出格式为GeoTIFF。并对极少数缺失数据采用其最邻近日的数据进行替代。

云的存在极大地限制了MODIS积雪产品的积雪监测效果。不少学者基于MODIS二值(雪或非雪)积雪产品开展去云研究,主要方法包括:Terra和Aqua(上下午星)产品融合^[29-31],临近日数合成^[31-33],临近像元空间插值^[29,31,34],雪线高度去云^[30-31,35],融合被动微波雪深^[35-36]或者其他光学遥感数据^[37],以及基于时空建模技术去云^[38-40]等。积雪覆盖率产品相对于二值积雪产品更能有效的反映像元内积雪覆盖的渐变(累积/消退)特征,Tang等^[40-42]发展了适用于积雪覆盖率产品的三次样条函数插值去云算法。本研究采用三次样条函数插值去云算法对MODIS NDSI产品进行去云处理,最终得到2000—2020年亚洲高山区逐日无云的MODIS NDSI数据集。

1.2.2 ERA5 气候再分析资料

ERA5数据是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的全球气候第五代大气再分析资料,涵盖了从1979年1月1日到接近实时的时间段,且与其他气候再分析资料相比在青藏高原地区具有更好的适用性^[43-46]。本文利用ERA5逐月数据集“ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to

present”(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset&text=ERA5>,空间分辨率为25 km)来提取2000—2020年亚洲高山区的月降水量和月平均气温,以探究积雪物候与气候因素之间的相关性。

1.2.3 其他数据

SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数字高程数据(Digital Elevation Model, DEM)用于积雪物候的空间分布特征分析。目前,SRTM V4 DEM空间分辨率为90 m,以WGS84地理坐标系为基准,可直接在线获得(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)。为了在分析过程与MODIS积雪数据的空间分辨率保持一致,将DEM数据重采样成500 m分辨率。

2 研究方法

2.1 去云算法精度评价

本文采用“云假设”的精度验证方法^[40-41],对三次样条函数插值法得到的云覆盖下的NDSI精度进行验证。首先选取研究区2020年云覆盖较少的4日(第238、261、289和315 d)的MODIS NDSI数据作为“真值”影像,影像中晴空条件下所有像元的NDSI值即为“真实值”;然后假设这4幅“真值”影像完全被云覆盖(即影像像元值为250),并利用去云算法对“云假设”后的影像进行去云处理,得到相应的无云NDSI(即“计算值”)和云持续日数(即为云覆盖像元最邻近的前后两次无云覆盖之间所持续的日数);最后将“计算值”与“真值”进行对比,统计不同云持续时间条件下的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE),计算公式如下:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |c_i - s_i|}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - s_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中: n 为所有参与比较的像元个数; c_i 为MODIS产品的NDSI值(“计算值”); s_i 为对应的MODIS NDSI“真值”。

2.2 积雪物候参数提取

本文提取的积雪物候参数包括积雪日数(snow-covered days, SCD)、积雪开始日期(snow onset date, SOD)、积雪结束日期(snow end date, SED)和积雪持续日数(snow duration days, SDD),其具体定义与提取方法如下。

积雪日数(SCD):一个水文年内观测到的积雪

覆盖日数之和;

积雪开始日期(SOD): 查找一个水文年内首次出现连续5天为积雪覆盖的事件, 若存在, 则取这5天中第一天的日期为SOD;

积雪结束日期(SED): 查找一个水文年内最后出现连续5天为积雪覆盖的事件, 若存在, 则取这5天中最后一天的日期为SED;

积雪持续日数(SDD): 从积雪开始日期到积雪结束日期的持续日数, 即两者的差值。

原MODIS V005版的二值积雪产品以NDSI阈值0.40作为积雪判识条件, 但已有研究^[47-50]表明该阈值在青藏高原地区的积雪判识中存在较大误差, 并证明了NDSI阈值0.29更适合于青藏高原地区的积雪制图^[47]。因此, 本研究在积雪物候参数的提取过程中, 将NDSI ≥ 0.29 的像元视为积雪像元, 水文年定义为当年9月1日至次年8月31日。为了便于分析积雪物候参数的变化特征, 若SOD和SED出现在水文年中的第一个自然年, SOD和SED值以儒略日计数; 若SOD和SED出现在该水文年中的第二个自然年内, 其值的计算则以儒略日+365(或366)计数, 单位记为day of year (DOY)。例如SOD等于365、370, 分别代表积雪开始日期出现在第一个自然年的12月31日、第二个自然年的1月5日。

2.3 趋势分析法

采用Sen's斜率估计法计算亚洲高山区近20年的积雪物候参数的变化趋势, 并结合Mann-Kendall检验方法对变化趋势进行显著性检验。Sen's斜率估计是一种广泛应用于气象学和水文学中的非参数统计检验方法, 其优点在于可以处理非正态分布的数据, 用它代替线性回归, 是因为它限制了离群值对斜率的影响^[51-52]。Sen's斜率 β 的计算公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (3)$$

式中: Median为取中值函数; β 为时间序列的趋势斜率。当 $\beta > 0$ 时, 序列呈上升趋势; 当 $\beta = 0$ 时, 序列趋势不明显; 当 $\beta < 0$ 时, 序列呈下降趋势。

Mann-Kendall检验是一种单调趋势的非参数方法, 已广泛应用于检测时间序列的趋势^[53-55]。时间趋势的统计显著性由Z值来假设, 当 $|Z| \geq 1.28$ 、1.64、2.32时, 分别通过了置信度为90%、95%、99%的显著性检验。对于时间序列变量 x_1, x_2, \dots, x_n, n 为

时间序列长度, 定义检验统计量S:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

其中, sgn为符号函数

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: 当 $n \geq 10$ 时, 统计量S近似服从正态分布。将S标准化得到Z, 利用统计检验值Z进行显著性检验, 计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

3 结果分析

3.1 去云算法精度分析

统计2020年逐日MODIS NDSI原始影像中云覆盖像元的云持续时间, 得到研究区云覆盖像元按照云持续时间的频率分布图[图2(a)], 可以看出, 随着云持续时间的增加, 研究区云覆盖像元出现的频率逐渐降低, 云持续时间在5d内的云覆盖像元频率可达63.7%。图2(b)为去云算法在不同云持续时间条件下的MAE和RMSE分布。去云算法的MAE和RMSE随着云持续时间的增加而增加, 即云覆盖像元的云持续时间越短, 去云精度越高。以云覆盖像元随云持续日数的分布频率为权重, 得到NDSI去云算法的总体MAE和RMSE分别为0.041和0.108。可见, 本文的基于三次样条函数插值的NDSI去云算法具有较高的精度。

3.1 积雪范围年内变化

图3为近20年研究区积雪范围的平均年内波动特征(S1~S7七个子区域是根据亚洲高山区地形地貌的相似性和复杂程度, 由16个RGI分区进行邻域合并而来)。可以看出, 研究区积雪范围季节变化显著, 有着明显的积雪累积期和融雪期。从整个研究区来看[图3(a)], 积雪从9月开始积累, 直至次年1月中旬积雪范围达到峰值(45.5%); 随后积雪开始融化, 至8月份积雪范围达到谷值(3.0%); 此外, 较大的标准差分布表明积雪范围年际波动较大。

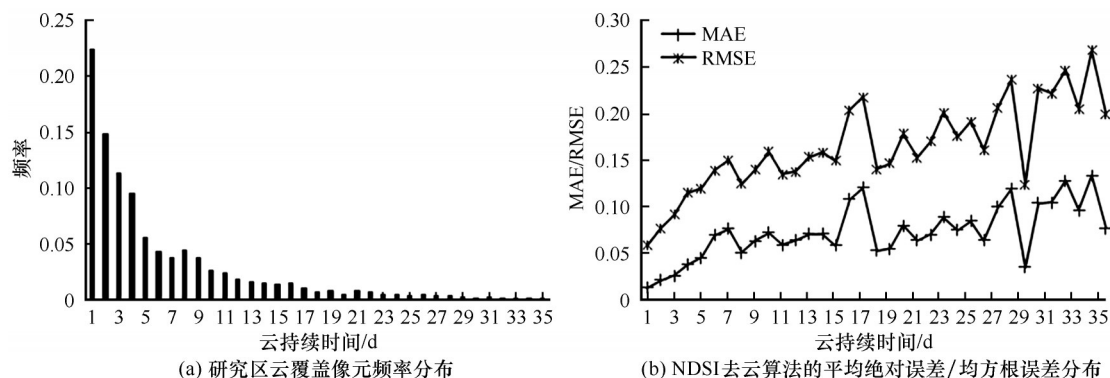
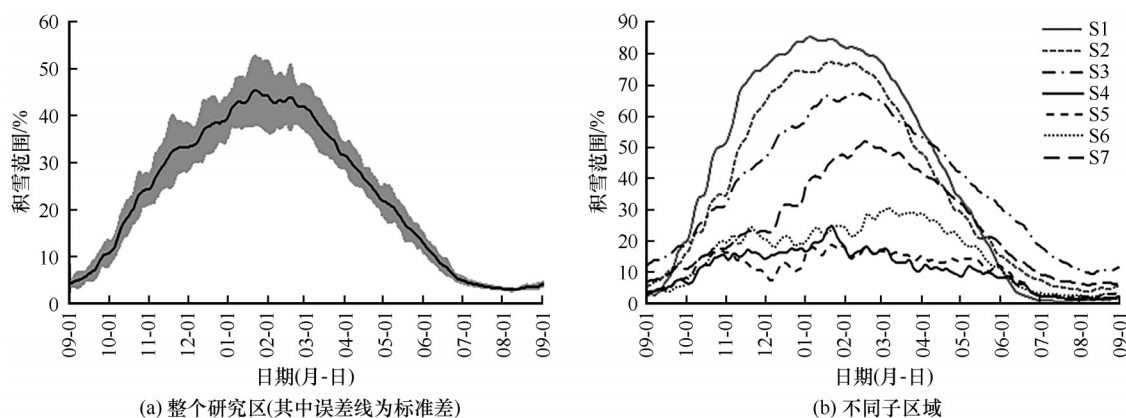


图2 去云算法精度检验

Fig. 2 Accuracy verification of cloud removal methodology



S1: 阿尔泰—萨彦岭; S2: 天山/希萨尔—阿莱山; S3: 帕米尔/兴都库什/喀喇昆仑/西昆仑;
S4: 东昆仑/祁连山; S5: 青藏高原内部; S6: 青藏高原东南部/横断山; S7: 喜马拉雅山脉

图3 积雪范围水文年内变化

Fig. 3 The annual cycle of snow cover extent during a hydrological year

从图3(b)可以看出,不同子区域积雪范围的年内波动差异明显。其中,高纬度的阿尔泰—萨彦岭(S1)、天山/希萨尔—阿莱山(S2),积雪范围峰值明显高于其他子区域,且在融雪期4月至6月的积雪范围下降较快;较高纬度的帕米尔/兴都库什/喀喇昆仑/西昆仑(S3)和高海拔的喜马拉雅山脉(S7)年内积雪范围也均处于较高水平;而东昆仑/祁连山(S4)、青藏高原内部(S5)和青藏高原东南部/横断山(S6),年内的积雪范围较低。此外不同区域的积雪范围峰值出现的时间表现出明显差异。

3.2 积雪物候空间分布

积雪日数(SCD)大于60 d的地区被认为是稳定积雪区,也是雪水资源的主要来源地^[56]。研究区的稳定积雪区主要分布在天山、喀喇昆仑山、昆仑山、祁连山、喜马拉雅山以及横断山等高海拔山脉,以及高纬度的阿尔泰—萨彦岭[图4(a)],占研究区总面积的44.7%;其中,SCD在120 d以上的区域占研究区总面积的28.0%。此外,SCD低值区(SCD<

20 d,占30.7%)主要分布在青藏高原周边的低海拔区以及高原内部区域。青藏高原内部地区主要是由于受到四周高山地形的阻挡,水汽输入量少,因而降雪很少。

研究区积雪开始日期(SOD)、积雪结束日期(SED)和积雪持续日数(SDD)也体现出较强的空间差异性[图4(b)~4(d)]。整体上,SOD主要集中在9—12月,SED主要集中在3—6月,SDD与SCD在数值上虽有所差异,但两者呈现出极其相似的空间分布格局。在天山、喀喇昆仑山、西昆仑、喜马拉雅山脉和横断山等高海拔山脉以及高纬度的阿尔泰—萨彦岭,SOD普遍较早,9月初就开始出现积雪;在空间分布上,SOD有着明显的海拔梯度,海拔越低,SOD越晚(图5);低海拔区的SOD多出现在11月及以后。从SED的空间分布来看,在低海拔区SED出现在3月份及以前;SED同样呈现出主要受海拔影响的垂直地带性分布规律,海拔越高,SED越晚(图5);高海拔山区则推迟到6月份及以后。

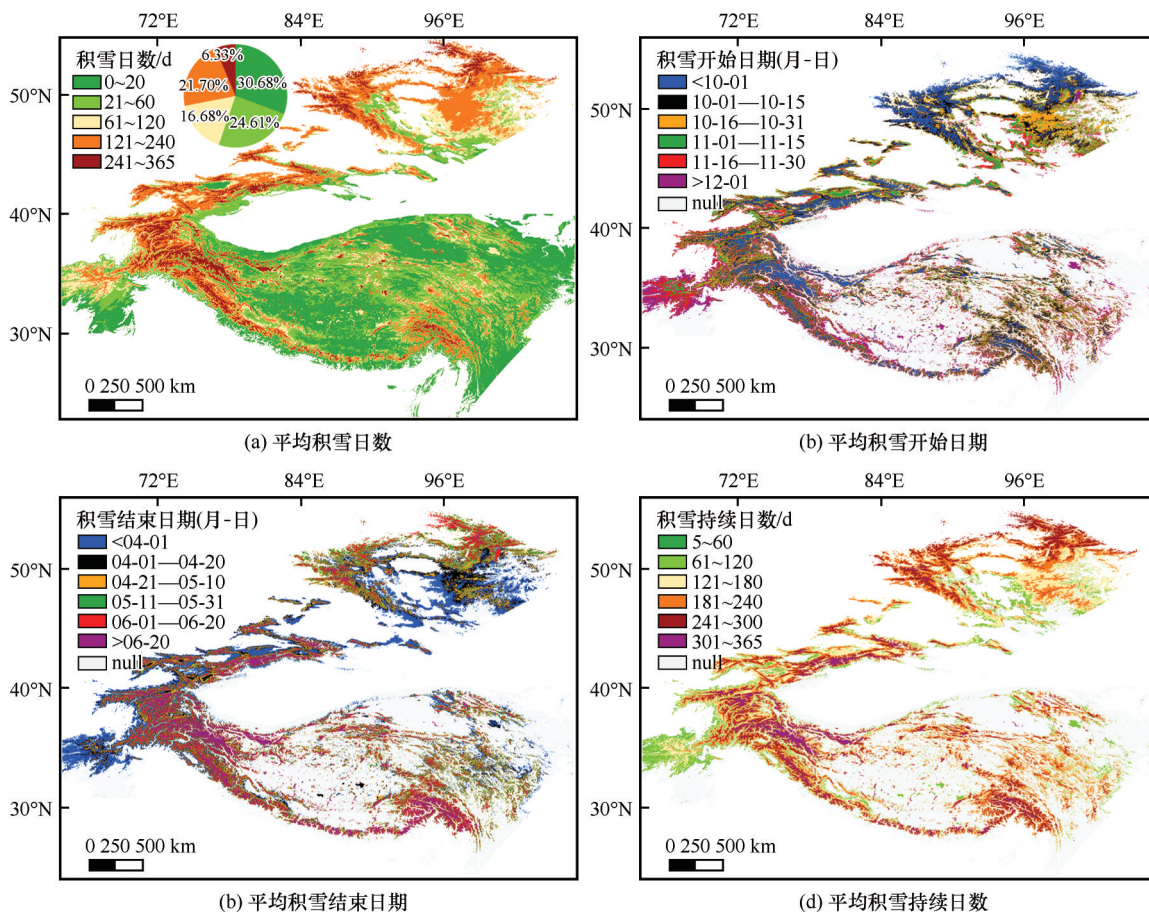


图4 2000—2019水文年亚洲高山区平均积雪物候

Fig. 4 Average snow phenology in the High Mountain Asia during the hydrological year of 2000—2019

3.3 积雪物候年际变化

对研究区 2000—2019 水文年的 SOD、SED 和 SDD 进行变化趋势分析和显著性检验(图 6),并统计了不同区域趋势显著性所占面积比例(表 1)。总体而言,大部分地区的 SOD 无显著变化趋势[图 6(a)、6(b)];SOD 在 8.2% 的区域显著提前($P < 0.1$),提前速率约为 $3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,主要分布在阿尔泰山、东天山以及青藏高原东南部的部分区域;SOD 在 11.4% 的区域表现为显著推迟($P < 0.1$)的趋势,推迟速率约为 $1 \sim 5 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,主要分布在萨彦岭南部、西天山、喀喇昆仑、中喜马拉雅和东喜马拉雅。从 SED 的变化趋势和显著性空间分布来看[图 6(c)、6(d)],15.8% 的区域 SED 显著提前($P < 0.1$),主要集中在阿尔泰山—萨彦岭、天山以及横断山西部,提前速率为 $1 \sim 6 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$;而显著推迟($P < 0.1$)的区域占比仅为 8.8%,主要分布在兴都库什南部、西喜马拉雅,推迟速率在 $3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。研究区 13.5% 的区域 SDD 呈现显著缩短($P < 0.1$)趋势,其中,西天山、中喜马拉雅和东喜马拉雅、横断山西部、萨彦岭等地区缩短了 $1 \sim 6$

$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$,兴都库什北部、喀喇昆仑、东天山以及阿尔泰山—萨彦岭部分区域缩短了约 $3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$;7.4% 的区域 SDD 显著延长($P < 0.1$),主要集中分布于兴都库什南部、西喜马拉雅以及青藏高原东南部,大约延长 $3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ [图 6(e)、6(f)]。从积雪物候显著变化面积占比来看(表 1),整个研究区 SDD 以显著缩短为主(显著缩短多于显著延长)、SED 以显著提前为主(显著提前多于显著推迟)、SOD 以显著推迟为主(显著推迟多于显著提前)。

3.4 积雪物候变化和气候因子相关性分析

积雪物候变化是一个周期性、持续性的动态过程,对气候环境变化非常敏感。为了分析积雪物候对气候变化的响应关系,本文从不同空间区域和时间段计算了 SOD 和 SED 与降水和气温之间的相关关系(表 2);其中,累积期为 9—12 月、融雪期为 3—6 月。气温和降水对研究区积雪物候的影响表现出较强的空间差异性。但总体而言,SOD 与累积期降水呈负相关,与累积期气温呈正相关;几乎整个研究区(除东喜马拉雅以外)的 SOD 均与累积期气温

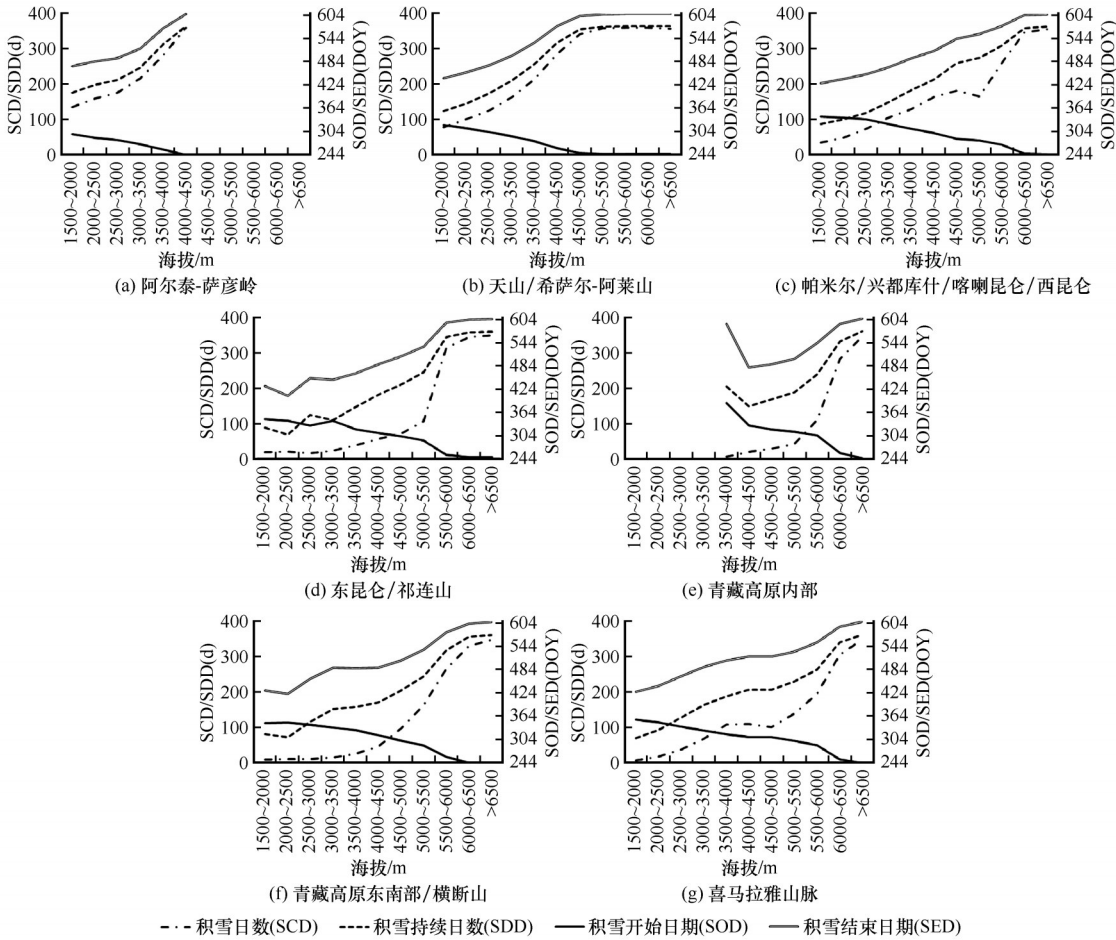


图5 不同子区域积雪物候随海拔变化
Fig. 5 Variations of snow phenology with elevation in different subdivisions

表1 积雪物候显著变化面积占比
Table 1 The area proportion of significantly changed snow phenology

区域	积雪开始		积雪结束		积雪持续	
	日期/%		日期/%		日数/%	
	显著提前	显著推迟	显著提前	显著推迟	显著缩短	显著延长
阿尔泰-萨彦岭	13.4	7.9	19.7	3.7	12.5	6.3
希萨尔-阿莱山	5.7	8.2	9.9	6.1	9.7	5.1
西天山	7.9	12.1	23.1	3.7	18.7	4.0
东天山	19.5	3.1	36.3	2.0	16.5	4.9
帕米尔	2.0	19.2	10.1	4.5	15.5	2.6
兴都库什	5.6	13.3	2.7	30.9	8.2	16.7
喀喇昆仑	4.2	10.1	9.2	8.3	11.6	6.1
西昆仑	5.1	9.6	16.0	4.8	16.7	5.6
东昆仑	10.6	11.9	10.6	9.9	12.3	11.9
祁连山	5.6	15.2	7.6	11.6	10.6	9.2
青藏高原内部	8.9	13.1	14.0	8.4	14.3	7.5
青藏高原东南部	8.8	10.7	16.1	5.2	15.7	5.8
西喜马拉雅	7.7	9.0	3.1	23.7	4.1	12.2
中喜马拉雅	0.9	28.2	7.5	15.0	18.6	3.3
东喜马拉雅	2.5	28.9	19.6	4.6	31.4	3.3
横断山	5.4	12.4	18.3	5.9	17.7	5.5
整个区域	8.2	11.4	15.8	8.8	13.5	7.4

注：显著提前、推迟、缩短和延长表示通过0.1的显著性检验，未监测到积雪物候的像元不纳入统计。

的相关性更大,累积期气温是影响SOD年际变化的主导因子。SED与融雪期降水和年降水均呈正相关,与融雪期气温和年平均气温均呈负相关;阿尔泰-萨彦岭、希萨尔-阿莱山、天山、帕米尔以及兴都库什的SED都与融雪期气温的相关性更大(呈显著负相关),融雪期气温是其影响SED年际变化的主导因子;而喀喇昆仑的SED主要受融雪期降水的影响,西喜马拉雅的SED主要受年降水量的影响。

4 结论

本文在对2000—2020年逐日MODIS积雪产品进行了去云处理的基础上,提取了研究区20个水文年的SCD、SOD、SED和SDD,从像元尺度以及不同空间分区对其年际变化趋势进行了分析,并分析了积雪物候对气候变化的响应关系,主要结论包括:

(1)基于三次样条函数插值的MODIS积雪覆盖率去云算法,能够有效地获取云遮蔽像元的NDSI信息。云覆盖像元的云持续时间越短,该算法的去云精度越高;该去云算法的总体平均绝对误

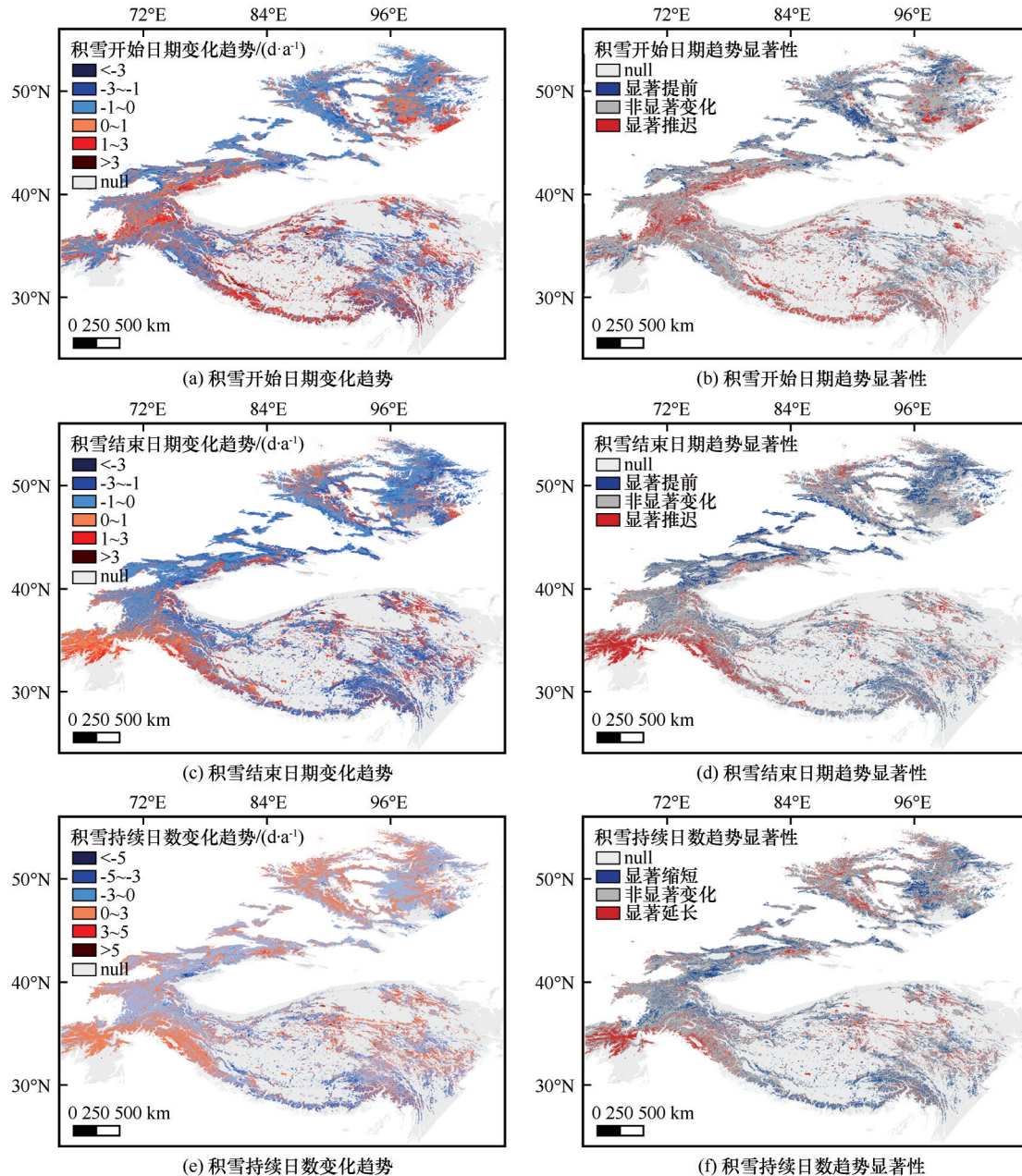


图6 2000—2019水文年亚洲高山区积雪物候变化趋势与显著性分布图

Fig. 6 Trends and significance of snow phenology in the High Mountain Asia during the hydrological year of 2000—2019

差和均方根误差分别为0.041和0.108。

(2)亚洲高山区积雪物候空间差异性较大,并呈现出主要受海拔影响的垂直地带性分布规律。稳定积雪区($SCD > 60$ d)主要分布在天山、喀喇昆仑山、昆仑山、祁连山、喜马拉雅山以及横断山等高海拔山脉,以及高纬度的阿尔泰—萨彦岭。研究区SOD主要集中在9—12月,高海拔山脉及高纬度地区的SOD出现较早,而低海拔区的SOD多出现在11月及以后;SED主要集中在3—6月,在低海拔区SED出现在3月份及以前,而高海拔山区则推迟到6

月份及以后。

(3)20年间,研究区SDD主要呈缩短趋势,在13.5%的区域呈现显著缩短趋势,而仅有7.4%的区域显著延长;SED主要呈提前趋势,在15.8%的区域为显著提前,而显著推迟的区域仅占8.8%;SOD主要以推迟趋势为主,在11.4%的区域表现为显著推迟,在8.2%的区域为显著提前。

(4)亚洲高山区积雪物候年际变化对气候变化有着明显的响应关系。SOD与累积期降水呈负相关,与累积期气温呈显著正相关,累积期气温是影

表2 不同分区积雪开始日期、结束日期与降水、温度的相关性

Table 2 Correlation of snow onset date and snow end date with precipitation and temperature in different subdivisions

区域	积雪开始日期		积雪结束日期			
	累积期降水	累积期平均气温	融雪期降水	年降水	融雪期平均气温	年平均气温
阿尔泰-萨彦岭	-0.40*	0.45**	0.38*	0.30	-0.41*	-0.33
希萨尔-阿莱山	-0.47**	0.56***	0.31	0.39*	-0.61***	-0.45*
西天山	-0.42*	0.45**	0.23	0.26	-0.47**	-0.28
东天山	-0.37	0.48**	0.17	0.14	-0.44*	-0.33
帕米尔	-0.40*	0.50**	0.34	0.45**	-0.49**	-0.34
兴都库什	-0.52***	0.55***	0.44*	0.52***	-0.57***	-0.39*
喀喇昆仑	-0.47**	0.48**	0.51**	0.41*	-0.09	-0.23
西昆仑	-0.22	0.42*	0.27	0.10	-0.35	-0.21
东昆仑	-0.25	0.30	0.17	0.17	-0.12	-0.07
祁连山	-0.17	0.24	0.21	0.15	-0.12	-0.05
青藏高原内部	-0.32	0.46**	0.21	0.15	-0.06	-0.09
青藏高原东南部	-0.23	0.42*	0.12	0.14	-0.20	-0.07
西喜马拉雅	-0.49**	0.58***	0.31	0.46**	-0.20	-0.28
中喜马拉雅	-0.37	0.45**	0.10	0.08	-0.05	-0.11
东喜马拉雅	-0.21	0.20	0.12	0.07	-0.05	-0.15
横断山	-0.26	0.35	0.16	0.06	-0.11	-0.01

注：*、**和***分别表示通过0.1、0.05和0.01的显著性检验。

响SOD年际变化的主导因子;SED与融雪期降水和年降水均呈正相关,与融雪期气温和年平均气温均呈负相关,融雪期气温是影响SED年际变化的主导因子。

参考文献(References):

[1] Hu Ruji. Snow cover and snow disaster control in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013. [胡汝骥. 中国积雪与雪灾防治[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.]

[2] Che Tao, Hao Xiaohua, Dai Liyun, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1247-1253. [车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1247-1253.]

[3] Immerzeel W W, Van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.

[4] Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.

[5] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(9): 668-673.

[6] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Ye Baisheng, et al. Regional characteristics of glacier mass balance variations in High Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 97-105. [刘时银, 丁永建, 叶佰生, 等. 高亚洲地区冰川物质平衡变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 97-105.]

[7] Xie Z, Zhou Z, Li Q, et al. Progress and prospects of mass bal-

ance characteristic and responding to global change of glacier system in High Asia[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(10): 1065-1072.

[8] Wang Xiaoru, Tang Zhiguang, Wang Jian, et al. Monitoring of snowline altitude at the end of melting season in high mountain Asia based on MODIS snow cover products[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(3): 470-484. [王晓茹, 唐志光, 王建, 等. 基于MODIS积雪产品的高亚洲融雪末期雪线高度遥感监测[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 470-484.]

[9] Tang Zhiguang, Wang Jian, Wang Xin, et al. Extraction and spatiotemporal analysis of snow covered days over Tibetan Plateau based on MODIS data[J]. Mountain Research, 2017, 35(3): 412-419. [唐志光, 王建, 王欣, 等. 基于MODIS数据的青藏高原积雪日数提取与时空变化分析[J]. 山地学报, 2017, 35(3): 412-419.]

[10] 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.

[11] Huang X, Deng J, Wang W, et al. Impact of climate and elevation on snow cover using integrated remote sensing snow products in Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 274-288.

[12] Xiong Chuan, Yao Ruzhen, Shi Jiancheng, et al. Change of snow and ice melting time in High Mountain Asia[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2885-2893. [熊川, 姚汝楨, 施建成, 等. 高亚洲地区冰雪融化时间变化[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2885-2893.]

[13] Kang Shichang, Guo Wanqin, Wu Tonghua, et al. Cryospheric changes and their impacts on water resources in the Belt and Road regions[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(1): 1-17. [康世昌, 郭万钦, 吴通华, 等. “一带一路”区域冰冻圈变化及其对水资源的影响[J]. 地球科学进展, 2020, 35(1): 1-17.]

- [14] Liu Yijing, Sun Yanhua, Zhong Xinyue, et al. Changes of snow cover in the Third Pole and the Arctic[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 140-156. [刘一静, 孙燕华, 钟歆玥, 等. 从第三极到北极: 积雪变化研究进展[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 140-156.]
- [15] Guo H, Li X, Qiu Y. Comparison of global change at earth's "three poles" using spaceborne earth observation[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1320-1323.
- [16] Che Tao, Li Xin, Li Xinwu, et al. Developing cryospheric remote sensing, promoting scientific programme of Earth's Three Poles[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(4): 484-493. [车涛, 李新, 李新武, 等. 冰冻圈遥感: 助力“三极”大科学计划[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(4): 484-493.]
- [17] 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 reports*, 2015, 5(1): 1-9.
- [18] Wang K, Zhang L, Qiu Y, et al. Snow effects on alpine vegetation in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2015, 8(1): 58-75.
- [19] 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.
- [20] Ke C, Li X, Xie H, et al. Variability in snow cover phenology in China from 1952 to 2010[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(2): 755-770.
- [21] Ma N, Yu K, Zhang Y, et al. Ground observed climatology and trend in snow cover phenology across China with consideration of snow-free breaks[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 55(9): 2867-2887.
- [22] Wang Xiaoyue, Wang Siyuan, Yin 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.]
- [23] Qiao Dejing, Wang Nianqin, Li Zhen, et al. Spatio-temporal changes of snow phenology in the Qinghai-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.]
- [24] Smith T, Bookhagen B, Rheinwalt A. Spatiotemporal patterns of High Mountain Asia's snowmelt season identified with an automated snowmelt detection algorithm, 1987-2016 [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(5): 2329-2343.
- [25] Tang QiuHong, Lan Cuo, Su Fengge, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2807-2821. [汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2807-2821.]
- [26] Ding Yongjian, Zhao Qidong, Wu Jinkui, et al. The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 23-32. [丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 23-32.]
- [27] Consortium R. Randolph Glacier Inventory-A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0[R]. Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA, 2017.
- [28] Dwyer J, Schmidt G. The MODIS reprojection tool[M]. *Earth Science Satellite Remote Sensing*, Springer, 2006: 162-177.
- [29] Gafurov A, Bárdossy A. Cloud removal methodology from MODIS snow cover product[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1361-1373.
- [30] Gao Y, Xie H, Yao T, et al. Integrated assessment on multi-temporal and multi-sensor combinations for reducing cloud obscuration of MODIS snow cover products of the Pacific Northwest USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1662-1675.
- [31] Qiu Yubao, Zhang Huan, Chu Duo, et al. Cloud removing algorithm for the daily cloud free MODIS-based snow cover product over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(3): 515-526. [邱玉宝, 张欢, 除多, 等. 基于MODIS的青藏高原逐日无云积雪产品算法[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(3): 515-526.]
- [32] Xie H, Wang X, Liang T. Development and assessment of combined Terra and Aqua snow cover products in Colorado Plateau, USA and northern Xinjiang, China [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, 3(1): 033559.
- [33] Hall D K, Riggs G A, Foster J L, et al. Development and evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow-cover product [J]. *Remote sensing of environment*, 2010, 114(3): 496-503.
- [34] López-Burgos V, Gupta H V, Clark M. Reducing cloud obscuration of MODIS snow cover area products by combining spatio-temporal techniques with a probability of snow approach [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(5): 1809-1823.
- [35] Gao Y, Xie H, Lu N, et al. Toward advanced daily cloud-free snow cover and snow water equivalent products from Terra-Aqua MODIS and Aqua AMSR-E measurements[J]. *Journal of hydrology*, 2010, 385(1): 23-35.
- [36] Huang Xiaodong, Hao Xiaohua, Wang Wei, et al. Algorithms for cloud removal in MODIS daily snow products [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1118-1126. [黄晓东, 郝晓华, 王伟, 等. MODIS逐日积雪产品去云算法研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1118-1126.]
- [37] Wang G, Jiang L, Hao S, et al. Cloud-free fractional snow cover estimation from blended MODIS and FY-2 VISSR measurements[C]//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018: 5191-5194.
- [38] Dozier J, Painter T H, Rittger K, et al. Time-space continuity of daily maps of fractional snow cover and albedo from MODIS [J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(11): 1515-1526.
- [39] Huang Y, Liu H, Yu B, et al. Improving MODIS snow products with a HMRF-based spatio-temporal modeling technique in the Upper Rio Grande Basin [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 568-582.
- [40] Tang Z, Wang J, Li H, et al. Spatiotemporal changes of snow cover over the Tibetan Plateau based on cloud-removed moderate resolution imaging spectroradiometer fractional snow cover product from 2001 to 2011 [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073582.
- [41] Tang Zhiguang, Wang Jian, Li Hongyi, et al. Accuracy validation and cloud obscuration removal of MODIS fractional snow cover products over Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(3): 423-430. [唐志光, 王建, 李弘毅, 等. 青藏高原MODIS积雪面积比例产品的精度验证与去云研究[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(3): 423-430.]

- [42] Tang Zhiguang, Wang Jian. Daily cloudless MODIS Snow area ratio data set of the QTP (2000—2015)[DB]. National Tibetan Plateau Data Center, 2019. DOI: 10.3972/westdc.024.2013.db. [唐志光, 王建. 青藏高原逐日无云MODIS积雪面积比例数据集(2000—2015)[DB]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019. DOI: 10.3972/westdc.024.2013.db. CSTR: 18406.11.westdc.024.2013.db.]
- [43] Sun He, Su Fengge, Huang Jingheng, et al. Contrasting precipitation gradient characteristics between westerlies and monsoon dominated upstream river basins in the Third Pole[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(1): 91-104. [孙赫, 苏凤阁, 黄敬恒, 等. 第三极西风和季风主导流域源区降水呈现不同梯度特征[J]. 科学通报, 2020, 65(1): 91-104.]
- [44] Liu L, Gu H, Xie J, et al. How well do the ERA-Interim, ERA-5, GLDAS-2.1 and NCEP-R2 reanalysis datasets represent daily air temperature over the Tibetan Plateau?[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(2): 1484-1505.
- [45] Chen Y, Ji D. Evaluation of ERA5 atmospheric reanalysis datasets for surface climatology over the Tibetan Plateau [C]// AGUFM 2019, 2019: A13R-3100.
- [46] Huai B, Wang J, Sun W, et al. Evaluation of the near-surface climate of the recent global atmospheric reanalysis for Qilian Mountains, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Atmospheric Research, 2021, 250: 105401.
- [47] Zhang H, Zhang F, Zhang G, et al. Enhanced scaling effects significantly lower the ability of MODIS normalized difference snow index to estimate fractional and binary snow cover on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125795.
- [48] Zhang H, Zhang F, Zhang G, et al. Ground-based evaluation of MODIS snow cover product V6 across China: Implications for the selection of NDSI threshold[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 2712-2726.
- [49] Hao Xiaohua, Wang Jian, Li Hongyi. Evaluation of the NDSI threshold value in mapping snow cover of MODIS: a case study of snow in the middle Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 132-138. [郝晓华, 王建, 李弘毅. MODIS积雪制图中NDSI阈值的检验——以祁连山中部山区为例[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 132-138.]
- [50] Zhang H, Zhang F, Che T, et al. Comparative evaluation of VIIRS daily snow cover product with MODIS for snow detection in China based on ground observations[J]. Science of the Total Environment, 2020, 724: 138156.
- [51] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 107-121.
- [52] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [53] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica; Journal of the Econometric Society, 1945: 245-259.
- [54] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann - Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3-4): 350-363.
- [55] Caloiero T, Coscarelli R, Ferrari E. Application of the innovative trend analysis method for the trend analysis of rainfall anomalies in southern Italy[J]. Water Resources Management, 2018, 32(15): 4971-4983.
- [56] 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.]

Spatiotemporal dynamics of snow phenology in the High Mountain Asia and its response to climate change

TANG Zhiguang^{1,2}, DENG Gang^{1,2}, HU Guojie³, WANG Xin^{2,3},
JIANG Zongli², SANG Guoqing^{1,2}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Geo-Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Snow cover is an essential parameter in the Earth's energy budget and hydrological cycle. Snow cover in the High Mountain Asia provides a significant contribution to runoff in many populated areas, where it represents a primary source of drinking water for billions of people across Asia and supports irrigation, the industry and energy production. Taking the High Mountain Asia as the study area, the cloud removal of the daily MODIS snow cover products during 2000—2020 is firstly carried out. On this basis, the snow-covered days (SCD), snow onset date (SOD), snow end date (SED) and snow duration days (SDD) for each hydrological year (from September 1 to August 31 in the next year) are extracted. Finally, the spatiotemporal dynamics of snow phenology and its response to climate change are analyzed. The following results are found: (1) The snow phenology in the High Mountain Asia shows a great spatial difference and a vertical zonality mainly influenced by the altitude. SED is mainly concentrated in March-June. In the low-altitude areas, SED appears in March or earlier, while it is delayed to June or later in the high-altitude mountainous areas. SOD is mainly concentrated in September-December. SOD appears earlier in the high-altitude mountainous areas and high-latitude areas, while mainly appears in November or later in the low-altitude areas. (2) During the 20-year period, SDD in the study area mainly shows a shortening trend. Up to 13.5% of the area of SDD shows a significantly shortening trend, while only 7.4% of the area shows a significantly lengthening trend. SED in the study area mainly shows an advanced trend. Up to 15.8% of the area of SED shows a significantly advanced trend, while only 8.8% of the area is significantly delayed. SOD in the study area mainly shows a delayed trend. 11.4% of the area show a significantly delayed trend, while 8.2% of the area is significantly advanced. (3) The interannual variation of snow phenology in the High Mountain Asia has an obvious response relationship to climate change, and shows different response degrees in different subregions. The temperature of snow accumulation period is the dominant factor affecting the interannual variation of SOD, and the temperature during snow melt period is the dominant factor affecting the interannual variation of SED. The increase of temperature leads to the delay of SOD, advance of SED and shortening of SDD.

Key words: High Mountain Asia; snow cover; snow phenology; MODIS; climate change

(责任编辑: 戴礼云; 编辑: 周成林)