

户元涛,雷向杰,王景红,等. 基于 MODIS 的太白山积雪变化特征分析[J]. 陕西气象,2025(3):41-48.

文章编号:1006-4354(2025)03-0041-08

基于 MODIS 的太白山积雪变化特征分析

户元涛^{1,2},雷向杰¹,王景红¹,张 凤³,王 延¹,王 娟¹,杨 柳¹

(1. 陕西省气候中心,西安 710014;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 航天恒星科技有限公司,西安 710061)

摘要:基于 2000—2020 年 MODIS 逐日无云积雪面积产品,分析了太白山积雪天数、积雪面积的年、季、月变化特征。结果表明:在水文年内,太白山积雪期为 9 月至次年 5 月,年平均积雪天数为 170 d,年平均积雪面积约占太白山总面积的 5%。冬季积雪较多,1 月最多;秋季较少,9 月最少。近 20 a 间,太白山积雪首日提前,积雪终日延后,全年积雪天数增加,秋季以 5.8 d/10 a 的趋势显著增加($P<0.05$),11 月增加最多;而年平均积雪面积减少,冬季减少最多,秋季次之,春季呈增加趋势,5 月增加明显。太白山积雪天数的增加主要出现在中山区和高山区,积雪面积的减少主要出现在低山区和中山区。

关键词:MODIS; 太白山; 积雪

中图分类号:P426.635

文献标识码:A

积雪是冰冻圈的重要组成部分之一,被誉为气候变化的指示器^[1-2]。积雪天数和积雪面积作为积雪研究的重要参数,直接影响着区域地-气系统能量交换和辐射平衡^[3-4]。在全球变暖背景下,积雪普遍减少^[5],特别是 20 世纪中期以来,中、低海拔地区积雪期、积雪天数、积雪深度等参数均呈显著减少变化,高海拔地区积雪减少不显著,或因缺乏长期观测,无法准确评估^[3,6]。山地积雪的减少降低了淡水资源储存能力^[7],增加了区域水安全风险,易诱发山体滑坡、流域洪水、生态退化等自然灾害事件^[8-12]。

太白山作为秦岭主峰,海拔 3 771.2 m,气候垂直差异显著,为秦岭腹地积雪最多的地方,属于常年多雪带^[13]。太白山积雪是渭水河、石头河、霸王河、黑河的重要补给来源,是汉中盆地和关中平原农业用水的来源之一,是高山湖泊水位保持稳定的主要因子,在维持高山生态系统稳定、保证

周边城市生活用水等方面具有重要意义。太白山高山区气候寒冷,积雪封山时间长,3 200 m 以上常年气候季节为无夏区,冬季天数在 300 d 以上,3 730 m 以上为常冬区^[14]。气候变暖背景下的太白山积雪变化备受关注,2015 年 6 月“应对气候变化·记录中国一走进陕西”媒体联合科学考察与公众科普活动关注的焦点之一就是太白山积雪变化。

目前,关于太白山积雪变化研究均是基于气象站观测资料和低时间分辨率的卫星遥感资料,无法反映空间上覆盖整个山区且时间上连续的积雪变化特征。气象站观测显示:1961—2016 年太白山积雪天数减少,海拔越高,减少越多^[15]; Landsat TM 卫星监测显示:太白山积雪主要分布在海拔 3 000 m 以上的山区,1988—2010 年冬季^[16]与 2000—2017 年冷季(11—4 月)^[17]积雪面积均呈波动减少变化。结合气象站和 TM 卫星

收稿日期:2024-02-29

作者简介:户元涛(1990—),男,汉族,甘肃庆阳人,博士,工程师,主要从事气候变化归因研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023G-7);陕西省重点产业链(群)项目(2020ZDLSF06-02)

资料发现,1962—2014年太白山西部中山区积雪首日推迟,积雪终日提前,积雪天数显著减少,积雪深度波动变浅;1988—2010年积雪面积年际变率大,无显著减少趋势^[18]。以上基于气象站的研究,受限于地形变化、站点数量、空间代表性等问题,无法反映整个山区,特别是高海拔山区的积雪变化;而基于 TM 卫星资料的研究,虽然空间分辨率高,覆盖范围广,但时间分辨率达 16 d 之久,难以监测积雪形成期和融化期的快速变化特征,特别是积雪天数的连续变化。由于 MODIS 卫星具有重访周期短、时间分辨率为 1 d、观测范围广、时间序列长等优势,其反演的资料弥补了气象站观测和 TM 卫星资料的不足。因此,本文利用 MODIS 卫星得到的长时间序列逐日积雪范围产品,分析了 2000—2020 年太白山积雪的时空变化特征,为了解全球变暖背景下太白山积雪的真实变化状况提供依据,以为当地水资源管理、生态环境保护、积雪冷资源开发提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

1.1.1 MODIS 逐日无云积雪面积产品 该数据集基于 MODIS 反射率产品 MOD/MYD09GA,利用高空间分辨率无云 Landsat-5 TM/Landsat8 OLR 影像作为真值,结合 MODIS 土地覆盖分类产品 MCD12Q1,采用不同土地覆盖类型条件下发展的多指数结合积雪判别算法^[19]生成,有效提高了林区和山区积雪面积精度,同时利用隐马尔科夫算法、多源数据融合等方法实现了产品的完全去云^[20]。数据集以 HDF5 文件格式存储,每个 HDF5 文件包含 18 个数据要素,其中包括数据值(0=陆地、1=积雪、2=雪水当量插补积雪、3=内陆水或海洋、4=冰川、255=填充值)、数据起始日期、经纬度等,该数据从国家冰川冻土沙漠科学数据中心获得(<http://www.ncdc.ac.cn/>),目前更新至 2020 年 12 月,空间分辨率为 500 m×500 m,精度满足科学研究需要^[21]。数字高程(DEM)采用 SRTM(shuttle radar topography mission)数据,为 V.003 版本,来源于美国地质勘探局(USGS; <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/>),空间分辨率为 90 m。

1.1.2 气象站观测数据 太白山目前共有 11 个气象观测站(图 1),仅太白站为国家站,海拔高度为 1 543.6 m,有积雪深度观测记录,其余均为区域站,无积雪观测或观测时间较短,无法用于本研究。因此,选取太白站 2000—2020 年的积雪深度观测数据,验证 MODIS 积雪产品的可靠性。当气象站观测的积雪深度 ≥ 1 cm 时,视为一个积雪日。该资料来源于陕西省气象信息中心。

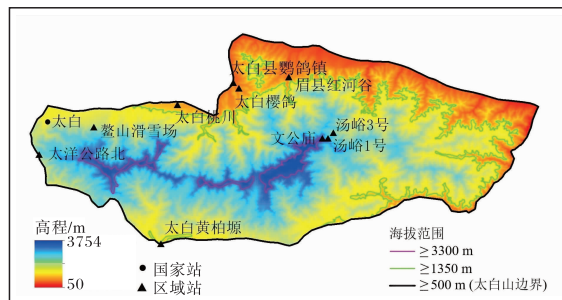


图 1 太白山气象站分布及海拔范围划分

(审图号为陕 S(2023)027 号,下同)

1.2 研究方法

1.2.1 指标定义 将每年 8 月 1 日至次年 7 月 31 日定义为一个水文年^[22],2000—2020 年自然年中共 20 个水文年,时间范围为 2000—2019 年,后文提及的年份均为水文年。积雪首日定义为一个水文年中第一次连续 5 d 出现雪的首日对应日期,积雪终日定义为一个水文年中最后连续 5 d 出现雪的终日对应日期,积雪天数是指在一个水文年中积雪首日和积雪终日之间在遥感影像上有积雪记录的累计天数^[22]。为研究不同海拔范围内的积雪变化,参照已有文献^[23],将太白山划分为:低山区(500 m $\leq$ 海拔<1 350 m)、中山区(1 350 m $\leq$ 海拔<3 300 m)以及高山区(海拔 $\geq 3 300$ m)。因太白山黄土台塬(500 m<海拔 ≤ 700 m)面积较小,被合并至低山区。

1.2.2 卫星产品验证 卫星观测资料在反演过程中受云量、地形、传感器等影响,导致了反演产品的不确定性。通过提取太白气象站所在位置的 MODIS 积雪数据,分析显示:2000—2019 年间,卫星监测的全年、秋季、冬季、春季平均积雪天数分别为 20.6 d、2.7 d、24.6 d 和 3.2 d,接近气象站观测结果(24.3 d、3.4 d、22.7 d 和 3.1 d)。二

者得到的积雪天数在全年和季节尺度上的年际相关系数分别为 0.86、0.89、0.77 和 0.63 ($P < 0.01$),表明 MODIS 积雪产品能很好地表征太白山积雪真实变化状况。

1.2.3 变化趋势 积雪天数和积雪面积的变化趋势计算采用一元线性回归算法,公式如下:

$$Y = a_0 t + a_1$$

式中, Y 为积雪天数或积雪面积, t 为时间段, a_0 为回归系数,即趋势值, a_1 为常数项;趋势显著性检验采用 p 值检验法。

2 结果分析

2.1 积雪首日和积雪终日变化

积雪首日和积雪终日直接影响着全年积雪天数的多少。图 2 给出了 2000—2019 年 MODIS 卫星监测的太白山积雪首日和积雪终日变化。由图可知,太白山积雪首日最早出现在 9 月 18 日,

为 2011 年;最迟出现在 10 月 23 日,为 2006 年;平均积雪首日为 10 月 8 日(图 2a)。太白山积雪终日最早结束于 4 月 19 日,为 2004 年;最迟结束于 6 月 8 日,为 2017 年;平均积雪终日为 5 月 12 日(图 2b)。近 20 a 间,太白山积雪首日提前,提前率为 2.9 d/10 a,但不显著(图 2a);积雪终日显著推迟($P < 0.05$),推迟率为 9.8 d/10 a(图 2b)。该结果与雷向杰等仅基于太白气象站单站观测数据的研究结果相反^[18]。通过提取太白站所在位置的 MODIS 积雪数据分析发现,卫星监测的积雪首日变化(趋势为:10.6 d/10 a)和积雪终日变化(趋势为:−6.1 d/10 a)与气象站观测结果完全一致^[18]。这表明:单个气象站观测不足以代表整个太白山积雪变化,使用高时间分辨率卫星遥感资料研究太白山积雪变化很有必要,也进一步说明了 MODIS 积雪产品的可靠性。

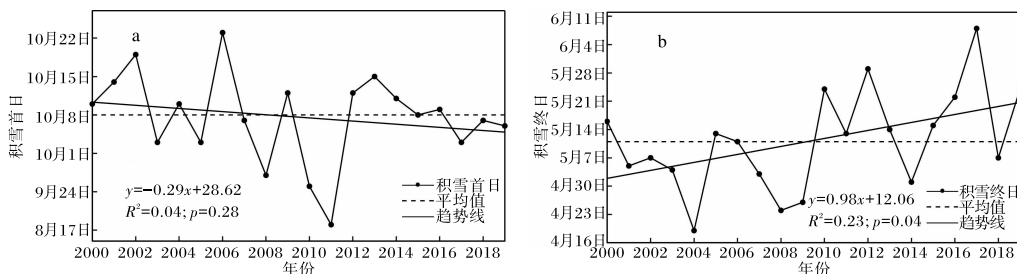


图 2 2000—2019 年太白山积雪首日(a)和积雪终日(b)年际变化

2.2 积雪天数变化

图 3 为 2000—2019 年太白山全年和各季节积雪天数的时空变化特征。由图 3 可知,太白山全年、秋季、冬季、春季积雪天数变化范围分别介于 138~187 d、18~50 d、85~92 d、38~51 d 之间,多年平均积雪天数分别为 170 d、38 d、88 d 和 45 d。近 20 a 间,太白山全年积雪天数呈微弱增加趋势(图 3a),增加主要出现在中山区高海拔地区和高山区,增加率超过了 6 d/10 a;而低山区积雪天数显著减少,特别是北部和东部山区,减少率超过了 9 d/10 a(图 3e)。该结果与全球低海拔山地积雪显著减少、高海拔山地积雪轻微增加的结论一致^[5]。秋季,太白山积雪天数显著增加($P < 0.05$),增加率为 5.8 d/10 a(图 3b),增加主要出现在中山区南部和高山区(图 3f);冬季,低山区

积雪天数减少,中山区和高山区积雪天数增加,整个太白山积雪天数无明显变化(图 3c, 图 3g);春季,中山区和高山区大部分山区积雪天数增加,增加率不足 6 d/10 a,低山区积雪基本消融,整个太白山积雪天数的年际变率较大,无明显趋势(图 3d, 图 3h)。太白山中山区高海拔地区和高山区积雪天数的增加可能受气温升高和水汽增加的共同影响,低山区积雪天数的减少主要与气温升高和降雪减少有关^[5]。

图 4 显示了 2000—2019 年 10—5 月期间(9 月积雪天数较少,未显示),太白山逐月积雪天数变化特征。由图可知,太白山 10 月多年平均积雪天数为 13.0 d,11 月增至 24.9 d,12 月为 29.1 d,1 月最多,为 31.0 d,2 月为 28.1 d,3 月为 28.3 d,4 月进一步减少为 13.3 d,5 月仅 2.2 d。近 20 a

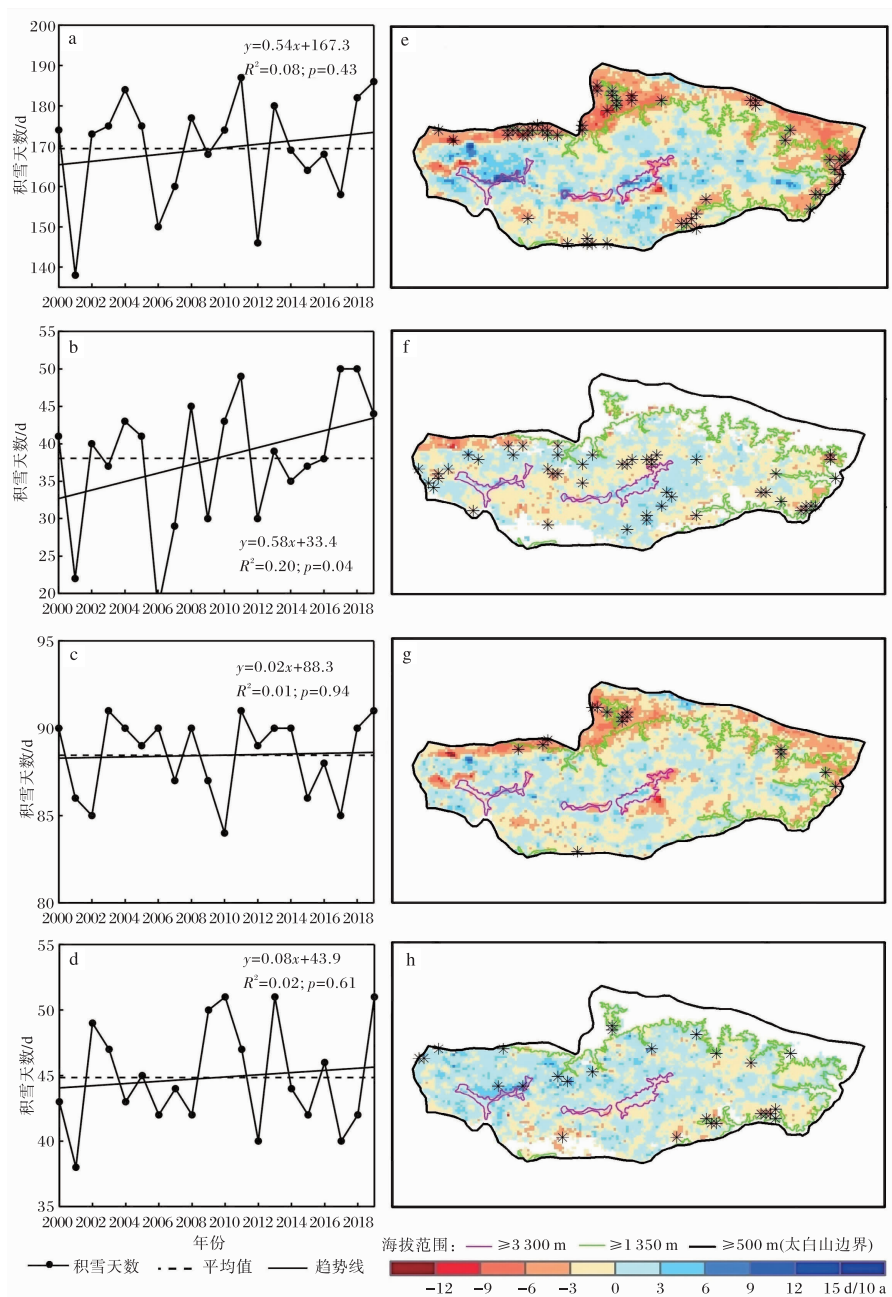


图3 2000—2019年太白山全年(a, e)、秋季(b, f)、冬季(c, g)和春季(d, h)积雪天数年际变化(a~d)和变化趋势空间分布(e~h, *代表趋势通过0.05显著性水平检验)

间,太白山10月积雪天数呈轻微增加趋势,特别是中山区高海拔地区,增加率约3 d/10 a ($P < 0.05$);11月,积雪天数的增加趋势进一步增大,增加率达到最大值,为4.0 d/10 a ($P < 0.10$),明显的增加出现在中山区大部分地区和高新区,而低山区呈减少趋势;12月,积雪天数呈微弱减少趋势,趋势变化的垂直差异大,低山区显著减少,减少率超过了6 d/10 a,中山区和高新区明显增

加,最大增加率达到15 d/10 a;1—3月,积雪天数均呈轻微增加趋势,增加主要出现在中山区低海拔地区;4月,积雪天数显著减少($P < 0.05$),减少率为2.1 d/10 a,减少主要出现在中山区北部地区;5月,积雪天数变化仅出现在高新区,呈较小的增加趋势,可能与全球变暖导致高海拔山区降水增多有关^[5]。

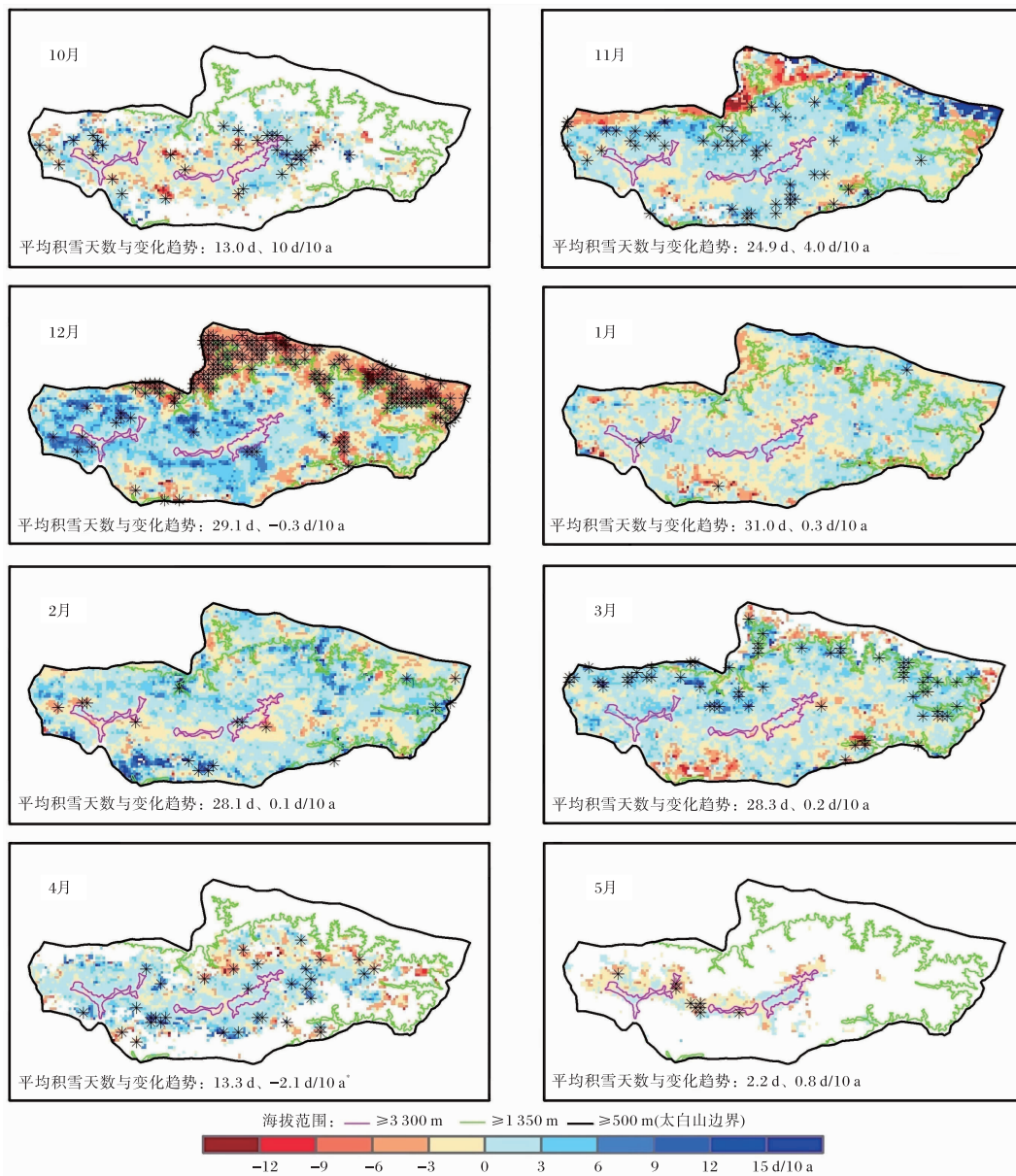


图4 2000—2019年10—5月太白山月积雪天数变化趋势的空间分布

(* 代表变化趋势通过了 0.05 显著性水平检验)

2.3 积雪面积变化

表1给出了2000—2019年太白山年、季节、9—次年5月逐月积雪面积的多年平均值和年际变化趋势。由表1可知,太白山年平均积雪面积为119 km²,占太白山总面积的5.0%;秋季最小,仅66.1 km²,占2.8%;冬季最大,为303.8 km²,占12.8%;春季为108.3 km²,占4.6%。从逐月变化来看,太白山多年平均积雪面积由9月的1.9 km²增至12月的217.8 km²,占比从0.1%增至9.2%;1月积雪面积最大,为360.4 km²,占比

15.1%;2月开始减少,5月减至最少,积雪面积的占比由14.1%减至0.4%。近20 a间,太白山年平均积雪面积呈减少趋势,冬季减少最多,其次为秋季,该结果与太白山冬半年积雪面积波动减少的结论一致^[16]。其中,太白山9月、11—1月、3月的积雪面积均呈减少趋势,12月减少最多,减少率为93.2 km²/10 a ($P < 0.10$);相反,10月、2月、4—5月的积雪面积均呈增加趋势,2月增加最多(趋势为18.8 km²/10 a),但不显著,5月增加明显($P < 0.10$),增加率为7.2 km²/10 a。

表 1 2000—2019 年太白山平均积雪面积、占山区面积比例及变化趋势

时间	平均积雪面积 /km ²	占比 /%	变化趋势 /(km ² /10 a)
年	119.0	5.0	−7.4
秋季	66.1	2.8	−7.3
冬季	303.8	12.8	−29.7
春季	108.3	4.6	1.7
9 月	1.9	0.1	−0.7
10 月	38.5	1.6	9.5
11 月	158.9	6.7	−4.8
12 月	217.8	9.2	−93.2*
1 月	360.4	15.1	−9.3
2 月	336.1	14.1	18.8
3 月	254.9	10.7	−4.8
4 月	59.4	2.5	2.9
5 月	9.1	0.4	7.2*

注：* 代表趋势通过 0.10 的显著性水平检验。

2.4 低山区、中山区和高山区积雪天数和积雪面积变化

图 5 量化了 2000—2019 年太白山低山区、中

山区和高山区年、季、月积雪天数和积雪面积变化趋势。由图可知，太白山低山区全年积雪天数呈减少趋势，减少率为 10.3 d/10 a ($P<0.10$)，中山区和高山区全年积雪天数呈不明显的增加趋势(图 5a)，该结果与低山区积雪天数减少^[5]，高山区积雪天数增加的结论一致^[24]。低山区不同季节积雪天数均呈减少趋势，冬季减少最多，其次为春季，秋季减少较少；而中山区和高山区不同季节积雪天数均呈增加趋势，秋季增加最多，增加率为 4.7 d/10 a 和 4.5 d/10 a ($P<0.10$)，冬、春季增加较少(图 5a)。从月变化来看，低山区积雪天数的减少出现在 11—次年 1 月和 3—4 月，其中 12 月显著减少，减少率为 4.3 d/10 a ($P<0.05$)，其次为 1 月，减少率为 3.1 d/10 a，其余月份减少不明显；中山区和高山区积雪天数的增加出现在 10—11 月、1—3 月和 5 月，其中 11 月增加最多，增加率为 4.0 d/10 a ($P<0.10$) 和 3.0 d/10 a ($P<0.05$)，其次为 1 月，增加率为 2.2 d/10 a ($P<0.10$) 和 1.7 d/10 a ($P>0.10$)；中山区积雪天数在 12、4 月呈减少趋势，4 月减少率为 2.1 d/10 a，通过了 0.10 的显著性水平检验(图 5c)。

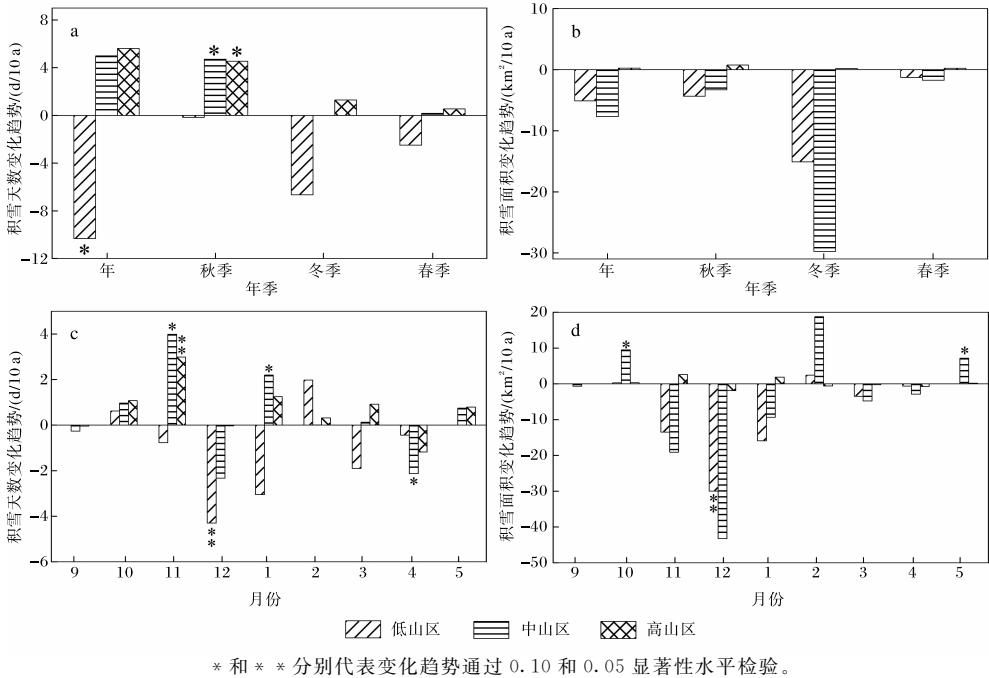


图 5 2000—2019 年太白山低山区、中山区和高山区年、季、月积雪天数(a, c)和积雪面积(b, d)变化趋势

近 20 a 间,太白山低山区和中山区年平均积雪面积呈减少趋势,减少率为 $5.1 \text{ km}^2/10 \text{ a}$ 和 $7.7 \text{ km}^2/10 \text{ a}$,冬季减少最多,其次是秋季,春季减少较少;而高山区年、季节平均积雪面积呈不明显的增加趋势(图 5b)。低山区积雪面积的减少出现在 11—次年 1 月和 3—4 月,其中 12 月减少最多,减少率为 $29.9 \text{ km}^2/10 \text{ a}$ ($P < 0.05$),其次为 1 月,减少率为 $15.9 \text{ km}^2/10 \text{ a}$;中山区几乎所有月份的积雪面积都呈减少趋势,仅 10 月和 5 月呈增加趋势 ($P < 0.10$),可能与气候变暖导致降水量增加有关^[25];高山区逐月积雪面积变化较小,均不显著(图 5d)。

由此看出:太白山低山区、中山区和高山区的积雪天数在年、季、月尺度上均出现了显著变化趋势,而积雪面积仅在个别月份变化明显,说明全球气候变暖对太白山积雪天数影响较大,对积雪面积影响较小。

3 结论

利用 MODIS 逐日无云积雪面积资料,分析了 2000—2019 年太白山年、季、月积雪天数和积雪面积变化特征,得出以下结论。

(1)太白山多年平均积雪首日为 10 月 8 号,积雪终日为 5 月 12 号,年平均积雪天数为 170 d,冬季积雪天数最多,1 月达 31 d,秋季最少;近 20 a 间,太白山积雪首日提前,积雪终日推迟 ($P < 0.05$),全年积雪天数增多,秋季增加最多,特别是 11 月。

(2)太白山年平均积雪面积 119.0 km^2 ,占山区总面积 5.0%,冬季积雪面积最大,特别是 1 月,占比 15%,春季较小,秋季最小,9 月占比不足 1%。近 20 a 间,太白山年、秋季、冬季平均积雪面积均呈减少趋势,12 月减少最多,其次为 1 月;而春季积雪面积呈增加趋势,5 月增加明显。

(3)近 20 a 间,太白山低山区年积雪天数、积雪面积均呈减少趋势,冬季减少最多,特别是 12 月,减少率达 $4.3 \text{ d}/10 \text{ a}$ 和 $29.9 \text{ km}^2/10 \text{ a}$;中山区全年积雪天数增加,秋季增加明显,11 月增加最多,而年平均积雪面积减少,冬季减少最多,12 月显著减少;高山区年积雪天数、积雪面积均呈增加趋势,秋季增加较多,尤其 11 月。

(4)高山区对流活动频繁,云的高频性和持续性对卫星观测的遮挡,导致研究结果具有一定的不确定性。今后需要更多、更长时间序列的高山区气象站观测资料,对卫星产品进行校正,进一步揭示全球变暖背景下的高山区气候变化机制。

参考文献:

- [1] BROWN R D, GOODISON B E. Interannual variability in reconstructed Canadian snow cover, 1915–1992[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9 (6): 1299–1318.
- [2] ARMSTRONG R L, BRUN E. Snow and climate: physical processes, surface energy exchange and modeling[M]. Cambridge U K: Cambridge University Press, 2008.
- [3] IPCC. Contributors to the IPCC special report on the oceans and cryosphere in a changing climate [M]. Cambridge U K: Cambridge University Press, 2022: 707–716.
- [4] HAMMOND J, SAAVEDRA F, KAMPF S K. Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001–2016[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(7066): 4369–4383.
- [5] 马丽娟, 效存德, 康世昌. 全球主要山地气候变化特征和异同: IPCC AR6 WGI 报告和 SROCC 综合解读[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(5): 605–621.
- [6] IPCC. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[M]. Cambridge U K: Cambridge University Press, 2019.
- [7] MUSSELMAN K N, ADDOR N, VANO J A, et al. Winter melt trends portend widespread declines in snow water resources[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(5): 418–424.
- [8] BORMANN K J, BROWN R D, DERKSEN C, et al. Estimating snow-cover trends from space[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(11): 924–928.
- [9] PULLIAINEN J, LUOJUS K, DERKSEN C, et al. Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018[J]. *Nature*, 2020, 581(7808): 294–298.
- [10] LIEVENS H, DEMUZERE M, MARSHALL H P, et al. Snow depth variability in the Northern

- Hemisphere mountains observed from space[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4629.
- [11] NOTARNICOLA C. Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000–2018[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 243: 111781.
- [12] SMITH T, BOOKHAGEN B. Changes in seasonal snow water equivalent distribution in High Mountain Asia (1987 to 2009)[J]. Science Advances, 2018, 4(1): e1701550.
- [13] 刘玉莲, 任国玉, 于宏敏. 中国降雪气候学特征[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1176–1185.
- [14] 雷向杰, 李亚丽, 雷杨娜, 等. 秦岭主峰太白山高山区气候季节划分[J]. 陕西气象, 2022 (6): 26–33.
- [15] 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.
- [16] 王娟, 卓静. 利用遥感技术监测太白山积雪变化[J]. 陕西气象, 2012 (1): 30–31.
- [17] 王娟, 董金芳, 何慧娟. 基于 GIS 和 RS 的秦岭主峰太白山积雪变化研究[J]. 陕西气象, 2021 (6): 31–35.
- [18] 雷向杰, 李亚丽, 李茜, 等. 1962–2014 年秦岭主峰太白山地区积雪变化特征及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38 (5): 1201–1210.
- [19] HAO X, HUANG G, CHE T, et al. The NIEER AVHRR snow cover extent product over China—a long-term daily snow record for regional climate research[J]. Earth System Science Data, 2021, 13 (10): 4711–4726.
- [20] HAO X, HUANG G, ZHENG Z, et al. Development and validation of a new MODIS snow-cover-extent product over China [J]. Hydrology And Earth System Sciences, 2022, 26 (8): 1937–1952.
- [21] 黄晓东, 马英, 李雨馨, 等. 1980—2020 年青藏高原积雪时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2023, 45 (2): 423–434.
- [22] 赵琴, 郝晓华, 王建, 等. 2000—2020 年 MODIS 中国积雪物候数据集[J]. 中国科学数据, 2022, 7 (3): 1–10.
- [23] 王娟, 雷向杰, 卓静, 等. 秦岭主峰太白山积雪时空变化规律及驱动机制分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 59–64.
- [24] 曹晓云, 肖建设, 郝晓华, 等. 2001—2020 年三江源地区积雪日数变化及地形分异[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1370–1380.
- [25] 刘晓琼, 吴泽洲, 刘彦随, 等. 1960—2015 年青海三江源地区降水时空特征[J]. 地理学报, 2019, 74 (9): 1803–1820.