

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0129

HAN Ting, LEI Xiangjie, LI Yali, et al. Analysis on the variation characteristics of regional alpine snow cover events in the Qinling Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4):1040-1048. [韩婷, 雷向杰, 李亚丽, 等. 秦岭区域性高山积雪事件变化特征分析 [J]. 冰川冻土, 2021, 43(4):1040-1048.]

## 秦岭区域性高山积雪事件变化特征分析

韩婷<sup>1</sup>, 雷向杰<sup>2</sup>, 李亚丽<sup>3</sup>, 王毅勇<sup>1</sup>

(1. 宝鸡文理学院, 陕西宝鸡, 721013; 2. 陕西省气候中心, 陕西西安, 710014; 3. 陕西省气象信息中心, 陕西西安 710015)

**摘要:** 为了研究秦岭高山积雪事件变化特点, 利用秦岭陕西境内32个国家气象站1980—2016年度共37年高山积雪观测记录, 统计分析5个或者5个以上气象站连续积雪日数 $\geq 3$  d的区域性高山积雪事件、5个或者5个以上气象站连续积雪日数 $\geq 20$  d的区域性长时间高山积雪事件、5个或者5个以上气象站连续积雪日数 $\geq 60$  d的区域性稳定高山积雪事件, 结果表明: 秦岭1980—2016年度共出现区域性高山积雪事件114次, 其中包含区域性长时间高山积雪事件29次, 区域性稳定高山积雪事件6次。区域性高山积雪事件均发生在冷季(11月—次年4月), 其中60%的区域性高山积雪事件发生在冬季(12月—次年2月)。6次区域性稳定高山积雪事件都发生在12月—次年3月。区域性高山积雪事件1980—1989年度最多(44次), 其次是1990—1999年度和2000—2009年度(各29次), 2010—2016年度最少(12次)。1980—2016年度, 区域性高山积雪事件呈现明显减少趋势(通过 $\alpha=0.01$ 的信度检验), 减幅为 $-0.86$ 次 $\cdot(10a)^{-1}$ , 区域性高山稳定积雪事件次数与冷季平均气温呈显著的负相关关系(通过 $\alpha=0.01$ 的信度检验)。

**关键词:** 秦岭; 高山积雪; 积雪事件; 气候变化; 气温升高

**中图分类号:** P333.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)04-1040-09

### 0 引言

IPCC第五次评估报告指出: 继续排放温室气体将进一步提高全球温度, 全球气候变暖是人类正在面临的一个重要问题<sup>[1]</sup>。积雪作为冰冻圈三大要素之一, 具有超高的反照率、热传导性差等特征, 在一定程度上可以对全球气候变暖做出敏感响应<sup>[2-4]</sup>。积雪在融化的过程中会引起大气环流变化, 积雪也是重要的淡水资源, 影响地表径流的变化<sup>[5]</sup>。

若全球气温升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 北半球冻土南界将会北移, 冬季和春季的雪水当量也会一致减少<sup>[6]</sup>。随着卫星监测技术的发展, 研究发现由于气温升高北半球积雪自20世纪80年代以来逐渐减少<sup>[7]</sup>。在国际上, 对于积雪变化也有大量研究, Frei等<sup>[8]</sup>通过研究北美洲冬季积雪变化, 发现自1930—1980年, 积雪呈增加趋势, 1980年后呈减少趋势。利用MO-

DIS积雪产品, 结合北极动植物群落调查, 推测出北极积雪将会更薄<sup>[9]</sup>。Malgorzata等<sup>[10]</sup>通过对波兰地区积雪深度、积雪日数、积雪初终日数的研究, 发现北大西洋涛动对该地区影响较大。

气候变暖将对处于较暖气候区的积雪产生较大威胁<sup>[11]</sup>, 众多学者通过对中国近几十年来积雪变化分析, 得出东北、新疆北部和青藏高原中东部为中国积雪日数和最大积雪深度的三个高值区, 这三大积雪区积雪日数减少, 是由于气温升高导致的<sup>[12-15]</sup>。

在东北地区, 积雪反照率在积累期、稳定期、消融期差异大, 积累期反照率为最大值, 积雪持续时间与海拔有很大的关系<sup>[16-17]</sup>。近40 a, 东北地区年平均积雪日数93 d, 春季积雪日数的增加, 使年积雪日数呈增加趋势, 但是积雪深度呈现减少趋势, 其中春季减少速率最大<sup>[18-19]</sup>。

收稿日期: 2019-03-27; 修订日期: 2019-10-31

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF201845); 陕西省气象局面上基金项目(2017M-5); 宝鸡文理学院重点项目(ZK2017044)资助

作者简介: 韩婷, 硕士研究生, 主要从事气候与气候变化相关研究. E-mail: 465761229@qq.com

通信作者: 雷向杰, 教授级高级工程师, 主要从事气候与气候变化相关研究. E-mail: lei\_xiang\_jie@sina.com

对新疆地区近年来积雪变化的研究发现,积雪日数逐渐减少,积雪深度有所增加,积雪面积在不同季节、不同海拔有不同表现,海拔 4 000~5 000 m 积雪面积最大<sup>[20-22]</sup>。积雪变化对当地冰雪灾害与径流变化也具有重要的影响,由于气候变化的作用,新疆地区洪水发生次数有所增加,气温升高导致河流径流变化明显<sup>[23-24]</sup>。

在青藏高原区,通过运用卫星遥感资料与地面气象站观测资料相结合,发现积雪日数的减少主要受北大西洋海温异常、气温升高等原因的影响,在不同地区积雪开始累积的时间不同,南部最先累积,其后向东向西发展,由于人类活动的影响,部分山区积雪范围有下降趋势<sup>[25-28]</sup>。

秦岭山脉作为中国重要的气候分界线,秦岭山区积雪长期变化对区域气候有重要的影响,同时积雪变化也是气候变化区域响应的直接反映。胡胜等<sup>[29]</sup>通过小波分析得出气候变化对秦岭北坡灞河流域的影响存在明显的周期性。陈超男等<sup>[30]</sup>对秦岭山地的植被覆盖垂直差异对气候因子的响应进行研究。相关学者通过对 1960 年以来秦岭地区气候变化的研究,发现气温呈上升趋势<sup>[31-33]</sup>。白红英等<sup>[34]</sup>研究发现,50 年来秦岭山区 1 月 0℃等温线呈上升趋势,平均上升高度 143.7 m。雷向杰等<sup>[35]</sup>通过对 1962—2014 年太白山积雪变化研究,得出太白山低山区积雪日数减少,深度变浅,西部中高山区积雪日数减少,气温升高是积雪减少的主要原因的结论。

然而,现阶段对秦岭山区积雪变化研究较少,对秦岭高山积雪的研究更少。相对于我国三大积雪区,秦岭高山区气象站点稀少,相关研究更加欠缺。本文利用 37 年来秦岭山区 32 个气象站的高山积雪观测记录,将原始纸质记录进行电子录入、整理,结合气温与降水资料,分析秦岭高山积雪事件变化特点。研究结果不但可弥补我国中部山地积雪研究不足,也可服务于当地应对气候变化及水资源供给方案,以及为秦岭生态环境保护和国家公园建设提供参考。

## 1 研究区概况

秦岭位于我国中部,东西走向,秦岭南北坡气候差异大,本文选取秦岭陕西段为研究对象。位于 32.8°~34.4°N、105.5°~111.1°E,面积约 6.68×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。北坡峡谷众多,地形较为陡峭,与关中平原接壤,南

坡坡势较缓,与巴山相连。秦岭是我国重要的地理分界线,是 1 月 0℃等温线分界线、800 mm 年降水量线、亚热带季风气候带和温带季风气候带的分界线,秦岭对区域小气候的调节具有重要的意义。

## 2 资料与方法

本文使用 1980—2016 年度秦岭山区陕西境内 32 个国家气象站数据,其中选取秦岭北坡户县、华阴、潼关、华县、蓝田、华山、长安、周至、眉县、宝鸡、凤县、洛南、太白共 13 个区县,南坡包括安康、旬阳、汉阴、石泉、紫阳、山阳、商南、丹凤、镇安、商县、柞水、宁陕、佛坪、城固、汉中、洋县、留坝、勉县、略阳共 19 个区县。高山积雪观测记录来源于气象站观测报表中的纪要栏,气温和降水数据采用陕西省气象信息中心提供的逐日数据。根据高山积雪观测记录,将有积雪的日期赋值为 1,没有积雪的日期赋值为 0。

积雪按持续时间的不同,分为永久积雪和季节积雪,永久积雪终年不消融,季节积雪根据季节的更迭而变化,冬季形成,夏季消融。季节积雪又分为稳定积雪和不稳定积雪。参考气象部门对沙尘事件等的定义<sup>[36]</sup>,对积雪事件进行定义:秦岭山区 32 个气象站中,有 5 个或者 5 个以上的气象站连续积雪日数≥3 d 定义为区域性高山积雪事件,满足上述条件的积雪首日为事件开始日期,事件中不满足条件的前一日为终日。有 5 个或者 5 个以上的气象站连续积雪日数≥20 d 定义为区域性长时间高山积雪事件,有 5 个或者 5 个以上的气象站连续积雪日数≥60 d 定义为区域性稳定高山积雪事件,起始日期确定方法与区域性高山积雪事件相同。

根据《地面气象观测规范》<sup>[37]</sup>,考虑积雪等天气现象在冬季和春季存在连续性、初日和终日跨年的特点,定义年度为当年 7 月 1 日—次年 6 月 30 日,冷季为当年 11 月 1 日—次年 4 月 30 日,冬季为当年 12 月 1 日—次年 2 月 28 日或者 29 日;例如,1998 年 12 月 1 日—次年 2 月 28 日为 1998—1999 年冬季,文中简写为 1998 年冬季<sup>[38]</sup>。

采用最小二乘法作线性倾向估计,分析高山积雪事件和气温、降水量等气象要素随时间的变化趋势,用线性倾向率表示气象要素的变化趋势和速率。通过对气象要素与时间的相关系数的检验,判断变化趋势是否显著。

### 3 高山积雪事件特征

#### 3.1 区域性高山积雪事件特征

1980—2016年度,秦岭山区共出现114次区域性高山积雪事件,平均每次事件16 d。其中1980—1989年出现44次,占总事件次数的38.6%,平均每次15.5 d;1990—1999年出现29次,占25.4%,平均每次21.0 d;2000—2009年出现29次,占25.4%,平均每次15.0 d;2010—2016年出现12次,占10.6%,平均每次7.7 d。20世纪80年代出现的区域性高山积雪事件最多,90年代次之,2000年后区域性高山积雪事件次数逐渐减少。在114次积雪事件中,积雪日数大于等于10 d的有51次,大于等于20 d有29次,大于等于60 d的有6次。1980—2016年度秦岭山区区域性高山积雪事件次数呈现明显减少趋势(通过了 $\alpha=0.01$ 的信度检验),减幅为 $-0.86$ 次· $(10a)^{-1}$ (图1)。

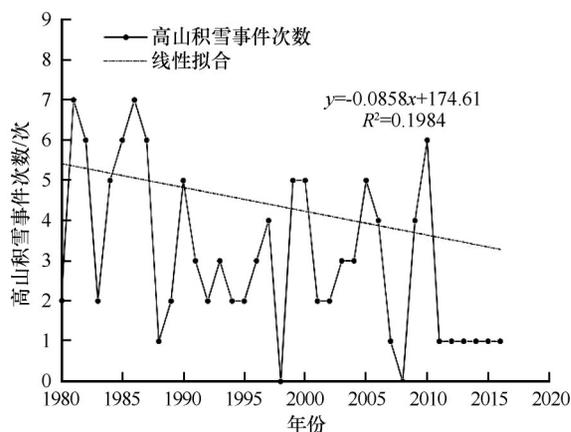


图1 1980—2016年秦岭山区区域性高山积雪事件次数变化  
Fig. 1 Change of the number of regional alpine snow processes in the Qinling Mountains from 1980 to 2016

从季节分布来看,区域性高山积雪事件均出现在冷季(11月—次年4月),其中有69次出现在冬季(12月—次年2月),占60%。夏季(6—8月)没有出现区域性高山积雪事件。统计每次区域性高山积雪事件中每个气象站的连续高山积雪日数,挑出连续积雪最长的气象站(含并列的气象站),再统计每个气象站成为区域高山积雪事件中最长连续高山积雪日数的总次数,发现太白、华山、山阳3个气象站成为区域高山积雪事件中最长连续积雪日数的次数最多,分别为太白111次,华山55次,山阳45次(图2)。

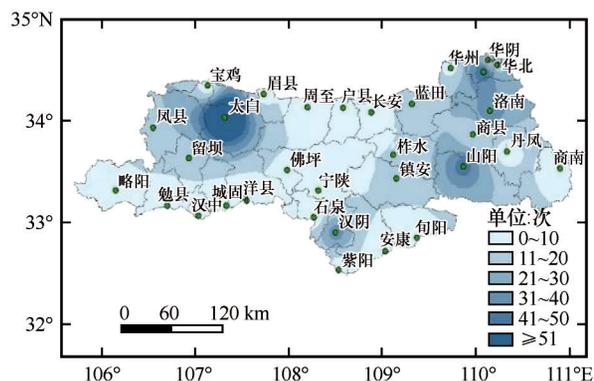


图2 各气象站成为区域高山积雪事件中最长连续积雪日数的次数

Fig. 2 The number of times that each weather station becomes the longest continuous snow cover in the area

#### 3.2 区域性长时间高山积雪事件特征

秦岭山区共出现29次区域性长时间高山积雪事件(表1),平均每次事件42 d。其中1980—1989年度11次,占总次数的37.9%,平均每次41.5 d。1990—1999年度11次,占37.9%,平均每次44 d。2000—2009年度6次,占20.7%,平均每次42 d。2010—2016年度1次,占3.5%,平均每次20 d。

21世纪以来,区域性长时间高山积雪事件急剧减少,2014年后没有出现过区域性长时间高山积雪事件。从开始时间看,29次区域性长时间高山积雪事件仅2次开始于11月,其余28次均开始于12月或者1月。29次事件中太白气象站观测到的高山最长积雪日数均为每次事件中最大的,平均每次42 d。

#### 3.3 区域性稳定高山积雪事件特征

1980—2016年度,秦岭山区共出现区域性稳定高山积雪事件6次,平均每次事件持续时间为73.7 d。6次区域性稳定高山积雪事件20世纪80年代出现2次,90年代出现2次,21世纪后的2002年和2004年各出现1次,2005年后没有出现过稳定高山积雪事件。1989年12月21日—1990年3月11日,积雪事件持续时间81 d,是有观测资料37 a来持续时间最长的,32个气象站中有28个观测到高山积雪,平均每个气象站出现积雪44.3 d。

### 4 高山积雪事件与气温降水的关系

#### 4.1 区域性高山积雪事件与气温降水的关系

气温的高低与降水量的大小直接影响积雪的多少,进而影响积雪事件的次数,气温升高与降水减少都会造成积雪事件次数减少。1980—2016年

表1 秦岭山区区域性长时间高山积雪事件及其最长连续积雪日数气象站

Table 2 Regional long-term alpine snow accumulation process in Qinling area and its longest continuous snow cover weather station

序号	时间	D	N	N <sub>3</sub>	N <sub>20</sub>	最长站名
1	1981-01-20—02-12	23	19	15	7	太白
2	1981-12-13—1982-01-03	22	22	16	3	太白、商县、山阳
3	1982-01-23—02-28	37	20	16	8	太白、山阳
4	1982-12-31—1983-01-23	24	22	14	3	太白、山阳、紫阳
5	1984-01-17—02-29	44	22	21	14	太白、洛南、山阳
6	1984-12-08—1985-01-31	55	26	23	21	太白
7	1985-12-20—1986-01-27	39	24	22	9	山阳、汉阴
8	1986-12-15—1987-01-09	26	24	18	7	太白、山阳
9	1988-02-14—03-10	26	28	28	8	太白、华山、洛南、山阳
10	1988-12-28—1989-03-17***	80	30	27	22	太白、洛南、汉阴
11	1989-12-21—1990-03-11***	81	28	28	19	太白、汉阴
12	1991-01-22—02-16	26	19	17	3	凤县、太白、山阳
13	1991-12-23—1992-02-19	59	28	27	18	太白、山阳
14	1992-12-26—1993-03-05***	70	30	27	22	太白
15	1993-11-17—12-21	35	26	24	9	太白
16	1994-01-14—02-16	34	30	27	7	太白、汉阴
17	1994-02-23—03-22	28	29	27	8	太白、汉阴
18	1994-12-11—1995-2-28***	80	28	26	19	太白、汉阴
19	1996-01-11—03-01	51	26	24	20	太白
20	1997-01-22—03-04	42	26	23	11	太白、汉阴
21	1998-01-10—02-07	29	24	23	6	太白、洛南
22	2000-01-12—02-11	31	24	22	14	太白、洛南、商县
23	2001-01-07—02-04	29	17	14	5	太白
24	2001-12-03—28	26	17	13	10	太白、蓝田
25	2002-12-20—2003-02-18***	61	26	24	13	太白
26	2004-12-21—2005-02-28***	70	28	26	16	太白
27	2008-01-11—02-29	50	28	26	22	太白、洛南
28	2009-11-11—12-01	21	26	22	3	太白、洛南
29	2014-02-05—24	20	14	14	3	太白、华山、洛南

注: 表中N表示区域性长时间高山积雪事件中观测到有高山积雪的气象站数量, N<sub>3</sub>表示观测到连续高山积雪大于等于3 d的气象站数量, N<sub>20</sub>表示观测到连续高山积雪大于等于20 d的气象站数量, D表示区域性长时间高山积雪事件中的最长积雪日数。\*\*\*表示大于等于60 d的区域性稳定高山积雪事件。

度,秦岭山区年度平均气温呈明显升高趋势,增幅为 $0.39^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,平均气温与时间(年度)相关系数0.74,通过了0.01的显著性水平检验,说明近37 a秦岭山区气候明显变暖。近37 a秦岭山区年度降水量波动较大,但变化趋势不明显,减少幅度为 $16.6\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,降水量与时间(年度)相关系数-0.15,未通过0.20显著性水平检验,说明气温升高是秦岭区域性高山积雪事件减少的主要原因。

1980—2016年度,秦岭114次区域性高山积雪事件均出现在冷季。近37 a冷季平均气温上升趋势

明显,增幅为 $0.42^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,平均气温与时间(年度)相关系数0.68,通过0.01的显著性水平检验,冷季降水量波动大,但变化趋势不明显,增加幅度为 $0.36\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,降水量与时间(年度)相关系数0.13,未通过0.50显著性水平检验。秦岭区域性高山积雪事件次数与冷季平均气温呈现非常明显的负相关关系,相关系数-0.47,通过了0.005的显著性水平检验。说明近37 a秦岭山区冷季气温升高,降水量变化不大,气温升高导致区域性高山积雪事件次数减少。

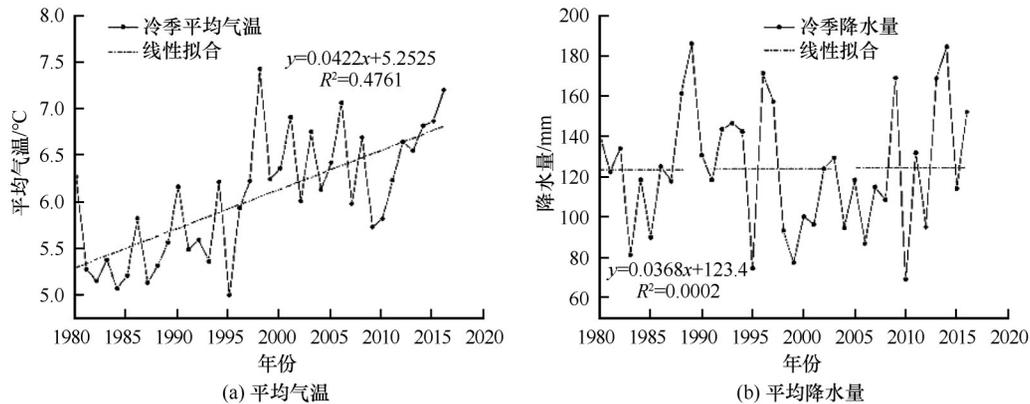


图3 陕西秦岭山区冷季平均气温(a)、降水量(b)变化趋势

Fig. 3 Trends of mean temperature and precipitation in cold season in qinling mountains, shaanxi province

#### 4.2 区域性高山稳定积雪事件出现时段气温和降水特点

秦岭6次区域性高山稳定积雪事件均出现在12月11日—次年3月17日,统计1980—2016年度历年12月11日—次年3月17日32个气象站平均气温和降水量,该时段平均气温为2.86℃,平均降水量为33.28mm,图4(a)和4(b)分别给出历年该时段平均气温距平和降水量距平百分率变化。如图4所示,1988年、1989年、1992年、1994年、2002年、2004年出现了稳定积雪事件,这6年稳定积雪出现时段平均气温低于1980—2016年度平均值,均为负距平,而且1988年、1989年、1992年、2002年平均降水

量均较1980—2016年度平均值偏多10%以上,其中3个年份高于20%。1994年、2004年降水略偏少,接近1980—2016年度平均值。

1989年12月21日—1990年3月11日是37年来秦岭山区区域性高山积雪事件持续时间最长的。在陕西省气候影响评价汇编中,记录了1988年12月27日—1989年2月23日陕西先后出现五次降雪过程,1—2月全省平均降雪42mm,较常年偏多近两倍,造成严重的积雪和电线积冰,秦岭部分山区积雪50~70cm,秦岭西部山区电线积冰直径达100~185mm。这与秦岭山区高山积雪相印证,说明高山积雪记录真实可用性。

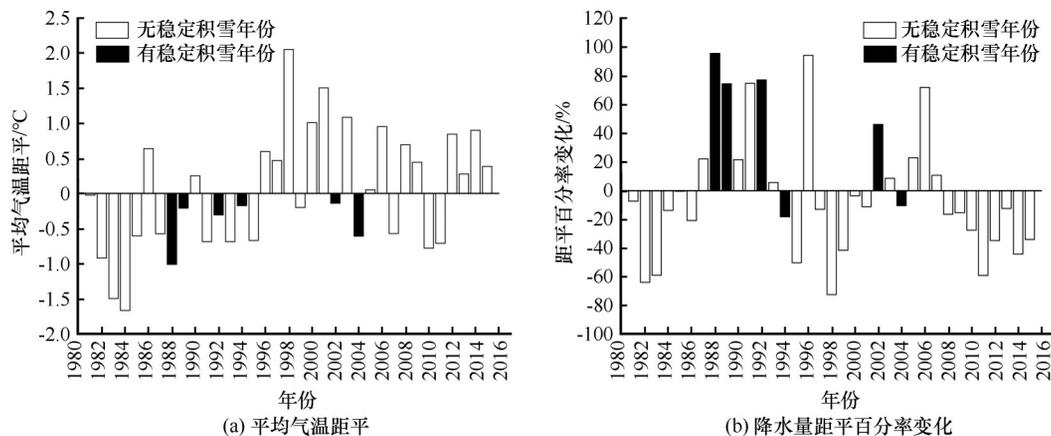


图4 六次区域性高山稳定积雪事件年12月11日—次年3月17日平均气温距平和降水量距平百分率变化

Fig. 4 The average temperature anomaly and precipitation anomalies of the six regional alpine stable snow events from December 11 to March 17

#### 5 太白山积雪事件分析

秦岭山区区域性长时间高山积雪事件和区域性稳定高山积雪事件分析结果表明,每次事件中太白气象站观测到的高山积雪事件均是持续时间最

长的。太白山是秦岭主峰,海拔高,积雪时间长,下面利用太白气象站(海拔1543.6m)观测到的高山积雪记录,对太白山高山积雪事件单独进行分析。参照秦岭山区区域性高山积雪事件定义,将太白气象站观测到高山积雪分为太白气象站高山积雪事

件、太白气象站长时间高山积雪事件、太白气象站稳定高山积雪事件,规定太白气象站本站(海拔 1 543.6 m)实测连续积雪日数同理定义。

### 5.1 太白山高山积雪事件分析

1980—2016 年度,统计出太白气象站高山积雪事件共 161 次,平均每次 34 d,出现在当年 9 月—次年 5 月。161 次高山积雪事件中,1980—1989 年度 54 次,平均每年 5.4 次;1990—1999 年度 46 次,平均每年 4.6 次;2000—2009 年度 36 次,平均每年 3.6 次;2010—2016 年度 25 次,平均每年 3.6 次。

太白气象站长时间高山积雪事件共 56 次,平均每次 83.8 d,出现在当年 10 月—次年 4 月。1980—1989 年度 18 次,平均每年 1.8 次;1990—1999 年度 13 次,平均每年 1.3 次;2000—2009 年度 15 次,平均每年 1.5 次;2010—2016 年 10 次,平均每年 1.4 次。

太白气象站稳定高山积雪事件共 37 次,平均每次 112.5 d。1980—1989 年度 10 次,1990—1999 年度 9 次,2000—2009 年度 11 次,2010—2016 年度 7 次。1990、1998 没有出现稳定高山积雪事件,1996、2005 年出现 2 次稳定高山积雪事件,其他年份每年均出现 1 次稳定高山积雪事件。太白气象站持续时间最长的积雪事件为 2003 年 11 月 7 日—2004 年 4 月 18 日,持续 164 d。

太白气象站高山积雪事件的持续时间与事件次数均多于秦岭山区区域性高山积雪事件,如图 5 所示,1980—2016 年度,太白气象站积雪事件次数呈现减少趋势(通过了  $\alpha=0.1$  的可信度检验),减幅为  $-0.59 \text{ 次} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,但减少趋势没有秦岭山区区域性高山积雪事件减少趋势明显。

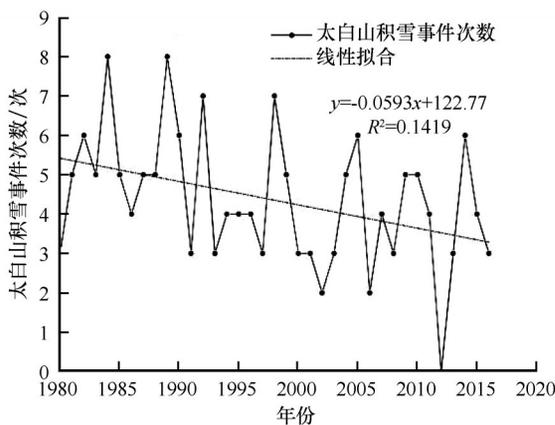


图 5 1980—2016 年度太白山高山积雪事件次数变化  
Fig. 5 Change of the number of snow cover processes in the Taibai Mountain from 1980 to 2016

### 5.2 太白气象站积雪事件分析

1980—2016 年度,统计出太白气象站本站积雪事件共 122 次,平均每次 5.3 d,出现在当年 11 月—次年 3 月。122 次太白气象站本站积雪事件中,1980—1989 年度 37 次,平均每年 3.7 次;1990—1999 年度 32 次,平均每年 3.2 次;2000—2009 年度 37 次,平均每年 3.7 次;2010—2016 年度 16 次,平均每年 2.3 次。在太白气象站本站观测到的积雪事件中,仅有 2 次为长时间积雪事件,没有出现稳定积雪事件(表 2)。通过对 37 a 来每年太白气象站本站积雪事件与太白高山积雪事件的积雪日数比较(图 6),可以清晰地看出,由于太白气象站本站观测数据海拔低于高山积雪观测海拔,太白站本站积雪事件次数明显低于太白高山积雪事件次数,长时间积雪事件次数远远低于高山积雪事件次数,太白站本站没有出现稳定积雪事件。雷向杰等在 6 月对太白山考察中发现,太白山眉县气象站所在地点观测到的气温与太白山主峰山顶气温差异巨大,大峪海至大文公庙之间的路边有正在消融的冻土和小冰柱<sup>[39]</sup>。在对太白山驴友伤亡事件天气分析中,利用太白山区域内新建的 13 个自动气象站 2017 年 5 月 1 日—7 日气温、

表 2 太白山本站积雪事件和高山积雪事件次数对比

Table 2 Comparison of the number of snow events in Taibai Mountain

事件	积雪事件/次	长时间积雪事件/次	稳定积雪事件/次
太白山高山积雪事件	161	56	37
太白山本站积雪事件	122	2	0

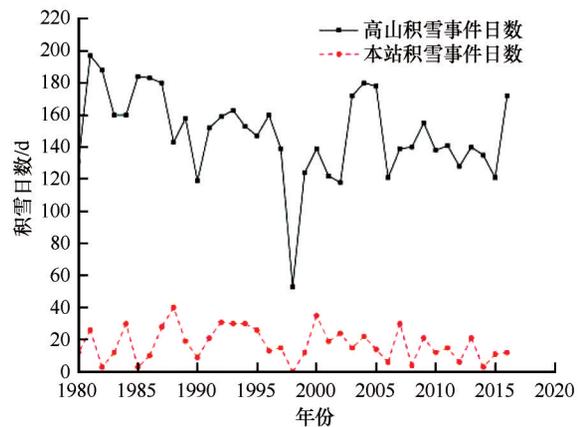


图 6 太白山历年高山积雪事件积雪总日数与本站积雪事件积雪总日数对比图

Fig. 6 Comparison of the number of days of snow in the mountainous area of Taibai Mountain and the number of days of snow accumulation in this station

降水、湿度、风、气压等监测数据和太白、眉县气象站高山积雪观测记录,分析事件前后太白山的天气条件,周至气象站平均气温 20 ℃,山顶拔仙台最高处平均气温低至-2.9 ℃,气温差异巨大<sup>[40]</sup>。遥感观测记录又受到观测不连续的影响<sup>[41]</sup>,由此可证,积雪与海拔高度的密切关系和高山积雪观测记录的珍贵性。

## 6 结论

统计分析秦岭地区 32 个气象站 1980—2016 年度高山积雪观测记录,得到如下主要结论:

(1)1980—2016 年度,秦岭山区共出现 114 次区域性高山积雪事件,其中区域性长时间高山积雪事件 29 次,区域性稳定高山积雪事件 6 次。114 次区域性高山积雪事件均发生在冷季,其中的 60% 发生冬季。区域性长时间积雪事件共 29 次,除 2 次开始于 11 月外,其他 27 次均开始于 12 月或次年 1 月。年度积雪事件次数与冷季平均气温呈显著的负相关。

(2)1980—2016 年度,秦岭山区区域性高山稳定积雪事件共 6 次,平均每次积雪日数 73.7 d。1989 年 12 月 21 日—1990 年 3 月 11 日为最长的区域性高山稳定积雪事件,持续 81 d,该事件中,高山积雪持续最长的气象站是太白气象站和汉阴气象站。

(3)在气候变暖的背景下,1980—2016 年度,秦岭山区区域性高山积雪事件呈现明显的减少趋势,减少速率为 $-0.86 \text{次} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。各年代区域长时间事件平均出现次数 20 世纪 80 年代平均每年 1 次,90 年代平均每年 0.9 次,21 世纪 10 年代平均每年仅 0.4 次。2004 年后秦岭山区没有出现区域性稳定高山积雪事件。

(4)1980—2016 年度,太白气象站观测到的高山积雪事件 161 次,其中长时间高山积雪事件 58 次,稳定高山积雪事件 37 次。37 年来太白气象站观测到的高山积雪事件呈减少趋势,减少速率为 $-0.59 \text{次} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

## 参考文献(References):

- [1] Qin Dahe, Thomas Stocker. Highlights of the IPCC working group fifth assessment report [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(1): 1-6. [秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 1-6.]
- [2] Choi G, Robinson D, Kang S. Changing northern Hemisphere snow seasons [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(19): 5305-5310.
- [3] 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.]
- [4] Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China [J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 49: 145-154.
- [5] Ma Lijuan, Zhao Jingfeng, Zhang Hongjun, et al. Impact of glacier and snow melting on Bosten Lake under climate change [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(2): 210-216. [马丽娟, 赵景峰, 张宏俊, 等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯湖水位变化的影响[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(2): 210-216.]
- [6] Kong Ying, Wang Chenghai. Responses and changes in the permafrost and snow water equivalent in the Northern Hemisphere under a scenario of 1.5 °C warming [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 13(4): 316-326. [孔莹, 王澄海. 全球升温 1.5 °C 时北半球多年冻土及雪水当量的响应及其变化[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(4): 316-326.]
- [7] Robinson D A, Dewey K F. Recent secular variations in the extent of Northern Hemisphere snow cover [J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(10): 1557-1560.
- [8] Frei A, Robinson D A. Northern Hemisphere snow extent: Regional variability 1972—1994 [J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 19(14): 1535-1560.
- [9] Young K L, Brown L, Labine C. Snow cover variability at Polar Bear Pass, Nunavut [J]. *Arctic Science*, 2018, 4(4): 669-690.
- [10] Szwed M, Pińskwar I, Kundzewicz Z W, et al. Changes of snow cover in Poland [J]. *Acta Geophysica*, 2017, 65(1): 65-76.
- [11] Ma Lijuan, Qin Dahe. Temporal-spatial characteristics of observed key parameters of snow cover in China during 1957-2009 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 1-11. [马丽娟, 秦大河. 1957—2009 年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 1-11.]
- [12] Wang Chenghai, Wang Zhilan, Cui Yang. Snow cover of China during the last 40 years: spatial distribution and interannual variation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 301-310. [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.]
- [13] Wang Xuechun, Li Dongliang. Spatial-Temporal variations of snow cover days and the maximum depth of snow cover in China during recent 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 247-256. [王春学, 李栋梁. 中国近 50 a 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.]
- [14] Zhong Zhentao, Li Xia, Xu Xiacong, et al. Spatial-temporal variations analysis of snow cover in China from 1992—2010 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018 (25): 2641-2654. [钟镇涛, 黎夏, 许晓聪, 等. 1992—2010 年中国积雪时空变化分析[J]. *科学通报*, 2018 (25): 2641-2654.]
- [15] Tan Xuejin, Wu Zhenni, Mu Xingmin, et al. Spatiotemporal changes in snow cover over China during 1960 - 2013 [J]. *Atmospheric research*, 2019, 218: 183-194.
- [16] Liu Shibo, Zang Shuying, Zhang Liqun, et al. Remote sensing analysis of temporal and spatial variation of snow depth in northeast frozen soil area [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 261-269. [刘世博, 臧淑英, 张丽娟,

- 等. 东北冻土区积雪深度时空变化遥感分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 261-269. ]
- [17] Yang Q, Song K, Hao X, et al. An assessment of snow cover duration variability among three basins of Songhua River in Northeast China using binary decision tree[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(6): 946-956.
- [18] Zhang Xiaowen, Zang Shuying, Sun Li. Spatial-temporal variation characteristics of snow cover days in Northeast China in the past 40 years and their relationship with climatic factors[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(9): 958-968. [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. ]
- [19] Lu Qian, Li Baofu, Wang Zhihui, et al. The relationship between spatial and temporal change of snow cover depth and atmospheric circulation in Northeast China from 1979 to 2014 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 907-915. [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. ]
- [20] Hu Liequn, Li Shuai, Liang Fengchao. Analysis of the variation characteristics of snow covers in Xinjiang Region during recent 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 793-800. [胡列群, 李帅, 梁凤超. 新疆区域近50 a 积雪变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 793-800. ]
- [21] Qin Yan, Ding Jianli, Zhou 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. ]
- [22] 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.
- [23] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The response of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): hazards effect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1355-1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1355-1370. ]
- [24] Xiang Yanyun, Chen Yaning, Zhang Qifei, et al. Trends of snow cover and streamflow variation in Kaidu River and their influential factors[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1855-1865. [向燕芸, 陈亚宁, 张齐飞, 等. 天山开都河流域积雪、径流变化及影响因子分析[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1855-1865. ]
- [25] Wan Xin, Kang Shichang, Li Yanfeng, et al. Temporal and spatial variations of snow cover and its effect factors in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau, 2007-2011 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1400-1409. [万欣, 康世昌, 李延峰, 等. 2007—2011年西藏纳木错流域积雪时空变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1400-1409. ]
- [26] Liu Jinping, Zhang Wanchang, Deng Cai, et al. Spatiotemporal variations of snow cover over Yarlung Zangbo River basin in Tibet from 2000 to 2014 and its response to key climate factors [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 643-654. [刘金平, 张万昌, 邓财, 等. 2000—2014年西藏雅鲁藏布江流域积雪时空变化分析及对气候的响应研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 643-654. ]
- [27] Chen Zhiheng, Zhang Jie, Xu Weiping. Relationship between multi-scale variations of snow cover on the Tibetan Plateau in early-spring and the North Atlantic sea surface temperature [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 655-665. [陈志恒, 张杰, 徐玮平. 青藏高原初春积雪的多尺度变化与北大西洋海温的关系[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 655-665. ]
- [28] Yan Y, Zhang Y, Shan P, et al. Snow cover dynamics in and around the Shangri-La County, southeast margin of the Tibetan Plateau, 1974 - 2012: the influence of climate change and local tourism activities [J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2015, 22(2): 156-164.
- [29] Hu Sheng, Qiu Haijun, Song Jinxi, et al. Influencing mechanisms of climate change on runoff process in the north slope of Qinling Mountains: a case of the Bahe River basin [J]. Arid Land Geography, 2017(5): 967-978. [胡胜, 邱海军, 宋进喜, 等. 气候变化对秦岭北坡径流过程的影响机制研究——以灞河流域为例[J]. 干旱区地理, 2017(5): 967-978. ]
- [30] Chen Chaonan, Zhu Lianqi, Tian Li, et al. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling-Daba Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3257-3266. [陈超男, 朱连奇, 田莉, 等. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3257-3266. ]
- [31] Zhang Yang, Bai Hongying, Su Kai, et al. Spatial variation of extreme temperature change on southern and northern slopes of Shaanxi section in Qinling Mountains during 1960—2013 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1296-1308. [张扬, 白红英, 苏凯, 等. 1960—2013年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1296-1308. ]
- [32] Zhang Yang, Bai Hongying, Huang Xiaoyue. et al. Variation of extreme temperature and its impact on regional warming in Qinling Mountains during recent 55 a [J]. Mountain Research. 2018, 36(1): 23-33. [张扬, 白红英, 黄晓月, 等. 近55 a 秦岭山区极端气温变化及其对区域变暖的影响[J]. 山地学报, 2018, 36(1): 23-33. ]
- [33] Lu Xin, Yin Shuyan, Wang Shuixia, et al. Temporal and spatial variation of agricultural climatic resources in the Northern and Southern regions of the Qinling Mountains [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018(8): 1866-1878. [芦鑫, 殷淑燕, 王水霞, 等. 秦岭南北地区农业气候资源时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018(8): 1866-1878. ]
- [34] Bai Hongying, Ma Xinpeng, Gao Xiang, et al. Variations in January temperature and 0 °C isothermal curve in Qinling Mountains based on DEM [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1443-1450. [白红英, 马新萍, 高翔, 等. 基于DEM的秦岭山地1月气温及0 °C等温线变化[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1443-1450. ]
- [35] Lie Xiangjie, Li Yali, Li Qian, et al. The characteristics and causes of the snow cover variation in the Taibai Mountains during 1962—2014 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1201-1210. [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. ]
- [36] China Meteorological Administration. Sand-dust weather almanac [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015. [中国气象局. 沙尘天气年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2015. ]
- [37] China Meteorological Administration. Ground meteorological observation specifications [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. [中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:

- 气象出版社, 2003. ]
- [38] Tang Xiaoping, Yan Xiaoli, Nimaji, et al. Changes of the snow cover days on Tibet Plateau in last 40 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 951-959. [唐小萍, 闫小利, 尼玛吉, 等. 青藏高原近40年积雪日数变化特征分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 951-959. ]
- [39] Lie Xiangjie, Tian Liang, Wang Yiyong, et al. Snow cover investigation of Taibai Mountain, the main peak of Qinling Mountains in June[J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2020(1): 26-30. [雷向杰, 田亮, 王毅勇, 等. 秦岭主峰太白山6月积雪考察[J]. *陕西气象*, 2020(1): 26-30. ]
- [40] Lei Xiang, Han Ting, Li Yali, et al. Analysis of weather conditions for the “Travelling friend” casualty event in Taibai Mountain in May 2017 [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2019(3): 35-40. [雷向杰, 韩婷, 李亚丽, 等. 2017年5月太白山“驴友”伤亡事件天气条件分析[J]. *陕西气象*, 2019(3): 35-40. ]
- [41] Wang Juan, Zhuo Jing. Using remote sensing technology to monitor snow accumulation changes in Taibai Mountains [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2012(1): 30-31. [王娟, 卓静. 利用遥感技术监测太白山积雪年变化[J]. *陕西气象*, 2012(1): 30-31. ]

## Analysis on the variation characteristics of regional alpine snow cover events in the Qinling Mountains

HAN Ting<sup>1</sup>, LEI Xiangjie<sup>2</sup>, LI Yali<sup>3</sup>, WANG Yiyong<sup>1</sup>

(1. Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, Shaanxi, China; 2. Climate Center of Shaanxi Province, Xi'an 710015, China; 3. Meteorological Information Center of Shaanxi, Xi'an 710015, China)

**Abstract:** Using a total of 37 a high mountain snow observation data from 32 national meteorological stations in the Qinling Mountains in Shaanxi Province from 1980 through 2016, statistical analysis has been done of the regional alpine snow cover processes with 5 or more consecutive days with snow cover more than or equal to 3 days. The regional stable alpine snow cover processes of long-term alpine snow cover process with 5 or more weather stations with continuous snow cover days greater than or equal to 20 days, 5 or more weather stations with continuous snow cover days greater than or equal to 60 days, have been studied also. The results show that in the Qinling Mountains from 1980 through 2016 there were 114 regional alpine snow cover events, including 29 regional long-term alpine snow cover events and 6 regional stable alpine snow cover events. Regional alpine snow cover events occurred from November to April (the cold season), among them 60% occurring in winter (December to February). There were 6 regional stable snow cover events with an average of 73.7 days per snow cover event. The longest regional stable snow cover event, totally lasting 81 days, occurred from November 7, 2003 to April 18, 2004. The number of regional alpine snow events was the highest in the 1980—1989 (44 times), followed by 1990—1999 and 2000—2009 (29 times each), and the least one in 2010—2016 (12 times). The average temperature and precipitation in winter had significantly correlated with the atmospheric circulation index, and had significantly negatively correlated with the Tibetan Plateau Index, the Indo-Burma Basin Intensity Index, the Antarctic Oscillation Index and the Western Pacific Subtropical High West Point Index. Beside, they had clearly positively correlated with the Pacific Trade Wind Index and the Asian Polar Vortex Area Index. In the context of climate warming, the regional snow cover events in the Qinling Mountains had showed a significant reduction trend in 1980—2016, with a reduction rate of  $-0.8$  times/10a. The average number of long-term incidents in various epochs was once a year in the 1980s, 0.9 times a year in the 1990s and only 0.4 times per year in the 2010s. After 2004, there was no regional stable mountain snow cover event in the Qinling Mountains. In 1980—2016, there were 161 snow events in Taibai Station, including 58 long-term snow cover events and 37 snow-stabilizing events. At the 37 a, the regional alpine snow cover events at Taibai Station had showed a decreasing trend with a reduction rate of  $-0.47$  times per 10 years.

**Key words:** Qinling Mountains; mountain snow cover; snow cover events; climate change; air temperature rising

(责任编辑: 周成林; 编辑: 庞瑜, 周成林)