

李彦霖,周永水,朱育雷,等. 贵州省 1960—2020 年霜的时空变化特征[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(2): 83-88.

## 贵州省 1960—2020 年霜的时空变化特征

李彦霖,周永水,朱育雷,吴昌航,李 力

(贵州省气象台,贵州 贵阳 550002)

**摘 要:**该文利用贵州省 85 个气象观测站 1960—2020 年霜的气象观测资料,采用线性趋势分析、气候倾向率、Mann - Kendall 突变分析等方法,对贵州省霜的时空分布特征进行分析。结果表明:1960—2020 年贵州省霜发生频次呈下降趋势,以  $-66 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  速率减少,主要出现在每年的 11 月一次年 3 月,12 月最多,1 月次之;省的西北部是霜的高发区,向东部、南部递减;平均霜期为 168 d,以  $-5.17 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  速率缩短,平均初霜日呈推迟趋势,平均终霜日呈提前趋势;初霜日最早出现在省的西北部,向东部、南部推进,终霜日从南部向北部推进,最晚出现在西北部;霜期与初霜日呈显著负相关(相关系数为  $-0.644$ ),而与终霜日呈显著正相关(相关系数为  $0.647$ ),表明霜期缩短是初霜日推迟和终霜日提前共同作用的结果;海拔高度与霜的发生频次、霜期、初霜日和终霜日均有很好的相关性:海拔高度与霜的发生频次和霜期的长短呈正相关,初霜日随海拔高度的增加而提前,终霜日随海拔高度的增加而推迟。

**关键词:**霜;气候特征;贵州省;突变检验

**中图分类号:**P426.3<sup>+</sup>22 **文献标识码:**B

## Analyses on the Spatial and Temporal Distribution of Frost in Guizhou Province in 1960—2020

LI Yanlin, ZHOU Yongshui, ZHU Yulei, WU Changhang, LI Li

(Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Based on the frost meteorological data of 85 meteorological observation stations in Guizhou Province from 1960 to 2020, the spatial and temporal distribution characteristics of frost in Guizhou Province were analyzed with linear trend analysis, climatic tendency rate, Mann - Kendall mutation and other methods. The results show that the occurrence trend of frost in Guizhou province were decreasing in 1960—2020, with a rate of  $-66 \text{ times} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , which mainly occurred from November to March of the next year, with the most in December and the second in January. In the northwest part of the province, the frost occurred more frequently than other areas, while decreasing to the east and south. In Guizhou Province, the average frost duration was 168 days, which was shortened at the rate of  $-5.17 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , while the average first frost date was delayed and the average last frost date was advanced. The first frost day appeared in the northwest of the province, advanced to the east and south, and the last frost day advanced from the south to the north, and ended in the northwest. There was a significant negative correlation between frost duration and first frost date (correlation coefficient  $-0.644$ ), and a significant positive correlation between frost duration and last frost date (correlation coefficient  $0.647$ ), indicated that the shortening of frost duration was the result of the effect of delayed first frost date and advanced last frost date. There is a well correlation between altitude and frost frequency, frost duration, first frost date and last frost date. Altitude was positively correlated with frost frequency and frost duration, also, the first frost date advanced

收稿日期:2022-06-10

第一作者简介:李彦霖(1992—),女,硕士,工程师,主要从事灾害性天气短临预报工作,E-mail:liy1921219@163.com。

通讯作者简介:李力(1990—),女,硕士,工程师,主要从事灾害天气短临预报服务研究,E-mail:905102548@qq.com。

with the increase of altitude, while the last frost date delayed with the increase of altitude.

**Key words:** frost; climate characteristics; Guizhou Province; mutation test method

## 0 引言

霜冻是由于最低气温下降,使植物茎、叶处温度下降到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,导致生长的植物受到冻伤的现象,是一种农业气象灾害,多由于寒潮南下,短时间内气温急剧下降到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下引起。霜冻的判别指标与气温密切相关,不同作物的霜冻判别指标和霜的有本质区别。霜是一种自然现象,是水汽在地面和近地面物体上凝华而成的白色松脆冰晶,或者是由露冻结而成的冰珠。霜易在晴朗微风湿度大的夜间且地面温度在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下时形成,气象上对于霜的确定主要以观测到结晶为判别手段。霜多发生在秋季至第二年春季,霜发生时,易造成飞机气流提前分离而导致升力下降,阻力增加,处置不当甚至会引发飞行事故,顾加强对霜的研究分析显得尤为必要<sup>[1-7]</sup>。

目前大部分研究人员对霜冻的时空分布和发生的判别指标有一定的研究,张鑫等<sup>[8]</sup>、张志杰<sup>[9]</sup>分别对北疆和呼和浩特霜冻的时空变化特征进行研究分析;张丙午<sup>[3]</sup>、张晓煜等<sup>[4]</sup>、李茂松等<sup>[5]</sup>对不同农作物的霜冻指标做了相关研究。贵州的一些研究人员对复杂山地地形下的霜冻做了研究分析,陈静等<sup>[10]</sup>、张波等<sup>[11]</sup>利用贵州省霜冻历史资料,对贵州省霜冻天气的时空分布与气候变化特征做了相关的气候学分析,郜红娟等<sup>[12]</sup>研究了1960—2013年霜冻日数的时空分布特征。但目前国内对于霜的研究较少,在我国东部和北部地区,有科研人员对基于基本观测资料的霜的时空分布和主要影响因素有一定的研究:华连生等<sup>[13]</sup>利用2003—2014年安徽省81个气象站的观测资料,对安徽省霜的时空分布特征作了相关研究,发现霜期呈现缩短趋势;王勇等<sup>[14]</sup>根据气温、相对湿度、地面温度等气象要素对宁夏霜的判别指标进行研究;郝玲等<sup>[15]</sup>对草棉温度在霜的预报中的应用做了相关研究。但是,贵州省鲜有复杂地形下霜的相关研究,故本文利用贵州地区近60 a 85个气象台站霜的观测数据,统计分析贵州省霜的时空分布特征,以期气象减灾提供一定的参考依据。

## 1 数据来源和方法

### 1.1 数据来源

本文研究数据来源于贵州省气象信息中心整

编的人工结霜观测资料,研究范围为贵州省85个气象观测站,覆盖时间为1960—2020年。

### 1.2 研究方法

定义每年立秋后第1次观测到霜的出现判定为当年的初霜日,次年立秋前最后1次观测到霜的出现判定为当年的终霜日,初霜日与终霜日间的持续时间定义为霜期。为了便于分析将公历下的初、终霜日的日期进行转化,定义1月1日为第1 d,1月2日为第2 d,以此类推,12月31日为第365 d(闰年为第366 d)。利用线性趋势、气候倾向率<sup>[16]</sup>分析方法,主要对近60 a在复杂山地地形下贵州省霜的发生频次、霜期、初霜日和终霜日的时空变化特征及其与海拔高度的关系进行研究分析。同时,利用Mann-Kendall(简称M-K)突变检验<sup>[17]</sup>对其进行气候突变分析。为增加突变检验的准确性,减少M-K检验的虚假突变点,本文同时利用滑动T检验<sup>[18]</sup>的方法进行共同检验。

本文利用样条函数插值法,将贵州省85个气象站初霜日、终霜日的观测数据插值为 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 的格点数据,以更加直观地反应初、终霜日的空间变化。

## 2 霜的时空分布

### 2.1 霜的时间分布

从1960—2020年贵州省85个气象站霜的发生频次的年际变化上看(图1a),霜的发生频次呈现波动变化特征,气候倾向率为 $-66\text{次}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,总体呈减少趋势,平均每年发生770次。其中1993年霜出现的频次最多(1753次),1971年次之(1614次)。从逐月的发生频次上看,霜主要发生在11月—次年3月,其中12月发生频次最多(16806次),1月次之(16108次);而9—10月和4—5月的发生频次很少,夏季基本没有霜的发生(6月1次、8月2次)。

### 2.2 霜的空间分布

从1960—2020年霜的发生频次空间分布上可以看出(图1b),省的西北部发生霜的概率更高,东部次之,其中威宁发生频次最多(2521次),水城次之(1110次);而省的南部和遵义市局地霜发生的频次总体较低,其中赤水最低,仅发生81次,这可能与省的南部和赤水地区海拔较低有一定关系,后文将进一步研究,省的中部一线发生频次总体在400~

600次。

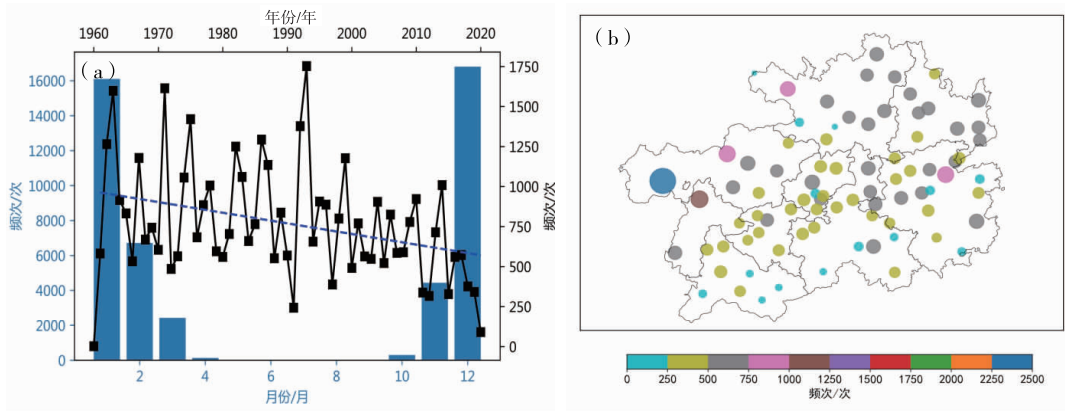


图1 1960—2020年霜发生频次的时间分布(a)(点折线为年际变化;柱状为月变化;虚线为年际变化线性趋势)、霜发生频次空间分布(b)

Fig. 1 Time distribution of frost frequency from 1960 to 2020 (a) (dotted line shows the interannual variation; columns are monthly variations; dotted line shows the linear trend of interannual variation) 、 the spatial distribution of frost occurrence frequency (b)

### 2.3 海拔高度对发生频次的影响

通过对85个气象站霜的发生频次与海拔高度的关系分析,进一步研究贵州山地地形对霜发生频次的影响。从霜的发生频次和海拔高度的拟合可知(图2),两者的相关系数为0.424,呈正相关,且通过了99%的显著性检验,表明随着海拔高度的增加,霜的发生频次增加,垂直递减率为 $290 \text{次} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

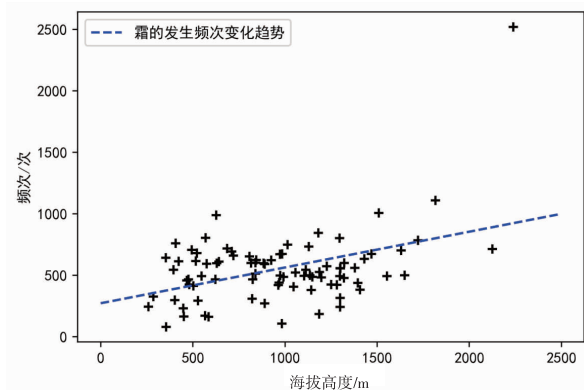


图2 1960—2020年霜的发生频次与海拔高度拟合

Fig. 2 Fitting of frost frequency and altitude during 1960—2020

## 3 初霜日和终霜日时空分布

### 3.1 初霜日和终霜日空间分布

从1960—2020年贵州省平均初、终霜日的空间分布上看(图3),省的西北部初霜日出现较早,依次向东部和南部推进,其中威宁出现最早,平均出现

在10月31日,而赤水出现最晚,平均出现在1月9日,中部地区主要出现在11月,南部边缘和东部边缘略晚,主要出现在12月。从终霜日的空间分布上看,终霜日从南部向北部推进,南部边缘和赤水终霜日出现较早,其中望谟最早,平均出现在1月16日,威宁出现最晚,平均出现在4月7日。

进一步从近60 a 85个站点初、终霜日发生频次的空间分布上看(图略),有60个观测站发生初霜,其中29个站仅有1 a最早出现霜,初霜日出现在威宁站最多,有38 a,其次为大方,有13次,水城12次;终霜日也多出现在威宁站,有42次,其次为水城17次和大方8次。初霜日和终霜日多出现在省的西北部,表明西北部初霜日早而终霜日迟,这可能与西北部地势较高有关。

### 3.2 初霜日和终霜日时间分布

最早的初霜日发生在1965年8月21日,出现在威宁,最晚发生在2014年12月8日,贵阳、黄平、麻江等14个观测站均观测到霜的发生,最早初霜日和最晚初霜日间相差109 d。最早的终霜日发生在2019年3月3日,出现在威宁和习水,最晚的发生在1967年6月10日,发生在水城,最早终霜日和最晚终霜日间相差99 d。

研究近60 a初、终霜日的时间分布,为保证数据更具代表性,采用2种方式对85个站点的数据进行筛选,筛选方式如下:(1)选取每年均有霜发生,且年均出现霜在100次以上的站点;(2)选取每年均有霜发生,且发生频次最多的9个(全省总站数

10%) 站点。分别进行初、终霜日的统计分析。从初、终霜日的时间可以看出(图4),初霜日均呈波动变化特征,气候倾向率为  $2.548 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$  ( $2.451 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ),呈推迟的趋势;终霜日也呈

现波动变化特征,气候倾向率为  $-2.841 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$  ( $-2.272 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ),呈提前的趋势。2种统计方式结果相差不大,因此本文主要以第1种筛选方式结果为例进行分析。

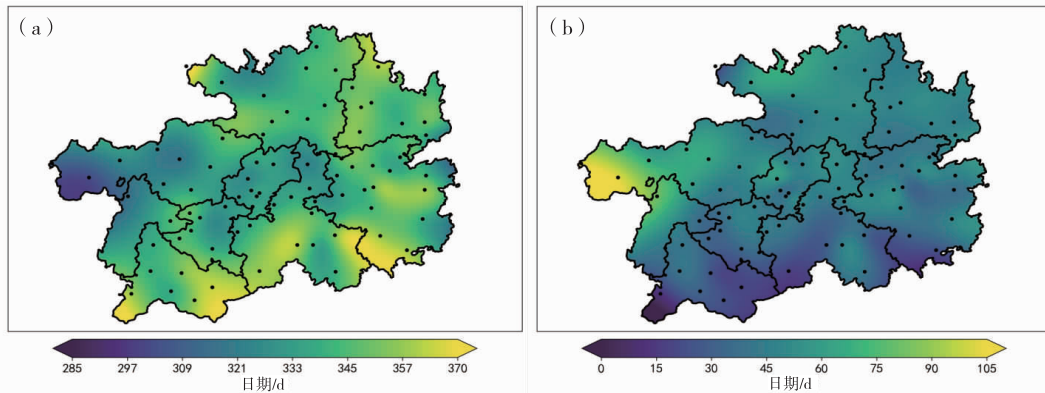


图3 1960—2020年平均初霜日(a)、平均终霜日(b)空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of average first frost days (a) and average last frost days (b) during 1960—2020

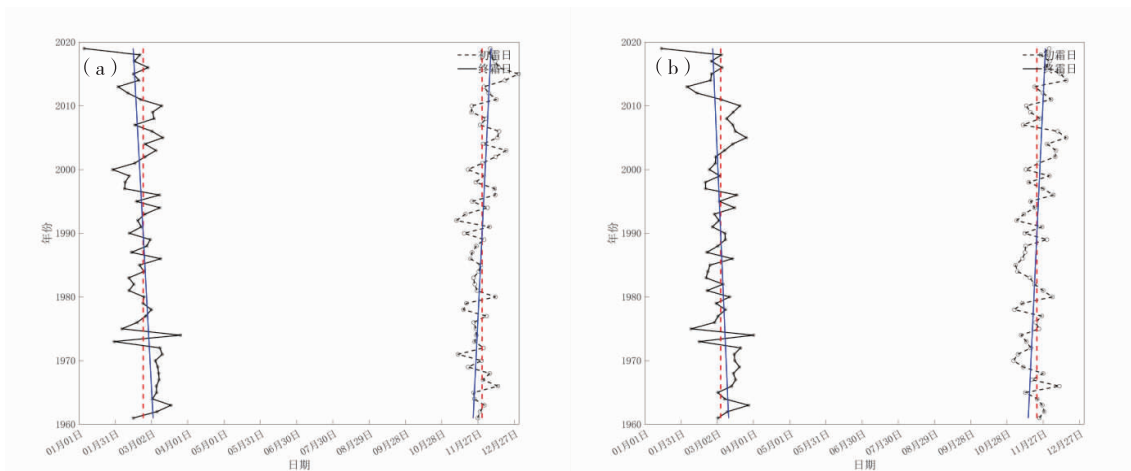


图4 1960—2020年初、终霜日年际变化趋势:方法1(a)、方法2(b)(红色虚线为平均初、终霜日;蓝色实线为初、终霜日年际变化趋势)

Fig. 4 Interannual variation trends of early and last frost days from 1960 to 2020: Methods 1 (a)、2 (b) (red dotted line represents average first and last frost days; solid blue line is the interannual variation trend of the first and last frost days)

从初霜日的M-K突变检验可以看出(图5a),贵州省的初霜日在1985—2000年总体呈减小趋势,表明初霜日在提前,2000—2020年初霜日呈上升趋势,表明初霜日在推迟,并在2014年后超过0.05显著性水平信度线,表明初霜日显著推迟,结合步长为5a的滑动T检验结果(图略),在2002年和2009年发生突变。终霜日的M-K突变检验可以看出(图5b),在1961—1975年贵州省的终霜日呈增加趋势,1975年后呈下降趋势,表明1975年后终霜日在提前,结合步长为5a的滑动T检验结果(图略),终霜日在1975年和2009年发生突变。

### 3.3 海拔高度对初霜日、终霜日的影响

从初霜日和终霜日与海拔高度的拟合表明(图

略),各站点初霜日时间变化随海拔高度的增加而减小,垂直递减率为  $-18 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,故海拔高度越高,初霜日越早,两者的相关系数为  $-0.69$ ,呈负相关;终霜日时间变化随海拔高度的增加垂直递减率为  $11 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,海拔高度越高,终霜日越晚,两者的相关系数为  $0.39$ ,呈正相关,表明海拔高度对初霜日的影响较终霜日更大。

## 4 霜期的时空变化特征

### 4.1 霜期的时间变化特征

统计1960—2020年贵州省平均霜期的变化趋势(图6a),结果表明,贵州省平均霜期为168d,气候变化率为  $-5.17 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ,随着年份的增加霜

期有逐渐缩短的趋势;霜期天数最多为243 d,出现在1968年,霜期天数最少仅有118 d,出现在2002年。从霜期的M-K突变检验可以看出,1961—1992年霜期总体呈上升趋势,表明这段时间贵州省霜期在增加;1992—2020年呈下降趋势,表明霜期整体缩短,结合步长为5 a的滑动T检验结果,2003年和2009年出现突变,2009年之后开始出现明显的缩短趋势,并在2015—2020年超过0.05显著性水平信度线,表明近5 a贵州省霜期显著缩短。

进一步分析近60 a霜期与初霜日、终霜日之间年际变化的相关关系,研究初霜日和终霜日的变化趋势对霜期变化的贡献(图略)。结果表明,霜期与初霜日呈显著的负相关,相关系数为-0.644,表明霜期缩短,初霜日推迟;而与终霜日呈显著正相关,相关系数为0.647,表明霜期缩短,终霜日提前。霜期的缩短是初霜日的推迟与终霜日的提前共同作用的结果,两者贡献相差不大。

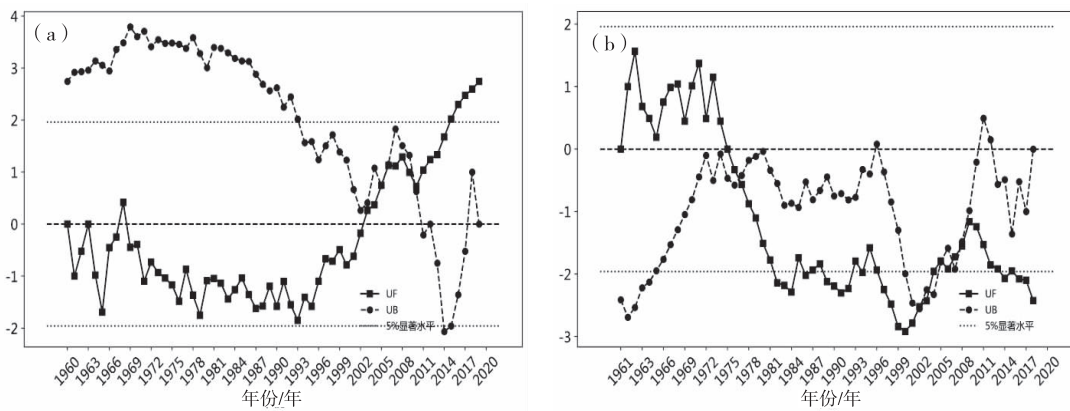


图5 1960—2020年初霜日(a)、终霜日(b)M-K突变检验

Fig. 5 M-K mutation test on first frost day (a) and last frost day (b) during 1960—2020

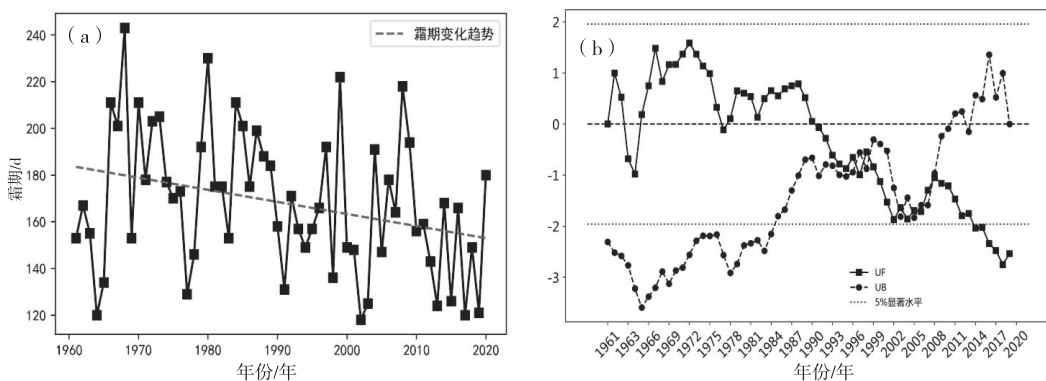


图6 1960—2020年霜期年际变化(a)、M-K突变检验(b)

Fig. 6 Interannual variation of frost period (a) and M-K mutation test (b) from 1960 to 2020

#### 4.2 海拔高度对霜期的影响

从海拔高度对霜期的影响上看,霜期的长短随海拔高度的增加呈增长趋势,垂直递减率为 $27 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,两者的相关系数为0.58。进一步从初霜日和终霜日的变化倾向率与海拔高度的关系来分析地形高度对霜的影响,为了保证研究结论的可靠性,根据85个站点初霜日、终霜日、霜期的时间变化关系,通过显著性检验的站点来定量分析三者随时间的变化趋势与海拔高度的关系。分析结果表明(图7),霜期和初霜日的时间变化趋势与海拔高

度的置信度不高,因此重点分析终霜日的时间变化趋势与海拔高度的关系。贵州省85个观测站有72个站点通过了终霜日随时间变化的显著性检验,达到总站点数的84.7%,海拔高度介于200~2300 m之间,各站点终霜日的时间变化趋势随海拔高度的增加而减小,垂直递减率为 $-0.173 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,即终霜日的提前速率随海拔高度的增加而减小,海拔高度越高,终霜日的提前越慢,两者相关系数为-0.38。

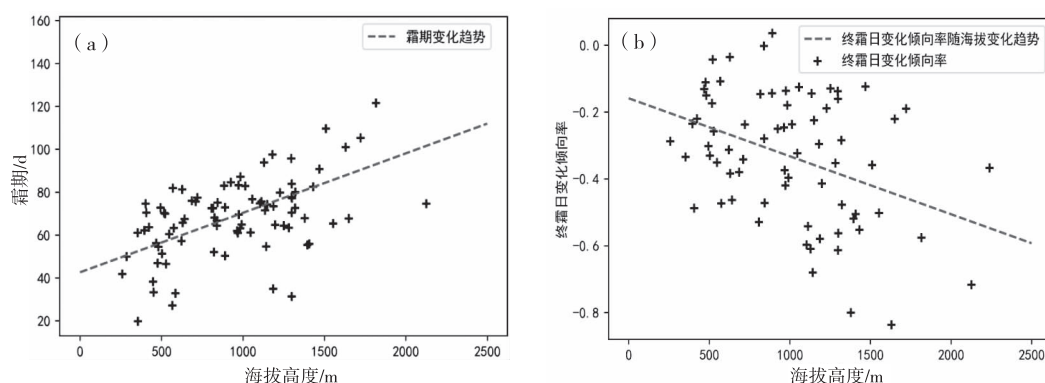


图7 1960—2020年霜期(a)、终霜日时间变化趋势(b)与海拔高度的拟合

Fig. 7 Fitting of frost period (a) and last frost day time variation trend (b) with altitude from 1960 to 2020

## 5 结论与展望

本文基于贵州省近60 a 85个气象观测站霜的观测资料,对初霜日、终霜日以及霜期的时空分布特征进行统计分析,得出以下结论。

(1)贵州省霜主要出现在每年11月—次年3月,其中12月发生频次最多,1月次之;1960—2020年霜的发生频次呈减少趋势,并以 $-66 \text{次} \cdot (10 \text{a})^{-1}$ 速率减少。省的西北部霜的发生频次最多,东部次之,南部地区和赤水发生频次较少;随着海拔高度的增加,霜的发生频次增加,垂直递减率为 $290 \text{次} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

(2)从代表性站点的分析结果表明,初霜日和终霜日整体呈波动特征。初霜日以 $2.548 \text{d} \cdot (10 \text{a})^{-1}$  [ $2.451 \text{d} \cdot (10 \text{a})^{-1}$ ]速率推迟,而终霜日以 $-2.841 \text{d} \cdot (10 \text{a})^{-1}$  [ $-2.272 \text{d} \cdot (10 \text{a})^{-1}$ ]的速率提前。初霜日最早出现在省的西北部,向东部南部推进;终霜日则从南部开始,向北部推进,最晚出现在西北部。与霜冻的初霜自西向东、自北向南,终霜日东部早、西部晚的趋势一致<sup>[10-11]</sup>。

(3)霜期的年际变化总体呈缩短趋势,气候变化率为 $-5.17 \text{d} \cdot (10 \text{a})^{-1}$ ,2003年和2009年出现突变,2015—2020年霜期显著缩短;霜期与初霜日呈显著的负相关,而与终霜日呈显著正相关,霜期的缩短是初霜日推迟与终霜日提前共同作用的结果。

本文揭示了复杂山地背景下贵州省1960—2020年霜的发生频次、初霜日、终霜日和霜期的时空分布特征,并以统计学的方法讨论了其气候变化规律,为气象减灾提供一定的参考依据。同时可从霜与霜冻的时空分布上发现,两者之间存在一定的相关关系,可进一步研究分析。

## 参考文献

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范. [M]. 北京:气象出版社,2003.
- [2] 大气科学辞典编委会. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社,1994.
- [3] 张丙午. 新疆主要气象灾害研究的进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 1994,17(5):1-5.
- [4] 张晓煜,马玉平,苏占胜,等. 宁夏主要作物霜冻试验研究[J]. 干旱区资源与环境,2001(2):50-54.
- [5] 李茂松,王道龙,钟秀丽,等. 冬小麦霜冻害研究现状与展望[J]. 自然灾害学报,2005(4):72-78.
- [6] 白金凤,公芙蓉,李春华,等. 侯马市近30 a霜及霜冻的气候特征分析[J]. 中国农学通报,2015,31(12):257-261.
- [7] 黄继雄. 近十年首都机场霜的特征及与气象要素相关分析[J]. 气象灾害防御,2018,25(3):27-31.
- [8] 张鑫,楼俊伟,王勇,等. 1961—2017年北疆初终霜日及霜期时空变化特征[J]. 干旱区地理,2021,44(2):308-315.
- [9] 张志杰. 1981—2015年呼和浩特市霜期时空分布特征及初霜日客观预报方法[J]. 内蒙古气象,2020(4):3-6.
- [10] 陈静,白慧,潘徐燕. 贵州省霜冻天气的时空分布与气候变化特征[J]. 贵州气象,2016,40(3):66-69.
- [11] 张波,于飞,吴战平,等. 贵州霜冻气候变化特征[J]. 浙江农业学报,2020,32(4):685-695.
- [12] 邵红娟,蔡广鹏,陆艺,等. 1960—2013年贵州省霜冻日数时空变化特征[J]. 农业科学研究,2017,38(4):16-19.
- [13] 华连生,朱华亮,温华洋. 安徽省霜的特征分析及其自动化观测模型研究[C]//中国气象学会. 第34届中国气象学会年会S16智能气象观测论文集,2017:188-194.
- [14] 王勇,潘娜,张素昭. 宁夏霜现象的判别指标研究[J]. 宁夏工程技术,2017,16(2):124-126.
- [15] 郝玲,史逸民,史达伟,等. 草面温度在霜预报中的应用[J]. 中国农学通报,2020,36(15):94-99.
- [16] 吴洪宝,吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京:气象出版社,2010.
- [17] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992(4):482-493.
- [18] 薛雨婷,李谢辉,王磊,等. 1976—2017年西南地区夏季不同等级降水时空变化特征[J]. 西南大学学报(自然科学版),2022,44(2):137-145.