

楼俊伟,王可欣,张智利,等. 近 48 a 浙江省不同气候态下无霜期特征对比分析[J]. 中低纬山地气象,2023, 47(6):59-65.

近 48 a 浙江省不同气候态下无霜期特征对比分析

楼俊伟¹,王可欣²,张智利³,李正泉⁴,曹峻烽⁵,陈俊达⁶

(1. 浙江省武义县气象局,浙江 武义 321200;2. 浙江省椒江区气象局,浙江 台州 318000;3. 内蒙古自治区空管分局, 内蒙古 呼和浩特 010000;4. 浙江省气候中心,浙江 杭州 310017;5. 中国民用航空西南地区空中交通管理局, 四川 成都 610225;6. 北京飞机维修工程有限公司,四川 成都 610225)

摘 要:采用浙江省气象信息中心提供的 1971—2018 年逐日最低气温数据,利用常规气象统计方法,对浙江省平均初终霜日和无霜期时空分布特征进行分析,同时基于不同气候态、年代际进行对比分析。结果表明:时间特征上,近 48 a 浙江省平均初霜日显著推迟,平均终霜日显著提前,平均无霜期显著延长;1981—2010 年气候态的平均初终霜日和无霜期推迟、提前、延长的趋势都最为显著;20 世纪 90 年代初终霜日和无霜期变化趋势最为显著;平均初霜日在 2003 年发生突变,终霜日在 1997、2004 年发生突变,无霜期在 2002 年发生突变。空间特征上,近 48 a 浙江省初霜日在空间上,整体呈现西东晚、北中南早的格局;1981—2010 年和 21 世纪 00 年代终霜日表现为自浙南向浙北逐步推迟的趋势;1981—2010 年和 21 世纪 00 年代无霜期整体分布上呈现出西东南长、中北短的特点;1981—2010 年和 21 世纪 00 年代初霜日整体有推迟的趋势,终霜日整体有提前的趋势,无霜期整体有延长的趋势。

关键词:初、终霜日;无霜期;时空变化;气候态

中图分类号:P466 **文献标识码:**A

Comparative Analysis of Frost - free Period Characteristics under Different Climatic States in Zhejiang Province in the Past 48 years

LOU Junwei¹, WANG Kexin², ZHANG Zhili³, LI Zhengquan⁴, CAO Junfeng⁵, CHEN Junda⁶

(1. Wuyi Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Wuyi 321200, China; 2. Jiaojiang Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Taizhou 318000, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Air Traffic Control Branch, Hohhot 010000, China; 4. Zhejiang Provincial Climate Center, Hangzhou 310017, China; 5. China Civil Aviation Southwest Regional Air Traffic Administration, Chengdu 610225, China; 6. Beijing Aircraft Maintenance Engineering Co., Ltd, Chengdu 610225, China)

Abstract: Using the daily minimum temperature data from 1971 to 2018 provided by the Zhejiang Meteorological Information Center, using conventional meteorological statistical methods, the temporal and spatial distribution characteristics of the average first and last frost days and frost - free periods in Zhejiang Province were analyzed. Based on the comparative analysis of different climatic states and decadal periods. The results show that: in terms of time characteristics, the average first frost date in Zhejiang Province in the past 48 years was significantly delayed, the average last frost date was significantly earlier, and the average frost - free period was significantly prolonged; from 1981 to 2010, the average first and last frost day and frost - free period showed the most significant trend of delay; in the early 1990s, the change trend of frost days and frost - free periods was the most significant. The average first frost day changed abruptly in 2003, the last frost day changed abruptly in 1997 and 2004, and the frost - free period changed abruptly in 2002. In terms of spatial characteristics, the first frost

收稿日期:2022-09-22

第一作者简介:楼俊伟(1995—),男,工程师,主要从事气候与环境变化研究,E-mail:854858145@qq.com。

通讯作者简介:李正泉(1978—),男,硕士,正高,主要从事生态气候资源评估,E-mail:lzq110119@163.com。

date in Zhejiang Province in the past 48 years showed a pattern of being late in the west and east and early in the north, middle and south; the final frost day shows a gradually delayed trend from southern Zhejiang to northern Zhejiang; the overall distribution of the frost free period shows the characteristics of being long in the southwest and short in the central and northern regions. From 1981 to 2010 and the early 2000s, there was an overall trend of delayed frost days, an overall trend of advanced final frost days, and an overall trend of extended frost free periods.

Key words: first and last frost days; frost - free period; temporal and spatial changes; climatic state

0 引言

霜是水汽在地面和近地面物体上凝华形成的或者由露冻结而成的,一般用地面温度是否 $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 来判定,但由于地面温度较难获取且数据质量不高,通常用日平均气温是否 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 代替。入秋后第一次日最低气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日期称为初霜日,次年入春后最后一次日最低气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日期称为终霜日,一年中除去终霜日距离年头、初霜日距离年末的天数便是无霜期^[1]。随着社会经济不断发展,生产规模不断扩大,霜冻造成的影响随之扩大,这引起了国内外学者的关注^[2-6]。

Tomczyk 等^[7] 研究指出,1971—2010 年波兰及邻近国家终霜日显著提前,而初霜日推迟(未通过显著性检验),无霜期(51% 站点)显著延长。Malinovic - Milicevic 等^[8] 根据 1961—2010 年塞尔维亚 15 个站点数据,研究指出无霜期在 20 世纪 60 年代呈现出缩短趋势,而在 80 年代表现为延长的趋势。宋海龙等^[9] 指出陕西地区在公元 618—2000 年间共发生霜冻灾害 341 次,其中 20 世纪发生 166 次。马彬等^[10] 研究指出青藏高原地区在 20 世纪 90 年代之后初霜日明显推后、终霜日明显提前,无霜期明显延长,四川盆地东部、华南地区南部部分站点在 20 世纪 90 年代之后霜期缩短明显。同时也有部分学者探索了初、终霜日以及霜期的变化对农业生产造成的影响,指出选择合适的作物类型并调整种植制度可以减少极端低温事件对农业生产的危害,从而增强农业对气候变化的适应性^[11-12]。Yan 等^[13] 发现河南无霜期的变化与主要粮食产量呈显著正相关,无霜期每延长 1 d,粮食总产量、稻谷、小麦和玉米分别提高 79.5、90.0、79.5 和 70.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

最近,有学者开始关注不同气候基准期下霜期变化。马尚谦等^[14] 以淮河流域多年平均初、终霜日期和霜期的等值线为指标线,研究发现 1981—2010 年初霜日的 11 月 8 日线、终霜日的 4 月 1 日线位置较 1961—1990、1971—2000 年偏北约 1 个纬距,无霜期 220 d 线在 1971—2000 年位置最为偏北,较其他时间段偏北约 0.5 个纬距。

浙江位于我国东南沿海地区,处于长江三角洲南翼,境内山地和丘陵居多,素有“七山一水二分田”之说。浙江山区盛产茶叶,而霜冻易在山区发生,因此研究该地区无霜期的时空变化特征十分有意义。肖晶晶等^[15] 研究指出 1951—2013 年浙江初霜日延迟、终霜日提前、无霜期延长,三者的气候倾向率平均为 $-3.62\text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $1.32\text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $4.97\text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。李时睿等^[16] 开展了浙江省松阳县茶叶霜冻害精细化预警研究,结果表明茶叶霜冻害精细化预警时效为 8 d,空间分辨率 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,2017 年 3 月 15 日的茶树霜冻害预警效果良好,实地调查结果与预估结果基本一致。目前关于浙江省初、终霜日和无霜期变化研究鲜有见刊,且不同气候态下无霜期特征的对比研究较少。本文基于不同气候基准期,研究浙江省初、终霜日和无霜期的变化特征,以期为当地的防灾减灾、农业生产布局提供一定的依据。

1 资料与方法

1.1 资料

浙江省处于 $118^{\circ} \sim 123^{\circ}\text{E}$ 、 $27^{\circ}12' \sim 31^{\circ}31'\text{N}$,研究区内有 62 个气象站点(图 1)。关于初、终霜日和霜期确定,目前主要是用日最低气温或者地面 0 cm 最低温度来判断^[17-18]。本文采用前者来进行研究。站点资料来自浙江省气象信息中心,数据经过严格的质量控制。根据数据连续性、统一性和时间一致性等原则,选取浙江省 1971 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日的逐日最低气温数据进行研究。为了便于统计分析,本文采用 Julian 历法^[19-20]。

1.2 方法

1.2.1 克里金插值 克里金插值是地统计学的主要内容之一^[21],是基于自相关的统计模型。该插值方法假定采样点之间的距离和方向可以反映空间相关性,基于数学函数可将指定数量点或指定半径内所有点进行拟合,从而确定每个位置的输出值。本文利用克里金插值法将北疆地区初、终霜日和霜期变化趋势以及不同气候基准期下平均初、终霜日和霜期插值成空间分辨率为 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的空间分布图。

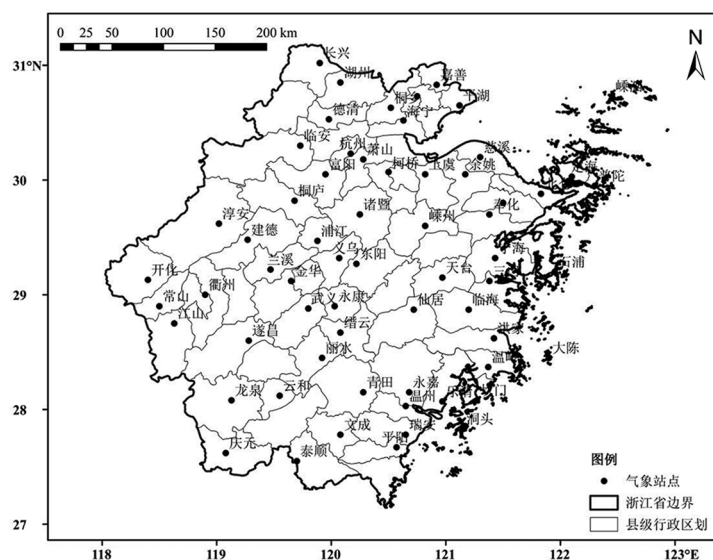


图 1 研究区站点分布

Fig. 1 Site distribution in the study area

1.2.2 M-K 突变检验 M-K (Mann-Kendall 的缩写) 突变检验法有检测范围宽、定量化程度高、计算简便^[22]等特点,常用于检测气候突变。应用该方法的前提是检测的气候序列平稳、随机独立以及概率分布等同^[23]。定义 UF、UB 2 个统计量来进行序列分析,UF>0 序列表现为增长趋势,反之则为减小趋势,若 UF 或 UB 曲线超过信度线(一般取 ± 1.96 ,即 $\alpha=0.05$ 置信水平),则有显著的变化趋势,而曲线超过信度线部分表现为十分显著的变化趋势,如果 UF 与 UB 曲线交点处于信度区间内,这点便是突变的开始^[24-25]。本文采用该方法来分析北疆地区平均初、终霜日和霜期的突变情况。

1.2.3 气候态的选取 WMO(世界气象组织)规定气候态(气候基准期)为某个气象要素 30 a 的平均值。随着全球气候变化加剧,极端天气气候事件发生的频率和强度有所增强^[26],1961—1990 年的气候基准值已经不符合实际需求^[27]。2012 年 1 月 1 日起我国气象部门的气候业务采用 1981—2010 年作为气候基准期,包括了气候态跃变、干湿转型的时段(即 20 世纪 70、80 年代)^[28]。因此,本文选取 1971—2000、1981—2010 这 2 个具有代表性的气候态进行对比研究。

2 不同气候态下初、终霜日和无霜期的时间变化特征

2.1 初、终霜日和无霜期的年际及年代际变化

用浙江省 1971—2018 年平均初、终霜日和霜期

数据做线性回归,并且根据 2 个气候态以及各年代际做分段回归,从而得到图 2。由图 2a 可知,近 48 a 浙江省平均初霜日最早出现在 1981 年的第 311 d(11 月 7 日),最晚发生在 1994 年和 2008 年的 350 d(12 月 16 日),推迟速率达 0.33 d/a ($P<0.001$)。从不同气候态来看,1981—2010 年初霜日推迟趋势最为显著,推迟速率达 0.47 d/a ($P<0.02$),1971—2000 年以 0.22 d/a 速率推迟 ($P<0.1$)。从不同年代际上看,20 世纪 70 年代的初霜日以 1.06 d/a ($P<0.1$) 速率显著提前,80、90 年代和 21 世纪 00 年代的初霜日呈现出推迟的趋势,其中 90 年代初霜日以 1.50 d/a ($P<0.1$) 速度显著推迟。

图 2b 为浙江省平均终霜日的时间变化,由图 2b 可知,终霜结束时间最早在 2015 年第 51 d(2 月 20 日),最晚在 1987、1991 年的 83 d(3 月 24 日),提前速率为 0.29 d/a ($P<0.005$)。不同气候态下,1981—2010 年浙江省终霜日提前速度最快,达到 0.32 d/a ($P<0.1$);1971—2000 年次之,提前速率为 0.29 d/a ($P<0.1$)。这与 IPCC 第五次评估报告指出 1983—2012 年的 3 个连续 10 a 比过去 1850 以来的任何一个 10 a 暖^[29]的结论一致。年代际上,20 世纪 70、90 年代的终霜日在提前,且 90 年代的终霜日以 2.39 d/a ($P<0.02$) 速率显著提前,80 年代和 21 世纪 00 年代的终霜日在延后的,其中 80 年代的终霜日以 1.52 d/a ($P<0.05$) 速率显著延后。

从图 2c 可见,浙江省平均霜期最短年份发生在 1979 年,最长年份出现在 2018 年,多年平均是 263

d, 无霜期整体呈现了显著延长的趋势, 缩短速率为 0.70 d/a ($P < 0.001$)。气候态上, 1971—2000、1981—2010 年浙江省无霜期延长速率分别为 0.51 d/a ($P < 0.05$)、 0.83 d/a ($P < 0.001$)。年代际上, 20 世纪 70、80 年代的无霜期表现为缩短的趋势, 其中 80 年代的无霜期以 1.12 d/a ($P < 0.1$) 速率显著缩短, 90 年代和 21 世纪 00 年代的无霜期表现为延长的趋势, 且 90 年代的无霜期以 4.06 d/a ($P < 0.001$) 速率显著缩短。

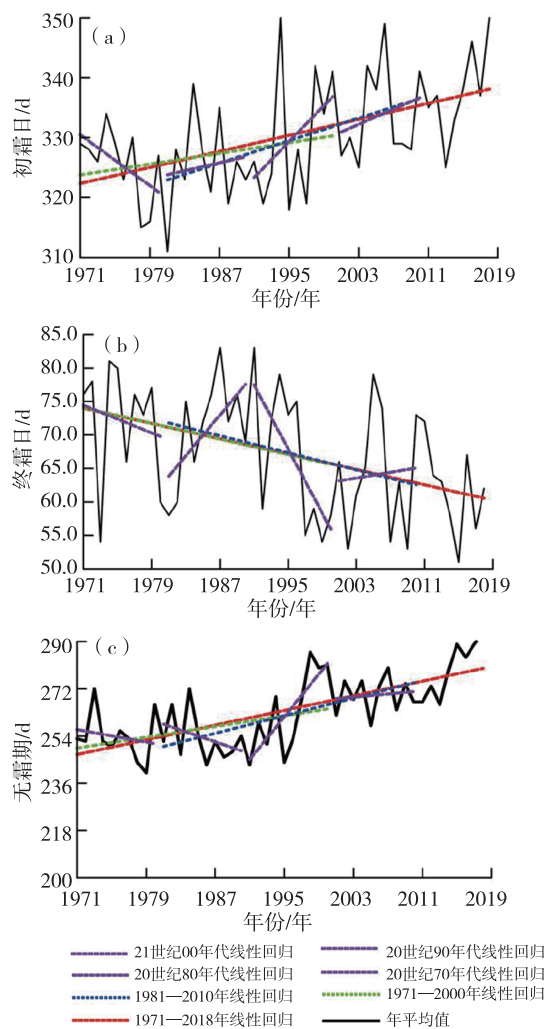


图 2 浙江省初霜日(a)、终霜日(b)和无霜期(c)的时间变化

Fig. 2 Time changes of the first frost days (a), last frost days (b) and frost-free period (c) in Zhejiang Province

2.2 M-K 突变检验

选用 M-K 突变检验法对浙江省 1971—2018 年初、终霜日和霜期的时间序列进行突变分析, 得到图 3。由图 3a 可知, UF 曲线超过了 0.05 信度检验, 且 1998 年之前曲线整体 < 0 , 说明 1971—1998 年浙江省初霜日有显著的提前趋势, 1998 年后则是

显著的推迟趋势, 且在 2003 年发生了 1 次突变。2008 年以后曲线 UF 超过信度线, 说明 2008—2018 年初霜日有十分显著的推迟趋势。

图 3b 所示, UF 和 UB 交点有 3 个, 分别为 1997 年、2004 年和 2010 年, 前 2 个为突变点, 第 3 个可能为突变点。浙江省终霜日在 1971—1977 年主要表现为显著的推迟趋势, 在 1978—1988 年、1997—2018 年呈现为显著的提前趋势, 其中 2004 年以后提前趋势更加显著。

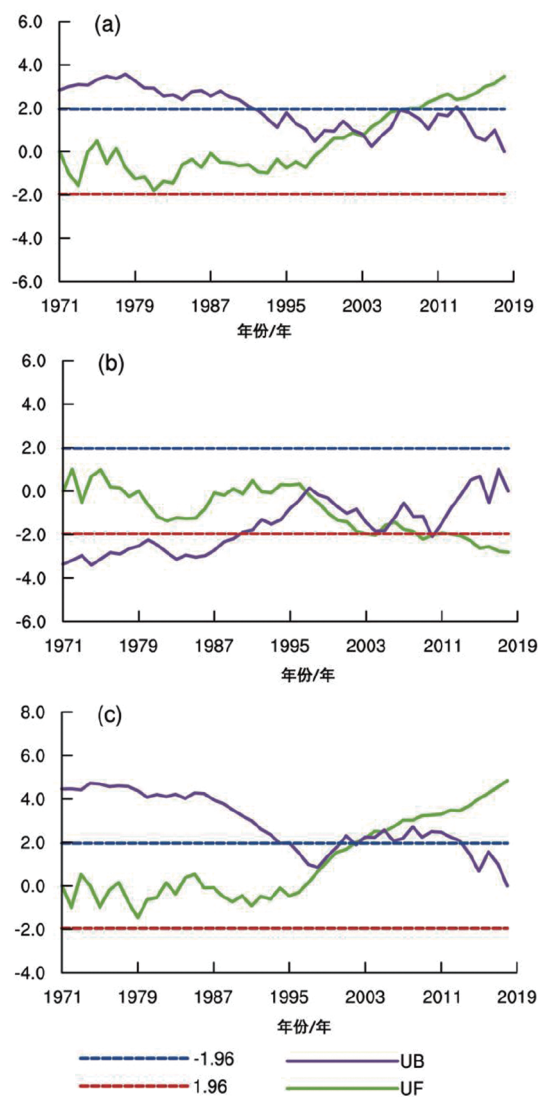


图 3 浙江省初霜日(a)、终霜日(b)和无霜期(c)的 M-K 突变检验

Fig. 3 M-K mutation test of the first frost days (a), last frost days (b) and frost-free period (c) in Zhejiang Province

由图 3c 可知, 浙江省无霜期在 1978—1996 年主要呈显著的缩短趋势, 1997 年以后表现为明显的延长趋势, 其中 2002—2018 年有十分明显的延长趋势, 且突变点为 2002 年。

综上所述,无霜期在 1997 年之后呈明显延长趋势是由初霜日推迟、终霜日提前导致的。李祎君等^[30]研究指出,南方气温在 1997 年突变之后升温幅度进一步增大,且秋季增温较春季更为显著。可见,秋、春季(次年)气候变暖是初霜日推迟、终霜日提前的主要原因,两者的共同作用导致了无霜期的延长,且秋季气候变暖的影响大于春季,这可能是浙江省无霜期在 1997 年突变的原因。

3 不同气候态下初、终霜日和无霜期的空间变化特征

3.1 初、终霜日和无霜期的空间变化

利用浙江省 62 个站点近 48 a 平均初、终霜日和霜期变化数据,采用 GIS 克里金插值方法,绘制空间分布图(图 4)。图 4a 为 1971—2018 年浙江省平均初霜日的分布情况,可知全省平均初霜日差异明显。舟山、宁波、台州、温州等沿海地区受海陆分布影响,初霜日发生最晚,主要集中在 12 月 3—20 日之间,其中台州的坎门站以及温州洞头站由于纬度偏南且又是海岛,初霜日出现在次年的 1 月 1—6 日。千岛湖周边的淳安、建德、桐庐、开化、常山、兰溪以及纬度偏南、海拔高度相对较低的丽水、云和、缙云等地初霜日出现较晚,主要出现在 11 月 26 日—12 月 2 日。发生最早的是在纬度较高的杭州、湖州、嘉兴一带以及天台、泰顺、遂昌等海拔较高的浙中南山区,集中在 11 月 14—22 日。浙江省初霜日发生时间在空间上,整体呈现出西东晚、北中南早的格局。

由图 4b 可知,1971—2018 年浙江省终霜日发生时间在 2 月 7 日—3 月 28 日,温州大部分地区、丽水一部分地区以及台州的坎门终霜日最早出现,浙北地区最迟结束。空间分布上,终霜日表现为自浙南向浙北逐步推迟的趋势。

由图 4c 可见,浙江省各地无霜期在 229 ~ 337 d,最大值出现在温州洞头,最小值出现在嘉兴平湖,整体分布上呈现出西东南长、中北短的特点。

3.2 不同气候态下平均初、终霜日和无霜期对比分析

基于 1971—2000、1981—2010 这 2 个气候态以及 20 世纪 70、80、90 年代和 21 世纪 00 年代,采用跟农业生产紧密联系的多年平均初霜日 11 月 27 日、终霜日 3 月 9 日和无霜期 263 d 等值线进行对比^[18](图 5)。由图 5a 可知,1981—2010 年 11 月 27 日分布线较 1971—2000 年的西伸北抬了近 0.5 个纬距。年代际上,20 世纪 80 年代计算出的 11 月 27

日分布线较 70 年代有所东退,90 年代和 21 世纪 00 年代则是在西伸北抬,其中 21 世纪 00 年代分布线主要在桐庐—义乌—缙云—奉化一带,较 20 世纪 70、80 年代偏北约 1 个纬距。由此可见,气候态不同、年代际不同,计算出的初霜日差异明显。11 月 27 日等值线随着气候态、年代际的更替逐渐西伸北抬,说明浙江省初霜日整体有推迟的趋势。

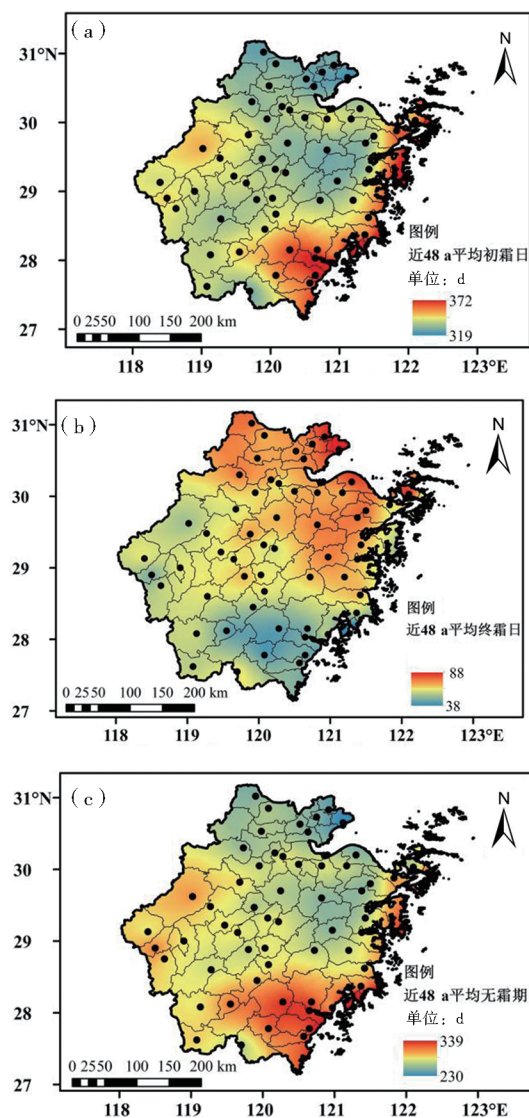


图 4 浙江省初霜日(a)、终霜日(b)和无霜期(c)的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the first frost days (a), last frost days (b) and frost-free periods (c) in Zhejiang Province

图 5b 显示,以 1981—2010 年为气候态计算的平均终霜 3 月 9 日等值线在浙中一带比 1971—2000 年计算的北抬了近 1 个纬距。就年代际而言,20 世纪 70、80、90 年代和 21 世纪 00 年代均呈现出北抬的趋势,其中 21 世纪 00 年代计算的 3 月 9 日分布线北抬近 1.5 个纬距。3 月 9 日的分布线逐渐向北移动,说明浙江省终霜日有提前的趋势。

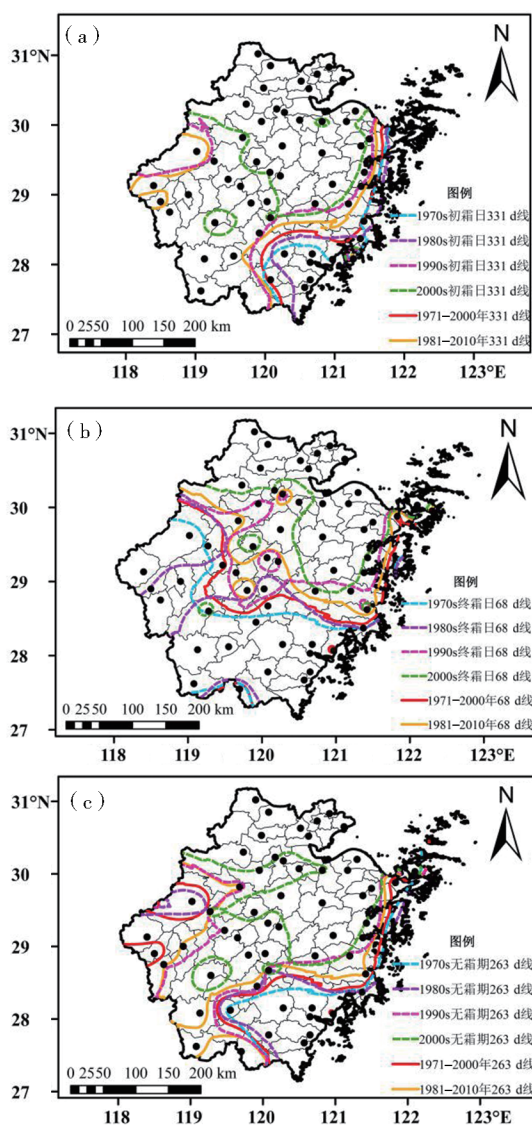


图 5 不同气候态、年代际下多年平均初霜日(a)、终霜日(b)、无霜期(c)等值线的位置变化

Fig. 5 The position change of multi-year average frost days(a) first, last frost days(b) and frost-free periods(c) under different climatic states and decades

1971—2018 年浙江省平均无霜期为 263 d, 以此为指标线, 绘制了不同气候态下该指标线的位置变化, 如图 5c 所示。由图 5c 可知, 2 个气候态计算出无霜期 263 d 指标线主要分布在浙东沿海以及千岛湖沿线, 在浙东沿海指标线随着气候态更替表现为西伸北抬, 在千岛湖沿线则表现为东伸北抬, 总体北抬近 0.2 个纬距。从年代际来看, 20 世纪 70、80、90 年代计算出的无霜期 263 d 指标线是在缓慢西伸北抬(浙东沿海部分)和东伸北抬(千岛湖沿线部分), 而 21 世纪 00 年代的 263 d 指标线则北抬明显, 移动近 1.5 个纬距。无霜期 263 d 指标线表现出的北抬特点, 有力说明了浙江省无霜期有延长的

趋势。

多年平均初、终霜日和无霜期等值线位置均是在气候态转变后的, 1981—2010 年以及气候突变之后的 21 世纪 00 年代发生较大变化。

4 结论与讨论

利用浙江省 62 个气象站点逐日最低气温数据, 通过常规气象统计方法, 分析近 48 a 初、终霜日和无霜期的时空变化特征, 并基于不同气候态、年代际进行对比分析, 得出如下结论。

(1) 近 48 a 浙江省平均初霜日以 0.33 d/a ($P < 0.001$) 速率显著推迟, 平均终霜日以 0.29 d/a ($P < 0.005$) 速率显著提前, 平均无霜期以 0.70 d/a ($P < 0.001$) 速率显著延长。1981—2010 年气候态的平均初、终霜日和无霜期的推迟、提前、延长趋势都最为显著, 分别达 0.47 d/a ($P < 0.02$)、 0.32 d/a ($P < 0.1$)、 0.83 d/a ($P < 0.001$)。20 世纪 90 年代初、终霜日和无霜期变化趋势最为显著, 分别以 1.50 d/a ($P < 0.1$)、 2.39 d/a ($P < 0.02$)、 4.06 d/a ($P < 0.001$) 速率显著推迟、提前、延长。

(2) 浙江省平均初霜日在 2003 年发生突变, 终霜日在 1997、2004 年发生突变, 无霜期在 2002 年发生突变。

(3) 近 48 a 浙江省初霜日在空间上, 整体呈现出西东晚、北中南早的格局; 1981—2010 年和 21 世纪 00 年代计算的 11 月 27 日分布线较其他气候态和年代分别偏北约 0.5 个和 1 个纬距, 表明初霜日整体有推迟的趋势。终霜日表现为自浙南向浙北逐步推迟的趋势; 3 月 9 日等值线在 1981—2010 年和 21 世纪 00 年代位置最偏北, 较其他时间段分别偏北约 1 个和 1.5 个纬距, 表明终霜日整体有提前趋势。无霜期整体分布上呈现出西东南长、中北短的特点; 1981—2010 年和 21 世纪 00 年代无霜期 263 d 指标线最为偏北, 较其他时段分别偏北约 0.2 个和 1.5 个纬距, 表明无霜期整体有延长的趋势。

浙江省初霜日推迟、终霜日提前、无霜期延长, 这跟肖晶晶等^[15]的研究结果保持一致。浙江省地形复杂, 不同的地形地势、气候环境会造成各个区域气象要素的变化分布不均。因此, 可进一步分析浙江省初、终霜日和无霜期变化趋势与海拔高度的关系。

参考文献

- [1] 宁晓菊, 张丽君, 杨群涛, 等. 1951 年以来中国无霜期的变化趋势[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1811-1822.

- [2] ECMEL, ERLAT, MURAT, et al. Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950—2010 [J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32 (12): 1889—1898.
- [3] 原野, 李力, 周永水, 等. 贵阳和威宁霜消时气象要素对比分析 [J]. *中低纬山地气象*, 2022, 46(1): 91—95.
- [4] 姚浪, 吴娜, 李刚, 等. 1990—2019 年毕节春季霜冻气候特征及温度关系分析 [J]. *中低纬山地气象*, 2022, 46(1): 86—90.
- [5] 楼俊伟, 张鑫, 王可欣, 等. 1951—2016 年秦巴山区霜期变化的时空特征分析 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2019, 13(5): 82—88.
- [6] 詹沛刚, 吴哲红, 肖俊, 等. 提高安顺山药栽培气候资源利用率的途径研究 [J]. *中低纬山地气象*, 2018, 42(2): 53—57.
- [7] TOMCZYK A M, SZYGA - PLUTA K, MAJKOWSKA A. Frost periods and frost - free periods in Poland and neighbouring countries [J]. *Open Geosciences*, 2015(1).
- [8] MALINOVIC - MILICEVIC, SLAVICA, STANOJEVIC, et al. Radovanovic. Recent changes in first and last frost dates and frost - free period in Serbia [J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2018, 100(1).
- [9] 宋海龙, 万红莲, 朱婵娟. 过去 1400 年陕西地区霜冻灾害事件及其影响研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(4): 170—176.
- [10] 马彬, 张勃, 贾艳青, 等. 1961—2014 年中国内陆农业区异常初、终霜日时空变化及其与环流因子的关系 [J]. *气象学报*, 2017, 75(4): 661—671.
- [11] HAN R, LI W, AI W, et al. The climatic variability and influence of first frost dates in northern China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 525—532.
- [12] ZHANG D, XU W, LI J, et al. Frost - free season lengthening and its potential cause in the Tibetan Plateau from 1960 to 2010 [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2014, 115(3—4): 441—450.
- [13] YAN J H, FU H, ZHOU H S. Variations of frost - free period and its impact on grain yields in Henan Province during 1961—2013 [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015(8): 1588—1591.
- [14] 马尚谦, 张勃, 唐敏, 等. 1960—2015 年淮河流域初终霜日时空变化分析 [J]. *中国农业气象*, 2018, 39(7): 468—478.
- [15] 肖晶晶, 郭芬芬, 李正泉, 等. 1951—2013 年浙江热量资源变化研究 [J]. *气象与环境科学*, 2017, 40(3): 110—118.
- [16] 李时睿, 王治海, 金志凤, 等. 茶叶霜冻害精细化预警——以浙江省松阳县为例 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(10): 2979—2987.
- [17] 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.
- [18] 马尚谦, 张勃, 杨文义, 等. 1960—2015 年淮河流域异常初、终霜日时空变化及其影响因子 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 359—373.
- [19] 夏声鹏. 关于历法改革的新建议 [J]. *吉首大学学报(社会科学版)*, 2014, 35(增刊 1): 139—144.
- [20] 吴燕. “废历”: 革命与进步情境中的旧历形象建构 [J]. *自然科学史研究*, 2016, 35(3): 297—310.
- [21] DUBRULE O. Cross validation of kriging in a unique neighborhood [J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1983, 15(6): 687—699.
- [22] 刘胜娅, 王会肖, 王艳阳, 等. 北京市潜在蒸散发量的时间序列变化特征分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 13—16.
- [23] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法 [J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482—493.
- [24] 莫跃爽, 周秋文. 贵州省 1960—2014 年不同地貌类型的气温变化特征 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 166—170.
- [25] 李政, 张文太, 轩俊伟. 伊宁市 1956—2015 年强降雨特征及对洪灾的影响 [J]. *水资源保护*, 2018, 34(6): 49—55.
- [26] 李崇银, 杨辉, 赵晶晶. 大气环流系统组合性异常与极端天气气候事件发生 [J]. *大气科学学报*, 2019, 42(3): 321—333.
- [27] 张树良. 新的国际气候变化基准将于 2015 年正式启用 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(8): 967.
- [28] 楼俊伟, 李正泉, 章永辉, 等. 金华市气温和日照时数气候态变化特征 [J]. *中南农业科技*, 2022, 43(4): 91—96.
- [29] 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.
- [30] 李伟君, 吕厚荃. 1961—2010 年南方双季稻区气候资源变化分析 [J]. *热带气象学报*, 2021, 37(4): 590—601.