

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.02.017

# 1960—2019 年河南省霜冻日期时空变化及影响因素研究

张志高<sup>1</sup>, 刘晴<sup>1</sup>, 刘慧颖<sup>1</sup>, 郭超凡<sup>1</sup>, 蔡茂堂<sup>2</sup>, 尹纪媛<sup>1</sup>

1. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455000; 2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081

**摘要:** 基于 1960—2019 年河南省 17 个气象站点观测资料, 采用线性倾向估计、Mann-Kendall 突变检验和相关分析等方法, 对河南省霜冻日期时空变化特征及其与地理因子的关系进行分析, 采用 R/S 分析法预测霜冻日期的未来趋势。结果表明, 1960—2019 年河南省平均初霜日期为 11 月 8 日, 终霜日期为 3 月 28 日, 平均无霜期 224 d。60 年来初霜日以 2.66 d/10a 的速率推迟, 终霜日以 -2.88 d/10a 的速率提前, 无霜期以 5.54 d/10a 的速率显著延长。21 世纪 10 年代初霜日最晚, 终霜日最早, 无霜期最长。初霜日期于 2004 年发生突变, 终霜日和无霜期于 1998 年发生突变。从空间分布来看, 河南省初霜日自南向北逐渐提前, 终霜日自南向北逐渐推迟, 无霜期自南向北逐渐缩短。未来河南省初霜日期推迟, 终霜日提前和无霜期延长的趋势将会延续, 初、终霜日和无霜期主要受纬度的影响。

**关键词:** 初霜日; 终霜日; 无霜期; 时空变化特征; 河南省

**中图分类号:** P467 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2023)02-0170-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Spatial and Temporal Characteristics and Influencing Factors of Frost Periods in Henan Province during 1960—2019

ZHANG Zhigao<sup>1</sup>, LIU Qing<sup>1</sup>, LIU Huiying<sup>1</sup>,  
GUO Chaofan<sup>1</sup>, CAI Maotang<sup>2</sup>, YIN Jiyuan<sup>1</sup>

1. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang Henan 455000, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract:** Based on the observation data of 17 meteorological stations in Henan from 1960 to 2019, this paper analyzed the spatial and temporal changes of frost date and its relationship with geographical factors in

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602366); 河南省高等学校青年骨干教师项目(2020GGJS188); 河南省高等学校重点科研项目(21A170002, 23A170008)。

作者简介: 张志高, 博士, 副教授, 主要从事气候变化研究。

通信作者: 蔡茂堂, 博士, 副研究员。

Henan using the methods of linear tendency estimation, Mann Kendall mutation test and correlation analysis. The future trend of frost date was predicted by R/S analysis. The results show that the average first frost date in Henan was November 8, the last frost date was March 28, and the average frost-free period was 224 d during 1960—2019. In the past 60 years, the first frost day was delayed at the rate of 2.66 d/10a, the last frost day was advanced at the rate of  $-2.88$  d/10a, and the frost-free period was significantly prolonged at the rate of 5.54 d/10a. The latest first frost day, the earliest last frost day, and the longest frost-free period were in the early of 2010s. The time series of the first frost date showed a climatic abrupt change in 2004, the last frost day and the frost-free period showed the climatic abrupt changes in 1998. In terms of the spatial distribution, the first frost day in Henan was gradually advanced from south to north, the last frost day was gradually delayed from south to north, and the frost-free period was gradually shortened from south to north. In the future, the delay of first frost day, the advance of last frost day and the extension of frost-free period may continue. The first and last frost day and frost-free period were mainly affected by latitude and reached a significant level.

**Key words:** first frost day; last frost day; frost-free period; spatial-temporal variation; Henan Province

霜冻常出现在春、秋两季农作物生长期,是由寒潮和强冷空气活动引致土壤或植物表面温度降至  $0^{\circ}\text{C}$  以下而造成作物受害的现象,是中高纬度地区影响农业生产的主要灾害之一<sup>[1-2]</sup>. 目前,全球正在经历以变暖为主要特征的气候变化,全球地表温度正以前所未有的速度上升,2011—2020 年全球平均表面温度相比 1850—1900 年上升  $1.09^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>. 全球变暖将改变气温、辐射以及降水等要素的地理分布,在一定程度上对初、终霜日和霜期长短产生影响,进而影响农业生产<sup>[4-5]</sup>. 因此,近年来在全球气候变暖背景下,霜冻的时空演变特征及其影响因素与灾害评估受到了国内外学者的广泛关注<sup>[6-9]</sup>. Frich 等<sup>[10]</sup> 研究发现 20 世纪中后期全球年霜冻日数不断减少. Crimp 等<sup>[11]</sup> 研究发现澳大利亚南部地区霜冻时间偏晚,东南部地区的霜冻频率呈增加趋势. 宁晓菊等<sup>[12]</sup> 分析了 1951 年以来中国无霜期的变化趋势,发现中国大部分区域呈初霜日推迟、终霜日提前无霜期延长的趋势,在变化幅度方面北方大于南方、东部大于西部. 张鑫等<sup>[13]</sup> 研究发现北疆初霜日推迟,终霜日提前,霜期缩短,速率分别为 2.2,  $-1.7$ ,  $-3.9$  d/10a,初、终霜日和霜期的主周期均为 2a 左右. 任景全等<sup>[14]</sup> 发现吉林省初霜日显著推迟,终霜日显著提前且无霜期显著延长,其主周期均为 3a 左右. 马尚谦等<sup>[15]</sup> 发现淮河流域呈初、终霜日和无霜期分别以 2.15,  $-2.49$ , 4.38 d/10a 的速率呈推迟、提前和延长的趋势,且在 20 世纪 90 年代的变化最为显著. 在霜冻变化影响因素方面,王国复等<sup>[16]</sup> 认为中国大部地区霜期缩短,初霜日推迟,终霜日提前主要与日最低气温和 0 cm 最低地温的不断升高有关;马彬等<sup>[17]</sup> 认为极涡与副热带高压的位置、强度、面积变化驱动了中国农业区霜冻多年气候状态的转变;马尚谦等<sup>[18]</sup> 认为淮河流域气候的转型促进了初霜日的推迟和终霜日的提前;陈少勇等<sup>[19]</sup> 探讨了西北地区影响初霜冻发生的环流特征,认为与副热带高压正相关,与极涡负相关,初霜日推迟是气候变暖的结果;Liu 等<sup>[20]</sup> 研究发现气候变暖减少了霜冻事件,但植物生长季节的延长可能在生长季诱发更高的霜冻频率. 此外还有学者分析了霜冻灾害对农作物的影响,代立芹等<sup>[21]</sup> 认为河北省冬小麦霜冻害以轻度为主,霜冻导致冬小麦气象产量下降、减产率增加;高文波等<sup>[22]</sup> 构建了西南茶区茶树春梢晚霜冻害概率和强度指数,发现西南茶区霜冻终日和初日均呈显著提前趋势,茶树晚霜冻害危险性呈下降趋势;吕佳佳等<sup>[23]</sup> 采用数理统计和墨西哥帽小波法分析了寒地大豆霜冻的时空变化特征,发现霜冻对大豆产量的影响为霜冻等级及出现日期的协同作用.

河南省位于黄河中下游,平原面积广阔,属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候,气候分明,雨热同期,适宜多种农作物生长,被誉为“中原粮仓”,在我国农业生产中占有举足轻重的地位. 然而由

于河南省地处南北气候过渡带和山区到平原的过渡带,对气候变化的适应能力较弱,加之农业基础条件薄弱,受霜冻等气象灾害影响较为严重.因此,本研究基于 1960—2019 年逐日气象观测数据,运用线性倾向估计、Mann-Kendall 突变检验、相关分析及 R/S 分析等方法对河南省初霜、终霜及霜期的时空演变进行研究,并探讨其与地理因子的关系,以期对河南省霜冻灾害的预报与防御及农业可持续发展提供科学依据和参考.

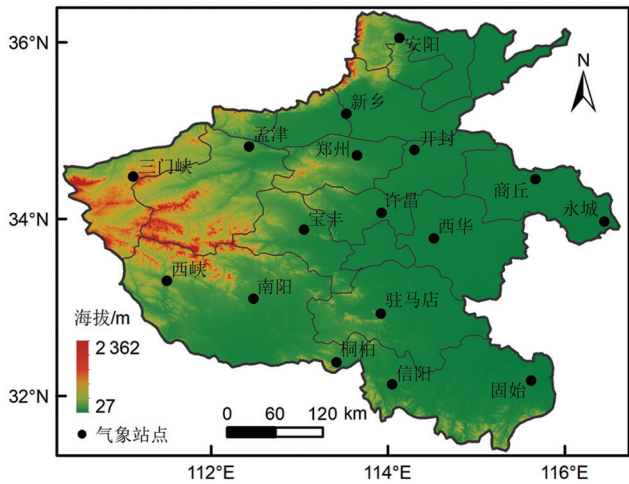
# 1 资料与方法

## 1.1 研究区概况

河南省位于中国中东部、黄河中下游,地理位置为  $31^{\circ}23' - 36^{\circ}22'N$ ,  $110^{\circ}21' - 116^{\circ}39'E$ . 全省地势西高东低,太行山脉、伏牛山脉、桐柏山脉、大别山脉沿省界呈半环形分布,中、东部为华北平原,西南部为南阳盆地. 全省总面积  $16.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中平原和盆地占 55.7%,山地和丘陵占 44.3%,农业用地占 74.25%. 河南省气候自南向北由亚热带向暖温带气候逐渐过渡,气候温和,四季分明,年平均气温在  $12 \sim 16^{\circ}\text{C}$ ,年降水量约为  $500 \sim 1\,400 \text{ mm}$ ,无霜期为  $190 \sim 230 \text{ d}$ ,日照时数  $1\,740 \sim 2\,310 \text{ h}$ . 河南省地处南北气候过渡带,同时自东向西由平原向丘陵山地气候过渡,霜冻等气象灾害较为频繁.

## 1.2 数据来源

河南省 17 个气象站点 1960—2019 年逐日地面 0 cm 最低温度数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)中国地面气候资料日值数据集. 以地面 0cm 最低温度  $\leq 0^{\circ}\text{C}$  作为霜冻指标,参考前人研究<sup>[24]</sup>,中国北方初霜日一般在 8 月 1 日后,因此以 8 月 1 日作为统计起始点,将 8 月 1 日定义为 1,用日序表示初、终霜日,初霜日为 8 月 1 日以后第一次出现地面最低温度  $\leq 0^{\circ}\text{C}$  的日期,终霜日为最后一次地面最低温度  $\leq 0^{\circ}\text{C}$  的日期,霜冻终日的翌日至初日的前一天之间的日数为无霜期. 利用算术平均法建立 1960—2019 年河南省初霜期、终霜期和无霜期序列. 研究区域及代表站点分布如图 1 所示.



审图号: 豫 S(2019 年)013 号.

图 1 河南省气象代表站点分布

## 1.3 R/S 分析

重标极差分析法(R/S)最初由英国科学家赫斯特提出,用于分析尼罗河水库流量和储蓄能力<sup>[25]</sup>,后被广泛用于气象学领域的趋势预测. R/S 分析法用气候要素时间序列计算出 Hurst 指数( $H$  值)来揭示气候要素的趋势,如果  $0 < H < 0.5$ ,表明时间序列前后变化负相关,且  $H$  值越接近 0,负相关性就越强;  $0.5 < H < 1$ ,时间序列前后变化正相关, $H$  值越接近 1,正相关性就越强;当  $H = 0.5$ ,时间序列前后变化无关,时间序列不存在趋势性.

此外,采用线性倾向估计法分析河南省霜冻的时间变化特征;利用相关分析和线性回归法分析霜冻日期与地理因子的关系,变量间相关性强度依据相关系数绝对值  $R$  大小分为 5 个等级,分别为极强相关( $0.8 < R \leq 1.0$ )、强相关( $0.6 < R \leq 0.8$ )、中等程度相关( $0.4 < R \leq 0.6$ )、弱相关( $0.2 < R \leq 0.4$ )和极弱相关( $0.0 < R \leq 0.2$ );采用非参数统计检验方法 Mann-Kendall 检验法对霜冻时间序列进行趋势分析和突变检验<sup>[26]</sup>;基于 ArcGIS 10.0 软件,采用克里金插值和自然分类法分析河南省霜冻日期空间分布特征.

2 结果与分析

2.1 河南省霜冻日期时间变化特征

近 60a 来河南省初霜平均日期为 11 月 8 日, 其中 1981 年初霜日最早, 为 10 月 24 日. 2011 年初霜日最晚, 为 11 月 25 日(图 2a). 进行线性拟合可知, 河南省初霜日期显著推迟, 倾向率为 2.66 d/10a. 1960—2019 年河南省终霜平均日期为 3 月 28 日, 其中 2007 年终霜日最早, 为 3 月 12 日. 1961 年终霜日最晚, 为 4 月 14 日(图 2b), 60a 来终霜日以−2.88 d/10a 的倾向率显著提前. 1960—2019 年河南省无霜期平均为 224 d, 其中 1962 年最短, 为 202 d, 2016 年最长, 为 249 d(图 2c), 60a 来无霜期显著延长, 倾向率为 5.54 d/10a.

年代际变化方面, 20 世纪 70 年代初霜日最早, 平均为 11 月 3 日, 之后逐渐推迟, 2000 年左右距平转正, 21 世纪 10 年代初霜日最晚, 平均为 11 月 18 日. 20 世纪 60 年代终霜日最晚, 为 4 月 3 日, 之后逐年代提前, 2000 年以后提前至 3 月 21 日. 20 世纪 70 年代无霜期最短为 214 d, 之后逐渐延长, 2000 年左右距平转正, 21 世纪 10 年代最长, 为 241 d, 相比 20 世纪 70 年代延长 27 d(表 1).

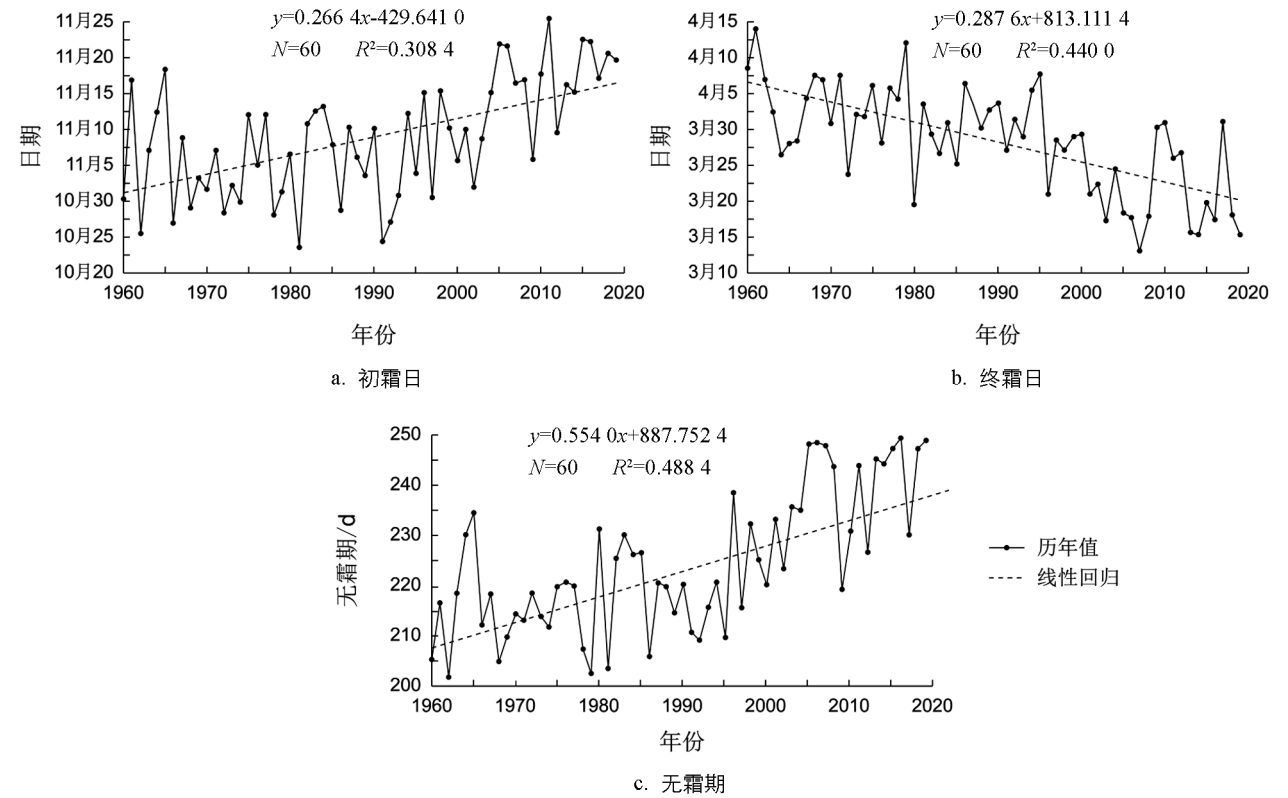


图 2 1960—2019 年河南省初霜日、终霜日和无霜期年际变化

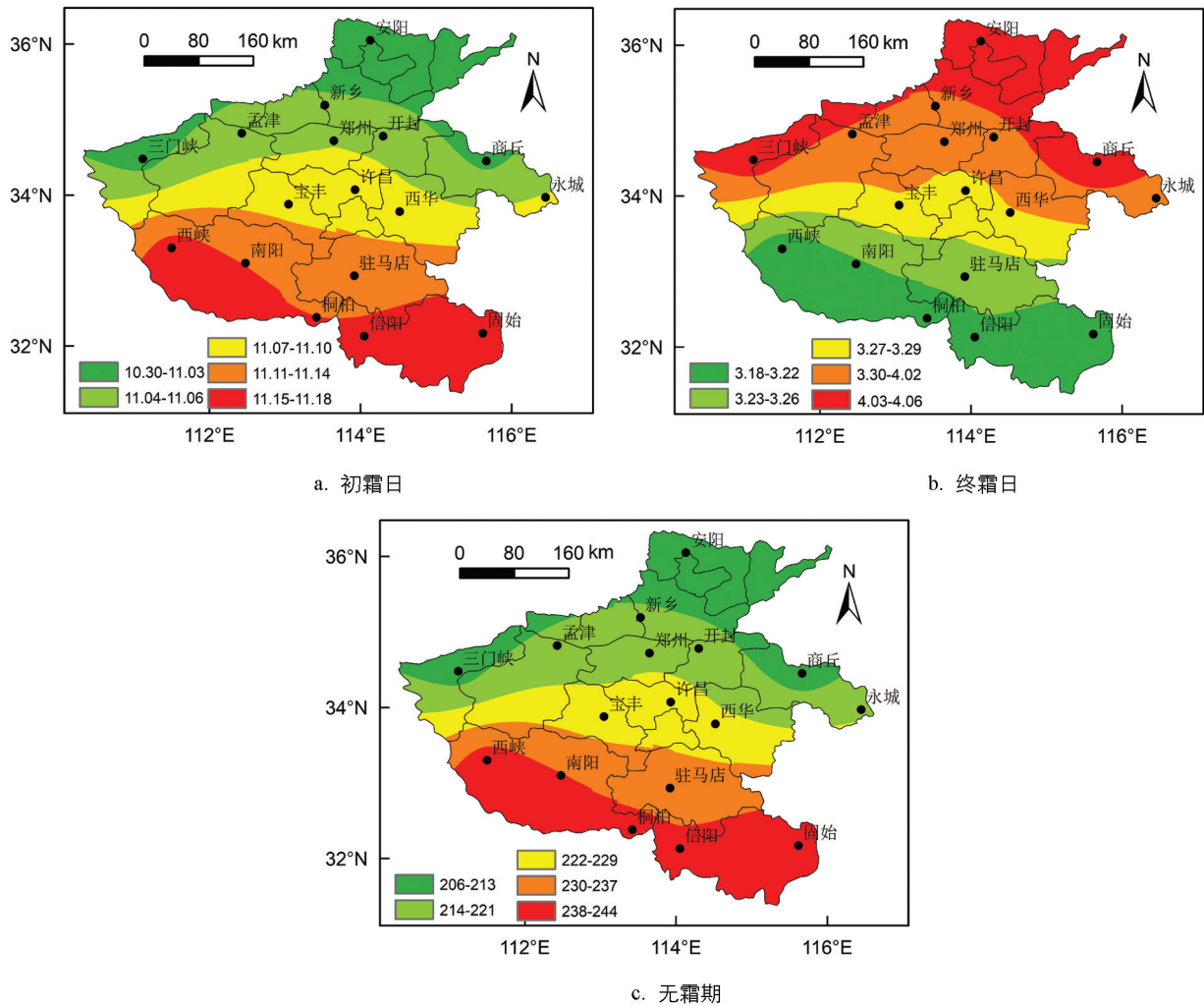
表 1 河南省初霜日、终霜日和无霜期年代际变化

| 年份        | 初霜日   |    | 终霜日  |    | 无霜期 |     |
|-----------|-------|----|------|----|-----|-----|
|           | 均值    | 距平 | 均值   | 距平 | 均值  | 距平  |
| 1960—1969 | 11.5  | −3 | 4.3  | 6  | 215 | −9  |
| 1970—1979 | 11.3  | −5 | 4.2  | 5  | 214 | −10 |
| 1980—1989 | 11.6  | −2 | 3.29 | 1  | 220 | −4  |
| 1990—1999 | 11.5  | −3 | 3.30 | 2  | 220 | −5  |
| 2000—2009 | 11.12 | 4  | 3.21 | −7 | 236 | 11  |
| 2010—2019 | 11.18 | 10 | 3.21 | −7 | 241 | 17  |

2.2 河南省霜冻日期空间分布特征

2.2.1 霜冻的平均空间分布特征

河南省各地初霜日出现在 10 月末至 11 月中上旬,空间差异明显,大致与纬线平行,呈“北早南晚”的空间分布格局,其中河南省西南部地区初霜日在 11 月 14 日以后;中部地区在 11 月 3—10 日,北部安阳站最早,为 10 月 30 日(图 3a). 近 60a 河南省各地平均终霜日自南向北逐渐推迟,南部地区终霜日多数出现在 3 月中下旬;北部地区终霜日多数出现在 3 月下旬和 4 月上旬;中部地区终霜日多数出现在 3 月 26 日—4 月 2 日(图 3b). 近 60a 河南省各地平均无霜期为 206~244 d,大致与纬线平行,自南向北呈逐渐减少趋势,西南部地区无霜期在 237 d 以上;豫北地区无霜期普遍小于 213 d,中部地区无霜期多在 213~229 d(图 3c).



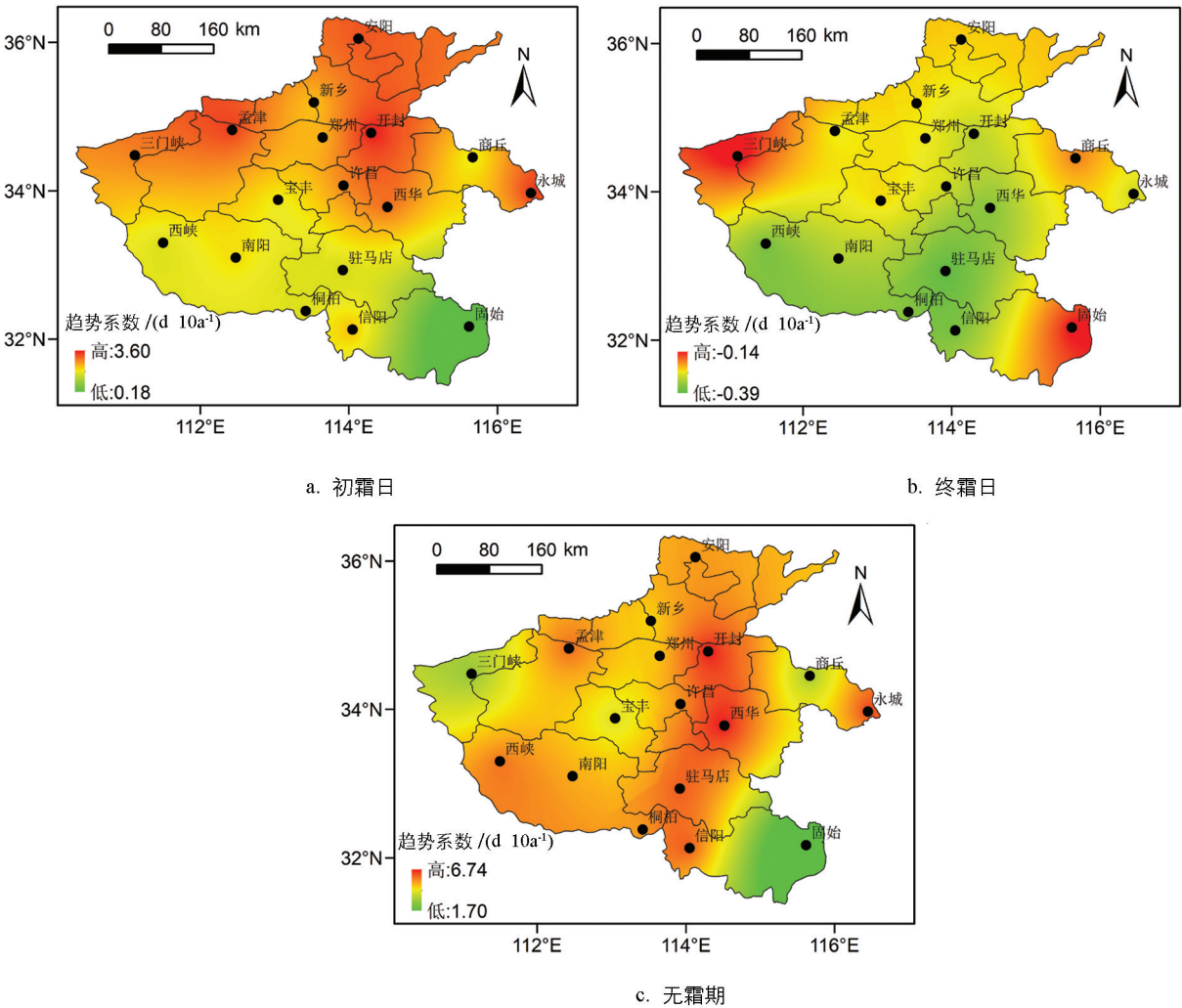
审图号: 豫 S(2019 年)013 号.

图 3 1960—2019 年河南省初霜日、终霜日和无霜期的空间分布

2.2.2 霜冻日期变化趋势空间分布特征

河南省 17 个站点初霜日期倾向率均为正值,均呈推迟趋势,全省初霜日气候倾向率在 0.18~3.60 d/10a 之间,其中西南部地区推迟幅度较小,多在 2.53 d/10a 以下;中部和北部地区推迟幅度较大,多在 2.68 d/10a 以上(图 4a). 近 60a 全省 17 个站点终霜日倾向率均为负值,终霜日均呈提前趋势,全省终霜日气候倾向率为-0.39~-0.14 d/10a,西南部提前幅度较大,多在-0.35 d/10a 以上(图 4b). 60a 来河南省无霜期显

著延长, 气候倾向率为  $1.70\sim 6.74\text{ d}/10\text{a}$ , 东南部无霜期延长幅度较小, 在  $4.04\text{ d}/10\text{a}$  以下, 西南部为  $5.69\sim 6.24\text{ d}/10\text{a}$ , 中部地区无霜期延长幅度较大, 在  $5.79\text{ d}/10\text{a}$  以上(图 4c).



审图号: 豫 S(2019 年)013 号.

图 4 1960—2019 年河南省初霜日、终霜日和无霜期趋势系数的空间分布

2.3 霜冻日期突变特征

近 60a 来河南省初霜日正序列曲线  $UF$  整体呈上升趋势, 反序列  $UB$  曲线呈下降趋势, 二者相交于 2004 年, 且在  $\alpha=0.05$  的信度线内, 确定初霜日的突变点为 2004 年, 突变前平均初霜日期为 11 月 5 日, 突变后为 11 月 18 日, 推迟了 13 d(图 5a). 终霜日正序列曲线  $UF$  呈下降趋势, 反序列曲线  $UB$  呈上升趋势,  $UF$  和  $UB$  曲线相交于 1998 年, 且在  $\alpha=0.05$  的信度线内, 确定终霜日的突变点为 1998 年, 突变后平均终霜日期为 3 月 22 日, 较突变前的 4 月 2 日提前了 11 d(图 5b). 无霜期正序列曲线  $UF$  呈下降趋势, 反序列  $UB$  曲线呈上升趋势,  $UF$  和  $UB$  曲线相交于 1998 年, 确定终霜日的突变点为 1998 年, 突变后无霜期平均为 238 d, 较突变前的 217 d 延长了 21 d(图 5c).

2.4 霜冻日期的未来趋势变化

根据 R/S 分析, 河南省初霜日、终霜日和无霜期的  $H$  指数平均值分别为 0.88, 0.91, 0.96(表 2), 均明显大于 0.5, 说明序列的趋势与原序列呈正相关, 未来河南省霜冻日期变化与过去 60a 的变化趋势保持一致, 即初霜日期持续推迟, 终霜日期持续提前, 无霜日持续延长.

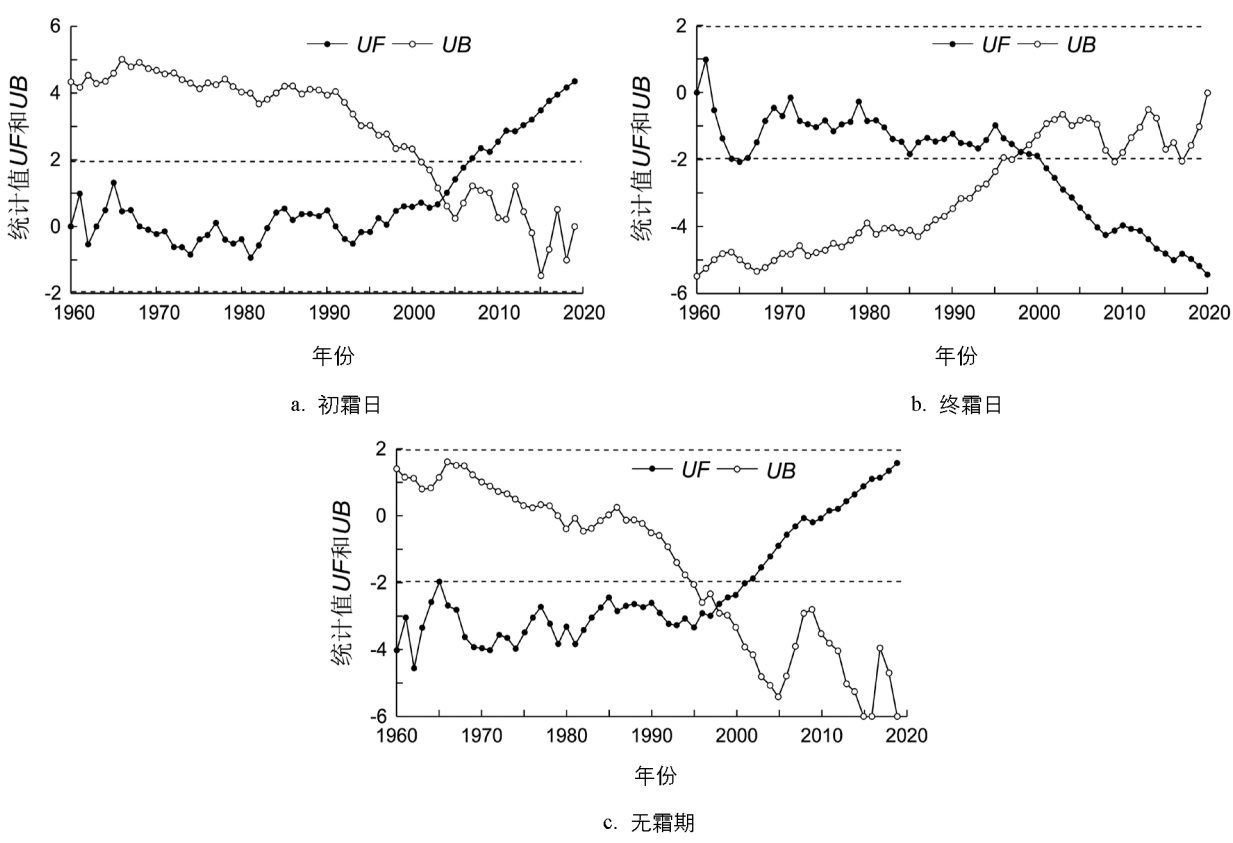


图 5 1960—2019 年河南省初霜日、终霜日和无霜期的 M-K 检验

表 2 河南省初霜日、终霜日和无霜期的 R/S 分析

|      | 初霜日  | 终霜日  | 无霜期  |
|------|------|------|------|
| H 指数 | 0.88 | 0.91 | 0.96 |

2.5 霜冻日期与地理因子的关系

河南省初霜日、终霜日和无霜期与海拔和经纬度的相关关系和回归系数如表 3 所示. 初霜日与纬度呈极显著负相关关系, 纬度每增加 1°, 初霜日提前 4.72 d, 初霜日与海拔和经度呈极弱负相关关系, 海拔每上升 10 m, 经度每增加 1°, 初霜日分别提前 0.01 d 和 0.17 d. 终霜日与纬度呈极显著正相关关系, 纬度每增加 1°, 终霜日推迟 5.06 d, 终霜日与海拔和经度呈极弱正相关关系, 海拔每上升 10 m, 经度每增加 1°, 终霜日分别推迟 0.01 d 和 0.43 d. 无霜期与纬度呈极显著负相关关系, 纬度每增加 1°, 无霜期缩短 9.7 d. 无霜期与海拔和经度呈极弱负相关关系, 海拔每上升 10 m, 经度每增加 1°, 无霜期分别缩短 0.05 d 和 4.58 d.

表 3 河南省初霜日、终霜日和无霜期与地理因子的关系

| 因素   | 地理因子 | 初霜日      | 终霜日     | 无霜期      |
|------|------|----------|---------|----------|
| 相关系数 | 海拔高度 | −0.125   | 0.102   | −0.113   |
|      | 经度   | −0.040   | 0.092   | −0.068   |
|      | 纬度   | −0.909** | 0.877** | −0.895** |
| 回归系数 | 海拔高度 | −0.001   | 0.001   | −0.005   |
|      | 经度   | −0.167   | 0.431   | −4.583   |
|      | 纬度   | −4.723   | 5.062   | −9.712   |

注: \*\* 表示相关性在 0.01 水平上有统计学意义.

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

1960—2019 年河南省初、终霜平均日期分别为 11 月 8 日和 3 月 28 日, 无霜期平均为 224 d, 近 60a 来河南省初霜日以 2.66 d/10a 的倾向率显著推迟, 终霜日显著提前, 倾向率为−2.88 d/10a, 无霜期显著延长, 倾向率为 5.54 d/10a. 初霜日突变点为 2004 年, 突变后初霜日推迟 13 d, 终霜日和无霜期于 1998 年发生突变, 突变后终霜日提前 11 d, 无霜期延长 21 d.

近 60a 河南省各地初霜日自南向北逐渐提前, 终霜日自南向北逐渐推迟, 多数地区终霜日出现在 3 月下旬至 4 月上旬, 全省无霜期在 206~244 d 之间, 自南向北逐渐减小.

河南省初霜日和无霜期均与纬度呈极显著负相关关系, 终霜日和纬度呈极显著正相关关系, 河南省初、终霜日和无霜期主要受纬度影响.

#### 3.2 讨论

在全球变暖背景下, 近 60a 河南省初霜日推迟, 终霜日提前, 无霜期显著延长, 这与中国大部分地区研究结果一致<sup>[12,27]</sup>, 这将延长作物生长季<sup>[28]</sup>, 利于作物适宜种植区域由较低海拔向较高海拔区域推进扩展, 然而生长季延长又增加了作物在霜冻中的暴露, 因此, 在未来全球变暖背景下, 各地还需因地制宜地采取调整农作物种植制度等措施, 以减少霜冻危害.

本研究探讨了霜冻与地理因子的关系, 认为河南省初、终霜日和无霜期主要受纬度影响, 限于数据的可获取性及篇幅所限, 环流指数和城市化等因素对霜冻的影响有待进一步研究.

#### 参考文献:

[1] 白磊, 张帆, 文元桥, 等. 基于格点资料的 1961—2018 年中国霜冻灾害时空变化规律 [J]. 中国农业气象, 2021, 42(9): 761-774.

[2] GE Q, WANG H, DAI J. Shifts in Spring Phenophases, Frost Events and Frost Risk for Woody Plants in Temperate China [J]. Climate Research, 2013, 57(3): 249-258.

[3] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis, the summary for policymakers of the working group I contribution to the fifth assessment report [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.

[4] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展 [J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.

[5] 谭大明, 季永月, 谭海运, 等. 西藏 60 多年来青稞生长季日照时长变化趋势 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(12): 48-57.

[6] DRAGONI D, SCHMID H P, WAYSON C A, et al. Evidence of Increased Net Ecosystem Productivity Associated with a Longer Vegetated Season in a Deciduous Forest in South-Central Indiana, USA [J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 886-897.

[7] 张山清, 普宗朝, 李景林, 等. 气候变暖背景下新疆无霜冻期时空变化分析 [J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1908-1916.

[8] 钱锦霞, 张霞, 张建新, 等. 近 40 年山西省初终霜日的变化特征 [J]. 地理学报, 2010, 65(7): 801-808.

[9] SCHEIFINGER H, MENZEL A, KOCH E, et al. Trends of Spring Time Frost Events and Phenological Dates in Central Europe [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2003, 74(1/2): 41-51.

[10] FRICH P, ALEXANDER L V, DELLA-MARTA P, et al. Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century [J]. Climate Research, 2002, 19(3): 193-212.

[11] CRIMP S, BAKAR K S, KOKIC P, et al. Bayesian Space-Time Model to Analyse Frost Risk for Agriculture in South-east Australia [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(8): 2092-2108.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 任景全,郭春明,王丽伟,等. 1961—2015 年吉林省霜时空分布特征及其影响因素 [J]. 气象与环境学报, 2018, 34(4): 119-125.

[15] 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.

[16] 王国复,许艳,朱燕君,等. 近 50 年我国霜期的时空分布及变化趋势分析 [J]. 气象, 2009, 35(7): 61-67.

[17] 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.

[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] 陈少勇,郑延祥,楼望萍,等. 中国西北地区初霜冻的气候变化特征 [J]. 资源科学, 2013, 35(1): 165-172.

[20] LIU Q, PIAO S L, JANSSENS I A, et al. Extension of the Growing Season Increases Vegetation Exposure to Frost [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 426.

[21] 代立芹,于长文,康西言,等. 河北省冬小麦春季霜冻害发生规律及风险分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5): 134-139.

[22] 高文波,林正雨,王明田,等. 1971—2020 年西南茶区灌木型茶树晚霜冻害危险性时空演变特征 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 4029-4038.

[23] 吕佳佳,朱海霞,宫丽娟,等. 1971—2016 年寒地大豆霜冻害时空演变特征及对产量影响 [J]. 大豆科学, 2020, 39(2): 260-268.

[24] 韩荣青,李维京,艾婉秀,等. 中国北方初霜冻日期变化及其对农业的影响 [J]. 地理学报, 2010, 65(5): 525-532.

[25] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.

[26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.

[27] 叶殿秀,张勇. 1961—2007 年我国霜冻变化特征 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 661-665.

[28] 张玉芳,吴冰洁,陈超. 四川省小麦生长季农业气候资源的时空分布特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 25-37.

责任编辑 包颖