

1960-2015年淮河流域异常初、终霜日 时空变化及其影响因子

马尚谦¹, 张勃¹, 杨文义¹, 杨梅², 魏堃¹,
李帅¹, 何航¹, 侯启¹, 魏怀东³

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 北京师范大学社会发展与公共政策学院,
北京 100875; 3. 甘肃省荒漠化防治重点实验室甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,
甘肃省治沙研究所, 兰州 730070)

摘要: 农作物生长关键期发生的异常初、终霜日, 对农业生产造成极大损失。准确了解并掌握异常初、终霜日在淮河流域的变化规律及成因, 有利于做好霜冻预报服务工作, 减轻霜冻灾害的影响, 对保障国家粮食稳产、高产、安全具有重大的意义。基于淮河流域 1960-2015 年 61 个气象站点逐日地面 0 cm 最低气温资料, 采用标准差计算了初、终霜日的稳定性, 使用概率密度函数定义了异常初、终霜日, 利用 IDW 插值方法反映气候态转变前后异常初、终霜日稳定性和频率, 同时利用线性倾向估计、M-K、滑动 t 检验和累计距平法得到气温的变化趋势及突变年份, 相关系数法用来分析环流指数、气温、初霜日、终霜日之间的关系。通过研究得出以下结论: (1) 淮河流域近 56 年来平均气温以 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ($P<0.01$) 的速率呈现显著的上升趋势并且在 1993 年发生突变, 气候态的转型促进了初霜日的推迟和终霜日的提前。(2) 气候态的转变导致初、终霜日的稳定性降低, 初、终霜日稳定性随经、纬度的增加而变好, 初霜日稳定性随海拔升高而变好, 终霜日稳定性随海拔升高而变化不显著, 终霜日稳定性好于初霜日稳定性。(3) 偏早初霜日频率 > 偏晚终霜日频率 > 特早初霜日频率 > 特晚终霜日频率, 且在气候态转型后, 异常初、终霜日的频率趋于降低, 稳定在 0~20% 之间, 异常初霜日发生频率整体高于异常终霜日, 气候变暖对初霜日的影响大于终霜日。(4) 异常初、终霜日频率时空分布差异显著, 高频年代分别为 1970s 和 1960s, 低频年代为 2000s。随着气候的转变, 虽然异常初、终霜日频率逐步趋于稳定且处于低频趋势, 但是气候转变促进了淮河流域东南部和南部的特早初霜日频率增加, 南部偏早初霜日发生频率范围增加。东北部的偏晚初霜日发生频率增加, 同时东南部的特晚终霜日发生频率也明显增加。(5) 北半球 9 月极涡面积越小, 淮河流域初霜日越迟 ($R=-0.41$, $P<0.01$)。10 月副高面积增加, 初霜日推迟 ($R=0.39$, $P<0.01$); 2 月极涡面积减小, 终霜日提前 ($R=0.29$, $P<0.05$)。4 月副高面积增大, 终霜日提前 ($R=-0.15$, $P>0.05$), 并且在 1990 年后提前趋势加快。
关键词: 农业气象学; 淮河流域; 气候变暖; 异常初、终霜日; 频率

气象学中的霜是一种天气现象, 指当气温下降使得地表或接近地表物体表面的温度下降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 空气中水汽直接凝华在地表或物体上形成白色冰晶的现象, 对农作物基本无害。农业气象学霜冻的定义是, 在植物生长季内, 土壤表面、植物表面及近地气

收稿日期: 2018-07-04; 修订日期: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561024); 高校博士学科点专项科研基金项目 (20136203110002)

作者简介: 马尚谦 (1991-), 男, 甘肃武威人, 硕士, 研究方向为气候变化与农业气象。

E-mail: msqnwnuedu@163.com

通讯作者: 张勃 (1963-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域环境与资源开发。

E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

层的温度下降到0℃以下,使得农作物受损乃至死亡,通常出现在秋、冬、春三季^[1]。

1980s中后期全球气候状态的转变^[2],影响中欧湖泊水质和生态系统^[3]、导致北半球海面温度升高^[4]、引起大气温度整体升高^[5],甚至对地下水也造成重大影响^[6],全球温度上升趋势在1998年以后依然没有改变^[7]。气候变暖导致气候异常和变率增大,冷害极端气温事件增加^[8],大多数研究显示初霜日推迟、终霜日提前^[9-10],无霜期延长^[11-12],并且得出霜冻在1980-1990年代发生突变的结论^[13]。气候变暖造成作物生长季的延长,导致作物更大的霜冻暴露度,因此气候变暖并不意味着农业霜冻害的减少或者减轻,反而会增加潜在的风险^[14-15]。Liu等^[16]最近使用卫星数据发现30°N以北,生长季延长的区域霜冻频率有所增加。当霜冻来得异常早或结束的特别晚时,对农作物的影响最为显著^[17],可能会导致农作物受到大面积的霜冻害,进而导致减产甚至绝收。初霜冻主要发生在秋季作物成熟之前^[18],初霜冻日期早晚变化对冬小麦^[19]、水稻和玉米单产有显著影响^[20];终霜冻一般发生在作物苗期,随着作物抗冻能力越差,春天最后一次霜冻出现越迟,造成的损失越大。Crimp等^[21]的研究表明虽然过去50年以来澳大利亚东南部最低温度呈逐渐变暖趋势,但近几十年的霜冻频率仍不断增加,一些地区的终霜冻较1960s迟了约四周的时间,这给农业带来相当大的风险。叶殿秀等^[22]认为中国终霜冻日期提早幅度大于初霜冻日期推迟幅度。李芬等^[23]从概率的角度研究发现山西省近50年偏早初霜冻出现的概率为6%~26%,特早初霜冻出现的概率为2%~22%。陈乾金等^[24]发现华北平原异常霜冻频率在空间上存在显著差异并按照周期特点将其长期变化趋势分为三种类型。杨荣珍等^[25]研究发现石家庄大多数异常霜冻发生在20世纪50年代末至20世纪80年代。杜军等^[26]研究发现雅鲁藏布江中游泽当站1986年初霜冻从一个相对偏早期跃变为一个相对偏晚期,1990年终霜冻从一个相对偏晚期跃变为一个相对偏早期。马彬等^[27]研究了全国异常霜冻发现20世纪90年代偏早初霜日高频率覆盖地区范围最大。国内外学者运用AO指数、欧亚和亚洲经向环流、阿留申低压指数等多种环流指数分析霜冻的成因,发现不同的指数在不同区域对霜冻的影响不同^[28]。贾艳青等^[29]指出,长三角霜冻日数受城市化影响显著减少。王媛媛等^[30]、马琼等^[31]认为霜冻与海拔、经纬度有密切关系。

农业气象灾害是中国最主要的农业自然灾害,占整个农业自然灾害的70%,是导致中国粮食减产的最主要原因^[32]。农业受霜冻的影响十分严重,其中较为严重的霜冻害将导致农作物减产30%左右,甚至是颗粒全无。20世纪90年代后,低温冷冻灾害属于整体增强的态势^[33]。淮河流域作为中国重要的自然地理界线,介于长江和黄河流域之间,地处0℃等温线、有霜区和无霜区的过渡区,该区粮食产量占中国粮食总产量的18%,作为中国主要的冬小麦主产区,该区粮食对中国粮食安全有着重大的意义。掌握初、终霜日的稳定性以及气候态转变以来的异常初、终霜日的变化特征,对于指导农业生产实践,提高对霜冻灾害的防范和预警能力,为有关农业部门防灾减灾提供科学依据具有现实意义。目前大多数研究集中在初、终霜日以及无霜期长短的变化特征,但是异常初、终霜日的研究并不多见,较少和气候态的转变关联起来。在分析霜冻成因时,多用环流指数的年际平均值,而很少有研究聚焦到环流指数具体的月份上。因此本文在充分借鉴前人工作的基础上,针对淮河流域围绕三个科学问题展开:(1)淮河流域的初、终霜日的稳定性如何变化?(2)淮河流域的异常初、终霜日频率如何变化?(3)对应月份的环流指数变化对初、终霜日的影响如何?

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

1.1.1 气象数据

选取逐日0 cm地表最低温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 基础数据作为代用资料^[34], 构建霜冻日期指标^[35], 初霜日期为一年中8月1日以后首次出现霜冻的日期, 地面0 cm日最低温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的第一天。终霜日期为一年中7月31日之前最后一次出现地面0 cm日最低温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的一天; 分析北方地区霜冻日的变化可知, 中国北方初霜日期基本稳定在8月1日以后。因此, 本文将从8月1日开始作为统计时点, 记为1, 若1960年8月25日为初霜日期, 则该年初霜日以25计, 由此建立所有站点的初终霜日数据序列, 研究区气象站点空间分布见图1。

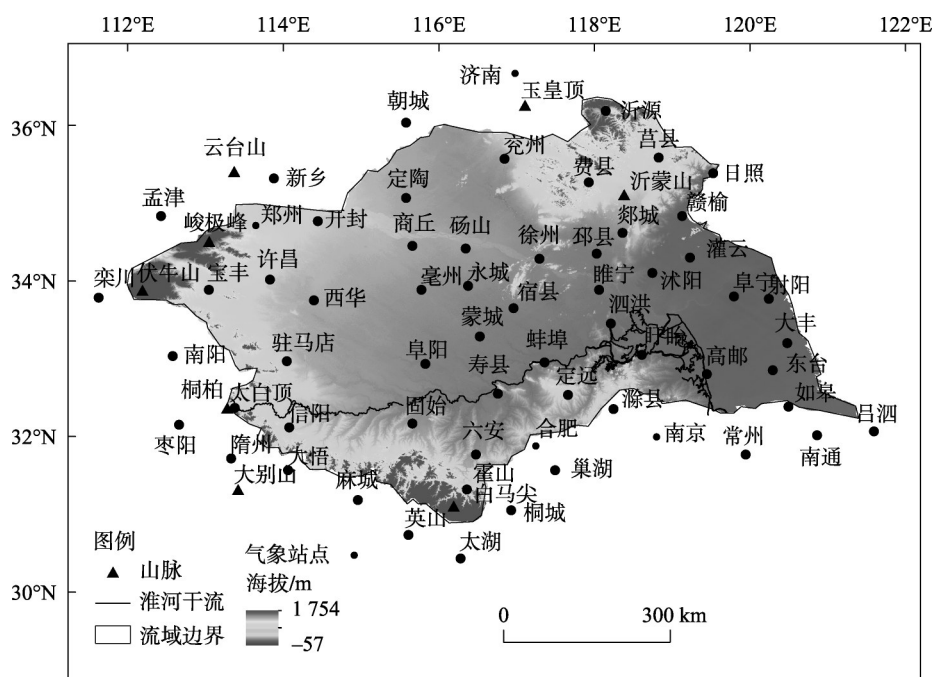


图1 研究区气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in the study area

选用1960年1月1日-2015年5月31日淮河流域内41个站点以及周边20个站点共计61个站点的数据(安徽15个、河南15个、湖北5个、江苏18个、山东8个), 由中国国家气象局气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>)的“中国地面气候资料日值数据V 3.0”提供。本文数据经过较为严格的质量控制, 主要包括极值控制、缺测站点时间一致性检验。使用Rclimdex软件对获取的数据进行进一步的质量控制, 包括日最低气温是否大于日最高气温、错误值和异常值的筛选。通过查阅安徽省、江苏省、河南省、山东省和湖北省气象台站简史, 对比发现站点位置无较大变化, 插补后相邻站点决定系数(R^2)介于0.89~0.97之间(表1), 说明插补之后数据质量和完整性比较好。

1.1.2 环流指数

在大的环流背景之下分析初、终霜日变化原因时需要特别关注对应月份的环流指数

变化。74项环流指数来自中国国家气候中心 (<http://www.ncc-cma.net/cn/>), 环流指数的选取基于淮河流域地理位置, 参照前人研究成果, 选取对淮河流域的初终霜日变化影响最大的环流指数, 分别是北极极涡面积指数和北半球副热带高压面积指数。

1.2 研究方法

1.2.1 异常初、终霜日

选用霜冻气候异常小概率事件特征来表示异常初、终霜日发生概率, 因为大气气温近似服从正态分布密度函数, 概率取值及发生概率见表2, 其关系表达式参见文献[17], 统计“异常”(特早、偏早、偏晚、特晚)初、终霜日的发生频率, 即概率波动在偏离均值最大时, 为异常霜冻出现。所有数据在Excel中依据表2编写函数挑选, 最后得到异常霜冻发生的频数以及频率。

表2 异常霜日概率分布表

Table 2 Probability distribution of abnormal frost

	特早初霜日	偏早初霜日	偏晚终霜日	特晚终霜日
<i>P</i> /霜日发生概率	$<-1.65\sigma$	$-1.65\sigma\sim-\sigma$	$\sigma\sim1.65\sigma$	$>1.65\sigma$
概率取值	0.05	0.11	0.11	0.05

1.2.2 稳定性分析

初霜日期的稳定推后及终霜日期的稳定提前, 直接影响了农业生产布局^[36]。标准差(σ)一般能反映一个数据集的离散程度(如稳定度), 本文采用标准差来表达初、终霜日期的稳定状态。标准差是一组数据平均值分散程度的一种度量, 一个较大的标准差, 代表大部分数值和其平均值之间差异较大; 一个较小的标准差, 代表这些数值较接近平均值。一般来说标准差较小为好, 代表数据比较稳定。便于对比其他基准期, 凸显近30年气候变暖对霜冻的影响, 气候多年平均值采用统一的基准期, 选用1981-2010年。

2 结果分析

2.1 淮河流域初、终霜日稳定性分析

为了在同一频率范围内将插值结果进行对比分析, 将插值结果在ArcGIS 10.2平台上进行了等值划分, 图2标准差的变化范围为0~20天。

2.1.1 不同的气候基准期

初霜日(图2a)1981-2010年 $\sigma>12$ 天的区域呈同心圆状小范围分布, 主要分布在淮河流域南部靠近大别山区的六安、霍山等地和流域西部的驻马店, 稳定性较差的区域大多分布在海拔较高的山区。从时间变化来看, σ 的变化幅度不是很大, 基本稳定在8~12天。其次对终霜日进行分析(图2b), 1961-1990年 $\sigma>1$ 天主要分布在南部的固始、大别山地区, 1971-2000年 σ 基本稳定在0~12天, 1981-2010年 $\sigma>12$ 天的区域零星分布在驻马店、永城、邳县。最后将初、终霜日稳定性进行对比发现, 终霜日 σ 在0~8天的分布范

表1 缺测站点与相邻站点的一致性检验

Table 1 Data consistency test between stations with missing measurements and their adjacent stations

缺测站点	相邻站点	R^2
西华	许昌	0.96
六安	马尖	0.97
高邮	大丰	0.96
东台	大丰	0.89
吕泗	南通	0.95
灌云	沐阳	0.95
新乡	郑州	0.93

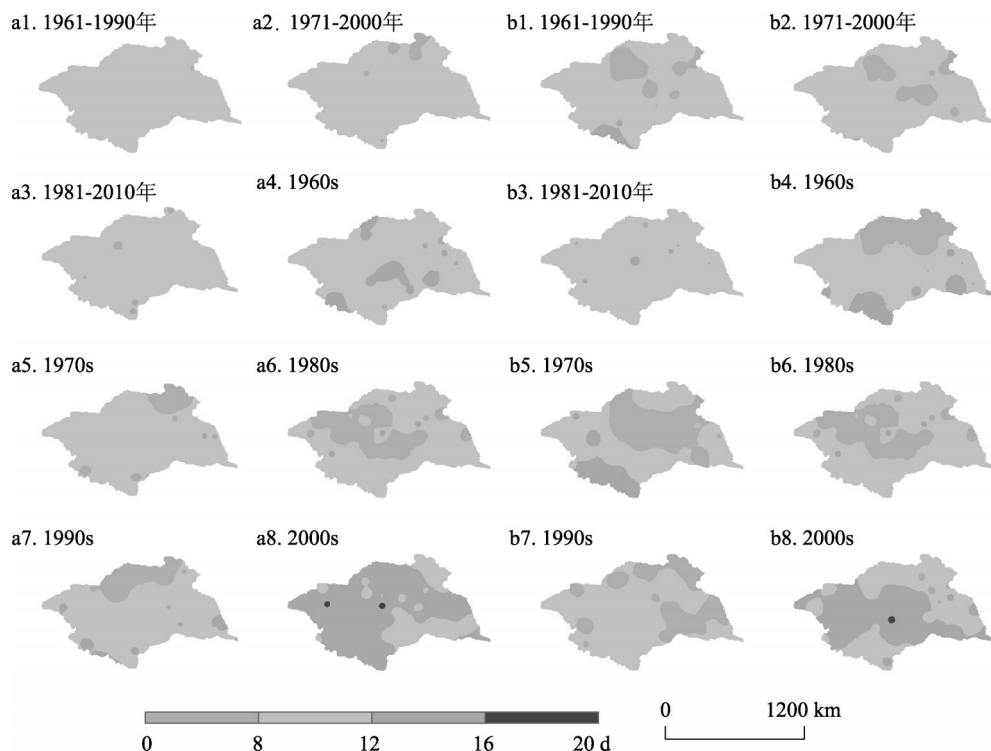


图2 初 (a)、终霜日 (b) 标准差不同时段空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of standard deviations of the first (a) and last (b) frost dates in different time periods

围大于初霜日,说明气候态转变以后终霜日稳定性好于初霜日。

2.1.2 不同年代际变化

初霜日 σ 在0~12天分布范围呈先增大(1960-1980s)后减小(1980-2000s)的特点, σ 在16~20天的年代主要为2000s,不稳定性随气候态转变增大,主要分布在许昌和永城。终霜日 σ 在0~12天的分布范围呈现先增大(1960s-1990s)后减小(2000s)的特点,2000s不稳定性范围增大最为显著。最后将初、终霜日稳定性进行对比发现,1993年气候转型后,2000s初霜日的0~12天分布范围小于终霜日,说明气候变暖增加了该地区的初、终霜日的不稳定性,且气候变化对初霜日的影响大于终霜日。

2.1.3 初、终霜日稳定性与地理参数的关系

使用ArcGIS的分区统计工具,以 1° (经纬度)为等间距计算在此间距上稳定性的均值,海拔高度考虑到区域海拔均低于1800 m,故选取海拔均低于1800 m的区域对其以100 m为等间距进行重分类,并求出每100 m高程上稳定性的均值。从稳定性在经纬度和海拔高度的变化趋势可知(图3),随着经度的增加,初、终霜日稳定性呈现两边好中间差的模式,变化倾向率分别为 $-0.54 \cdot 10^\circ\text{E}^{-1}$ ($P < 0.05$), $-0.37 \cdot 10^\circ\text{E}^{-1}$ ($P < 0.05$),且终霜日稳定性在 $119^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ 达到最小值;随着纬度的增加,初霜日稳定性同样呈现中部差而两边好的模式,终霜日稳定性以 35°N 为界线,以北稳定性逐渐变好,初、终霜日变化倾向率分别为 $-1.85 \cdot 10^\circ\text{N}^{-1}$ ($P < 0.01$), $-1.64 \cdot 10^\circ\text{N}^{-1}$ ($P < 0.01$);随着海拔的增加,初霜日的稳定性呈波动下降,变化倾向率为 $-0.14 \cdot 10 \text{ m}^{-1}$ ($P < 0.05$),而终霜日的稳定性波动变化趋势不显著,变化倾向率为 $0.05 \cdot 10 \text{ m}^{-1}$ ($P > 0.05$),上述分布态势可能是由于

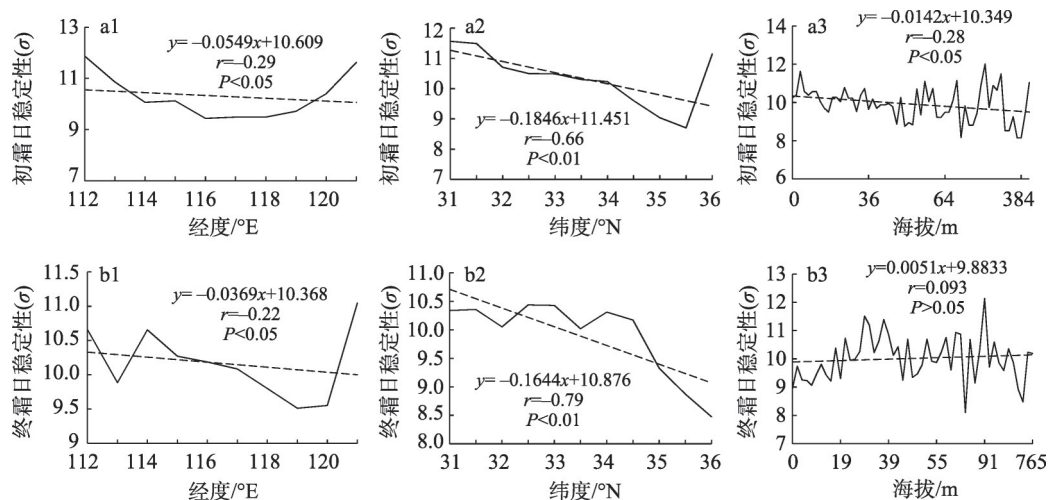


图3 1960-2015年淮河流域初、终霜日稳定性在不同经(a1, b1)、纬度带(a2, b2)和海拔高度(a3, b3)的平均变化趋势

Fig. 3 Mean change trends of the stability of first frost date and last frost date in categorized longitude (a1, b1), latitude (a2, b2) and altitude (a3, b3) ranks over Huaihe River Basin during 1960-2015

淮河流域西部、西南部、东北部皆分布山地而中部大部为平原所导致。因此可以认为在空间上,淮河流域初、终霜日稳定性随经、纬度增加而变好,初霜日稳定性随海拔升高而变好,终霜日稳定性随海拔升高变化不显著。

2.2 异常初、终霜日频率空间分布

2.2.1 异常初霜日频率空间分布

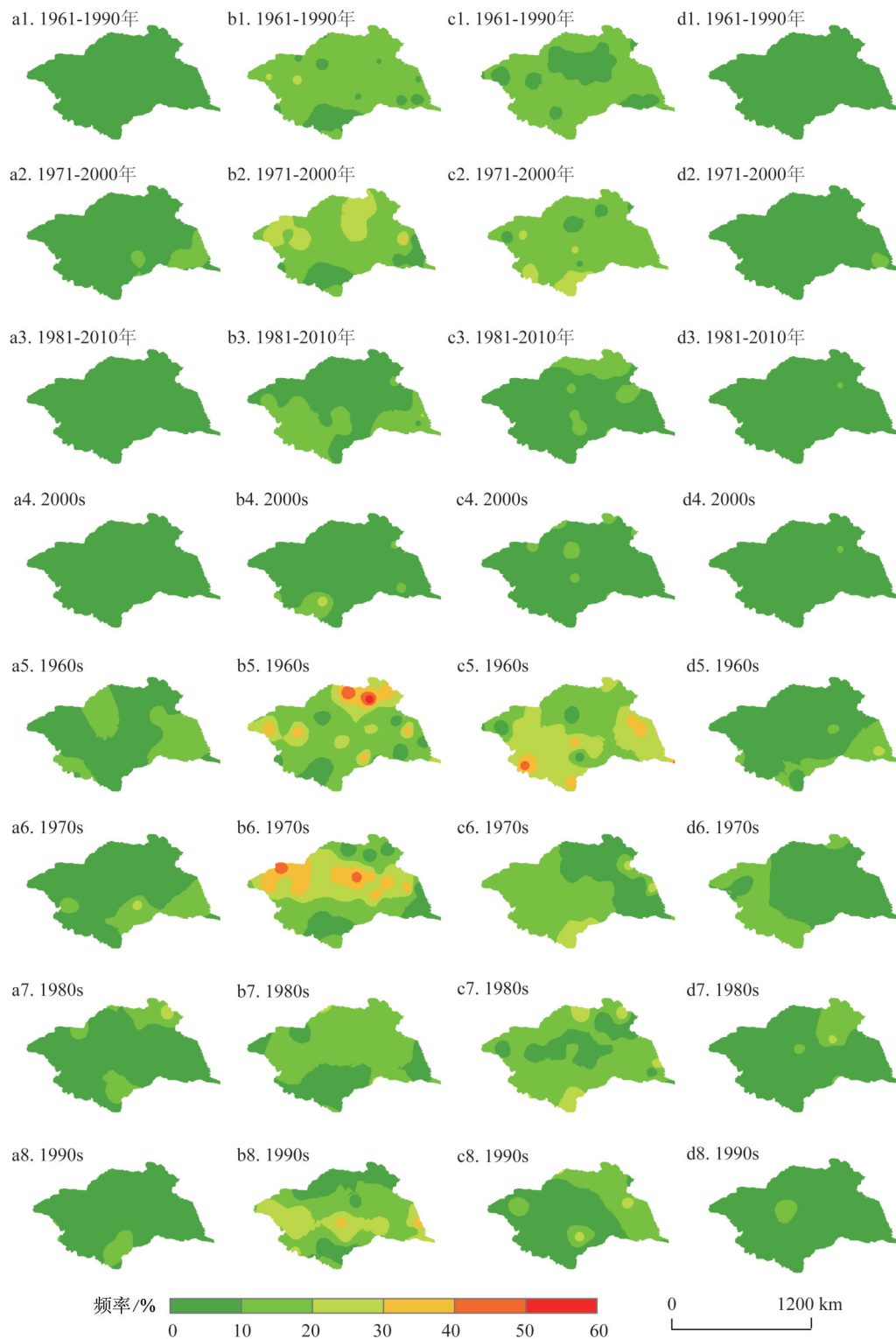
图4为特早初霜日、偏早初霜日、偏晚终霜日、特晚终霜日的频率空间分布图。

特早初霜日:在气候基准期1961-1990年和1981-2010年(图4a2、图4a3),频率基本稳定在0~10%。基准期1971-2000年(图4a2)频率在10%~20%的区域主要分布在南部蚌埠和东南部高邮、东台地区。各年代际绝大部分区域发生频率较低,在20%之下。1970s较之于1960s,郑州、开封地区频率减小,蚌埠地区频率呈增加趋势。1990s(图4a8)频率10%~20%主要分布在淮河流域南部地区,说明气候态转变增加了淮河流域东南部和南部的特早初霜日发生的频率。

偏早初霜日:在气候基准期1961-1990年和1971-2000年(图4b1、图4b2),北部地区如费县、徐州的频率高于南部地区,1981-2010年呈现南高北低的模式(图4b3)。1960s和1970s是频率较高的两个年代,频率在50%~60%的区域主要分布在费县、兖州、郑州、徐州地区,1980s区域整体稳定在0~20%之间;1990s,频率呈南高北低,沿着淮河干流频率主要集中在20%~40%。各年代高频率发生范围依次为1970s>1960s>1990s>1980s>2000s,说明气候转型后,偏早初霜日的频率分布范围变小,但增加了淮河流域南部发生的频率。

2.2.2 异常终霜日频率空间分布

偏晚终霜日:基准期1961-1990年和1981-2000年(图4c1、图4c3)频率西南低而东北高,频率在0~20%之间,基准期1971-2000年(图4c2)频率为20%~30%的区域为桐柏、霍山、六安地区。1960s偏晚终霜日的频率在各年代中最高,西南信阳、东南吕泗地区频率在50%~60%。1970-1990s频率基本在0~30%之间,沿着东北—西南走向波动。从



注: a、b、c、d分别为特早初霜日、偏早初霜日、偏晚终霜日、特晚终霜日。

图4 异常霜日频率时空分布

Fig. 4 Temporal and spatial distributions of the frequency of abnormal frost date

各年代高频率发生范围上来看, 1960s>1980s>1970s>1990s>2000s, 2000s 偏晚终霜冻发生频率整体偏低, 除北部局部区域, 其他区域低于10%。说明气候转变后, 偏晚初霜日频率分布范围缩小但增加了淮河流域东北部的偏晚初霜日发生频率。

特晚终霜日: 基准期1961-1990年和1981-2010年(图4d1、图4d3)特晚终霜日频率为0~10%, 1971-2000年(图4d2)流域东南部的频率分布在10%~20%之间。从各年代来看, 除1960s东南部、1980s北部较小区域发生频率大于20%之外, 其余各年代各区域发生频率均低于10%, 且在2000s有明显降低趋势。分布频率相对较高的地区大多处于山区, 如大别山区、沂蒙山区、伏牛山区等。说明气候转变后, 特晚终霜日频率分布范围缩小但增加了淮河流域东南部特晚终霜日发生频率。

通过对比分析异常初、终霜日冻频率发现, 偏早初霜日频率普遍高于特早初霜日, 偏晚终霜日频率普遍高于特晚终霜日。气候态转变后, 大多数地区的异常初、终霜日频率逐步趋于稳定, 处于低频趋势。

在气候转型后淮河流域异常初霜日发生频率整体高于异常终霜日, 初霜日的稳定性较终霜日的稳定性差, 说明气候变化对该地区初霜日的影响大于终霜日。

2.3 淮河流域霜冻成因分析

2.3.1 环流指数对初、终霜日的影响

选择与初、终霜日期对应的月值极涡面积指数, 对影响初、终霜日的因素进行分析(图5), 首先在DPS中对数据进行标准化处理, 然后进行相关分析并进行显著性检验。对初终霜日日期和环流指数进行三次多项式拟合, 用来显示年代际变化趋势。从图5a中可以看出, 初霜日与9月极涡面积呈极显著的负相关, 相关系数达 -0.41 ($P<0.01$), 从三次多项式拟合曲线的年代际变化来看, 当9月极涡面积下降时, 初霜日推迟, 当北半球9月极涡面积越小时, 冷空气南下的动力越小, 初霜日到来越迟。当9月极涡面积上升时, 初霜日提前。终霜日与2月极涡面积呈现显著正相关(图5b), 相关系数为 0.29 ($P<0.05$)。从拟合曲线来看, 极涡面积呈现减小趋势, 终霜日呈稳定的提前趋势。

初霜日与北半球10月副热带高压面积指数呈极显著的正相关(图6a), 相关系数为

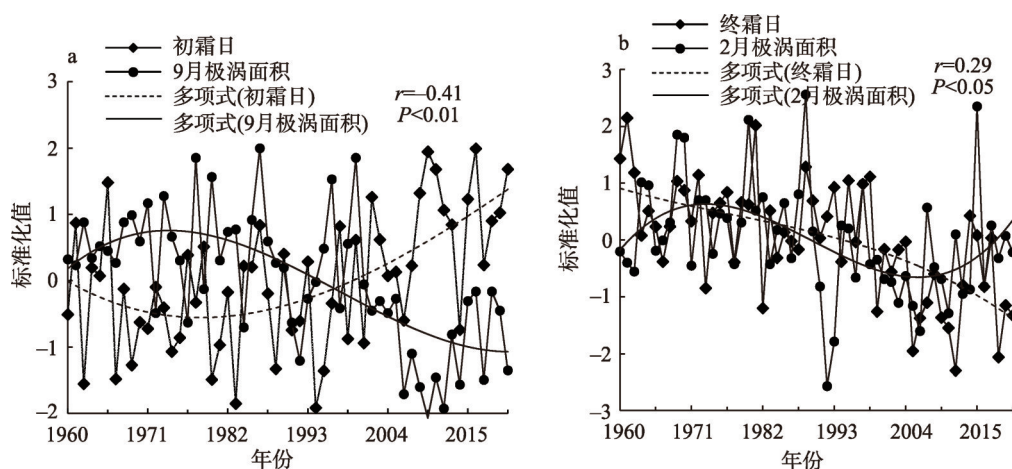


图5 淮河流域初霜日、终霜日与北半球极涡面积指数的年际变化

Fig. 5 Inter-annual variation of foam area index in the Northern Hemisphere, and the first frost date and last frost date in the Huaihe River Basin

0.39 ($P<0.01$), 初霜日从1980年开始, 呈现稳定的推迟趋势, 10月副高面积呈同步增加的趋势。终霜日与北半球4月副高面积指数呈负相关(图6b), 相关系数为 -0.15 ($P>0.05$), 没有通过显著性检验。拟合曲线显示终霜日呈现稳定的提前趋势, 并且在1990年后提前趋势加快。自1990年以后初霜日呈稳定推迟趋势, 终霜日呈稳定提前趋势。另外, 2月极涡面积指数与4月副高面积指数均存在25年左右的变化周期。

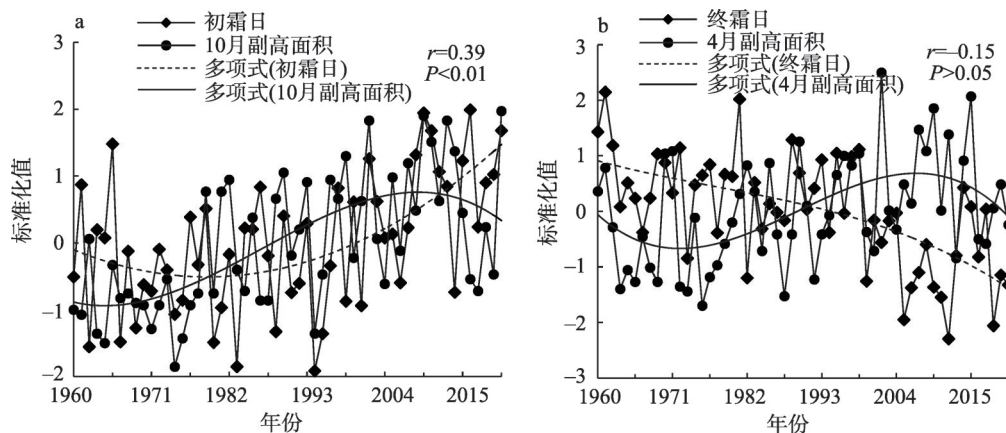


图6 淮河流域初霜日、终霜日与副热带高压面积指数的年际变化

Fig. 6 Inter-annual variation of subtropical high area index in the Northern Hemisphere, and the first frost date and last frost date in the Huaihe River Basin

2.3.2 气温对初、终霜日的影响

淮河流域气温以 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{ a}^{-1}$ ($P<0.01$) 的速率呈显著的上升趋势(图7a)。通过计算发现各年代的平均气温分别为 $14.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1960s)、 $14.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1970s)、 $13.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1980s)、 $14.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1990s)、 $14.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2000s), 1980s之前的两个年代平均气温呈下降趋势, 1980s之后的两个年代平均气温呈上升趋势。在1993年之前, 累积距平曲线(图7b)处于负值呈下降趋势, 说明气候比较冷, 气温比较低。累积距平曲线1993年之后呈现上升趋势, 说明气候温暖, 气温上升。从M-K突变曲线($\alpha=0.05$ 显著性水平)来看(图7c), 1993年以后 UF 曲线呈现显著上升的趋势, 且在置信区间内, UF 和 UB 出现了交点, 交点对应的年份为1993年, 且在2000年以后, UF 曲线大大超过显著性水平临界线, 说明气温在2000年以后, 上升更加显著。滑动 t 检验曲线(图7d)显示1978-1989年, 曲线($\alpha=0.05$ 显著性水平)超过显著性水平临界值, 1987年以后曲线呈现稳定上升的趋势, 1978-1989年气温皆有可能存在突变点。从各年代的初、终霜日日序平均值来看(表3), 1990s后初霜日显著推迟, 终霜日显著提前, 突变(1993年)前后的平均值显示出同样的规律。

初霜日距平(图8)以 $2.15\text{ d} \cdot 10\text{ a}^{-1}$ 的速率呈显著上升的趋势($P<0.01$), 距平最大值15天出现在2011年, 初霜日在1998年以后, 除2002年和2009年, 均呈现为正距平, 说明初霜日开始的时间越来越晚。终霜日距平以 $2.48\text{ d} \cdot 10\text{ a}^{-1}$ 的速率呈显著下降的趋势($P<0.01$), 距平最大值14天出现在1961年, 距平最小值 -15 天出现在2007年。1995年以后, 除了2009年、2010年和2012年外, 距平值均呈现负值, 说明终霜日结束时间越来越早。淮河流域气温突变年为1993年, 初霜日在1998年后越来越晚, 终霜日在1995年

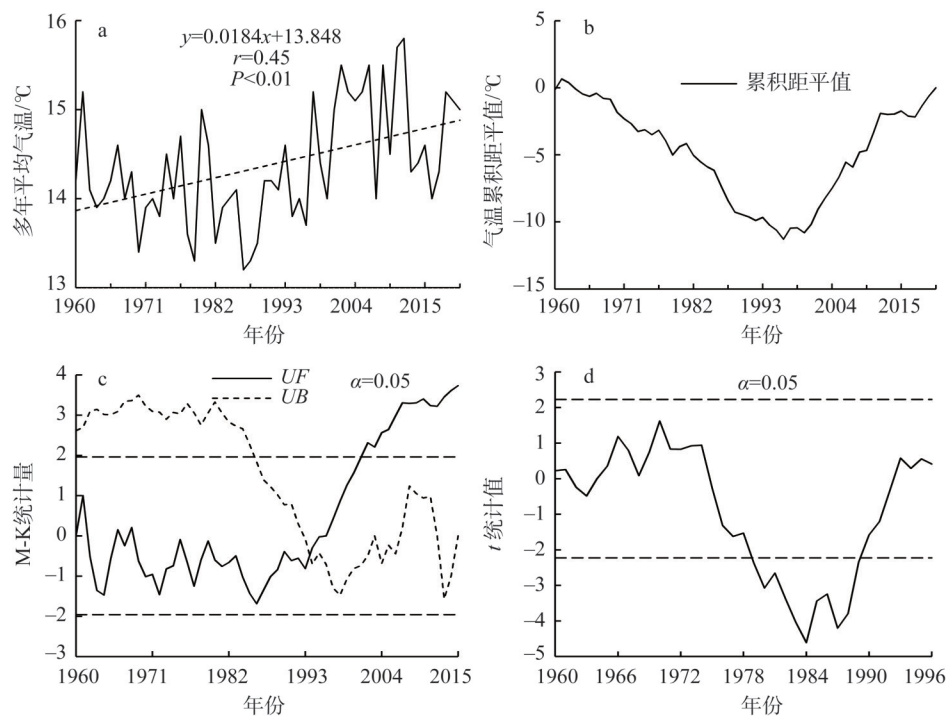


图7 淮河流域多年平均气温 (a) 及突变变化图 (b、c、d)

Fig. 7 Changes of annual mean temperature (a) and mutation (b, c, d) in the Huaihe River Basin

表3 各年代际及突变前后初、终霜日序平均值

Table 3 The average value of the first and last frost dates in inter-decadal change and days of before and after abrupt change

	各年代际				突变前后		
	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	突变前	突变后
初霜日	99.74	98.87	100.16	100.71	108.72	99.03	107.20
终霜日	246.23	244.25	243.93	241.98	234.65	244.69	236.84

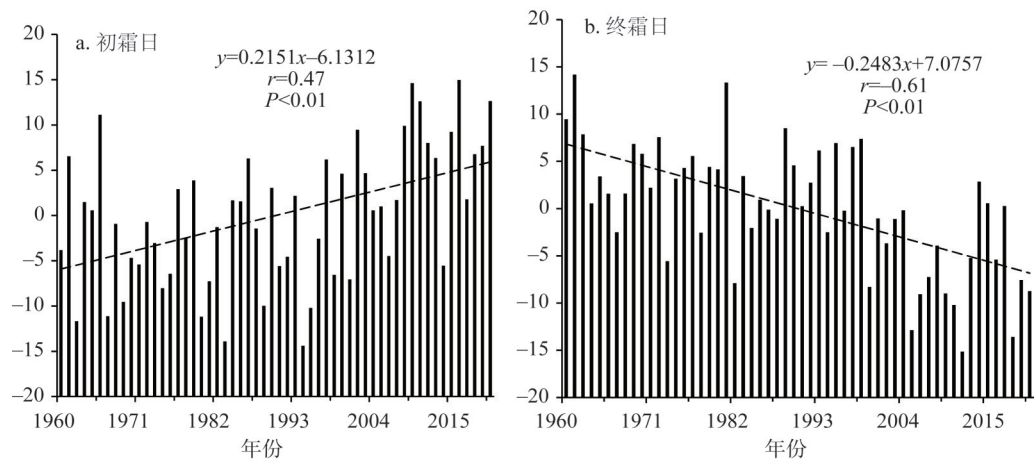


图8 淮河流域初霜日、终霜日距平

Fig. 8 The anomalies of the first frost date and last frost date in the Huaihe River Basin

后越来越早,说明淮河流域初、终霜日的变化趋势对气候变暖具有滞后性。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 初、终霜日稳定性最强年代分别在1970s、1990s,初、终霜日稳定性随经、纬度的增加而变好。初霜日稳定性随海拔升高而变好,终霜日稳定性与海拔相关系数没有通过显著性检验。基准期1981-2010年和21世纪 σ 在16~20天的分布范围较大,说明气候状态的转变促进两者的稳定性降低,同时终霜日 σ 在0~8天的分布范围大于初霜日,说明终霜日的稳定性好于初霜日。

(2) 异常初、终霜日时空分布差异显著,高频年代分别为1970s和1960s,低频年代为2000s。随着气候的转变,异常初、终霜日频率逐步稳定,趋于低频。虽然异常初霜日的高频分布范围逐渐缩小,但增加了流域东南部和南部的特早、偏早初霜日发生的频率。异常终霜日的高频分布范围逐渐缩小,但增加了流域东北部偏晚、东南部特晚终霜日发生的频率。

(3) 淮河流域偏早初霜日频率普遍高于特早初霜日,偏晚终霜日频率普遍高于特晚终霜日。在气候转型后异常初霜冻发生频率整体高于异常终霜冻,加之初霜日的稳定性比终霜日差,说明气候变化对该地区的初霜日的影响大于对终霜日的影响。

(4) 初霜日与北半球9月极涡相关系数为-0.41 ($P<0.01$),北半球9月极涡面积越小,淮河流域的初霜日越迟。初霜日与北半球10月副高面积指数相关系数为0.39 ($P<0.01$),10月副高面积呈增加趋势,初霜日呈稳定的推迟趋势;终霜日与2月极涡面积相关系数为0.29 ($P<0.05$),极涡面积呈现减小趋势,终霜日呈现稳定的提前趋势。终霜日与北半球4月副高面积相关系数为-0.15,没有通过显著性检验,终霜日呈现稳定的提前趋势,且在1990年后提前趋势加快。

(5) 淮河流域近56年来平均气温以 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ 的速率呈显著的上升趋势($P<0.01$)并且在1993年发生突变。1990-2000s平均气温呈上升趋势,且在2000s表现的更为显著,初霜日在1998年后越来越晚,终霜日在1995年后越来越早,气候变暖对初霜日显著推迟、终霜日显著提前具有重要影响。

3.2 讨论

(1) 不同年代和气候基准期表现的异常霜冻空间模式的不同,可能是由冷空气南下的路径、强度、经纬度和海拔的不同而造成^[9]。本文发现,近56年来淮河流域初、终霜日稳定性随经纬度的增加而变好。初霜日稳定性随海拔升高而变好,终霜日稳定性随海拔升高变化不显著。同时,结果也带有很大的不确定性,因为经、纬度的增加只是其中的一个方面(图3),从稳定性随经纬度变化呈中间好两边差的特点,结合地形因素,说明初、终霜日的稳定性可能需要结合经纬度和海拔同时考虑,需要更多的定点观测和实证资料来佐证上述的结论。

(2) 21世纪以来,北极海冰以史无前例的速度急剧消融,北极增暖放大效应和北极海冰的迅速减少是北极地区气候变化的重要表现形式^[37],本文发现终霜日与2月极涡面积呈显著的正相关关系,相关系数为0.29 ($P<0.05$),而从拟合曲线来看,2003年以后,当极涡面积呈现增加趋势时,终霜日却呈现提前趋势,结果还存在不确定性,可能有更多的环流因子作用于终霜日。

(3) 全球范围的气候态转变为1980s中后期, 本文通过对淮河流域多年平均气温做突变分析发现, 淮河流域气温出现突变点的年份为1993年左右, 与全球相比略有滞后。1993年之前, 异常初、终霜冻频率较高。1993年之后, 异常初、终霜日频率下降较为显著, 说明气候变暖对于异常初、终霜日的发生频率有较大的影响。初霜日在1998年后越来越晚, 终霜日在1995年后越来越早, 说明淮河流域初、终霜日的变化趋势对区域气候变暖也具有滞后性。当初、终霜日出现时间异常早或异常晚, 虽然地温条件要比正常年份偏高, 易使降温幅度很大而后迅速回温, 但是如此大的温差足以使得尚在生长的农作物受到很大的损害。据文献记载, 雅鲁藏布江中游江孜地区1997年出现了1次特早初霜事件, 比往常提早32天, 致使处于灌浆期的春青稞受冻, 造成大面积的减产。在冬小麦灌浆成熟期, 气温达到 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即可发生晚终霜冻, 使灌浆停滞, 籽粒丧失发芽力。马树庆等^[33]的研究认为气候变暖后作物种植边界北移、晚熟品种面积扩大和复种指数增加, 作物对热量的需求仍然处于紧平衡的状态, 同时气候变化和种植结构变化导致作物生长发育的节律有所改变, 增加了霜冻害风险。然而最新研究发现, 20世纪80-90年代霜冻增加最多, 20世纪90年代至21世纪增加减缓, 气候变暖总体上减少了每年的霜冻天数。霜冻天数增加明显的区域其生长季延长也更明显, 无霜期的延长可以使复种指数上升, 生长季延长增加了植物对霜冻的暴露, 但植物生长对霜冻的敏感性因物种、生长条件、生长阶段而异^[38], 霜冻天数增加不一定会对植物带来损害。春秋季节植物物候学的基本机理仍有很大一部分未知, 因此, 迫切需要进行实地观测和野外实验, 提高对植物物候与霜冻损害之间关系的认知水平。

参考文献(References):

- [1] 冯秀藻. 农业气象学原理. 北京: 气象出版社, 1991: 127-143. [FENG X Z. Agricultural Meteorology Principles. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 127-143.]
- [2] REID P C, HARI R E, BEAUGRAND G, et al. Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 682-689.
- [3] WOOLWAY R I, DOKULIL M T, MARSZELEWSKI W, et al. Warming of central European lakes and their response to the 1980s climate regime shift. *Climatic Change*, 2017, 142(34): 505-520.
- [4] YASUNAKA S, HANAWA K. Regime shifts in the Northern Hemisphere SST field: Revisited in relation to tropical variations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, 81(2): 415-424.
- [5] XIAO D, LI J P, ZHAO P. Four-dimensional structures and physical process of the decadal abrupt changes of the northern extra tropical ocean-atmosphere system in 1980s. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(7): 983-994.
- [6] FIGUAR S, LIVINGSTONE D M, HOEHN E, et al. Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(23): 23401-23410.
- [7] HUANG J B, ZHANG X D, ZHANG Q Y, et al. Recently amplified arctic warming has contributed to a continual global warming trend. *Nature Climate Change*, 2017, 20(7): 875-879.
- [8] 孙杨, 张雪芹, 郑度. 气候变暖对西北干旱区农业气候资源的影响. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1153-1162. [SUN Y, ZHANG X Q, ZHENG D. The impact of climate warming on agricultural climate resources in the arid region of Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(7): 1153-1162.]
- [9] ANANDHI A, PERUMAL S, GOWDA P H, et al. Long-term spatial and temporal trends in frost indices in Kansas, USA. *Climatic Change*, 2013, 120(12): 169-181.
- [10] EASRETLING D R. Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(9): 1327-1332.
- [11] 梁宏, 王培娟, 章建成, 等. 1960-2011年东北地区热量资源时空变化特征. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 466-479. [LIANG H, WANG P J, ZHANG J C, et al. Spatial and temporal distribution of variation in heat resource over Northeast

- China during the period from 1960 to 2011. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 466-479.]
- [12] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近 50 a 气温和降水极端事件的变化特征. *自然资源学报*, 2012, 27(10): 1720-1733. [WANG B L, ZHANG M J, WEI J L, et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over Northwest China in recent 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1720-1733.]
- [13] 宁晓菊, 张丽君, 杨群涛, 等. 1951 年以来中国无霜期的变化趋势. *地理学报*, 2015, 70(11): 1811-1822. [NING X J, ZHANG L J, YANG Q T, et al. China frost-free period since 1951 trends. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1811-1822.]
- [14] 娄伟平, 吉宗伟, 邱新法, 等. 茶叶霜冻气象指数保险设计. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2050-2060. [LOU W P, JI Z W, QIU X F, et al. Design of weather index insurance contract for tea frost. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2050-2060.]
- [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. *中国农业气象*, 2018, 39(7): 468-478. [MA S Q, ZHANG B, TANG M, et al. Analysis on the temporal and spatial changes of frost date in the Huaihe River Basin from 1960 to 2015. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(7): 468-478.]
- [16] LIU Q, PIAO S L, JANSSENS I A, et al. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nature Communication*, 2018, 9(1): 426-435.
- [17] 陈乾金, 夏洪星, 张永山. 我国江淮流域近 40 年异常初、终霜冻的分析. *应用气象学报*, 1995, 6(1): 50-55. [CHEN Q J, XIA H X, ZHANG Y S. Analyses of unusual first and last frost during the last 40 years in the Yangtze River and Huaihe River Basin. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1995, 6(1): 50-55.]
- [18] 梁进秋, 贾利芳, 何正梅, 等. 大同市近 50 年霜冻及其异常事件变化特征分析. *中国农业气象*, 2010, 31(1): 124-128. [LIANG J Q, JIA L F, HE Z M, et al. Variation analysis on frost and unusual events in Datong city in recent 50 years. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(1): 124-128.]
- [19] 王涛, 吕昌河, 于伯华. 基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 475-487. [WANG T, LYU C H, YU B H. Assessing the potential productivity of winter wheat using WOFOST in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3): 475-487.]
- [20] 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. *地理学报*, 2010, 65(5): 525-532. [HAN R Q, LI W J, AI W X, et al. The climatic variability and influence of first frost dates in Northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 525-532.]
- [21] CRIMP S, BAKAR K S, KOKIC P, et al. Bayesian space-time model to analysis frost risk for agriculture in Southeast Australia. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(8): 2092-2108.
- [22] 叶殿秀, 张勇. 1961-2007 年我国霜冻变化特征. *应用气象学报*, 2008, 19(6): 661-665. [YE D X, ZHANG Y. Characteristics of frost changes from 1961 to 2007 over China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(6): 661-665.]
- [23] 李芬, 张建新. 山西近 50 年初霜冻的区域特征. *灾害学*, 2013, 28(4): 104-109. [LI F, ZHANG J X. Regional characteristics of the first frost over Shanxi province in latest 5 decades. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(4): 104-109.]
- [24] 陈乾金, 张永山. 华北异常初、终霜冻气候特征的研究. *自然灾害学报*, 1995, 4(3): 33-39. [CHEN Q J, ZHANG Y S. Study on climatic characteristics of anomalous early frost in North China. *Journal of Natural Disasters*, 1995, 4(3): 33-39.]
- [25] 杨荣珍, 朱伟军, 岳艳霞, 等. 石家庄市霜冻期的气候异常特征分析. *气象与减灾研究*, 2011, 34(2): 67-70. [YANG R Z, ZHU W J, YUE Y X, et al. Analysis of the climate anomalies of frost in Shijiazhuang. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2011, 34(2): 67-70.]
- [26] 杜军, 宁斌. 雅鲁藏布江中游近 40 年异常初终霜冻分析. *气象*, 2006, 32(9): 84-89. [DU J, NING B. Analysis of anomalous first/last frost over middle reaches of the Yarlung Zangbo River in Tibet from 1961 to 2000. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(9): 84-89.]
- [27] 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. *气象学报*, 2017, 75(4): 661-671. [MA B, ZHANG B, JIA Y Q, et al. Spatial and temporal variation of anomalous early and final frost days and its relationship with circulation factors in inland agricultural areas of China during 1961-2014. *Acta Meteorological Sinica*, 2017, 75(4): 661-671.]
- [28] ERLATE E, TURKE M. Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950-2010. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(12): 1889-1898.

- [29] 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 城市化对长三角地区极端气温影响的时空分异研究. 自然资源学报, 2017, 32(5): 814-828. [JIA Y Q, ZHANG B, ZHANG Y Z, et al. Effect of urbanization on spatial and temporal variation of extreme temperature events in the Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 814-828.]
- [30] 王媛媛, 张勃. 1971年至2010年陇东地区霜冻与积温变化特征. 资源科学, 2012, 34(11): 2181-2188. [WANG Y Y, ZHANG B. Characteristics of frost days and accumulated temperature in Eastern Gansu over the last 40 years. *Resource Science*, 2012, 34(11): 2181-2188.]
- [31] 马琼, 张勃. 1980-2014年黄土高原霜冻时空变化及冬小麦晚霜冻危险性研究. 兰州: 西北师范大学, 2016. [MA Q, ZHANG B. Spatio-temporal change of last frost risk of winter wheat in the Loess from 1980 to 2014. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016.]
- [32] 王春乙, 张继权, 霍治国, 等. 农业气象灾害风险评估研究进展与展望. 气象学报, 2015, 73(1): 1-19. [WANG C Y, ZHANG J Q, HUO Z G, et al. Progress and prospect of agricultural meteorological disaster risk assessment. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(1): 1-19.]
- [33] 马树庆, 杨菲芸. 我国霜期、霜冻时空特征及其对气候变暖的响应. 气象灾害防御, 2015, 22(2): 1-4. [MA S Q, YANG F Y. Spatial and temporal characteristics of frost date in China and its response to climate warming. *Meteorological Disaster Prevention*, 2015, 22(2): 1-4.]
- [34] 拉巴次仁, 索朗加措, 白玛. 1981-2010年西藏霜冻日数的变化特征. 地理学报, 2014, 69(5): 690-696. [LA B C R, SUO L J C, BAI M. Changes of the number of frost days in Tibet during 1981-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 690-696.]
- [35] 马柱国. 中国北方地区霜冻日的变化与区域增暖相互关系. 地理学报, 2003, 58(1): 31-37. [MA Z G. Variation of frost days and its relationship to regional warming in Northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 31-37.]
- [36] 李芬, 于文金, 张建新, 等. 山西近50 a初霜冻的气候变化特征及其周期分析. 大气科学学报, 2012, 35(6): 754-761. [LI F, YU W J, ZHANG J X, et al. Climate change and its periodic analysis of early frost in recent 50 years in Shanxi province. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2012, 35(6): 754-761.]
- [37] HOPSOH S, COHEN J, DETHLOFF K. Analysis of a link between fall Arctic sea ice concentration and atmospheric patterns in the following winter. *Tellus*, 2012, 64(3): 389-400.
- [38] AUGSPURGER C K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. *Ecology*, 2013, 94(1): 41-50.

Spatial and temporal changes of the abnormal first and last frosts and their influencing factors in Huaihe River Basin from 1960 to 2015

MA Shang-qian¹, ZHANG Bo¹, YANG Wen-yi¹, YANG Mei², WEI Kun¹,
LI Shuai¹, HE Hang¹, HOU Qi¹, WEI Huai-dong³

(1 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. The School of Social Development and Public Policy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Gansu Key Laboratory of Desertification Combating, Minqin National Station for Desert Steppe Ecosystem Research, Gansu Institute of Desertification Combating Research, Lanzhou 733070, China)

Abstract: The abnormal first frost date and last frost date that occur in the critical period of crop growth will cause great losses to crop yields. It is of great significance to know and grasp the changing rules of abnormal frost date index accurately in the Huaihe River Basin to ensure

the stable, high and safe grain yield of China. Ground 0 cm daily minimum temperature collected at 61 meteorological stations were used to identify the first and the last frost dates. The standard deviation was used to calculate the stability of the first and the last frost dates and the probability density function was used to define abnormal first and last frost dates. Meanwhile, IDW interpolation method was adopted to reflect the stability of first and last frost dates and the frequency of abnormal frost date before and after the transition of climate state. Moreover, linear trend estimation, Mann-Kendall mutation test, sliding t-test and cumulative averaging method were employed to obtain the mutation year in temperature. And the effect of the circulation index and air temperature on the first and the last frost dates was analyzed by correlation coefficient method. The following conclusions can be drawn from the analysis above: (1) The mean temperature of Huaihe River Basin in the period 1960-2015 showed a significant upward trend at a rate of $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ($P<0.01$) and the mutation year happened in 1993. The transition of climate state promoted the postponement of the first frost date and the advancement of the last frost date. (2) The transition of climate state led to the decrease of the stability of first and last frost dates. The stability of first and last frost dates became much better with the increase of latitude and longitude. The stability of the first frost date became better with the increase of elevation. But the change of the last frost date is not significant even when the elevation increases. The stability of the last frost date is better than that of the first frost date. (3) There was a descending order among the frequency of earlier first frost date, later last frost date, special early first frost date, and special late last frost date. And after the transition of climatological state, the frequency of abnormal first and last frost days tends to decrease and be stable at 0-20%. On the whole, the frequency of abnormal first frost date is higher than that of abnormal last frost date. The impact of climate warming is greater on the first frost date than on the last frost date. (4) The spatial distribution of abnormal first and last frost dates was significantly different, the high frequency of which was observed in the 1970s and the 1960s, respectively, and the low frequency of which was found in the 2000s. Although the frequency of abnormal first and last frost dates was gradually stabilized and remained at a low level, the transition of climate promoted the increase of the frequency of special early first date in the southeast and south parts, partial early first frost date in the south, partial late last frost date in the northeast, and special late frost date in the southeast of the Huaihe River Basin respectively. (5) The smaller the polar vortex area is in September in the northern hemisphere, the later the first frost date is ($R=-0.41$, $P<0.01$); the smaller the polar vortex area is in February, the earlier the last frost date would be ($R=0.29$, $P<0.01$); the larger the subtropical high is in October, the later the first frost date is ($R=0.39$, $P<0.05$); the larger the subtropical high is in April, the earlier the last frost date is ($R=-0.15$, $P>0.05$). Moreover, the tendency ahead of schedule was accelerated after 1990. The result of this article is good for frost forecast services and mitigation of frost disasters.

Keywords: agro- meteorology; Huaihe River Basin; climate change; abnormal first and last frost date; frequency