

近 50 年冬小麦主产区农业气候资源变化特征分析*

曹倩¹, 姚凤梅^{1**}, 林而达², 张佳华³, 王培娟³, 秦鹏程¹

(1. 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要:在冬小麦主产区选取 113 个气象站点的 1961–2008 年逐日气象资料, 应用 Mann-Kendall 突变检测和气候线性倾向率方法, 分析冬小麦生育期内农业气候资源变化趋势和特征。结果表明: 研究区域近 50a 冬小麦生育期内 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温呈明显的增加趋势 ($P < 0.01$), 90 年代初期以来, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温增加趋势更加显著 ($P < 0.05$); 冬小麦生育期内的降水量变化趋势不显著, 也不存在突变现象, 但降水量年际间变化较大; 冬小麦生育期内参考作物蒸散量的变化趋势不显著, 80 年代出现弱的减少趋势 ($P < 0.1$), 90 年代以后有弱的增加趋势 ($P < 0.1$); 冬小麦生育期内的初霜冻日期呈推迟趋势 ($P < 0.01$), 终霜冻日期呈提前趋势 ($P < 0.01$), 导致霜冻日长度呈减少趋势。21 世纪初初霜冻日的推迟趋势、终霜冻日的提前趋势更加显著 ($P < 0.05$)。

关键词: 冬小麦; 农业气候资源; 变化特征

Analysis of Changing Characteristics of Agricultural Climate Resources in the Main Planted Areas of Winter Wheat in China over Last 50 Years

CAO Qian¹, YAO Feng-mei¹, LIN Er-da², ZHANG Jia-hua³, WANG Pei-juan³, QIN Peng-cheng¹

(1. College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Based on the daily meteorological data of 113 weather stations in the main planted areas of winter wheat from 1961 to 2008, the characteristic of agricultural climate resources during the growing period of winter wheat was analyzed by using Mann-Kendall rank analysis and linear trend estimate method. The results indicated that the accumulated temperature higher than 0°C during the growing period of winter wheat significantly increased, and it had an abrupt change in the beginning of 1990s. The precipitation and reference evapotranspiration had little change during the growing period of winter wheat over last 50 years, however, the fluctuation of precipitation and reference evapotranspiration inter-annual was intensified. The reference evapotranspiration decreased in 1980s and increased slightly after 1990s. The first frost date was delayed and the last frost date was ahead of time, which caused decrease of the frost days over the last 50 years. The first frost date delayed significantly and the last frost date became earlier since the beginning of 2000s.

Key words: Winter wheat; Agricultural climate resources; Changing characteristic

近年来,在全球和区域气候变化背景下,直接影响农业生产的农业气候资源的变化正在引起人们的关注。有研究表明,全国范围内年 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温呈明显增加趋势,并且积温带明显北移^[1-3],东北地区年降水量呈下降趋势^[4],华北平原全年降水量减少趋势不显著^[5-6],全国大多数地区的参考作物蒸散量

呈现减少趋势,夏季参考作物蒸散量减少趋势尤其明显^[7-9],全国平均霜期呈现减少趋势^[10]。这些研究都是针对某一省或者某一地区全年的农业气候资源变化进行的,相比较而言,农作物生育期内的农业气候资源变化更能对农作物生长发育产生直接影响。冬小麦是中国主要的粮食作物,有关冬小麦生育期内农

* 收稿日期:2010-10-18 ** 通讯作者。E-mail: yaofm@gucas.ac.cn

基金项目:农业部农业环境与气候变化重点开放实验室开放基金;国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951302)

作者简介:曹倩(1986-),女,陕西宝鸡人,硕士生,主要从事气候变化影响评估方面的研究。E-mail: caoqian2004@163.com

业气候资源变化的研究目前还不多见。在气候变化对冬小麦生长发育的影响方面,已有研究表明一定程度内积温是小麦产量形成的主要影响因子^[11-12];冬小麦生育期内的降水负距平和冬小麦减产百分率有着密切的关系^[13];参考作物蒸散量的增加或减少会导致冬小麦生育期内需水量相应的变化^[7];气候变暖的同时,温度的波动性在不断加剧,冬小麦冻害的危险依然存在^[14]。因此,本文拟选取 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量、参考作物蒸散量、初霜冻日、终霜冻日、霜冻日长度指标,研究冬小麦生育期内农业气候资源的变化趋势和特征,以便更好地了解气候变化对冬小麦生长发育的可能影响,从而为制定相应的种植制度和耕作措施提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 研究区域和研究资料

研究区域为冬小麦主产区,包括北京、天津、河北、山东、河南、山西、陕西、安徽、江苏 9 个省份、直辖市。气象资料来自国家气象信息中心气象资料室的中国地面气候资料日值数据集。在综合考虑站点数据的时间序列长度、完整性和代表性的基础上,从研究区中选出 113 个气象站点。时间序列为 1961-01-01—2008-12-31 共 48a 的逐日观测数据,包括平均气压、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、降水量、平均风速、日照时数等。研究区的冬小麦一般在 9 月下旬开始播种,6 月上旬收获,但为了农业气候条件比较的一致性,统一选择 10 月—翌年 5 月作为冬小麦生育期。

1.2 农业气象参数和指标

选取的主要农业气象参数包括 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量、参考作物蒸散量、初霜冻日、终霜冻日、霜冻日长度。参考作物蒸散量采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算^[7-9]。以百叶箱日最低气温降到 2°C 或以下作为霜冻的气候指标,每年下半年第一次出现霜冻的日期为初霜冻日,次年上半年最后一次出现霜冻的日期为终霜冻日,初霜冻日和终霜冻日之间的日数为霜冻日长度^[10,15]。为了保持年资料的可比性,所有 2 月 29 日的数据被剔除,并且为了方便计算,将初、终霜冻日期采用儒略历的表示方法,即用自 1 月 1 日起的日序来表示,如 1 月 1 日为 1,3 月 20 日为 79,10 月 3 日为 276 等^[15-16]。

1.3 数据分析

农业气候资源的突变性使用 Mann-Kendall 方法^[17]进行检测,农业气候资源趋势变化使用气候线性倾向率^[6]分析。

2 结果与分析

2.1 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温变化

由图 1 可见,研究区近 50a 冬小麦生育期内 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温呈现明显的增加趋势,增加速率为 $5.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。由 Mann-Kendall 突变检测结果得出,从 20 世纪 70 年代开始 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温呈增加趋势,特别是在 90 年代以来增加趋势十分显著($P < 0.05$)。 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温变化的突变点为 1990 年,突变前 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温距平平均值为 $-58.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。而突变后 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温距平平均值为 $86.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,增加速率为 $8.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P < 0.05$)。

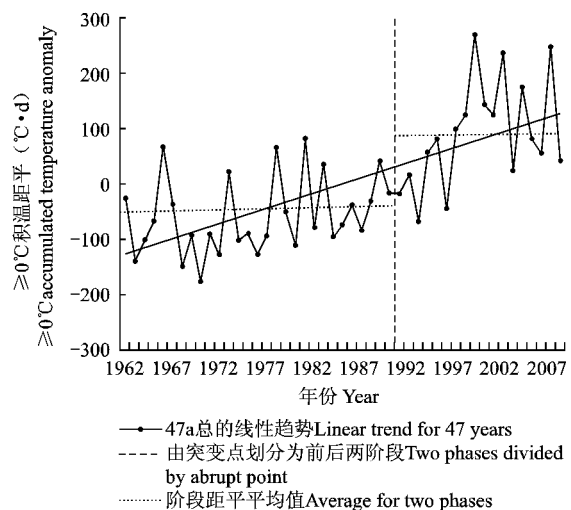


图1 冬小麦生育期内 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温距平随时间的变化趋势

Fig. 1 Time trend of $\geq 0^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature anomaly during the growing period of winter wheat

研究区 98% 的站点 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的变化为正值,并且 98% 的台站通过了 0.01 水平的显著性检验(图 2),

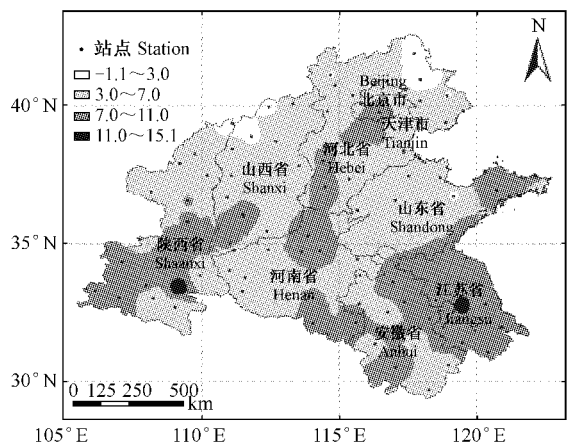


图 2 冬小麦生育期内 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温的气候倾向率($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$)分布

Fig. 2 Distribution of climatic trends of $\geq 0^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{y}^{-1}$) during the growing period of winter wheat

说明近 50a 研究区大部分站点冬小麦生育期内 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温增加趋势显著。57% 的地区包括河北、北京、天津、山西、山东以及河南的大部分地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温增加速率为 $3.0 \sim 7.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。28% 的地区包括江苏省全部、陕西西南部和中南部地区、安徽省东部和西南部小部分地区、山东省东部沿海地区以及河南省和河北省的小部分地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温增加速率为 $7.0 \sim 11.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$,其余个别站点 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温增加速率 $> 11.0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.2 降水量变化

研究区近 50a 冬小麦生育期内的降水量变化趋势不显著(未通过 0.05 水平的显著性检验),突变检测得出降水量不存在突变(图 3),但年际间变化较大,1964 年和 1998 年为两个高值,1981 年和 1996 年为

两个低值,60 年代和 90 年代以后降水量波动幅度较 70 年代和 80 年代更为剧烈。从各站点冬小麦生育期内降水量的气候倾向率来看,59% 的台站降水量呈减少趋势,其中 32% 的台站通过 0.1 水平的显著性检验。其余 41% 的台站降水量呈增加趋势,而只有个别站点通过 0.1 水平的显著性检验(图 4)。研究区降水量在陕西南部、河南南部小部分地区减少,变化速率为 $-2.6 \sim -1.0\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$,山东东部、河北南部小部分地区、陕西北部、山西和河南大部分地区减少,变化速率为 $-1.0 \sim 0\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其余北京、天津、河北、安徽和江苏的大部分地区增加,变化速率为 $0 \sim 2.3\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.3 参考作物蒸散量变化

由图 5 可见,研究区近 50a 冬小麦生育期内参考作物蒸散量的变化趋势不显著(未通过显著性水平检验)。1964 年为最低值,80 年代有弱的减少趋势,变化速率为 $-4.87\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.1$),90 年代以后有弱的增加趋势,变化速率为 $1.98\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.1$),2004 年为最高值。由 Mann-Kendall 突变检测得出,冬小麦生育期内的参考作物蒸散量在 21 世纪初期开始发生突变,具体的突变点为 2002 年。突变前阶段参考作物蒸散量的距平平均值为 -3mm ,而突变后的距平平均值为 20mm 。相关分析显示,近 50a 冬小麦生育期内参考作物蒸散量与降水量呈显著的负相关 ($P < 0.01$),并且冬小麦生育期内参考作物蒸散量大于降水量。

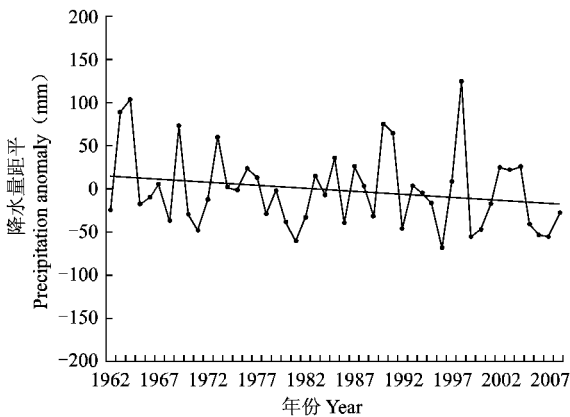


图 3 冬小麦生育期内降水量距平随时间的变化趋势
Fig. 3 Time trend of precipitation anomaly during the growing period of winter wheat

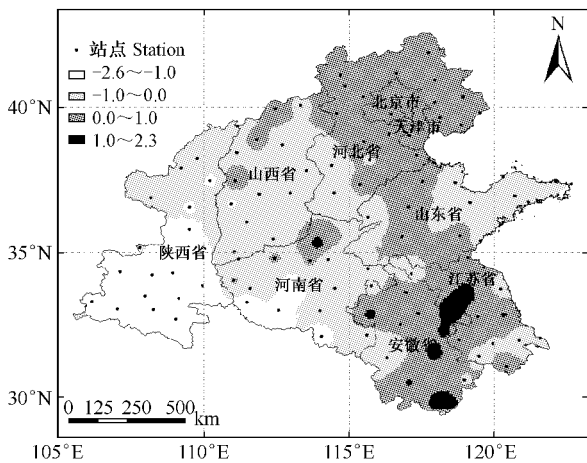


图 4 冬小麦生育期内降水量的气候倾向率 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 分布
Fig. 4 Distribution of climatic trends of precipitation during the growing period of winter wheat ($\text{mm} \cdot \text{y}^{-1}$)

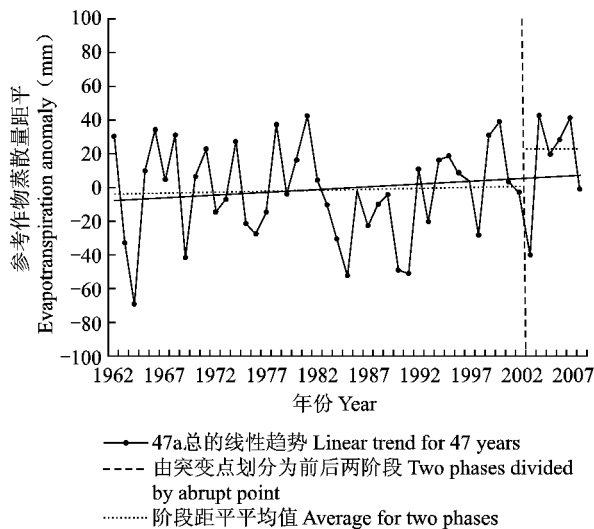


图 5 冬小麦生育期内参考作物蒸散量距平随时间的变化趋势
Fig. 5 Time trend of ET_0 during the growing period of winter wheat

由图 6 可见,研究区各站点近 50a 冬小麦生育期内的参考作物蒸散量气候倾向率最大值为 $3.0\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (山东威海),最小值为 $-1.6\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (河南宝丰)。其中 33% 站点冬小麦生育期内的参考作物蒸散量呈减少趋势,即山东西部、河南东部大部分地区以及河北南部和河北东部部分地区参考作物蒸散量减少速率为 $-2.0\sim 0\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$;67% 的站点冬小麦生育期内的参考作物蒸散量呈增加趋势,除陕北北部,江苏东南部沿海,山东东部沿海地区等 23% 的站点参考作物蒸散量增加速率为 $1.0\sim 3.0\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 外(17% 的站点参考作物蒸散量增加速率为 $1\sim 2\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$,6% 的站点参考作物蒸散量增加速率为 $2.0\sim 3.0\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$),其余 44% 的站点参考作物蒸散量增加速率为 $0\sim 1.0\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中 49% 的台站通过了 0.05 水平的显著性检验。

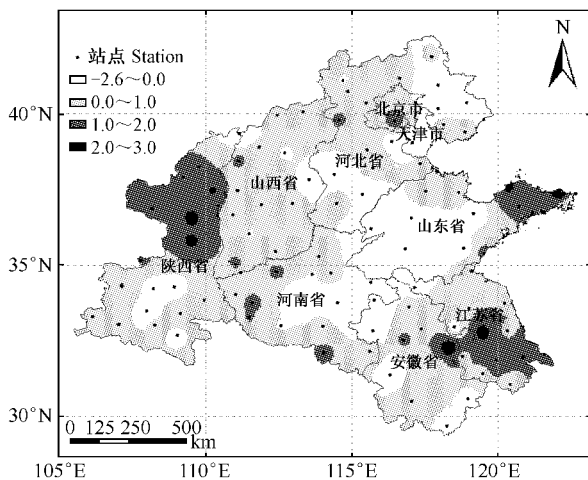


图 6 冬小麦生育期内参考作物蒸散量的气候倾向率 ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) 分布

Fig. 6 Distribution of climatic trends of ET_0 during winter wheat growing period ($\text{mm}\cdot\text{y}^{-1}$)

2.4 初、终霜冻日变化

研究区近 50a 冬小麦生育期内初霜冻日序呈增加趋势,即初霜冻日期呈推迟趋势,变化速率为 $0.11\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。由 Mann-Kendall 突变检测得出,初霜冻日期自 90 年代末期以后明显推迟,在 21 世纪初期这种推迟趋势更加显著 ($P < 0.05$)。初霜冻日期变化的突变点为 1999 年,突变前初霜冻日序的距平平均值为 -0.63d ,即此阶段初霜冻日期比多年平均偏早 0.63d。而突变后初霜冻日序的距平平均值为 2.65d ,即此阶段初霜冻日期比多年平均偏晚 2.65d (图 7a)。

终霜冻日序呈减小趋势,即终霜冻日期呈提前趋势,其变化速率为 $0.23\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。由 Mann-Kendall 突变检测得出,终霜冻日期自 90 年代初期以

后明显提前,特别是在 21 世纪初期这种提前趋势更加显著 ($P < 0.05$)。终霜冻日期变化的突变点为 1991 年,突变前终霜冻日序的距平平均值为 1.98d ,即终霜冻日期比多年平均偏晚 1.98d,此阶段终霜冻日期提前速率为 $0.17\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P < 0.1$);而突变后终霜冻日序的距平平均值为 -3.85d ,即终霜冻日期比多年平均偏早 3.85d,此阶段终霜冻日期提前速率为 $0.49\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P < 0.1$)。终霜冻日期提前幅度大于初霜冻日期推迟幅度 (图 7b)。因此霜冻日长度呈减小趋势,减少速率为 $0.34\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

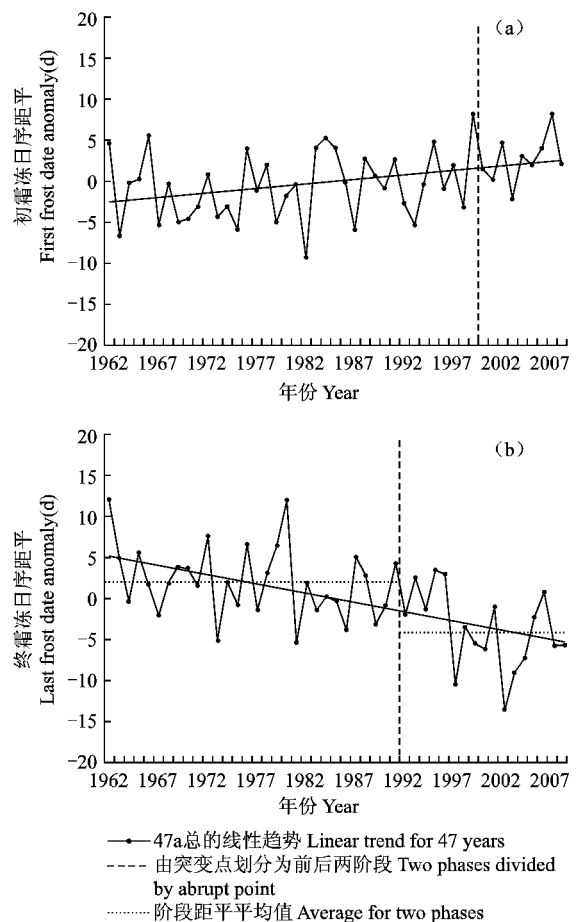


图 7 冬小麦生育期内初霜冻日序距平 (a)、终霜冻日序距平 (b) 随时间变化趋势

Fig. 7 Time trends of first frost date anomaly (a) and last frost date anomaly (b) during the growing period of winter wheat

由图 8 可见,研究区 89% 站点近 50a 冬小麦生育期内的初霜冻日期呈推迟趋势。陕西、山西、河南、安徽、山东、天津的大部分地区以及河北北部地区推迟速率为 $0\sim 0.2\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$;河北南部、江苏南部及北部小部分地区、山东南部 and 东部小部分地区推迟速率相对较大,为 $0.2\sim 0.4\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$;个别站点推迟速率 $> 0.4\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$;陕

西北部小部分地区以及山西个别站点初霜冻日期呈提前趋势,但是趋势不明显。其中,48%的台站通过了0.05水平的显著性检验。除个别站点外,93%的站点终霜冻日期呈提前趋势。陕西北部 and 东南部小部分地区、山西北部和中部、山东中部地区提前速率为 $0 \sim 0.2 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$;北京、天津、河北、河南、安徽、江苏的大部分地区以及陕西、山西中部和南部地区提前速率为 $0.2 \sim 0.4 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$;河北中部小部分地区和河南中部小部分地区提前速率 $>0.4 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中68%的台站通过了0.05水平的显著性检验。

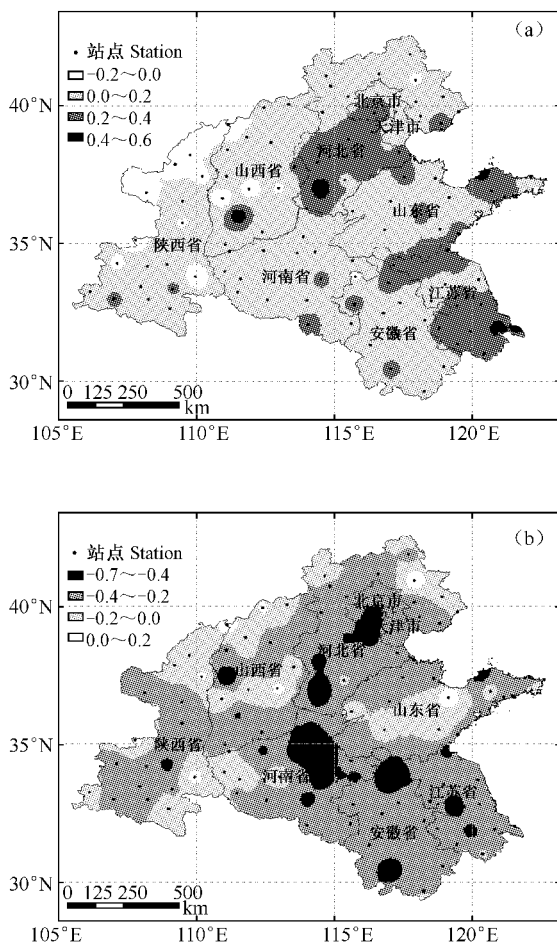


图8 冬小麦生育期内初霜冻日序、终霜冻日序气候倾向率($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$)分布

Fig. 8 Distribution of climatic trends of first frost date(a) and last frost date anomaly(b) during the growing period of winter wheat($\text{d} \cdot \text{y}^{-1}$)

3 结论与讨论

研究区近50a冬小麦生育期内 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温呈现一个明显的增加趋势,增加速率为 $5.5^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ($P < 0.01$)。突变检验得出,20世纪90年代以后 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温增加趋势更加显著($P < 0.05$)。空间分布上,大部

分站点 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温增加速率为 $4 \sim 8^\circ\text{C} \cdot \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。积温会从影响小麦发育期、籽粒充实度等方面最终影响小麦产量。冬小麦生育期内积温呈逐渐增加趋势,冷害减少,在一定程度上会对小麦产量有正面作用,但积温增加也会导致冬小麦的生育期缩短,干物质积累减少,从而导致小麦减产^[18-19]。因此,近50a冬小麦生育期内的积温增加对冬小麦的影响还需要从正负两个方面定量研究。

研究区近50a冬小麦生育期内的降水量变化趋势不显著,也不存在突变现象。但降水量年际间变化较大,60年代和90年代以后降水量波动更为剧烈。冬小麦生育期内的参考作物蒸散量无明显的变化趋势,80年代出现弱的减少趋势($P < 0.1$),90年代以后有弱的增加趋势($P < 0.1$)。一些研究表明研究区全年的降水量和参考作物蒸散量均有减少的趋势^[2,7,17],因为在全年的变化中,夏季的降水量和参考作物蒸散量的减少是主要的特征,而本研究的冬小麦生育期内没有考虑这部分变化。冬小麦生育期内参考作物蒸散量与降水量呈显著的负相关($P < 0.01$),并且冬小麦生育期内参考作物蒸散量大于降水量,这种缺水的状况会对冬小麦生长不利^[20-22]。

研究区近50a冬小麦生育期内初霜冻日期呈推迟趋势($P < 0.01$),终霜冻日期呈提前趋势($P < 0.01$),并且终霜冻日期提前速率大于初霜冻日期推迟速率,这会使霜冻日长度呈减少趋势。突变检验得出初霜冻日期自90年代末期以后明显推迟,21世纪初期这种推迟趋势更加显著($P < 0.05$);终霜冻日期自90年代初期以后明显提前,在21世纪初期这种提前趋势更加显著($P < 0.05$)。这种变化会使小麦生育进程加快,拔节期提前,抗冻性降低,不利于小麦的正常生长。如果春季遇到寒潮,极易发生小麦冻害^[23-24]。

参考文献:

- [1] 毛恒青, 万晖. 华北、东北地区积温的变化[J]. 中国农业气象, 2000, 21(3): 1-6.
- [2] 马洁华, 刘园, 杨晓光, 等. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3818-3827.
- [3] 李勇, 杨晓光, 代姝玮, 等. 长江中下游地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2912-2921.
- [4] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206.

- [5] 赵少华,杨永辉,邱国玉,等. 河北平原 34 年来气候变化趋势分析[J]. 资源科学,2007,29(4):109-113.
- [6] 谭方颖,王建林,宋迎波,等. 华北平原近 45 年农业气候资源变化特征分析[J]. 中国农业气象,2009,30(1):19-24.
- [7] 刘园,王颖,杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. 生态学报,2010,30(4):0923-0932.
- [8] 李春强,洪克勤,李保国. 河北省近 35 年(1965-1999 年)参考作物蒸散量的时空变化[J]. 中国农业气象,2008,29(4):414-419.
- [9] 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956-2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究,2006,25(3):6-16.
- [10] 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.
- [11] 全文伟,查菲娜,王其英,等. 气候变化对河南省小麦产量影响分析[J]. 河南科学,2009,27(12):191-195.
- [12] 郝立生,闵锦忠,张文宗,等. 气候变暖对河北省冬小麦产量的影响[J]. 中国农业气象,2009,30(2):204-207.
- [13] 刘荣花,王友贺,朱自玺,等. 河南省冬小麦气候干旱风险评估[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(6):1-4.
- [14] 郑大玮,郑大琼,刘虎城. 农业减灾实用技术手册[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2005:24-27.
- [15] Liu B H, Henderson M, Zhang Y D. Spatiotemporal change in China's climatic growing season:1955-2000[J]. Climatic Change,2010,99:93-118.
- [16] Moonen A C, Ercoli L, Mariotti M. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2002,111:13-27.
- [17] 纪瑞鹏,张玉书,冯锐,等. 辽宁省农业气候资源变化特征分析[J]. 资源科学,2007,29(2):74-82.
- [18] 史印山,王玉珍,池俊成,等. 河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(6):1444-1447.
- [19] 余卫东,赵国强,陈怀亮. 气候变化对河南省主要农作物生育期的影响[J]. 中国农业气象,2007,28(1):9-12.
- [20] 莫兴国,薛玲,林忠辉,等. 华北平原 1981-2001 年作物蒸散量的时空分异特征[J]. 自然资源学报,2005,20(2):60-68.
- [21] Todisco F, Vergniagr L. Climatic changes in central Italy and their potential effects on corn water consumption[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2008,148:1-11.
- [22] 宋艳玲,董文杰. 1961-2000 年干旱对我国冬小麦产量的影响[J]. 自然灾害学报,2006,15(6):227-231.
- [23] 代立芹,张文宗. 河北省冬小麦冻害发生规律统计影响因素研究[J]. 防灾科技学院学报,2008,10(3):10-13.
- [24] 高懋芳,邱建军,刘三超,等. 我国低温冷冻害的发生规律分析[J]. 中国生态农业学报,2008,16(5):1167-1172.

(上接第 160 页)

- [41] 马金虎,刘玉兰. 宁夏气候变暖对春小麦生产的影响及对策[J]. 宁夏农林科技,2002,(4):26-27.
- [42] 张智,林莉. 宁夏近 40 多年积温及不同积温期降水量变化研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(2):232-234.
- [43] 刘德祥,董安祥,邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业的影响[J]. 自然资源学报,2005,20(1):119-125.
- [44] 杨淑萍,赵光平,马力文,等. 气候变暖对宁夏气候和极端天气事件的影响及防御对策[J]. 中国沙漠,2007,27(6):1073-1076.
- [45] 武艳娟,李玉娥,刘运通,等. 宁夏气象灾害变化及其对粮食产量的影响[J]. 中国农业气象,2008,29(4):491-495.
- [46] 刘德祥,董安祥,梁东升,等. 气候变暖对西北干旱农作物种植结构的影响[J]. 中国沙漠,2007,27(5):832-836.
- [47] 宁金花,申双和. 气候变化对中国农业的影响[J]. 现代农业科技,2009,(12):251-256.
- [48] 刘德祥,董安祥,陆登荣. 中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):195-183.
- [49] Rosenzweig C, Francesco N T. Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies[J]. Mitig. Adapt Strat. Glob. Change, 2007, (12): 855-873.
- [50] 苏占胜,陈晓光,黄峰,等. 基于 GIS 的宁夏气候要素推算及农业气候资源分析[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(4):243-249.
- [51] 鲁向晖,隋艳艳,高鹏,等. 宁夏南部山区不同耕作方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(5):35-39.
- [52] 王雅琼,马世铭. 中国区域农业适应气候变化技术选择[J]. 中国农业气象,2009,30(增1):51-56.
- [53] 王春乙,张雪芬,孙忠富,等. 进入 21 世纪的中国农业气象研究[J]. 气象学报,2007,65(5):815-824.