

余焰文,蔡小琴,蔡哲,等. 江西省近 35 年双季早稻气候资源变化及其生育期响应[J]. 江苏农业科学,2019,47(10):261-267.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.10.058

# 江西省近 35 年双季早稻气候资源变化及其生育期响应

余焰文<sup>1</sup>, 蔡小琴<sup>1</sup>, 蔡哲<sup>2</sup>, 郭瑞鸽<sup>2</sup>

(1. 江西省抚州市气象局,江西抚州 344000; 2. 江西省农业气象中心,江西南昌 330000)

**摘要:**为研究气候变化背景下江西省早稻气候资源的变化特征,以江西省 69 个气象观测站 1981—2015 年 3—7 月逐日气象观测数据和 14 个农业气象观测站的早稻生育期观测数据为基础,分析江西省近 35 年早稻生育期气象因子的时间变化,稳定通过 10℃ 初日及 3—7 月积温、降水量、日照时数的时空分布规律。结果表明,早稻生育期在年际上有不同程度提前,赣北较赣南更为明显,时间上以 21 世纪初最为明显,且整个时段内各地稳定通过 10℃ 初日均明显早于播种期。MK 突变检验的结果表明,积温显著突变时间为 2000 年左右,降水量和日照时数则呈现波动性变化,结合线性拟合分析,1981—2015 年 3—7 月积温呈极显著增加趋势,其气候倾向率为 57.33℃·d/10 年,但 2000 年前后时段内积温升高并不显著;降水量呈现减少—增加交替的周期性变化;日照时数总体略有减少,其中 2000 年以来以 -72.58 h/10 年的趋势显著减少。空间上,积温总体表现为南高北低,20 世纪 90 年代和 21 世纪初赣南中部和赣中以北区域积温均有明显升高;降水量高值区主要位于赣东北,低值区主要分布在赣北北部和赣西南,日照时数呈现北多南少的特点,降水量和日照时数的空间分布均存在年代际波动周期,从 20 世纪 80 年代起降水量表现为先增后减再增,日照时数则表现为先减后增再减。气候变化导致农业气候资源的变化,研究可为江西早稻调整和优化耕种制度,充分利用气候资源、趋利避害提供理论支撑和技术指导。

**关键词:**早稻;气候资源;MK 检验;时空分布;生育期

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)10-0261-07

气候变化及其引发的后果一直是近年来科学研究关注的热点和重点,根据 IPCC 第 4 次评估报告,全球平均温度在过去 100 年(1906—2005 年)上升了 0.74℃<sup>[1]</sup>,2013 年的第 5 次评估报告指出全球升温趋势仍在继续,在北半球,1983—2012 年可能是过去 1 400 年中最暖的 30 年<sup>[2]</sup>。

气候条件是影响农业生产最重要的因素,温度、降水、光照等气象因子的变化直接影响作物生长,在全球气候变化背景下,我国的农业气候资源也同样发生改变。杨晓光等对比分析了我国 1980 年前后的气候变化特征<sup>[3]</sup>;段运怀等结合农

作物对热量条件的需求将全国划分为不同的制熟区域<sup>[4]</sup>;缪启龙等以全国≥10℃、≥0℃积温和持续天数分布的变化为基础,重点分析了气候变暖对我国热量资源分布的影响<sup>[5]</sup>;赵俊芳等以气候模式结合历史气候资料分析表明,2011 年后全国大部分地区初霜冻日提前,终霜冻日延迟,农业热量资源有不同程度增加<sup>[6]</sup>。气候变化还会引起耕作制度的改变<sup>[7]</sup>,气候变暖背景下高低温气象灾害的发生及分布规律也随之改变<sup>[8-10]</sup>,李勇等分析了气候变化对长江中下游水稻的影响,研究表明 1981 年后 30 年间水稻安全种植区域相对明显增加,而敏感区域内高温热害次数增加,低温冷害次数减少<sup>[11]</sup>。

目前农业气候变化的研究大多涉及范围较广,主要涉及我国华南地区<sup>[12]</sup>、西北地区<sup>[13]</sup>、东北地区<sup>[14]</sup>、长江中下游<sup>[15-16]</sup>等地区,但是针对江西省早稻的气候资源研究相对较少。江西省是我国重要的水稻主产区之一,同时也是农业气象灾害高发区和重灾区,气候变化对早稻生产带来的影响不容忽视,本研究以 1981—2015 年江西省早稻生育期数据和 3—7 月逐日气象资料为基础,分析江西省早稻生育期内光、

收稿日期:2017-12-29

基金项目:江西省气象科技项目“早春气候资源在水稻生产中的利用技术研究”。

作者简介:余焰文(1989—),男,江西九江人,硕士,助理工程师,主要从事农业气象业务及研究。E-mail: yuyanwen204@163.com。

通信作者:郭瑞鸽,硕士,高级工程师,主要从事农业气象业务及研究。E-mail: 65736370@qq.com。

[8] 王国亚,毛炜峰,贺斌,等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. 冰川冻土,2012,34(6):1293-1300.

[9] 杨奇勇,杨劲松,余世鹏. 禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析[J]. 生态学报,2011,31(8):2196-2202.

[10] 杨奇勇,杨劲松,刘广明. 土壤盐分空间异质性的指示克里格阈值研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(3):72-76.

[11] 新疆维吾尔自治区农业厅. 新疆土壤[M]. 北京:科学出版社,1996:151-521.

[12] 赵秀芳,杨劲松,姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究[J]. 土壤学报,2010,47(3):422-428.

[13] 周伟,王文杰,张波,等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价[J]. 生态学报,2017,37(4):1211-1220.

[14] 张倩,胡胜勇,高明,等. 紫色丘陵区土壤养分空间变异特征研究——以重庆市铜梁县为例[J]. 中国农学通报,2011,27(20):216-223.

[15] 张兆永,李菊英,祖皮艳木·买买提,等. 艾比湖流域小尺度农田土壤养分的空间分布和盐渍化风险评价[J]. 生态学报,2017,37(3):819-828.

[16] 王振华,裴磊,郑旭荣,等. 盐碱地滴灌春小麦光合特性与耐盐指标研究[J]. 农业机械学报,2016,47(4):65-72,104.

热、水等农业气候资源的时空变化特征,探讨早稻生育期及气候资源对气候变化的响应规律,以期为合理安排江西早稻安全生产合理布局、调整种植制度提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

研究采用的气象数据为江西省 69 个气象观测站 1981—2015 年 3—7 月份逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量和日照时数数据,和 14 个农业气象观测站 1981—2015 年(其中 1982 年缺失)早稻生育期观测数据,个别缺失气象数据采取 5 日滑动平均法补充,并将数据连续缺失超过 5 天的站点予以剔除,站点分布情况见图 1。

### 1.2 分析方法

采用 5 日滑动平均法确定温度通过 10 ℃ 的逐年初日时间,初日及温度、日照和降水要素的空间分布通过 ARCGIS 9.3 的 IDW 模块进行插值实现。Mann-Kendall (MK) 检验主要用于时间序列的趋势分析,现已在气象领域广泛应用,方法说明见文献[17],本研究拟采用 MK 检验对研究时段内积温、降水量和日照时数的变化趋势进行分析。气候倾向率通过线性回归拟合来实现,以回归系数乘以 10 表示,并通过  $F$  检验法对拟合的回归方程进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 早稻气候资源时间变化

对 3—7 月积温、降水量和日照时数的突变检验分析,结果见图 2,UF 和 UB 曲线分别表示统计量的瞬时时间序列和逆时间序列,UF > 0 表示序列呈上升趋势,反之则为下降趋势。

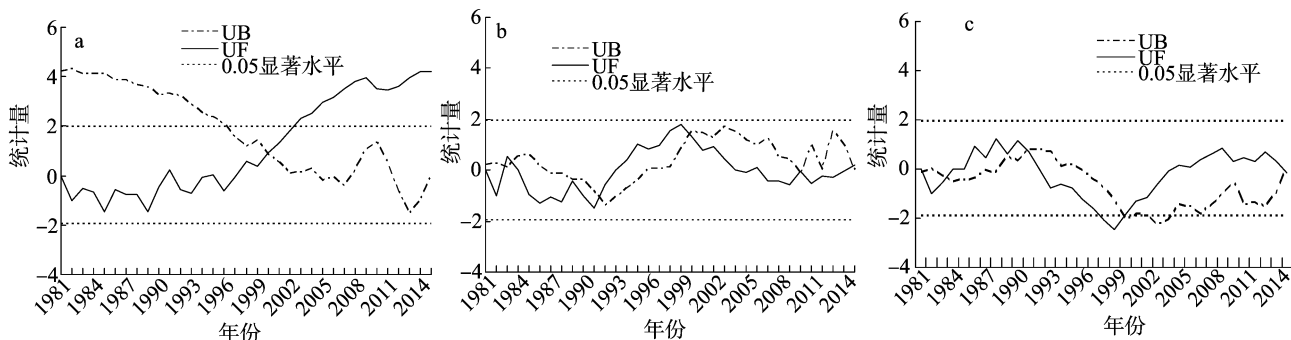


图2 江西省 1981—2015 年 3—7 月积温(a)、降水量(b)和日照时数(c)MK 突变检验结果

图 3 为江西省 1981—2015 年逐年 3—7 月积温、降水量和日照时数变化情况,并通过线性回归方程进行分时段拟合及全时段拟合。积温最大出现年份为 2013 年,为 3 472.5 ℃ · d,最小为 3 160.8 ℃ · d,出现在 1996 年;1981—2015 年积温拟合方程通过了 0.01 水平显著性检验,说明总体期间升高趋势极显著,积温的气候倾向率为 57.33 ℃ · d/10 年,2000 年前其气候倾向率为 29.13 ℃ · d/10 年,而 2001—2015 年积温气候倾向率仅为 8.66 ℃ · d/10 年,但是两段时间内积温升高均不显著。降水量年际波动较大,年降水量最多达 1 451.5 mm,而最少仅有 766.2 mm,1981—2015 年其气候倾向率为 9.60 mm/10 年,其中 1981—1991 年降水量气候倾向率为 -205.03 mm/10 年,说明降水量呈减少趋势,但并未通过显著性检验,且时段内降水

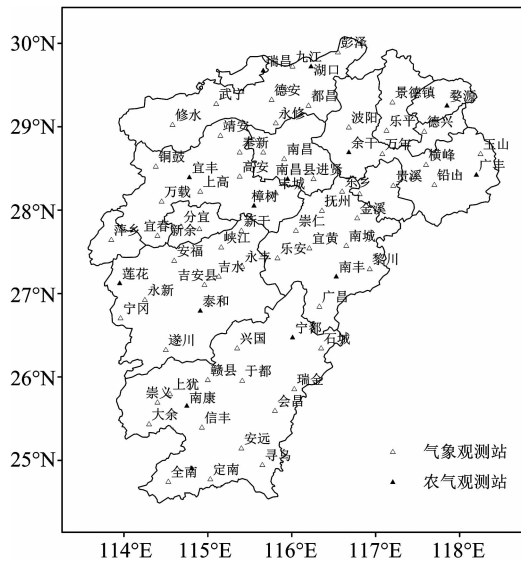


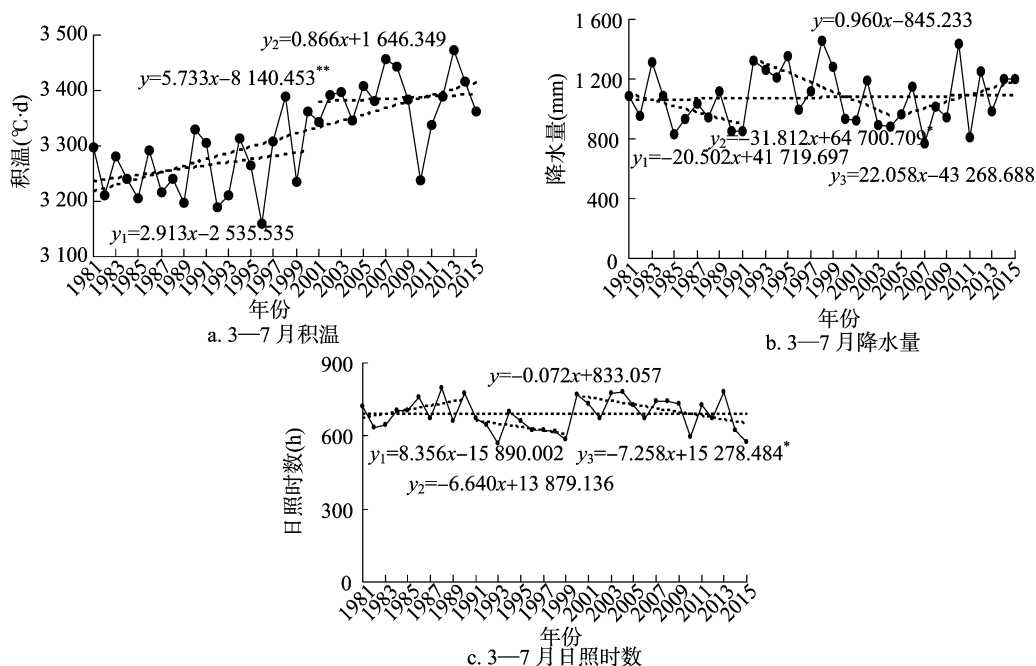
图1 江西省气象观测站点分布

从图 2 - a 可以看出,积温的变化总体表现为 20 世纪 90 年代前以下降为主,但是下降趋势并不显著,90 年代以后则上升,21 世纪初上升趋势开始超过 0.05 显著水平临界线,UF 和 UB 曲线的交点表明积温突变的时间大约为 2000 年,且交点位于 2 条虚线之间,说明突变结果通过 0.05 显著水平检验。图 2 - b 中 UF 曲线的变化表明 1981—2015 年江西省 3—7 月降水量整体表现出波动性变化,1981—1993 年减少,1994—2004 年增加,2005—2015 年减少。从图 2 - c 可以看出,1981—1986 年 3—7 月日照时数减少,1987—1992 年增加,1993—2005 年再次减少,2006—2015 年又再次增加。

量表现出减-增交替性变化。1992—2004 年降水量波动现象仍然存在,整体呈显著减少趋势,其气候倾向率为 -318.12 mm/10 年,2005—2015 年降水量气候倾向率为 220.58 mm/10 年,且存在增减逐年交替的规律。日照时数整体表现出减少趋势,气候倾向率为 -0.72 h/10 年,但是总体减少趋势不显著,其中 1981—1990 年、1991—1999 年、2000—2015 年日照时数分别表现出增加、减少、减少的趋势,其中 2000—2015 年日照时数减少显著,其气候倾向率高达 -72.58 h/10 年。

### 2.2 气候资源空间变化

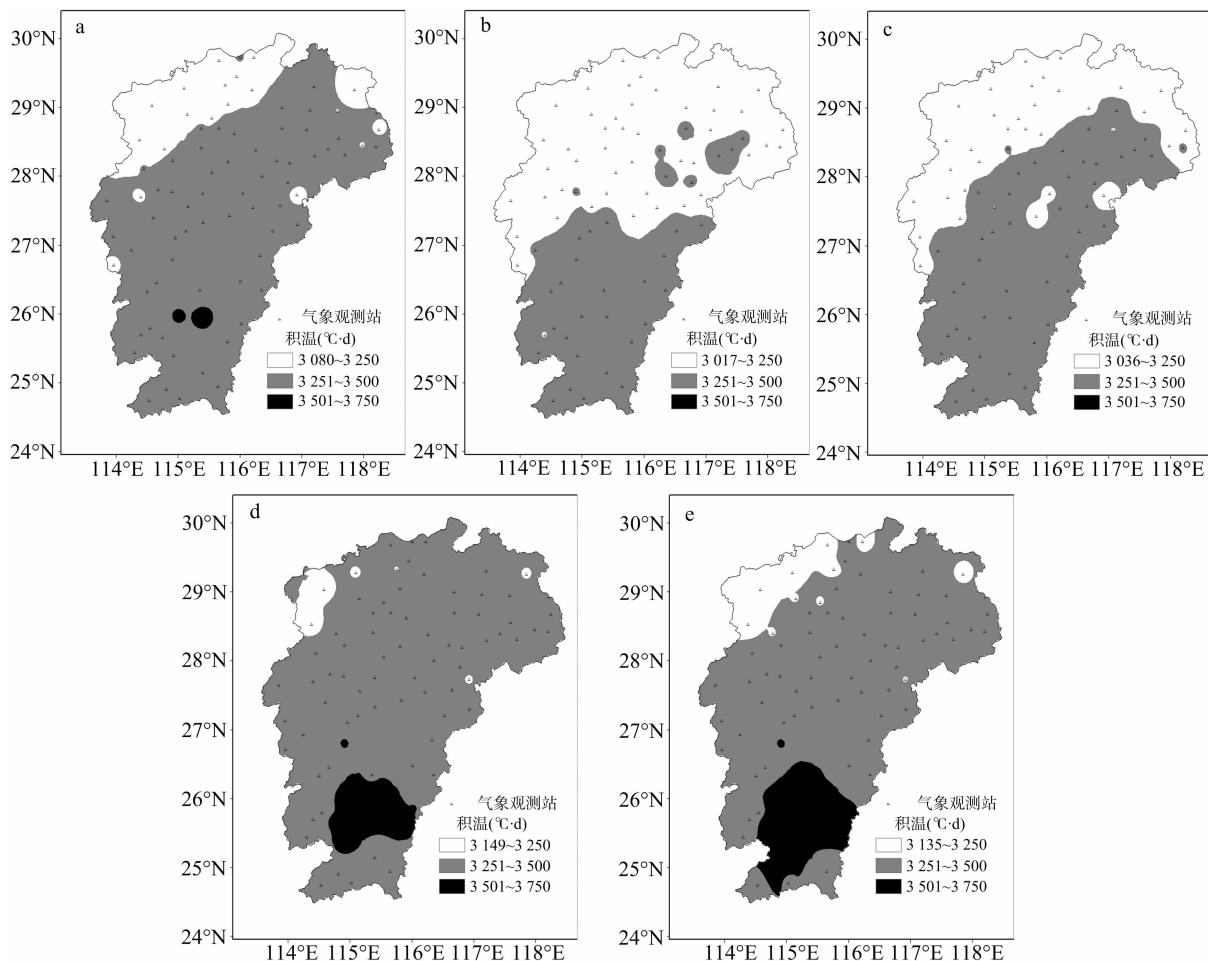
2.2.1 积温 图 4 为江西省 3—7 月积温的空间分布情况,江西省 1981—2015 年平均积温为 3 315.42 ℃ · d,热量条件的纬度分布特征明显,从南到北随纬度增加积温逐渐递减,大



$y$  的线性方程表示 1981—2015 年的拟合模型;  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$  线性方程表示不同时段拟合模型;

\*表示通过 0.05 水平显著性检验; \*\*表示通过 0.01 水平显著性检验

图3 江西省 1981—2015 年 3—7 月积温(a)、降水量(b)和日照时数(c)拟合结果



a、b、c、d、e 分别表示 1981—2015 年、20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代、21 世纪初、2010—2015 年, 图 5、图 6 同

图4 江西省不同时间段 3—7 月积温的空间分布

部分站点积温处于  $3\,250 \sim 3\,500\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$  之间,最高积温出现于都 ( $3\,536.55\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ),最低积温出现在铜鼓 ( $3\,079.62\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ),积温除主要受纬度影响外还与站点海拔高度及周边地形等因素有关,因此积温极值站点位置并不与纬度极值位置重合。20 世纪 80 年代江西省全省积温为  $3\,245.60\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,总体表现为南高北低,到 90 年代全省积温平均增幅为  $0.87\%$ ,赣中北部和赣北南部积温增加相对明显。21 世纪初全省积温进一步增加,相对 20 世纪 90 年代增加  $3.70\%$ ,赣北大部分积温超过  $3\,250\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,赣南中部积温超过  $3\,500\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ,2010—2015 年赣南地区积温高值区稍有增加,其他地区积温从赣中向赣北成下降趋势,但是积温相对于 20 世纪 80 年代仍有较明显增加,赣北大部分、赣中北部、赣南中部积温均提升 1 个量级。

2.2.2 降水量 江西省 3—7 月降水量分布情况见图 5,全

省 1981—2015 年平均降水量为  $1\,054.89\text{ mm}$ ,高值区主要分布在赣东北,低值区则主要分布在赣北北部和赣西南等地区,不同年代其地理分布规律与多年平均值分布特征基本一致。20 世纪 80 年代江西省全省平均降水量为  $1\,014.81\text{ mm}$ ,90 年代全省降水量增加  $13.42\%$ ,仅赣南南部有所减少,其他地区降水量均有不同程度增加,赣北地区降水增加超过  $20\%$ ,其中以婺源降水量增幅最大,为  $36.84\%$ 。21 世纪初全省降水的空间分布情况与 20 世纪 90 年代类似,但是降水量有不同程度减少,减少程度从南到北逐渐增加,以德兴减少最多 ( $34.52\%$ )。2010—2015 年全省降水量空间分布及其变化规律总体与 20 世纪 90 年代基本一致,高值区位于赣东北,除赣南部分地区降水量有所减少,其他地区降水量增幅从南到北逐渐增大。

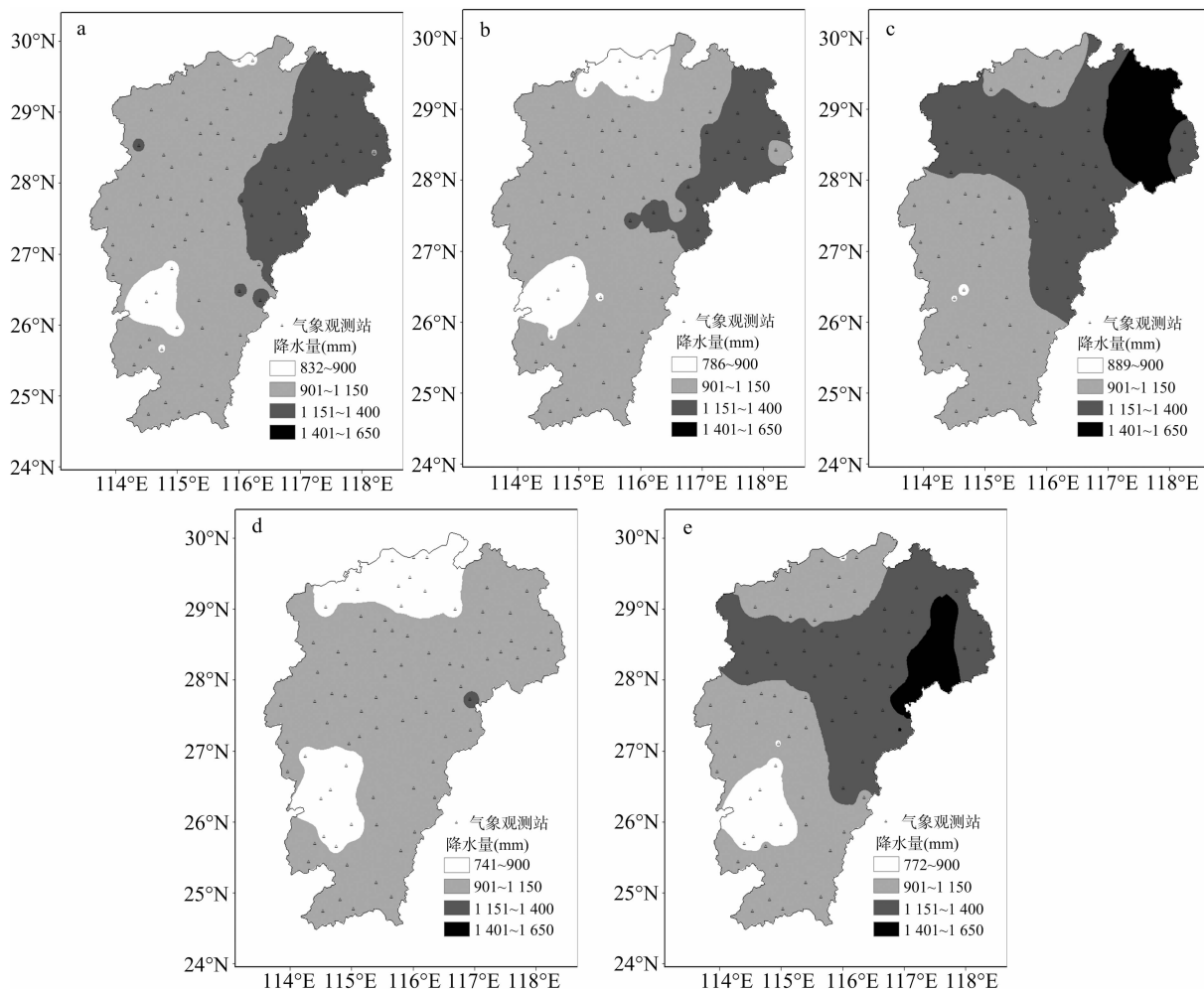


图5 江西省不同时间段 3—7 月降水量的空间分布

2.2.3 日照时数 图 6 为江西省 1981—2015 年日照时数多年不同年代平均值及空间分布情况,其空间分布特征总体与积温相反,随纬度增加日照时数呈现增加趋势,这是由于 3—7 月太阳直射点从赤道向北回归线移动,北半球日照时数随纬度增加而增加。日照时数的空间分布存在年代际的周期性交替,20 世纪 90 年代江西省日照时数为  $630.23\text{ h}$ ,各地区日照时数较 20 世纪 80 年代基本均有不同程度减少,全省日照

时数减少  $7.80\%$ ,赣中和赣北为主要减少区域,其中部分地区减幅超过  $20\%$ 。21 世纪初全省日照时数相对 20 世纪 90 年代增加  $14.30\%$ ,仅会昌和宁都略有减少,赣中和赣北大部分地区日照时数增幅超过  $10\%$ ,赣北日照时数的增幅更明显。2010—2015 年全省日照时数再次减少,除北部部分地区维持较高水平外,其他大部分地区日照时数基本与 20 世纪 90 年代相当。

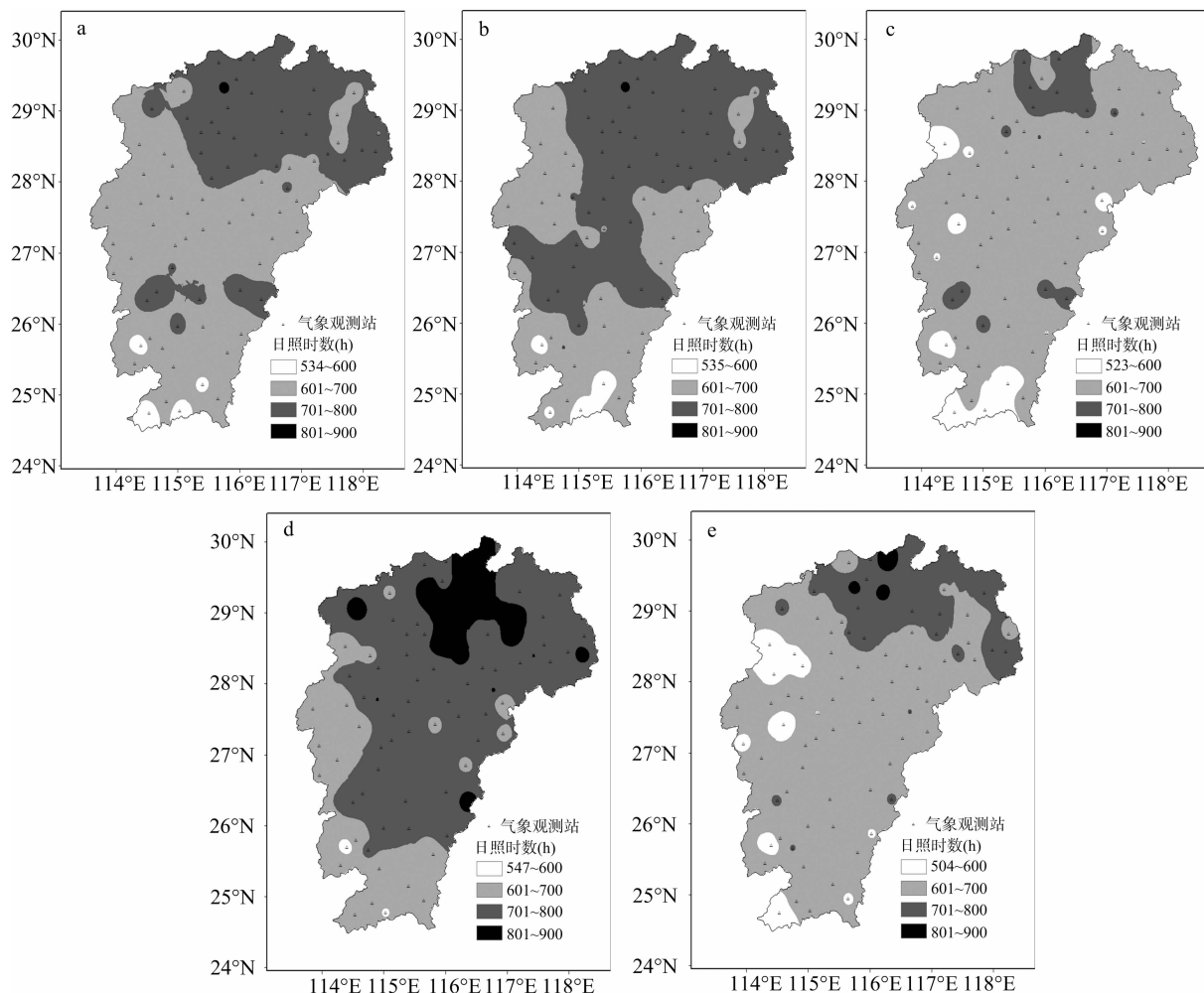


图6 江西省不同时间段 3—7 月日照时数的空间分布

### 2.3 早稻生育期

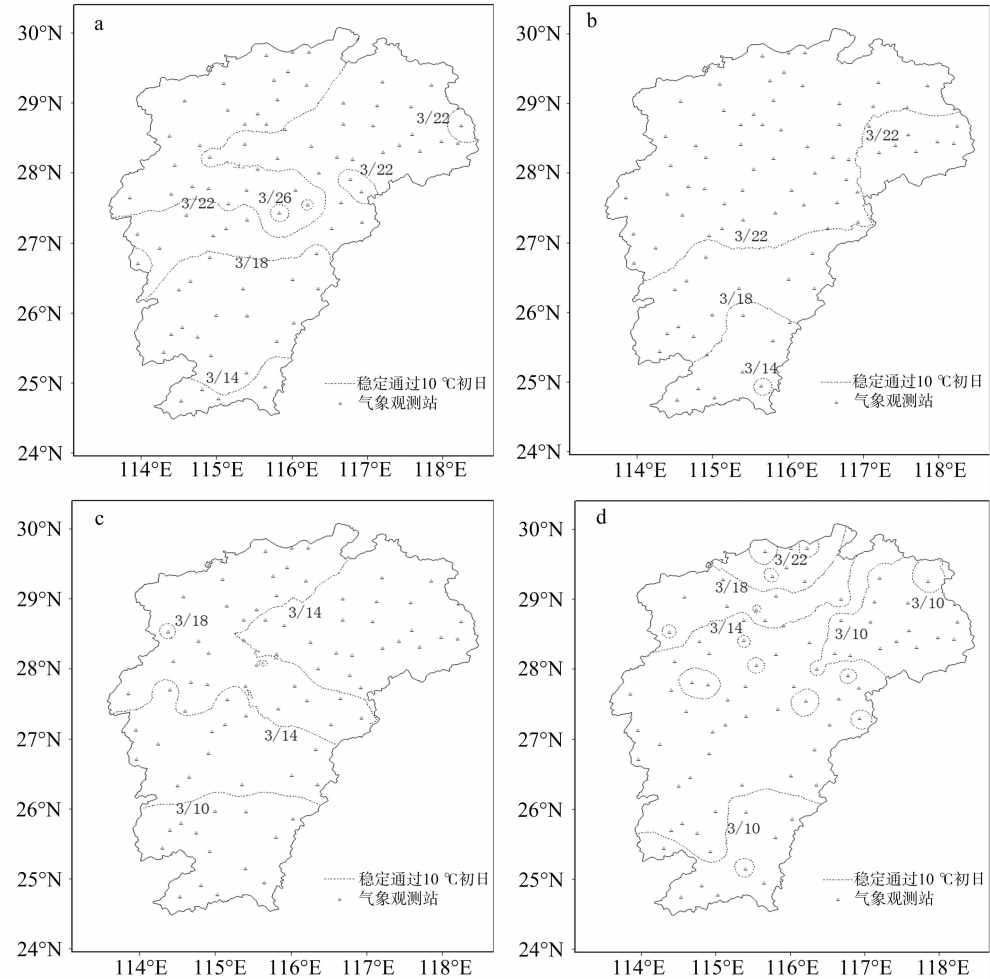
农业气象中常用的界限温度有 0、5、10、25℃等,一般将春季稳定通过 10℃初日认为是早稻等喜温作物的开始播种期。图 7 为江西省 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代、21 世纪初、2010—2015 年稳定通过 10℃初日的等值线分布图,4 个时段稳定通过 10℃初日总体上均呈现从南到北逐渐滞后的特征。从全省范围看,20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代、21 世纪初及 2010—2015 年全省稳定通过 10℃初日的平均时间依次为 3 月 20 日、3 月 21 日、3 月 12 日、3 月 12 日。20 世纪 80 年代、90 年代最早稳定通过 10℃初日是在 3 月 14 日左右,而 21 世纪初和 2010—2015 年则更早一些,在 3 月 10 日左右,以 21 世纪初提早最为明显。相对 20 世纪 80 年代,各地区 20 世纪 90 年代稳定通过 10℃初日北部推迟而南部提前,到 21 世纪初全省稳定通过 10℃初日出现明显提前,较 20 世纪 90 年代提前约 8 d 左右,2010—2015 年全省大部分地区稳定通过 10℃初日较 20 世纪初期变化不大,但赣东北部提前 2~4 d,而赣北北部则明显推迟,推迟 4~6 d。

江西省各年代早稻观测平均生育期见表 1,不同年份早稻生育期波动较大,不同地区早稻生育期同样存在差异,全省不同地区不同年代播种期、出苗期、移栽期、抽穗期、成熟期间隔分别为 7~16、8~17、11~20、11~13、9~12 d。赣北早稻

生育期提前表现更突出,其次为赣中地区,且纬度越高生育期提前的趋势越明显,而赣南地区生育期则呈现波动性变化。赣南、赣中和赣北早稻成熟期基本一致,相差 0~1 d,其他生育期赣北较赣中晚 1~2 d,较赣南则晚 4~6 d。在年代变化上,20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代及 21 世纪初与 2010—2015 年时间段内早稻生育期基本一致,但是进入 21 世纪后早稻各生育期存在不同程度提前,移栽期提前最明显(提前 5 d),播种期、出苗期、抽穗期、成熟期分别提前 1.5、2.0、3.5、1.5 d。

### 3 结论与讨论

本研究以江西省气象观测站 1981—2015 年逐年气象观测资料和早稻生育期数据为基础,分析江西早稻近 35 年来生育期及 3—7 月的积温、日照时数和降水量等气候资源的时空变化特征,研究表明,(1)对积温、降水量和日照时数进行 MK 突变检验和线性拟合的结果表明,3—7 月积温先降后升,积温的气候倾向率为 57.33℃·d/10 年,2000 年后积温增加极显著。降水量和日照时数表现出减少和增加交替出现的规律,但是两者的变化并不一致,且部分时段内变化显著,其中 1992—2004 年降水量显著减少,2000—2015 年日照时数减少显著。(2)不同时段气候要素的空间分布特征表明,总体上



a、b、c、d 分别表示 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代、21 世纪初、2010—2015 年，图中数字表示月/日  
图7 江西省不同时间段稳定通过 10℃ 初日的等值线分布

		表 1 江西省各年代早稻观测平均生育期										月/日				
生育期	时间	赣北								赣中			赣南			平均 时间
		宜丰	瑞昌	湖口	婺源	南昌县	樟树	余干	广丰	莲花	泰和	南丰	南康	宁都	龙南	
播种期	1981—1989 年	3/29	3/30	—	3/20	4/1	—	4/1	4/5	4/2	3/31	3/26	3/26	3/24	3/25	3/28
	1990—1999 年	3/28	3/29	4/3	3/24	3/28	4/1	3/29	4/4	4/5	4/1	3/28	3/26	3/24	3/20	3/28
	2000—2009 年	3/26	3/27	3/27	3/23	3/29	3/25	3/27	3/30	3/25	3/30	3/27	3/24	3/25	3/23	3/26
	2010—2015 年	3/28	—	3/23	—	3/26	3/24	4/7	3/31	3/26	3/29	3/28	3/23	3/27	3/24	3/27
出苗期	1981—1989 年	4/1	4/5	—	3/30	4/7	—	4/6	4/9	4/6	4/5	3/28	4/1	3/29	3/31	4/2
	1990—1999 年	4/3	4/4	4/7	3/31	4/4	4/8	4/6	4/10	4/9	4/7	3/31	3/31	3/29	3/29	4/3
	2000—2009 年	4/2	3/31	4/3	3/28	4/3	3/29	4/2	4/5	3/29	4/4	4/2	3/28	3/31	3/28	3/31
	2010—2015 年	4/5	—	3/29	—	3/30	3/29	4/13	4/4	3/30	4/3	4/2	3/27	4/2	3/29	4/1
移栽期	1981—1989 年	4/30	5/13	—	4/24	5/1	—	4/28	5/2	5/4	4/30	4/23	4/26	4/25	4/25	4/29
	1990—1999 年	5/1	4/29	5/4	4/26	4/29	5/1	4/27	5/2	5/6	4/29	4/20	4/25	4/22	4/19	4/27
	2000—2009 年	4/28	4/28	4/26	4/22	4/27	4/24	4/18	4/30	4/26	4/26	4/23	4/12	4/25	4/20	4/23
	2010—2015 年	4/26	—	4/23	—	4/23	4/21	—	4/28	4/26	4/25	4/23	4/17	4/26	4/21	4/23
抽穗期	1981—1989 年	6/23	6/28	6/27	6/27	6/20	6/19	6/21	6/29	6/26	6/26	6/19	6/21	6/19	6/17	6/23
	1990—1999 年	6/20	6/24	6/29	6/28	6/20	6/17	6/19	6/29	6/23	6/22	6/16	6/19	6/19	6/20	6/21
	2000—2009 年	6/17	6/25	6/23	6/25	6/16	6/20	6/16	6/23	6/21	6/19	6/21	6/12	6/19	6/18	6/19
	2010—2015 年	6/20	—	6/23	—	6/13	6/21	6/18	6/23	6/19	6/17	6/19	6/12	6/23	6/19	6/18
成熟期	1981—1989 年	7/17	7/20	—	7/17	7/15	—	7/14	7/22	7/16	7/18	7/15	7/16	7/13	7/13	7/16
	1990—1999 年	7/13	7/21	7/18	7/23	7/17	7/16	7/16	7/23	7/17	7/16	7/13	7/14	7/16	7/18	7/17
	2000—2009 年	7/11	7/21	7/15	7/21	7/10	7/16	7/11	7/16	7/16	7/15	7/16	7/9	7/16	7/18	7/15
	2010—2015 年	7/17	—	7/18	—	7/9	7/16	7/15	7/15	7/17	7/17	7/16	7/9	7/20	7/20	7/15

注：“—”表示因数据缺失严重,不予考虑。

积温表现出南高北低的趋势,而日照时数则表现出南低北高的特征,降水量的空间特征为从东北到西南和偏北方向逐渐减少。不同年代气象要素的空间变化特征各不相同,积温从 20 世纪 80 年代起表现出先减后增趋势,其中 21 世纪初赣南中部开始出现明显高值区,2010—2015 年高值区范围进一步扩大;赣北北部降水量总体偏少,20 世纪 90 年代全省降水量较为丰富,2010—2015 年次之,20 世纪 80 年代和 21 世纪初全省降水量基本相当;日照时数总体为北多南少,从 20 世纪 80 年代开始呈先减少后增加再减少的趋势,2010—2015 年日照时数与 20 世纪 90 年代基本一致,赣西和赣南部分地区日照偏少。(3)2000 年后江西省早稻生育期总体有所提前,播种期和成熟期提前 1~2 d,其他阶段提前 2~5 d,赣北地区生育期提前比赣中更明显,而在赣南地区生育期则表现出波动性。结合江西省稳定通过 10℃初日的变化特征分析,稳定通过 10℃初日总体均有不同程度提前,时间上以 21 世纪初最为明显,但是整个时段内的 10℃初日均早于实际播种期。

积温增加,江西省热量资源增加,稳定通过 10℃初日提前,进入 21 世纪后表现尤为明显,这与郭瑞鸽等的结论<sup>[18]</sup>基本一致;吴立等的研究进一步表明,气候变化背景下江西省早稻发生春季低温次数整体下降,热量条件对早稻生育期提前较为有利<sup>[10,19]</sup>。目前江西早稻播种期大多为 3 月底,而气象条件分析表明除赣北外的大部分地区可提前至 3 月中旬,赣南部分地区甚至可提前至 3 月上旬,以便充分利用热量资源。另一方面,热量条件充足下病虫害发生发展的范围和程度扩大<sup>[20-21]</sup>,因此须加强早稻病虫害的防控。江西省降水量和日照时数时空分布不均,但是时间上存在年代交替的特征,4—6 月为全省降水集中期,早稻遭受洪涝的风险较高,早稻生育期内的降水分布规律总体与洪涝发生的时空规律一致<sup>[22]</sup>,洪涝仍是对早稻影响最大的气象灾害,须重点考虑洪涝对早稻生产的不利影响。江西省全省日照时数总体呈现逐渐减少趋势,时间上以 2010—2015 年最为明显,空间分布的低值区主要位于赣西和赣南部分地区,目前已有不少研究表明水稻产量和生育期内日照时数成正相关<sup>[23-24]</sup>,因此要加强重视日照时数减少对江西省早稻的影响。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: synthesis report [R]. Oslo: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [2] IPCC. Climate change 2013: synthesis report [R]. Oslo: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [3] 杨晓光,李 勇,代姝玮,等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IX. 中国农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3177—3188.
- [4] 段运怀,章庆辰,孔令凯,等. 我国农业气候资源与种植制度的热量条件区划[J]. 中国农业科学, 1981, 14(3): 57—65.
- [5] 缪启龙,丁园圆,王 勇. 气候变暖对中国热量资源分布的影响分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 934—944.
- [6] 赵俊芳,郭建平,马玉平,等. 气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2922—2930.
- [7] 李克南,杨晓光,慕臣英,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 VIII——气候变化对中国冬小麦冬春性品种种植界限的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1583—1594.
- [8] 包云轩,刘 维,高 苹,等. 气候变暖背景下江苏省水稻热害发生规律及其对产量的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 289—296.
- [9] 高晓容,王春乙,张继权. 气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2110—2118.
- [10] 吴 立,霍治国,姜 燕,等. 气候变暖背景下南方早稻春季低温灾害的发生趋势与风险[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1263—1271.
- [11] 李 勇,杨晓光,叶 清,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 IX. 长江中下游地区单双季稻高低温灾害风险及其产量影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(19): 3997—4006.
- [12] 戴声佩,李海亮,刘海清,等. 全球气候变暖背景下华南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(1): 52—60.
- [13] 李 硕,沈彦俊. 气候变暖对西北干旱区农业热量资源变化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 227—235.
- [14] 赵俊芳,穆 佳,郭建平. 近 50 年东北地区  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  农业热量资源对气候变化的响应[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 190—198.
- [15] 张立波,娄伟平. 气候变暖对长江中下游地区热量资源分布的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1361—1372.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 郭瑞鸽,刘寿东,杜筱玲. 江西气温稳定通过 10℃初日变化及其对双季早稻物候期的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 12—16.
- [19] 陈 斐,杨沈斌,申双和,等. 长江中下游双季稻区春季低温冷害的时空分布[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(3): 540—547.
- [20] 霍治国,李茂松,王 丽,等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1926—1934.
- [21] 卢小凤,霍治国,申双和,等. 气候变暖对中国褐飞虱越冬北界的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(8): 1977—1983.
- [22] 张桂香,霍治国,吴 立,等. 1961—2010 年长江中下游地区农业洪涝灾害时空变化[J]. 地理研究, 2015, 34(6): 1097—1108.
- [23] 曹海珊,曹海鑫,田奉俊,等. 日照时数与水稻产量性状的相关分析[J]. 安徽农学通报(上半月刊), 2012, 18(19): 48—49.
- [24] 沈陈华. 气象因子对江苏省水稻单产的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4155—4167.