

李 建, 江晓东, 杨沈斌, 等. 长江中下游地区水稻生长季节内农业气候资源变化[J]. 江苏农业学报, 2020, 36( 1 ): 99-107.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.014

## 长江中下游地区水稻生长季节内农业气候资源变化

李 建, 江晓东, 杨沈斌, 田欣雨

(南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 基于长江中下游地区 1960–2016 年 153 个气象台站的地面观测资料, 分析了长江中下游地区水稻生长季节内热量、光照和水分资源的时空变化特征。结果表明: 1960–2016 年长江中下游地区水稻生长期内  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温平均为  $4\,944.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ , 10 年倾向率为  $47.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 积温有效率平均为  $86.920\%$ , 10 年倾向率为  $-0.279\%$ ; 高温日数平均为  $21.93\text{ d}$ , 10 年倾向率为  $0.84\text{ d}$ ; 低温日数平均为  $5.81\text{ d}$ , 10 年倾向率为  $-1.26\text{ d}$ ; 日照时数平均为  $1\,228.94\text{ h}$ , 10 年倾向率为  $-41.04\text{ h}$ ; 降水量平均为  $1\,048.91\text{ mm}$ , 10 年倾向率为  $7.52\text{ mm}$ ; 降水日数平均为  $61.04\text{ d}$ , 10 年倾向率为  $-1.38\text{ d}$ ; 降水强度平均为  $11.24\text{ mm/d}$ , 10 年倾向率为  $0.25\text{ mm/d}$ 。长江中下游地区水稻生长期在 1960–2016 年热量资源增加明显, 但积温有效率呈下降趋势, 光照资源呈减少趋势, 降水量及降水强度呈现增加趋势, 这将对该地区水稻生产产生负面影响。

**关键词:** 长江中下游地区; 水稻生长季节; 温度; 降雨; 日照时数

**中图分类号:** S162.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)01-0099-09

## Changes of agricultural climate resources during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River

LI Jian, JIANG Xiao-dong, YANG Shen-bin, TIAN Xin-yu

(*Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*)

**Abstract:** Based on the ground observation data of 153 meteorological stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1960 to 2016, the temporal and spatial variations of heat, light and water during rice growing season were analyzed in this study. The results showed that the accumulated temperature ( $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), accumulative temperature efficiency, high temperature days, low temperature days, the average sunshine hours, the precipitation, days of precipitation and precipitation intensity of the study area during 1960–2016 were  $4\,944.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,  $86.920\%$ ,  $21.93\text{ d}$ ,  $5.81\text{ d}$ ,  $1\,228.94\text{ h}$ ,  $1\,048.91\text{ mm}$ ,  $61.04\text{ d}$ ,  $11.24\text{ mm/d}$ , respectively, and the ten-year propensity rates of these elements were  $47.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.279\%$ ,  $0.84\text{ d}$ ,  $-1.26\text{ d}$ ,  $-41.04\text{ h}$ ,  $7.52\text{ mm}$ ,  $-1.38\text{ d}$ ,  $0.25\text{ mm/d}$ , respectively. During the growth period of rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1960 to 2016, heat resources increased obviously, accumulated temperature efficiency decreased, light resources decreased, precipitation and precipitation intensity increased, which would have a negative impact on rice production in the region.

**Key words:** middle and lower reaches of the Yangtze River; rice growing season; temperature; precipitation; sunshine hours

收稿日期: 2019-06-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41875140); 公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY201506018)

作者简介: 李 建(1993-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 主要从事农业气象研究。(E-mail) 2681440454@qq.com

通讯作者: 江晓东, (E-mail) jiangxd@nuist.edu.cn

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次报告指出, 1880–2012 年以来全球平均温度已升高  $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0.65\sim 1.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[1]</sup>。受全球气候变暖的影响, 中国近 100 年来地表平均气温升高  $0.5\sim$

0.8℃<sup>[2]</sup>,但中国降雨量变化趋势不明显,中高纬度地区降水量减少而亚热带地区降水量增加,这与全球降水量变化不同<sup>[2-5]</sup>。伴随着气候变化的农业气候资源包括温、光、水、风等要素变化对农业生产的影响很大<sup>[6]</sup>。柏秦风<sup>[7]</sup>等研究结果表明,1979年以来全国大部分地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温有所增加,使得全国喜温作物的种植面积增加,越冬作物种植区北界北扩。唐国平等<sup>[8]</sup>指出,中国北方暖干型气候变化趋势对棉花、大豆生长有利,半干旱区无霜期延长对马铃薯等作物后期生长有利,由于气温升高和东北、西北、青藏地区降水增加,中国农业的复种指数将普遍增加。艾治勇等<sup>[9]</sup>研究结果表明,气候变化有利于早稻生产而不利晚稻生产。气候变化也会对农业生产带来不利影响。吴志祥等<sup>[4]</sup>估算,气候变化可能会使中国种植业减产5%~10%。唐国平等<sup>[8]</sup>研究结果表明气候变化对全国土地生产潜力产生不利影响。气候变化引起的气候极端事件增多也严重影响农业生产<sup>[3, 10]</sup>。

近年来,国内学者做了大量有关农业气候资源方面的研究工作<sup>[4, 9, 11-15]</sup>,大多进行了年代际气候变化的研究<sup>[11, 14-16]</sup>,而针对作物生长季节内的气候变化研究较少。长江中下游地区是中国主要水稻产区,该地区气温呈增加趋势,比同期中国平均气温增速略低<sup>[14]</sup>,年降水量呈下降趋势,而极端降水呈增加趋势<sup>[17]</sup>,日照时数减少<sup>[18]</sup>,水面蒸发量减少<sup>[19]</sup>,正在影响水稻生产<sup>[9, 11, 20]</sup>。本研究通过分析长江中下游地区水稻生长季节内气候资源变化特点,以期为该地区水稻生产中应对气候变化,合理利用气候资源提供理论依据。

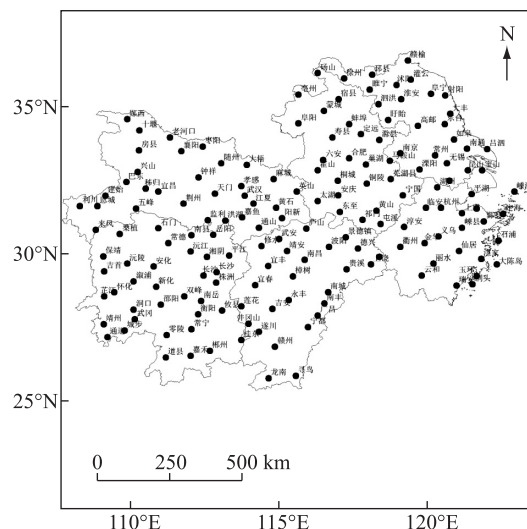
## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域为长江中下游地区六省一市( $108^{\circ}\text{E}\sim 123^{\circ}\text{E}$ ,  $24^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ ),包括江苏省、浙江省、上海市、湖北省、湖南省、安徽省和江西省,面积约 $1.215\times 10^6\text{ km}^2$ 。研究区以平原为主,山区主要集中在湖北西部、湖南中西部、江西南部及江西南部、浙江南部及安徽南部。气候属于亚热带季风气候,年降雨量1 000~1 500 mm,年平均气温14~18℃,气候温暖湿润,农业生产条件优越。该地区水稻播种面积占全国的49.76%,水稻产量占全国的49.82%,是中国主要水稻产区之一<sup>[21]</sup>。

### 1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),选取长江中下游地区153个气象站(图1)1960~2016年逐日气候资料,气象要素包括日平均温度、日最高温度、日降水量、日照时数、水稻发育期数据等。



· 站点; □ 边界。

图1 研究区气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in the study area

### 1.3 研究方法

1.3.1 水稻生长季节的确定 根据中国气象数据网提供的农业气象数据,将长江中下游地区水稻生长季节定为3月下旬~10月下旬。

1.3.2 高温日数 已有研究结果<sup>[22-24]</sup>表明,在水稻抽穗开花期平均温度超过30℃或日最高温度超过35℃,会影响花器官的发育,降低结实率,从而造成水稻减产。所以本研究以水稻生长期日平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 或日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的天数作为高温日数。

1.3.3  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温有效率 用生长季节日平均气温在10~35℃范围内的积温与 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的百分比作为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温有效率。

1.3.4 低温日数 水稻生长后期尤其在灌浆期遇到低温,对水稻灌浆及品质形成会造成不利影响<sup>[25-27]</sup>。所以本研究统计水稻生育后期低温日数(7月份之后日平均气温低于15℃的天数)。

1.3.5 降水强度 将生长季节内降水量与降水日数的比值定义为降水强度(mm/d),即降水强度=降水量/降水日数。

1.3.6 气候倾向率 用  $X_i$  表示样本量为  $n$  的某一气候变量,所对应的时间为  $t$ ,建立  $X_i$  与  $t$  之间的一元线性回归方程:  $X_i = a + bt_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 式中,  $a$  为回归常数,  $b$  为回归系数。  $a$  和  $b$  可用最小二乘法进行估计<sup>[28]</sup>。以  $b$  值作为气候要素变化速率。

#### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 MATLAB 2014a 进行数据分析和处理,采用 ArcGIS 软件的反距离加权插值法 (IDW) 对气象指标进行空间插值, cell size 参数均为  $0.043^\circ$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 长江中下游地区水稻生长季节内热量资源变化

2.1.1  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温  $10^\circ\text{C}$  是适合水稻生长的起始温度,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温一般作为水稻等喜温作物的热量

指标<sup>[13]</sup>。从图 2a 可以看出,1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温在  $3\,598.64^\circ\text{C}\cdot\text{d}$  至  $5\,568.75^\circ\text{C}\cdot\text{d}$  之间,平均值为  $4\,944.53^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ,最高值出现在赣州 ( $5\,568.75^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ),最低值出现在南岳 ( $3\,598.64^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ),整体上呈现由南向北递减的趋势。其中湖北省东部、湖南省中部和东部、江西省及浙江省南部等双季稻区水稻生长季节内  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温较高,超过  $5\,500^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 。从图 2b 可以看出,长江中下游地区水稻生长季节内  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温 10 年倾向率整体为正值,说明积温呈增加趋势,平均每 10 年增加  $47.76^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ,其中增加较快的区域为江苏省南部、浙江省北部、安徽省祁门地区、湖北省中部等地,以上区域平均 10 年倾向率大于  $60.00^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 。

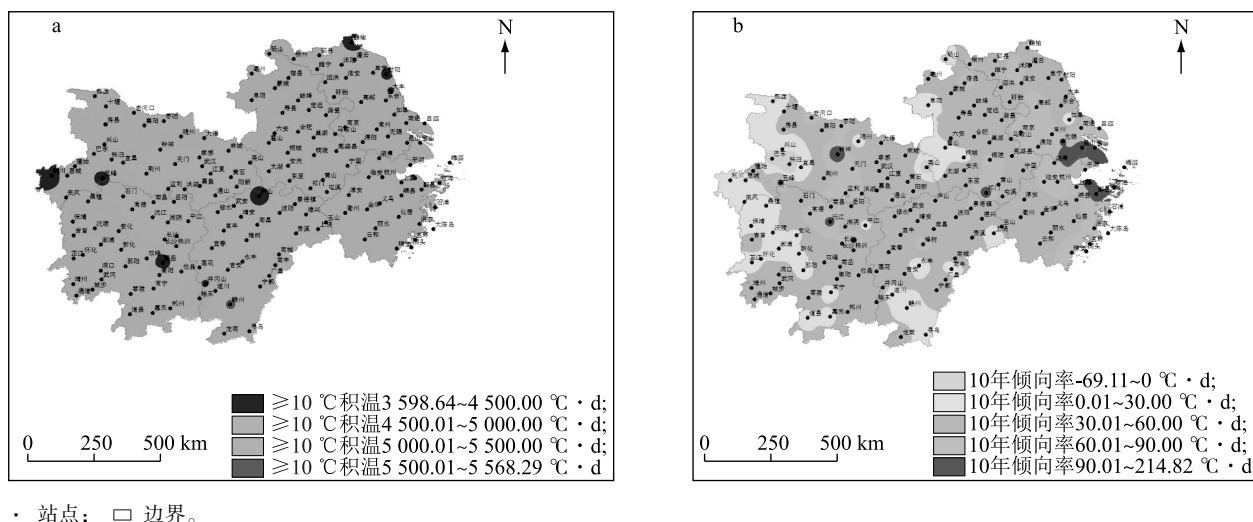


图 2 长江中下游地区水稻生长季节内  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温及 10 年倾向率分布

Fig.2 Distribution of accumulated temperature ( $\geq 10^\circ\text{C}$ ) and the ten-year propensity rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River

2.1.2  $\geq 20^\circ\text{C}$  积温  $20^\circ\text{C}$  是水稻植株快速生长的界限温度,也是水稻安全齐穗的界限温度<sup>[29-30]</sup>。1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内  $\geq 20^\circ\text{C}$  积温平均值为  $3\,828.94^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ,  $>4\,500^\circ\text{C}\cdot\text{d}$  高值区主要分布在江西省东南部,  $<3\,500^\circ\text{C}\cdot\text{d}$  低值区主要分布在湖北省西部山区、江苏省北部地区及区域内少数海拔较高的站点 (图 3a)。从图 3b 可以看出,  $\geq 20^\circ\text{C}$  积温整体上呈现增加趋势,平均 10 年倾向率为  $71.92^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ ,其中湖北省钟祥、天门至湖南省常德、沅江一带及江苏省南部、浙江省北部和浙江省东部地区增加较快,以上区域平均 10 年倾向率大

于  $100.00^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 。

2.1.3 积温有效率 1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内积温有效率呈现北部高南部低的分布特征,整个区域积温有效率平均为  $86.92\%$ 。高值区主要分布在江苏省大部、浙江省东部、湖北省利川及湖南省西南部,以上区域积温有效率平均值大于  $90.00\%$ ,其中江苏省沭阳、射阳、赣榆等地积温有效率大于  $95.00\%$ ;低值区主要分布在湖北省东部、湖南省中东部、江西省大部、安徽省南部、浙江省中西部,以上地区积温有效率小于  $85.00\%$ ,其中湖南省长沙、株洲、长宁、衡阳,江西省中部和东北部及

浙江省中部地区积温有效效率低于 80.00% (图 4a)。从图 4b 可以看出, 积温有效率的 10 年倾向率在江苏省北部、安徽省北部、江西省北部、湖北省西北部及湖南省南部表现为正值, 说明以上区域积温有效

率呈增加趋势; 而研究区其他区域积温有效率的 10 年倾向率则表现为负值, 即积温有效率呈降低趋势, 其中江苏省南部、浙江省东北部下降较快, 积温有效率平均每 10 年下降超过 1 个百分点。

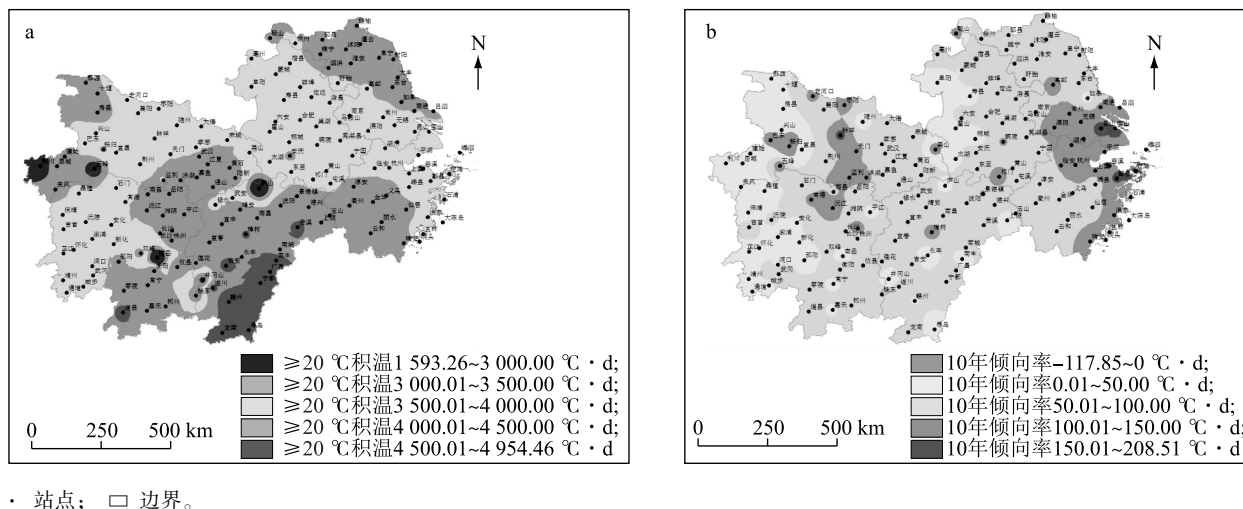
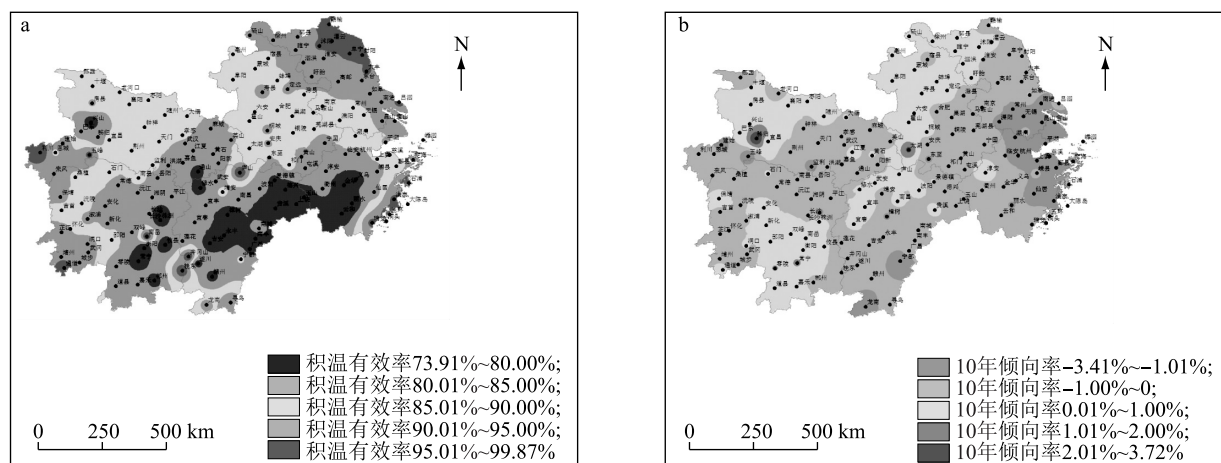


图 3 长江中下游地区水稻生长季节内  $\geq 20$  °C 积温及 10 年倾向率分布

Fig.3 Distribution of accumulated temperature ( $\geq 20$  °C) and the ten year propensity rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River



· 站点; □ 边界。

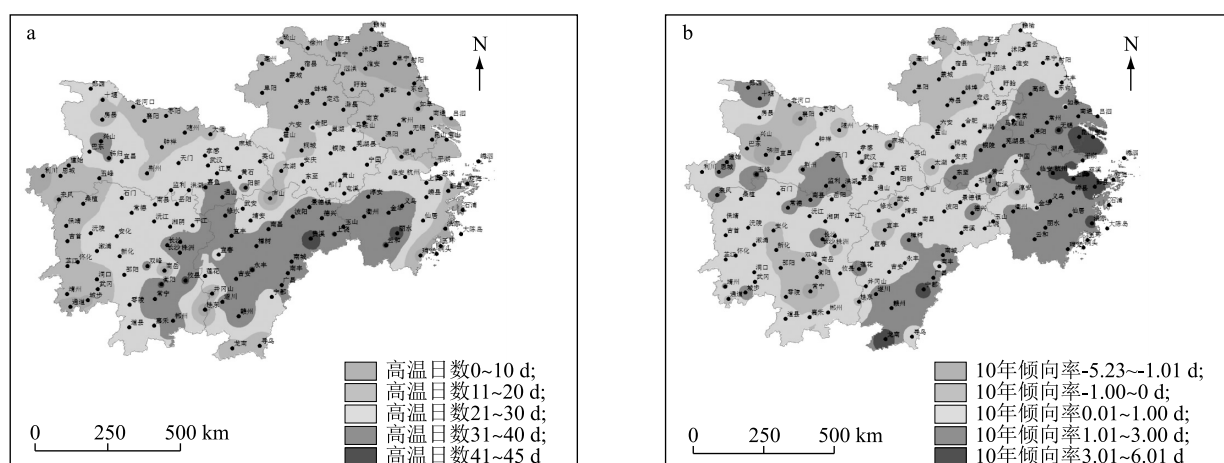
图 4 长江中下游地区水稻生长季节内  $\geq 10$  °C 积温有效效率及 10 年倾向率分布

Fig.4 Distribution of accumulated temperature ( $\geq 10$  °C) efficiency and rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River

2.1.4 高温日数 1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内高温日数整体上呈南多北少的分布特征, 区域内平均为 21.93 d, 高值区 (高温日数  $> 30$  d) 主要分布在湖北省东南部的通山一带、湖南省东部、江西省中部、浙江省中西部及东北部地区, 最大值出现在浙江省丽水 (45.46 d); 低值区 (高温日数  $< 10$  d) 主要分布江苏省北部 (图 5a)。1960–2016

年研究区水稻生长季节内高温日数 10 年倾向率为 0.84 d, 除安徽省北部、湖北省西部和湖南省中南部部分地区高温日数呈减少趋势外, 其他地区高温日数呈现增加的趋势, 增加较快的区域主要分布在江西省南部、安徽省大部、江苏省南部和浙江省大部, 每 10 年增加高温日数大于 3 d, 鄞县 10 年倾向率为 6.02 d (图 5b)。





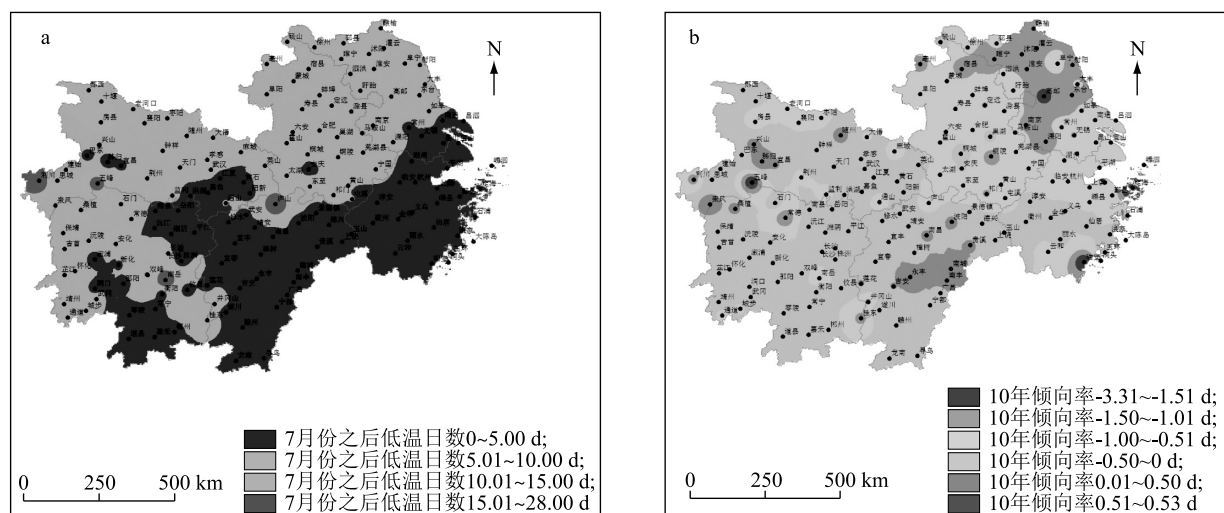
· 站点; □ 边界。

图5 长江中下游地区水稻生长季节内高温日数及10年倾向率分布

Fig.5 Distribution of high temperature days and the ten-year propensity rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River

2.1.5 低温日数 1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内 7 月份之后低温日数呈现由南向北递增的趋势,区域内低温日数平均值为 5.81 d。低值区主要分布在湖北省东南部、湖南省南部和东北部、江西省大部、浙江省、江苏省南部,以上地区低温日数小于 5 d;高值区主要分布在江苏省西北部及区域内少数几个海拔较高的站点,低温日数大于 10.00 d

(图 6a)。从图 6b 可以看出,研究区 7 月份之后低温日数 10 年倾向率除江西省永丰、吉安至贵溪、南丰一带及湖北省秭归、宜昌等少数地区为正值外,大部分地区表现为负值,说明长江中下游地区 7 月份之后低温日数主要呈减少的趋势,其中减少较快的区域为江苏省中部和北部,10 年倾向率小于 -1.00 d。



· 站点; □ 边界。

图6 长江中下游地区水稻生长季节内 7 月份之后低温日数及 10 年倾向率分布

Fig.6 Distribution of low temperature days after July and the ten-year propensity rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River

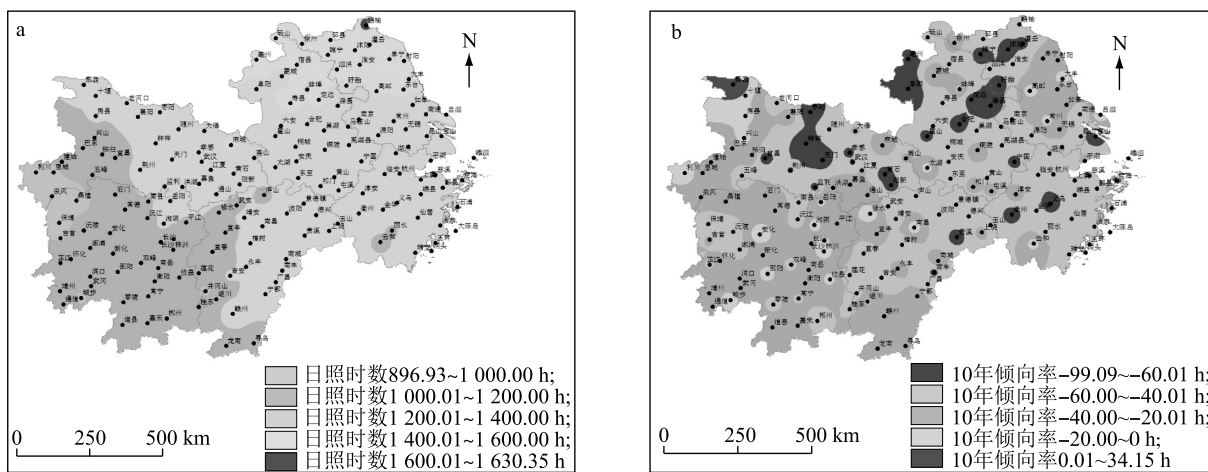
## 2.2 长江中下游地区水稻生长季节内日照时数变化

1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内

日照时数整体上呈现东多西少的分布特征,整个区域平均日照时数为 1 228.94 h。高值区主要分布在

江苏省北部和安徽省北部,以上地区水稻生长季节内日照时数大于1 400.00 h,其中江苏省赣榆的日照时数达到区域内最高值,为1 630.35 h;低值区主要分布在湖北省西南部、湖南省西北部,水稻生长季节内日照时数低于1 000.00 h,其中湖南省保靖的日照时数达到区域内最低值 896.93 h(图 7a)。从图 7b 可以看出,研究区除湖北省郢西以外,水稻生长季节内日照时数倾向率大都为负值,说明长江中下游地区水稻生长季节内日照时数变化趋势以减少

为主,区域内平均 10 年倾向率为-41.04 h,湖北省中东部、安徽省大部、江苏省北部和南部、浙江省大部、江西省中部和北部地区日照时数减少较快,平均每 10 年减少的日照时数超过 40.00 h。其中湖北省枣阳、钟祥、天门、黄石、阳新,安徽省阜阳、亳州、滁县、定远,江苏省沐阳、睢宁,江西省贵溪,浙江省衢州等地日照时数减少更快,以上区域日照时数 10 年倾向率小于-60.00 h。



· 站点; □ 边界。

图 7 长江中下游地区水稻生长季节内日照时数及 10 年倾向率分布

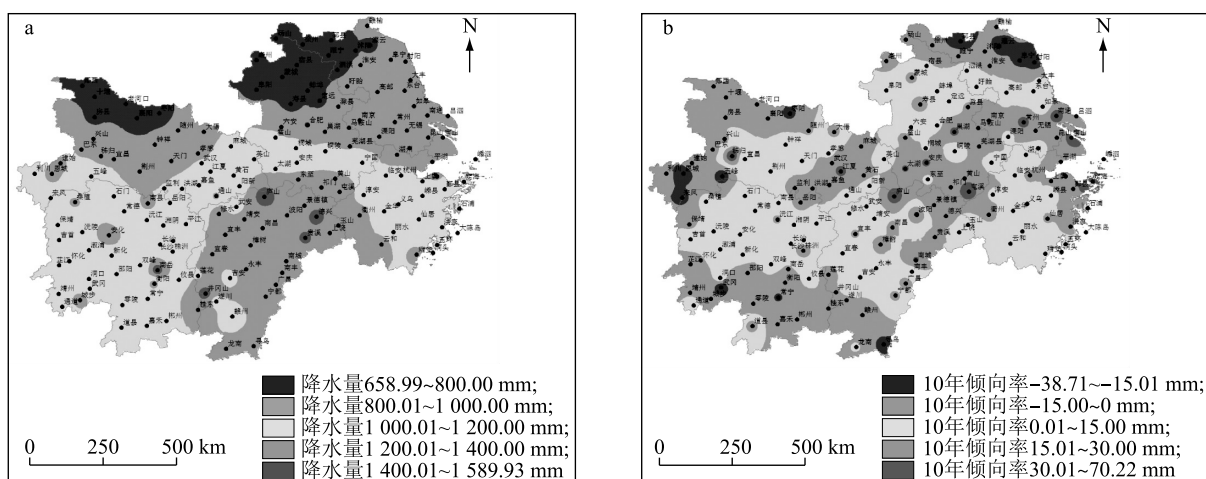
Fig.7 Distribution of sunshine hours and the ten-year propensity rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River

## 2.3 长江中下游地区水稻生长季节内降水资源变化

**2.3.1 降水量** 1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内降水量呈现南多北少的分布特征,整个区域平均降水量为1 048.91 mm。高值区主要分布在江西省大部、安徽省南部和浙江省西南部,以上地区水稻生长季节内降水量大于1 200.00 mm;水稻生长季节内降水量小于 800.00 mm 的区域主要分布在江苏省北部、安徽省北部及湖北省西北部(图 8a)。1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内降水量呈微弱增加的趋势,10 年倾向率平均值为 7.52 mm(图 8b),研究区水稻生长季节内降水量 10 年倾向率的负值区主要分布在江苏省东北部、湖北省西部和西北部、湖南省南部、江西省南部等区域,正值区主要集中在研究区中部和东部。降水量增加较快的区域为江苏省南部、安徽省南部、浙江省东部、江西省东北部、湖北省东部,以上区域降水量 10

年倾向率大于 15.00 mm;降水量减少较快的区域分布在江苏省灌云、阜宁、射阳、邳县,湖北省恩城、五峰,以上地区降水量 10 年倾向率小于-15.00 mm。

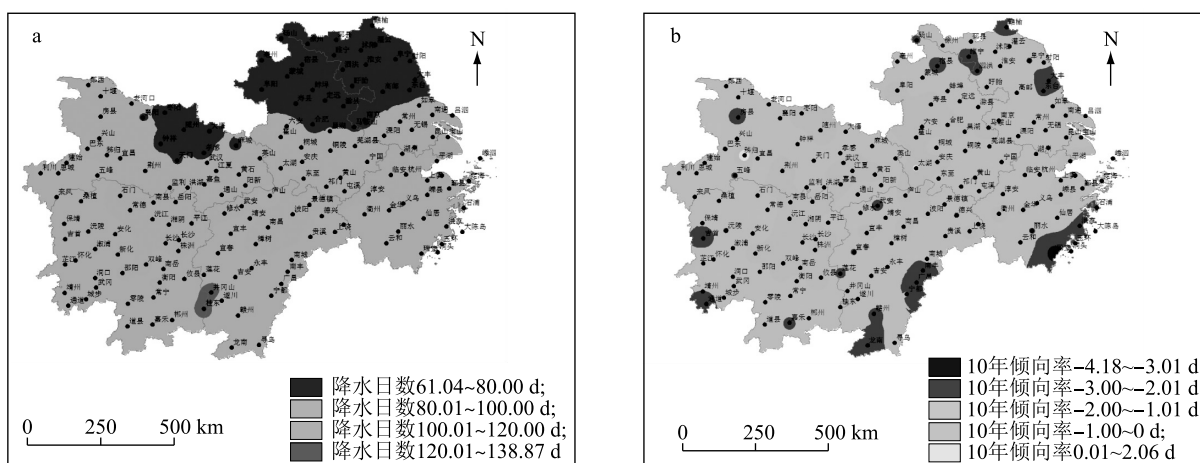
**2.3.2 降水日数** 1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内降水日数整体上呈现由南向北递减的趋势。降水日数大于 100 d 的高值区主要分布在湖北省西南部、湖南省西部和南部、江西省南部、浙江省南部,降水日数最多的地方为江西省井冈山(139 d);降水日数小于 80 d 的低值区主要分布在江苏省中部和北部、安徽省北部,以及湖北省钟祥、孝感、襄阳以北地区,降水日数最少的区域为安徽省砀山(61.04 d)。整个区域水稻生长季节内降水日数平均值为 92.97d(图 9a)。从图 9b 可以看出,研究区水稻生长季节内降水日数整体上呈现下降趋势,降水日数 10 年倾向率平均值为-1.38 d,降水日数减少较快的区域分布在江苏省北部、浙江省东南部、江西省东南部,以上地区降水日数 10 年倾向率小于-2.00 d。



· 站点; □ 边界。

图8 长江中下游地区水稻生长季节内降水量及10年倾向率分布

Fig.8 Distribution of precipitation and the ten-year propensity rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River



· 站点; □ 边界。

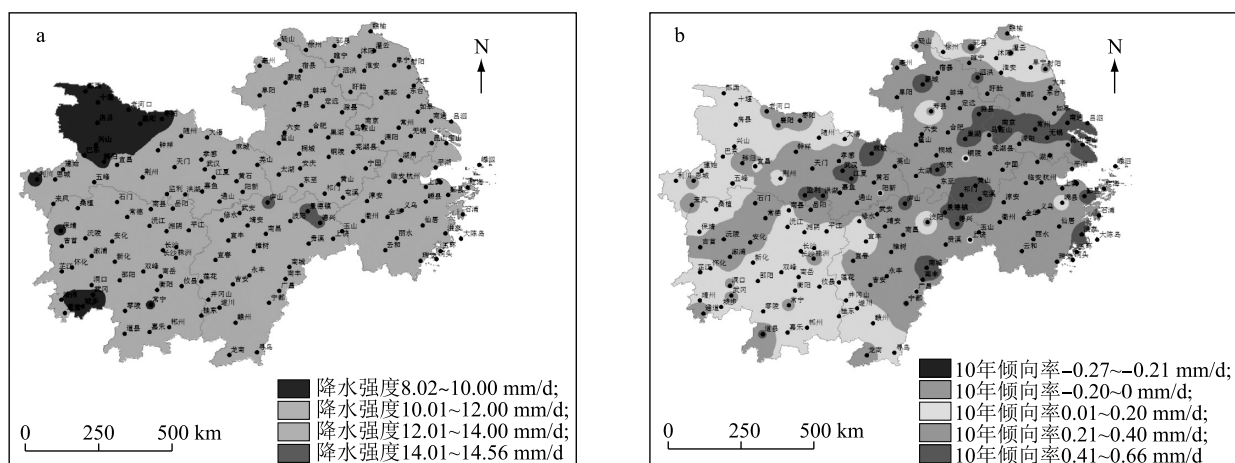
图9 长江中下游地区水稻生长季节内降水日数及10年倾向率分布

Fig.9 Distribution of days of the precipitation and the ten-year propensity rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River

2.3.3 降水强度 1960~2016年长江中下游地区水稻生长季节内降水强度呈现中部较强、东部和西部较弱的分布特征。高值区主要分布在安徽省南部、湖北省东部、江西省北部、浙江省西南部,以上地区降水强度大于12.00 mm/d,降水强度最高值14.56 mm/d出现在江西省庐山;低值区主要分布在湖北省西北部及湖南省西南部,以上地区降水强度小于10.00 mm/d,降水强度最低值8.02 mm/d出现在湖北省房县。整个研究区降水强度平均值为11.24 mm/d(图10a)。从图10b可以看出,水稻生长季节

内降水强度10年倾向率在整个研究区大部分表现为正值,说明生长季节内降水强度整体呈增加趋势。增加较快的区域分布在安徽省滁县、巢湖至江苏省南京、无锡、南通一线,安徽省屯溪、祁门至江西省景德镇一线,湖北省麻城、武汉、监利一带,以上区域10年倾向率大于0.40 mm;10年倾向率为负值的区域主要包括江苏省邳县、灌云、射阳,湖北省老河口、襄阳、枣阳、恩城、来风,湖南省武冈、常宁,江西省波阳等少数站点。整个研究区水稻生长季节内降水强度10年倾向率平均值为0.25 mm。





· 站点; □ 边界。

图 10 长江中下游地区水稻生长季节内降水强度及气候倾向率分布

Fig.10 Distribution of precipitation intensity and the ten-year propensity rate during rice growing season in the middle and lower reaches of the Yangtze River

### 3 讨论

长江中下游地区水稻生长季节内  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温和  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  积温平均值分别为  $4\,944.53^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $3\,828.94^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ , 且都呈现增加趋势, 平均每 10 年分别增加  $47.76^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$  和  $71.92^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。由此可知研究区水稻生长的热量条件呈增加趋势, 双季稻区热量资源增加且区域呈扩大趋势, 这使得种植区域北界有向北拓展的可能, 这与前人研究结果<sup>[12,14]</sup>相似。

研究发现积温增加的同时, 水稻生长季节内高温日数也呈现增加趋势。1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内高温日数平均值为 21.93 d, 高温天气在整个区域都有发生, 其中湖南省东部、江西省大部、浙江省南部等地高温日数明显比其他区域多。研究区水稻生长季节内高温日数的 10 年倾向率平均值为 0.84 d, 其中江西省中部和东部、浙江省大部、江苏省南部等地高温日数相比比其他区域增加更快, 这无疑加重了上述地区水稻遭遇高温热害的风险; 而湖南省中部、安徽省北部、湖北省西北部的高温热害呈略微降低趋势。高温热害的增加降低了热量有效率, 整个研究区  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的有效率平均值为 86.92%, 其中浙江省南部、江西省中部和东部北部的积温有效率在整个研究区最低, 低于 80.00%, 从 10 年倾向率来看, 以上地区积温有效率也呈现下降趋势。尽管水稻生长季节内积温增加, 但是积温效率下降, 说明热量资源的增加部分来自高温积温的贡献, 这与陈升宇等<sup>[11]</sup>研究结论类似。研究区 7 月份之后低温日数呈

现北多南少分布, 且整个区域除江西省中部低温日数略微增加外, 低温日数以减少为主, 尤其江苏省减少较快。7 月之后低温日数的减少, 对水稻后期的灌浆、光合及品质形成有利<sup>[25-27,31-32]</sup>。

1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内日照时数呈现东部多西部少的分布特征, 平均为 1 228.94 h, 研究区日照时数以减少为主, 平均 10 年倾向率为  $-41.04\text{ h}$ , 其中浙江省、安徽省、江西省中部和东北部、湖北省中部和东部减少较快。本研究同时发现, 长江中下游地区的降水日数呈现减少趋势, 这说明该地区阴天或寡照天气增多。高歌<sup>[33]</sup>认为日照时数降低一部分原因来自雾霾的增加。日照时数的减少会影响水稻发育进程, 不利于水稻的光合及单产的提高<sup>[9,20]</sup>。

1960–2016 年长江中下游地区水稻生长季节内降水量南多北少, 平均值为 1 048.91 mm, 10 年倾向率平均为 7.52 mm, 尤以安徽省南部降水量增加最快。研究区降水日数以减少为主, 平均降水日数 10 年倾向率为  $-1.38\text{ d}$ 。降水量增加, 降水日数减少, 必然导致降水强度的增加。研究区水稻生长季节内降水强度平均为 11.24 mm/d, 1960–2016 年降水强度平均每 10 年增加 0.25 mm/d, 研究区中部和东部增加速率比西部和西南部快。说明在长江中下游地区水稻生长季节内降水的时间分配不均匀, 极端降雨有增加的趋势, 这与梅伟等<sup>[34]</sup>和苏布达等<sup>[17]</sup>研究结论相似, 表明水稻生产的旱涝灾害风险增加。

综上所述, 1960–2016 年长江中下游地区水稻



生长季节内气候资源变化表现为热量资源增加的同时高温日数也在增加,低温日数减少;日照时数减少;降水日数减少,降水量和降水强度增加。这将导致水稻适宜生长季节缩短,高温热害增加,旱涝风险增大,生长期病虫害危害加剧<sup>[14,16]</sup>,影响水稻的产量和品质<sup>[16, 24, 35-38]</sup>。因此该地区应当采取逐步推广生长季节长、抗高温和耐涝抗旱、抗病虫害的品种,栽培过程中注意合理施用肥料,加强田间管理,加强农田水利设施建设,同时合理安排水稻播期,充分利用农业气候资源,以保证水稻的高产稳产。

### 参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [2] 秦大河,丁一汇,苏纪兰,等. 中国气候与环境演变评估(1): 中国气候与环境变化及未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9.
- [3] 王 英,曹明奎,陶 波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [4] 吴志祥,周兆德. 气候变化对我国农业生产的影响及对策[J]. 华南热带农业大学学报, 2004, 10(2): 7-11.
- [5] ZHAI P, SUN A, REN F, et al. Changes of climate extremes in China [J]. *Clim Change*, 1999, 42: 203-218.
- [6] 肖国举,张 强,王 静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1877-1885.
- [7] 柏秦凤,霍治国,李世奎,等. 1978 年前、后中国  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温对比[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1810-1816.
- [8] 唐国平,李秀彬, FISCHER G, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 129-138.
- [9] 艾治勇,郭夏宇,刘文祥,等. 农业气候资源变化对双季稻生产的可能影响分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2089-2102.
- [10] 熊 伟,陶福祿,许吟隆,等. 气候变化情景下我国水稻产量变化模拟[J]. 中国农业气象, 2001, 22(3): 2-6.
- [11] 陈升宇,刘安国,张亚杰,等. 气候变化背景下湖北省水稻高温热害变化规律研究[J]. 气象与减灾研究, 2013, 36(2): 51-56.
- [12] 谢远玉,黄淑娥,田 俊,等. 长江中下游热量资源时空演变特征及其对双季稻种植的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2950-2958.
- [13] 徐华军,杨晓光,王文峰,等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅶ. 青藏高原干旱半干旱区农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1817-1824.
- [14] 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.
- [15] 金志凤,杨太明,李仁忠,等. 浙江省高温热害发生规律及其对早稻产量的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 628-631.
- [16] 江 敏,金之庆,石春林,等. 长江中下游地区水稻孕穗开花期高温发生规律及其对产量的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 649-656.
- [17] 苏布达,姜 彤,任国玉,等. 长江流域 1960-2004 年极端强降水时空变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 9-14.
- [18] 马金玉,罗 勇,梁 宏,等. 中国近半个世纪地面太阳总辐射时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 268-280.
- [19] 任国玉,郭 军,徐铭志,等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
- [20] 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.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2017) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [22] MATSUI T, OMASA K, HORIE T. Rapid swelling of pollen grains in response to floret opening unfolds anther locules in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant Production Science*, 1999, 2(3): 196-199.
- [23] MATSUI T, OMASA K, HORIE T. High temperature at flowering inhibits swelling of pollen grains, a driving force for thecae dehiscence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant Production Science*, 2000, 3(4): 430-434.
- [24] 李守华,田小海,黄永平,等. 江汉平原近 50 年中稻花期危害高温发生的初步分析[J]. 中国农业气象, 2007, 28(1): 5-8.
- [25] 王 静,张成军,陈国祥,等. 低温对灌浆期水稻剑叶光合色素和类囊体膜脂肪酸的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(2): 177-182.
- [26] 曾研华,张玉屏,潘晓光,等. 花后低温对水稻籽粒灌浆与内源激素含量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(10): 1551-1559.
- [27] 褚春燕,王锦冬,孙桂玉,等. 三江平原水稻发育中后期低温对水稻品质的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(26): 1-7.
- [28] 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: 69-72.
- [29] 高亮之,郭 鹏,张立中,等. 中国水稻的光温资源与生产力 [J]. 中国农业科学, 1984, 17(1): 17-23.
- [30] 张祖建,张洪熙,杨建昌,等. 江苏近 50 年粳稻安全齐穗期的变化[J]. 作物学报, 2011, 37(1): 146-151.
- [31] 刘 民. 水稻低温冷害分析及研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2009(4): 154-157.
- [32] 潘熙曙,胡定汉,李迎征,等. 水稻低温冷害和高温热害的发生特点及预防措施[J]. 中国稻米, 2007(6): 52-54.
- [33] 高 歌. 1961-2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 761-768.
- [34] 梅 伟,杨修群. 我国长江中下游地区降水变化趋势分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2005, 41(6): 577-589.
- [35] 王 强,陈 雷,张晓丽,等. 水稻生殖生长阶段不同时期高温热害对产量损失的影响[J]. 中国稻米, 2017, 23(4): 78-80.
- [36] 骆宗强,石春林,江 敏,等. 孕穗期高温对水稻物质分配及产量结构的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(3): 326-334.
- [37] 李 飞,卓 壮, KAPILA SIRI UDAWELAUA, 等. 水稻高温热害发生机理与耐高温遗传基础研究[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(1): 97-103.
- [38] 雷享亮,吴 强,卢大磊,等. 水稻抽穗开花期高温热害影响机理及其缓解技术研究进展[J]. 江西农业学报, 2014, 26(11): 10-15.

(责任编辑:张震林)