

沙修竹, 申双和, 陶苏林. 长江中下游地区一季稻高温热害风险评估与区划[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(5): 1053-1059.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.05.017

## 长江中下游地区一季稻高温热害风险评估与区划

沙修竹<sup>1</sup>, 申双和<sup>2</sup>, 陶苏林<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 气象灾害预警预报与评估协同创新中心, 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 为探究 1961–2013 年长江中下游地区一季稻高温热害风险分布, 根据一季稻抽穗开花期高温热害等级指标, 统计逐站逐年各强度高温热害发生频次, 利用 ArcGIS 分析高温热害空间分布, 采用 Morlet 小波分析高温热害周期规律; 设定抽穗开花期有无高温热害 2 种天气方案, 使用 ORYZA2000 模型提取灾损率, 进而根据灾害风险评估模型完成风险区划。结果表明: 一季稻抽穗开花期高温热害分布面积为轻度>中度>重度, 轻度、中度、重度高温热害分布面积最大省份均为湖北省; 年际尺度 28 年为 1961–2013 年一季稻抽穗开花期高温热害频次的的第一主周期。高温热害灾损率高值区为江苏中西部、浙江中部、安徽东南部、湖南西南部。高温热害风险高值区为湖北中南部及东北部、安徽中西部、湖南中北部。高温热害及其灾损率的空间分布不完全一致。

**关键词:** 高温热害; ORYZA2000; 灾损率; 风险评估模型

**中图分类号:** S162.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2015)05-1053-07

## Risk assessment and regionalization of heat injury for single-season rice in Middle and Lower Yangtze River

SHA Xiu-zhu<sup>1</sup>, SHEN Shuang-he<sup>2</sup>, TAO Su-lin<sup>1</sup>

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** To explore the risk distribution of heat injury for single-season rice in Middle and Lower Yangtze River from 1961 to 2013, based on the indicators of single rice heat injury grade during flowering, the frequency of the damage with different intensities of each station and each year was counted up, the horizontal distribution of heat injury was analyzed by ArcGIS, and the periodic trend was analyzed by Morlet wavelet. Two weather programs

were set, which were with and without heat injury during flowering, and the risk regionalization of heat injury were achieved using the model of damage risk evaluation based on the damage rate of heat injury extracted by ORYZA2000 model. Mild heat injury covered the largest area, and severe heat injury, the smallest area. Hubei province presented the largest ar-

收稿日期: 2015-03-13

基金项目: “农业应对气候变化”项目(132020010406、1411145000994); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12\_0503); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506018)

作者简介: 沙修竹(1990-), 辽宁兴城人, 硕士研究生, 研究方向为农业气象。(E-mail) tongling.niao@163.com

通讯作者: 申双和, (E-mail) yqzhr@nuist.edu.cn

eas for all three injury grades of heat. The first major period of heat injury during flowering from 1961 to 2013 were shown as 28 years. The areas with high damage rate of heat injury were midwestern Jiangsu province, central Zhejiang, southeastern Anhui, and southwestern Hunan. The areas with high risk of heat injury were south-central and northeastern Hubei, midwestern Anhui, north-central Hunan. The spatial distributions of heat injury was not consistent with its damage rate.

**Key words:** heat injury; ORYZA2000; damage rate; risk assessment model

长江中下游稻区以占全国 19% 的耕地生产约占全国 51% 的稻谷<sup>[1]</sup>。近年来,随着种植结构的调整,长江中下游地区双季稻面积呈现下降趋势,一季稻面积逐年上升<sup>[2]</sup>。水稻是对气温要求较高、对气温变化较敏感的作物,极端高温会对水稻正常抽穗、开花、授粉、授精和灌浆结实造成较大影响,轻则减产,重则绝收<sup>[3-4]</sup>。

在国内水稻高温热害温度指标确立方面,已有研究结果已得到广泛认可<sup>[5-7]</sup>。抽穗开花期是水稻生殖生长最敏感时期,水稻明显的高温障碍可认为在 35℃。对致害高温的持续时间,认为日最高气温 35℃ 连续 3 d 以上可作为水稻高温热害指标。总结近年水稻高温热害表现出的危害结果,高温热害主要对正值抽穗开花阶段的一季稻造成危害。

在计算水稻灾损率方面,一部分学者使用平均减产率表达式计算灾损率,另一部分学者采用国内外研究较多、使用较为成熟的 ORYZA 系列水稻模型<sup>[8]</sup>提取灾损率。ORYZA2000 模型已在不同地区进行了验证和应用<sup>[9-11]</sup>,结果表明该模型在模拟水稻叶面积、生长期、生长速率及生物量等方面具有较好的准确性。ORYZA2000 模型可为区域水稻产量预测、农业水资源利用和配置提供技术手段。

本研究将以往的水稻范畴风险评估细分至一季稻,将高温热害时段界定至抽穗开花期,将研究区域界定至一季稻种植区。本研究的重点在于,设定逐站逐年一季稻抽穗开花期内有无高温热害 2 种天气的方案,该方案能够较准确表达该灾害造成的损失,利用 ORYZA2000 水稻模型提取逐站逐年一季稻高温热害灾损率,进而完成一季稻高温热害风险评估与区划,为未来农业生产中水稻栽培管理、防灾减灾提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

研究区域为长江中下游地区一季稻种植区(图 1 阴影部分),该区域内 59 个气象站、40 个农业气象站的分布见图 1。主要资料含:

(1)气象资料。1961–2013 年各气象站逐日气象要素,主要包括日平均温度(℃)、日最高气温(℃)、日最低气温(℃)、降水量(mm)、水汽压(hPa)、平均相对湿度(%)、风速(m/s)、日照时数(h)。

(2)作物资料。1990–2011 年各农业气象站代表地区的一季稻全生育期、出苗期、移栽期、孕穗期及抽穗开花期;1980–2011 年 95 个县级地区一季稻播种面积与总产量;江苏兴化、安徽合肥农业试验站一季稻生育期、分阶段生物量、栽培措施等资料,代表品种为汕优 63 和中粳 898。

(3)土壤资料。利用 HWSD (Harmonized world soil database) 世界土壤数据库,根据各气象站经纬度信息提取各气象站代表地区土壤参数,包括土壤层数、各层厚度、粘土含量和沙土含量。

### 1.2 方法

1.2.1 高温热害辨识指标 一季稻抽穗开花期高温热害等级以日最高气温 $\geq 35.0$ ℃持续天数为指标,划分为轻度高温热害、中度高温热害、重度高温热害 3 个等级<sup>[5-6]</sup>(表 1)。统计近 53 年、59 个气象站逐站逐年的一季稻抽穗开花期内高温热害频次,再通过公式 1、公式 2 分别计算以台站为序列的  $H_{\text{region}(n)}$ 、以年份为序列的  $H_{\text{time}(n)}$ 。其中,  $H_{(1)}$ 、 $H_{(2)}$ 、 $H_{(3)}$  分别表示轻度高温热害、中度高温热害、重度度高温热害的发生次数。

$$H_{\text{region}(n)} = 1/59 \sum_{i=1}^{53} H_{i(n)}, \quad (n=1,2,3) \quad (1)$$

$$H_{\text{time}(n)} = 1/53 \sum_{i=1}^{59} H_{i(n)}, \quad (n=1,2,3) \quad (2)$$

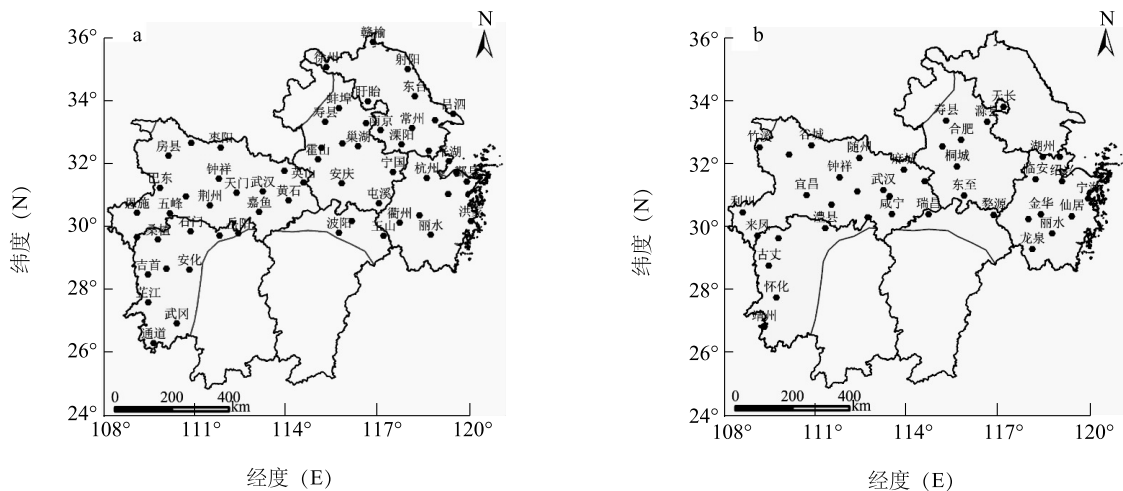


图1 长江中下游一季稻种植区气象站分布(a)、农业气象站分布(b)  
Fig.1 Locations of meteorological stations(a) and agrometeorological stations(b) in the single-season rice plant areas of the Middle and Lower Yangtze river

表1 一季稻抽穗开花期高温热害等级指标

Table 1 Indicators of single-season rice heat injury grades during flowering			
项 目	轻度高温热害	中度高温热害	重度高温热害
日最高气温(℃)	≥35	≥35	≥35
持续时间(d)	3~4	5~7	≥8

1.2.2 小波分析法 本研究选用 Morlet 小波<sup>[12-15]</sup>分析一季稻高温热害时频分布特征。根据 Morlet 小波函数(公式3),作出高温热害发生频次的二维小波系数等值线图,获得其在不同时段、不同时间尺度下的变化特征。将小波方差(公式4)<sup>[16]</sup>随尺度变化过程绘制成小波方差变化图,以反映  $H_{time(n)}$  时间序列波动能量随尺度的分布情况,通过该图可确定一个在  $H_{time(n)}$  时间序列中起主要作用的周期成分。小波方差图能反映高温热害频次随年际尺度的分布情况,以确定整个时域内频次发生的主周期。

$$\psi(t) = Ce^{i^2/2} \cos(5t) \tag{3}$$

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \tag{4}$$

式中,  $t$  为时间,  $C$  为常数,  $\psi(t)$  为基本小波或母小波;  $a$  为频率参数,  $b$  为时间参数,  $W_f(a,b)$  为小波变化系数,  $\text{Var}(a)$  为小波方差。

1.2.3 高温热害损失率估算 一季稻抽穗开花期高

温热害的灾损率通过 ORYZA2000 水稻模型模拟获得。根据灾害辨识结果,使用高温替换天气数据(抽穗开花期内引起高温热害的日最高气温替换成对应时段的多年均值)模拟常年产量,同时认为使用实际天气数据模拟的产量为高温热害受灾产量,2种产量的差值为气象产量,气象产量占趋势产量的比例即该灾种灾损率。模型提取灾损率步骤如图2。

1.2.4 灾害风险评估模型 区域自然灾害风险形成机制应由3个因素综合构成,包括自然灾害的危险性、承灾体的暴露性及承灾体的脆弱性或易损性。该研究考虑一季稻高温热害风险由灾害发生概率、种植率、灾损率3部分组成<sup>[5]</sup>。灾害风险度由灾害风险度评估模型[公式(5)]计算。

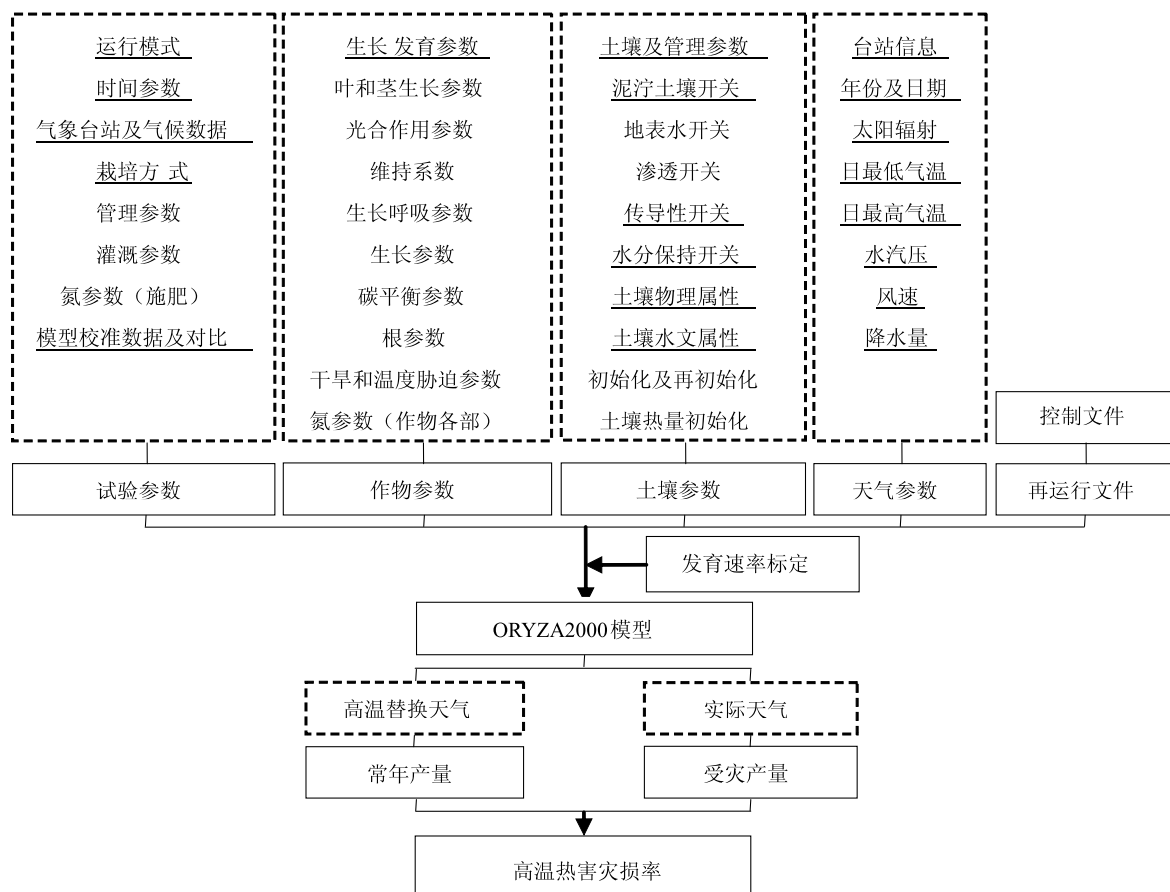
高温热害发生概率的估算基于灾害辨识结果。考虑到气象要素一般具备正态分布特点,一季稻高温热害发生频次也应具备正态分布特征,依据正态分布密度函数及概率分布函数估算灾害发生概率。对高温热害发生频次进行正态分布检验,对不符合正态分布的序列需进行偏态分布正态化处理,在此基础上估算相应概率<sup>[17]</sup>。

种植率的计算见公式(6)。

$$R = P \times C \times D \tag{5}$$

$$C = S_1 / S_2 \tag{6}$$

$R$  为灾害风险度,  $P$  为灾害发生概率(%),  $C$  为种植率(%),  $D$  为灾损率(%)。  $S_1$  为一季稻种植面积,  $S_2$  为地区行政面积。



下划线标示项包含该模拟修改参数,其余项使用模型默认值。

图2 ORYZA2000 模型提取灾损率步骤

Fig. 2 The process of damage rate extraction by ORYZA2000

## 2 结果与分析

### 2.1 长江中下游地区一季稻抽穗开花期高温热害风险辨识

2.1.1 空间分布 1961–2013 年长江中下游地区一季稻抽穗开花期轻度、中度、重度高温热害空间分布形势见图 3。高温热害 3 种强度分布面积比较: 轻度(约 70%)>中度(约 50%)>重度(约 20%), 轻度高温热害、中度高温热害、重度高温热害分布面积最大省均为湖北省。

轻度高温热害[指标  $H_{\text{region}(1)} \in (0.40, 0.63)$ ]的多发地区有: 安徽省六安南部、安庆西部, 湖北省黄冈、孝感、武汉北部、荆门东北部、天门、潜江、仙桃、恩施北部、宜昌北部, 湖南省常

德、湘西南部、怀化北部。其中, 黄冈中部、宜昌北部、恩施北部、常德中部轻度高温热害频次高达 0.50~0.63。

中度高温热害[指标  $H_{\text{region}(2)} \in (0.20, 0.43)$ ]的多发地区有: 安徽省六安南部、安庆西部, 江西省九江中北部, 湖北省孝感、武汉、黄冈、黄石、咸宁、天门、仙桃、荆州东部及西部、十堰西南部、恩施北部、宜昌北部, 湖南省怀化北部、益阳西部、娄底西部。其中, 孝感东部、武汉北部、黄冈北部、荆州及咸宁交界处、恩施北部、宜昌中部中度高温热害频次高达 0.30~0.43。

重度高温热害[指标  $H_{\text{region}(3)} \in (0.20, 0.36)$ ]的多发地区有: 湖北省恩施北部、宜昌西北部。



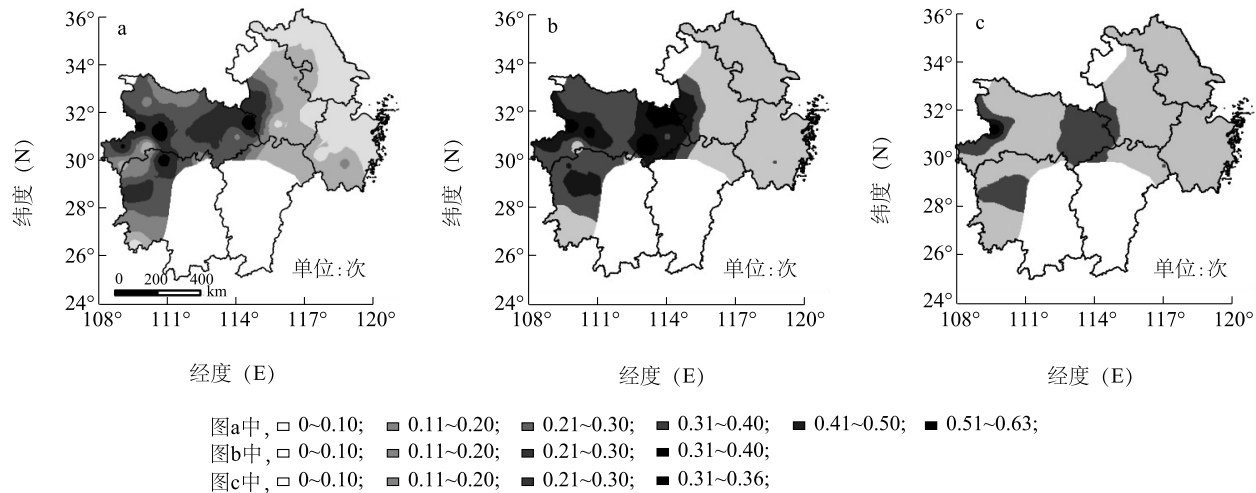


图3 1961–2013 年长江中下游地区一季稻抽穗开花期轻度高温热害(a)、中度高温热害(b)、重度高温热害(c)空间分布  
Fig.3 Spatial patterns of mild (a), moderate (b) and severe (c) heat injury for single-season rice during flowering in the Middle and Lower Yangtze river from 1961 to 2013

2.1.2 周期特征 1961–2013 年长江中下游地区一季稻抽穗开花期高温热害频次的小波方差见图 4a,由图 4a 可知,28 年的年际尺度为最大峰值,表明以 28 年为周期的震荡最强,是高温热害频次的第一主周期,整个时域内高温热害频次呈现“多-少-多”震荡特征,且该年际尺度的周期性变化在整个

时域表现稳定,小波系数等值线在 2013 年以后趋于闭合,即高温热害频次将减少。10 年和 47 年分别是高温热害频次的第 2 主周期和第 3 主周期。高温热害频次的小波时频分布见图 4b,存在显著周期性变化的年际尺度与小波方差分析结果一致。

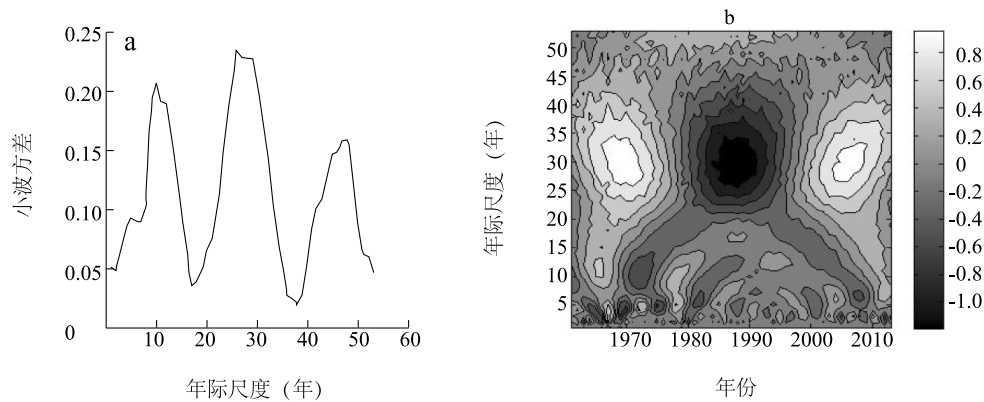


图4 1961–2013 年长江中下游地区一季稻抽穗开花期高温热害频次的小波方差(a)、小波变换时频分布 (b)  
Fig.4 Wavelet variance (a) and wavelet analysis (b) of single-season rice heat injury during flowering in the Middle and Lower Yangtze river from 1961 to 2013

2.2 长江中下游地区一季稻高温热害灾损率

2.2.1 空间分布 1961–2013 年长江中下游地区一季稻高温热害灾损率的空间分布见图 5,高温热害灾损率为 0~5%。一季稻高温热害灾损率 ∈ [2.0%,

4.8%] 的地区有:江苏省淮安南部,浙江省绍兴、金华及台州三市交界处,浙江省杭州西南部、衢州西北部,安徽省黄山,湖南省怀化南部。其他省份或地区在该时段内的高温热害灾损率 ∈ [0,2%]。

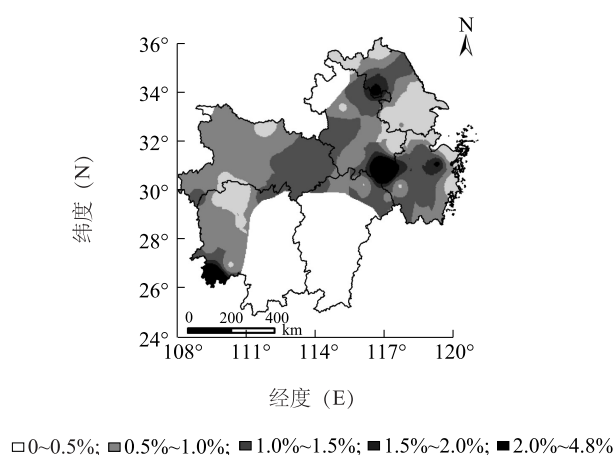


图 5 1961-2013 年长江中下游地区一季稻高温热害灾损率的空间分布

Fig. 5 Spatial patterns of heat injury damage rate for single-season rice in the Middle and Lower Yangtze river from 1961 to 2013

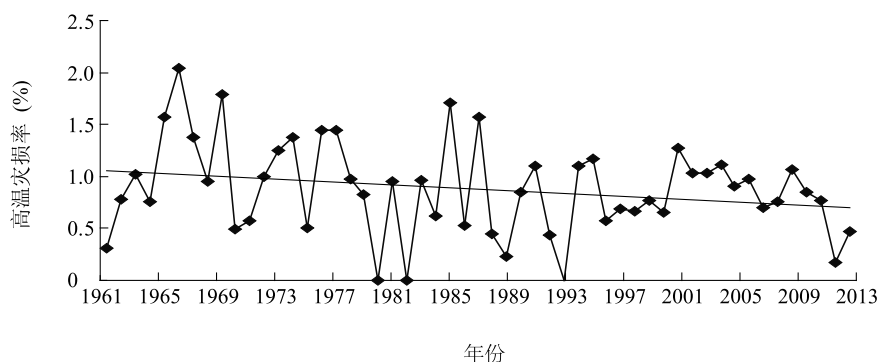


图 6 1961-2013 年长江中下游地区一季稻高温热害灾损率的时间变化

Fig. 6 Temporal variation of heat injury damage rate for single-season rice in the Middle and Lower Yangtze river from 1961 to 2013

### 3 讨论

一季稻抽穗开花期各强度高温热害的空间分布及周期规律：分布面积为轻度>中度>重度，各强度分布面积最大的省份均为湖北省，其次为湖南省、安徽省；28 年为高温热害频次的的第一主周期，且该周期下的高温热害在未来几年有减少趋势。

一季稻高温热害灾损率的时空特征：高温灾损在六省均有发生，范围 0~5%，较高值区有江苏省中西部、浙江省中部、安徽省东南部、湖南省西南部；以时间为序列的高温热害灾损率在 0~2% 范围内反复波动，90 年代以后波动幅度减小，且总体趋势略有下降。

一季稻高温热害风险高值区：湖北省中南部及东

2.2.2 时间变化 长江中下游地区一季稻高温热害灾损率时间变化如图 6。根据 1961-2013 年灾损率年际变化线及线性回归趋势线，整个时间域内的高温热害灾损率呈现以 1% 为轴、0~2% 范围内的反复波动，90 年代以后波动幅度减小，且总体趋势略有下降。

### 2.3 长江中下游地区一季稻高温热害风险区划

1961-2013 年长江中下游地区一季稻高温热害风险度的空间分布见图 7，高温热害风险度范围  $\in [0, 11.6 \times 10^{-4}]$ 。风险度  $\in [8.1 \times 10^{-4}, 11.6 \times 10^{-4}]$  的地区有：湖北省孝感西部、仙桃、荆门东部及中南部、咸宁西北部，湖南省常德、益阳、岳阳三市交界处，安徽省六安西北部、六安与安庆交界处；风险度  $\in [6.0 \times 10^{-4}, 8.0 \times 10^{-4}]$  的地区有：湖北省随州中北部、黄冈中部、孝感与仙桃交界处、荆门南部、宜昌东部、荆州北部。其他省份或地区风险度  $\in [0, 6 \times 10^{-4}]$ 。

北部、安徽省中西部、湖南省中北部。高风险区内一季稻抽穗开花期大多处于 8 月中下旬，可采取调整播种期<sup>[18]</sup>或选用耐高温品种<sup>[19]</sup>等措施应对高温热害。

高温热害及其灾损率的空间分布不完全一致，其原因在于，利用 ORYZA2000 模型提取高温热害灾损率时，ORYZA2000 模型模拟产量受生育期长短影响很大，而生育期长短受积温控制，模型中积温的计算方法为水稻三基点温度、日最高温、日最低温五要素构成的非线性方程，高温热害的发生可能会造成积温的增多或减少两种情况，即造成生育期增长或缩短，最终造成增产或减产。

湖北省为一季稻高温热害发生频次最高的区域。对于湖北一季稻或中稻高温热害，张方方等<sup>[18]</sup>统计

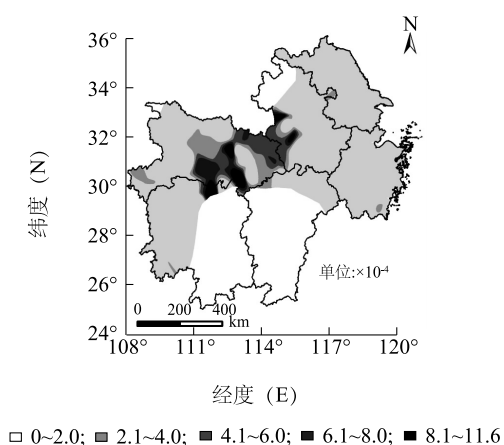


图7 1961–2013 长江中下游地区一季稻高温热害风险度的空间分布

Fig. 7 Spatial patterns of risk degree of single-season rice heat injury in the Middle and Lower Yangtze river from 1961 to 2013

时段为1971–2004年每年的5–9月,高温热害最重区为西北部;万素琴等<sup>[20]</sup>统计时段为1961–2005年每年的7月中旬到9月,高温热害最重区为东南部。本研究统计时段为1961–2013年各地一季稻抽穗开花期初日至终日,高温热害多发区为湖北东部及西部。可见,不同发育时段或时长的高温热害统计,对水稻高温热害发生规律的研究结果有一定影响。

对于长江中下游地区一季稻生产,本研究所做的高温热害风险评估界定为抽穗开花期,不包含高温热害次敏感期—孕穗期。

水稻高温热害发生过程复杂,而品种差异<sup>[3,18]</sup>、气候<sup>[17]</sup>、地理条件<sup>[6]</sup>、栽培措施、生产区划等因素的动态变化错综复杂地影响水稻高温热害风险评估结果。如何最大程度将信息全面、系统地输入风险评估模型是未来研究的重点。其中,作物模型作为模拟作物产量相对准确的手段,仍存在尚需解决的问题:第一,模型微观过程复杂繁多,且参数的地区性差异细化很难实现,很多参数难以得到,对模型的检验和应用造成严重限制;第二,栽培措施或生产技术往往不能与模型模拟过程保持一致,不能保证最终模拟结果的精确性。

## 参考文献:

- [1] 熊振民,蔡洪法. 中国水稻[M]. 北京:中国农业科技出版社,1992:273-383.
- [2] 程式华,李 建. 现代中国水稻[M]. 北京:金盾出版社,2007:

116-240.

- [3] 谢晓金,李秉柏,朱红霞,等. 抽穗期高温对水稻叶片光合特性和干物质积累的影响[J]. 中国农业气象,2012,33(3):457-461.
- [4] 刘伟昌,张雪芬,余卫东,等. 水稻高温热害风险评估方法研究[J]. 气象与环境科学,2009,32(1):33-38.
- [5] 王春乙,张雪芬,赵艳霞. 农业气象灾害影响评估与风险评价[M]. 北京:气象出版社,2010:196-248.
- [6] 杨炳玉,申双和,陶苏林,等. 江西省水稻高温热害发生规律研究[J]. 中国农业气象,2012,33(4):615-622.
- [7] 刘良式. 植物分子遗传学[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [8] YOUNG M D B, GOWING J W, WYSEURE G C L, et al. Parched-Thirst: development and validation of a process-based model of rainwater harvesting[J]. Agricultural Water Management, 2002,55(2):121-140.
- [9] 薛昌颖,杨晓光,BAM BOUMAN,等. ORYZA2000 模型模拟北京地区旱稻的适应性初探[J]. 作物学报,2005,31(12):1567-1571.
- [10] 韩湘云,景元书,浩 宇,等. 基于田间试验的水稻模型 ORYZA2000 区域参数比较[J]. 干旱气象,2013(1):37-42.
- [11] 浩 宇,景元书,马晓群,等. ORYZA2000 模型模拟安徽地区不同播期水稻的适应性分析[J]. 中国农业气象,2013,34(4):425-433.
- [12] 李春晖,杨志峰. 基于 Morlet 小波的太阳活动与黄河流域径流量关系分析[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(3):1-4.
- [13] SMITH L C, TURCOTTE D L, ISACKS B C. Stream flow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform[J]. Hydrological Processes, 1998(12):233-249.
- [14] KULKARNI J R. Wavelet analysis of the association between the southern oscillation and the Indian summer monsoon[J]. International Journal of Climatology, 2000(20):89-104.
- [15] 王文圣,丁 晶,向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展,2002,13(4):515-520.
- [16] 庾文武,胡铁松,吕美朝. 基于 Morlet 小波的 ETO 序列多时间尺度分析[J]. 武汉大学学报,2009,42(2):182-185.
- [17] 杨沈斌,申双和,赵小艳,等. 气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响[J]. 作物学报,2010,36(9):1519-1528.
- [18] 王连喜,任景全,李 琪. 未来气候变化情景下江苏水稻高温热害模拟研究 II: 孕穗-抽穗期水稻对高温热害的适应性分析[J]. 中国农业气象,2014,35(2):206-213.
- [19] 张方方,刘安国,刘志雄. 湖北省水稻高温热害发生规律的初步研究[J]. 现代农业科学,2009,16(5):217-219.
- [20] 万素琴,陈 晨,刘志雄,等. 气候变化背景下湖北省水稻高温热害时空分布[J]. 中国农业气象,2009,30(S2):316-319.

(责任编辑:陈海霞)