

DOI: 10.5846/stxb201804260948

张亮亮, 张朝, 张静, 冯博彦. 基于 CERES-Rice 模型的湖南省一季稻极端高温损失评估及适应性措施研究. 生态学报, 2019, 39(17): - .

Zhang L L, Zhang Z, Zhang J, Feng B Y. Yield losses caused by extreme high-temperature events and potential adaptive measures for single rice in Hunan Province based on the CERES-Rice model. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

# 基于 CERES-Rice 模型的湖南省一季稻极端高温损失评估及适应性措施研究

张亮亮, 张 朝\*, 张 静, 冯博彦

环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

**摘要:** 本文以湖南省四个农业气象站点的一季稻为研究对象, 基于 1990—2012 年逐日气象数据, 精细的土壤以及田间管理记录, 分析了过去 23 年极端高温的变化趋势, 并利用校准后的 CERES-Rice 模型评价了高温热害的致损率, 着重探讨了不同的适应性措施对缓解高温热害的作用, 以期提出科学合理的减灾措施来保障我国的粮食安全。结果表明: (1) CERES-Rice 能很好地捕捉本研究区不同天气和管理条件下的水稻物候期和产量, 除桑植站开花期外, 其余各参数的模拟误差均小于 10%。(2) 一季稻生育期内极端高温频发且在本世纪有增强趋势, 灾损率由高到低依次为古丈>桑植>怀化>靖州, 分别为 10.4%, 8.2%, 7.5% 和 4%。随着气候变暖的加剧, 一季稻生产将面临着日趋严重的高温热害风险。(3) 选用耐高温品种产量最大可提升 29.8%, 但在极端高温年份, 提高品种高温抗性的方法收效甚微。调节播种期会导致 -25—20% 的产量波动, 其中提前 10 天或 5 天种植均可缓解极端高温的危害。增加灌溉的贡献为 1—8%, 其中 6—8 cm 灌水量效果最佳。极端高温期间增施氮肥的贡献稳定且显著, 平均增产 2—20%, 80—100 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量能带来较为理想的避热增产效果。

**关键词:** 一季稻; 极端高温事件; CERES-Rice; 灾损率; 适应性措施; 湖南省

## Yield losses caused by extreme high-temperature events and potential adaptive measures for single rice in Hunan Province based on the CERES-Rice model

ZHANG Liangliang, ZHANG Zhao\*, ZHANG Jing, FENG Boyan

Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** By applying CERES-Rice, we firstly assessed the yield losses of single rice from extreme high-temperature events (EHTEs), and then tried to find the potential adaptation measures at four agro-meteorological stations in Hunan Province based on detailed information (including daily climatic observations, fine soil, field management and crop growing records from 1990 to 2012). We found that CERES-Rice was a suitable tool for the study due to the low simulated errors (<10%), with the exception of simulated flowering days at Sangzhi station (13.22%). EHTEs were occurred frequently during single rice growth seasons and a significant increased trend was observed during the 21<sup>st</sup> century. Moreover, the yield losses caused by EHTEs were ordered by Guzhang > Sangzhi > Huaihua > Jingzhou, with the corresponding values of 10.4%, 8.2%, 7.5%, and 4%, respectively. Finally, several potential adaptation measures were evaluated by the calibrated CERES-Rice, and we found that (1) the yield could be enhanced by 29.8% through planting a cultivar with a higher temperature tolerance coefficient. However, such a cultivar will show little effect on enhancing yield in the years with extremely high temperatures. (2) Adjusting sowing dates would cause a yield variability ranging from -25 to 20%, with a positive effect when planting 5 or 10 days in advance. (3) Increased irrigation would alleviate heat damage and increase yield by 1%—

基金项目: 国家自然科学基金 (31561143003, 41571493, 41571088)

收稿日期: 2018-04-26; 网络出版日期: 2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangzhao@bnu.edu.cn

8%, with the best effect when irrigating approximately the depth of 6—8 cm. (4) Applying nitrogen fertilizer during EHTEs would contribute significantly to the final increased yields of 2%—20%. On average, 80—100 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen application would produce an ideal effect.

**Key Words:** single rice; extreme high temperature events (EHTEs); CERES-Rice; yield loss; adaptation measures; Hunan Province

随着人口增长和生物燃料消耗的增加,预计到 2050 年,全球粮食需求将翻一番<sup>[1-2]</sup>。水稻是主要的粮食作物,供给着世界上 1/2 人口的主食<sup>[3-4]</sup>,其生长发育主要受温度和水分的控制,若日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 且持续 3 天以上,会破坏开花、授粉和结实等生理功能,造成减产甚至绝收<sup>[5]</sup>。高温热害不仅会使产量下降,还可能降低稻米的淀粉含量,影响稻米品质<sup>[6]</sup>。此外,气候变暖增加了极端高温事件的频率和强度,使农业生产更不稳定,放大了水稻遭受高温热害的风险<sup>[7]</sup>。中国作为最大的水稻生产和消费国,稻米产量占全球总产量的 30%<sup>[8]</sup>,然而 1980—2010 年 50%的种植区产量从未得到提高<sup>[9]</sup>。极端高温是影响中国水稻生产的主要气象灾害,过去 30 年高温热害造成减产 1.5—9.7%,仅 2003 年的水稻扬花期极端高温就导致长江中下游水稻受灾 40.5 万 hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>,粮食安全面临着严峻考验。

长江中下游是我国最大的稻作带,水稻播种面积约 2000 万 hm<sup>2</sup>,产量占全国的 2/3<sup>[11]</sup>。近年来,随着种植结构的调整,一季稻种植面积逐年上升,比例超过 40%<sup>[12]</sup>。湖南是水稻生产大省,产量始终占全国总产量的 10%以上,种植面积稳居首位<sup>[13]</sup>。同时,该省也是高温热害重灾区,一年中超过 35 $^{\circ}\text{C}$ 以上的极端高温天气时有发生,且往往持续数日,典型高温年份水稻减产率高达 30—50%<sup>[14]</sup>。

水稻高温热害的影响评估多年来备受关注,主要集中在高温热害的指标、影响机理以及时空分布等方面。郭安红等<sup>[15]</sup>基于华南地区的高温热害过程数据库,构建了早稻高温热害强度指数和气候危险性指数,分析了华南早稻区逐旬高温热害的危险性。姚凤梅等<sup>[16]</sup>利用 DSSAT 模拟了长江中下游水稻开花期和灌浆期高温导致的空秕率,并完成了稻区高温热害风险制图。杨太明等<sup>[17]</sup>的研究揭示了江淮地区高温热害发生的规律以及对水稻的危害机理。杨舒畅等<sup>[18]</sup>识别了长江中下游一季稻高温热害发生的时空变化规律,并进行了风险评估。尽管前人已经开展了大量的研究工作,并取得了相应的研究成果,但农民该如何防范高温热害依然缺乏定量且明确的应对措施。

选育和选种高温抗性较强的品种,调整播种时间避开极端高温频发期,增加灌溉降低冠层温度以及增施氮肥提高品种的抗高温能力是育种工作者和农户避灾的基本措施<sup>[19-20]</sup>,但是目前多数适应性研究仅限于室内或田间实验,不仅耗时耗力,且无法捕捉历史极端高温对水稻产量的影响。此外,单一条件下获得的实验结果还需进一步在复杂多变的环境中验证。作物模型以其面向作物生长过程、机理性较强被应用于产量预报、农田管理决策支持、气候变化影响评价、预测等方面<sup>[21-22]</sup>。DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 是主要的农业决策支持系统<sup>[23]</sup>,它囊括了众多作物模型,如 CERES, CROPGRO 和 CROPSIM 系列,其中 CERES 是最具代表性作物模式,可以模拟天气、土壤、品种和栽培管理对作物生长发育和产量的影响,并作为气候变化对农业影响的评价模式在国际上被广泛使用。Vashisht<sup>[24]</sup>等用 CERES-Wheat 评估了气候变化对印度小麦产量的影响并提出了最优管理措施。Braga<sup>[25]</sup>等基于 CERES-Maize 的长时间模拟,综合霜冻和低青贮质量风险提出了葡萄牙青贮玉米的最佳品种、播种和收获日期。Zhang<sup>[26]</sup>等利用 CERES-Rice 剥离了中国过去 30 年气候变化、品种更替和管理实践对水稻产量的贡献。虽然作物模型被广泛应用于对农作物生长发育过程精细的数字化模拟,但用来定制应对极端气候事件适应性措施的研究尚少。

基于此,本文利用可响应较多因素 CERES-Rice 模型开展对湖南省一季稻极端高温损失评估及适应性措施的定量分析,以期相关结果能够科学指导水稻生产避害趋利,有效降低高温热害的损失,保障粮食安全。主要研究目的如下:(1)探讨近 20 年来湖南省一季稻站点的极端高温风险;(2)评估历史极端高温对一季稻

产量的致损率;(3)剥离不同应对措施对缓解高温热害的相对贡献,定制合理可行的适应性措施实施方案,为实际生产实践提供指导,为农业防灾减灾提供科学依据。

1 研究区概况

湖南省位于长江中游,东经 108.78°—114.25°、北纬 24.64°—30.13°之间。全省土地总面积 211.8 km<sup>2</sup>,其中耕地面积约 3912.6 hm<sup>2</sup>。东南西三面环山,北部为洞庭湖平原,中部多为丘陵、盆地,整个地势南高北低(图 1)。气候为亚热带季风湿润气候,降水丰沛,雨热同季,冬寒期短,无霜期长。年平均气温 16—18 ℃,降水量 1 200—1 500 mm,年总辐射 385.0—488.0 kJ/cm<sup>3</sup>。10℃以上活动积温 5 000—5 800 ℃,持续 238—256 d。

水稻播种面积和产量分别占全国的 12.8% 和 13.1%,均居全国首位<sup>[27]</sup>。20 世纪 80 年代到 90 年代中期,种植结构多为三熟制,90 年代中期以后,多为二熟制,包括双季稻和单季稻。近年来一季稻种植占比逐年上升<sup>[12]</sup>。本文根据农业观测气象站点记录的 1990—2012 年水稻生长及田间管理等数据集,选取了连续种植一季稻且数据最为完整的靖州、怀化、古丈和桑植为研究对象,各站点具体土壤和气象情况如表 1 所示。

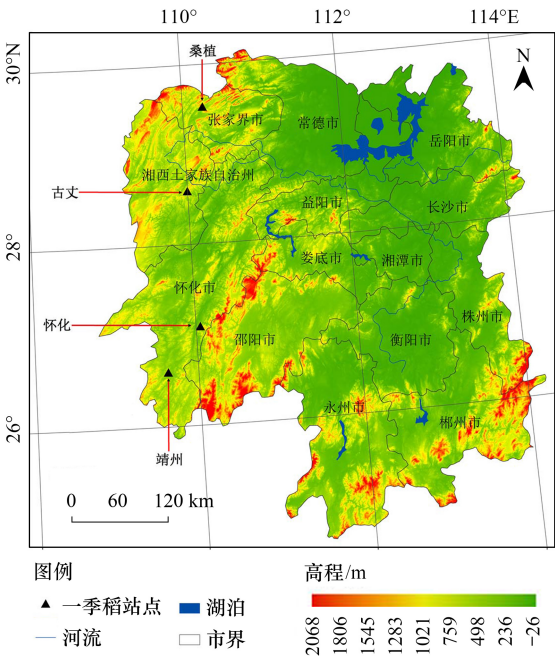


图 1 湖南省一季稻站点分布  
Fig.1 Distribution of the single rice stations in Hunan Province

表 1 湖南省一季稻站点基本资料

| Table 1 The general information of the single rice stations in Hunan Province                  |                |                                  |           |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------|-----------|------------|
| 站点 Stations                                                                                    | 靖州             | 怀化                               | 古丈        | 桑植         |
| 经度 Longitude(°E)                                                                               | 109.7          | 110.0                            | 109.9     | 110.2      |
| 纬度 Latitude(°N)                                                                                | 26.6           | 27.6                             | 28.6      | 29.4       |
| 海拔高度 Altitude/m                                                                                | 320            | 258                              | 302       | 322        |
| 土壤类型 Soil type                                                                                 | 沙壤土            | 黏土                               | 黄沙壤土      | 沙壤土        |
| 一季稻生育期平均气温/℃<br>Average temperature during single rice growing season                          | 23.3           | 23.6                             | 24.1      | 22.8       |
| 一季稻生育期平均降水量/mm<br>Average precipitation during single rice growing season                      | 938.3          | 863.7                            | 915.1     | 957.8      |
| 一季稻生育期平均太阳辐射/(MJ/m <sup>2</sup> )<br>Average solar radiation during single rice growing season | 2153.5         | 2280.8                           | 2245.5    | 2194.9     |
| 品种 Cultivar                                                                                    | 汕优 63          | 金优 77                            | 甘优 22     | 川香优 6 号    |
| 种植年份 Planting year                                                                             | 校准 Calibration | 1993—1995, 2005                  | 2000      | 1998       |
|                                                                                                | 验证 Validation  | 1990—1992, 1996—2000, 2004, 2010 | 2001—2002 | 1999—2000  |
|                                                                                                |                |                                  |           | 2007, 2009 |
|                                                                                                |                |                                  |           | 2010, 2011 |

2 数据和方法

2.1 数据来源

1990—2012 年日尺度的气象数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),包括降雨量(mm)、最高温度(℃)、最低温度(℃)和日照时数(h),其中模型所需逐日太阳辐射(MJ/m<sup>2</sup>)参考 Almorox<sup>[28]</sup> 等方法推算得到。土壤数据来自世界土壤数据库(<http://www.soil.csd.cn/>),包括土壤类型、剖

面特征、土壤理化性质,即土壤名称、土壤颜色、土壤保水性能及各层土壤质地(石砾、粉粒、黏粒所占百分比);有机碳、全氮、PH、阳离子交换量等。农业生产数据取自中国农业气象站点的观测数据集,包括站点基本信息、水稻生长数据(播种期、出苗期、开花期、成熟期)、水稻单产、水稻灾害数据以及水稻田间灌溉(灌溉时期、灌溉量和灌溉方式)、施肥(施肥时间、施肥种类和施肥量)等栽培管理数据。

## 2.2 方法

### 2.2.1 品种遗传参数率定

首先对四个站点均选取一种代表性品种(种植三年及以上),且以其中无灾害记录的年份校准模型,其余年份进行验证(表1),以保证获得稳定可靠的品种系数。作物遗传参数是品种间特性差异的反映<sup>[29]</sup>,主要表现在作物品种达到一个特定生长阶段所需要的积温、分蘖系数和温度容忍系数。在 CERES-Rice 模型中,每个水稻品种有 8 个遗传参数:P1 为作物基本营养生长期所需要的温时,P2O 为以最大速率发育的关键光合期,P2R 为开始抽穗的光合敏感期,P5 为完成灌浆期所需温时,G1 为潜在穗粒系数,G2 和 G3 为理想情况下的单粒重和分蘖系数,G4 为温度容忍系数。本文利用 DSSAT-GLUE 对各参数通过“试错法”进行反复迭代,最终对其进行标定。采用标准均方根误差(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE)<sup>[30]</sup>对模型的可靠性进行检验,其公式如下:

$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - Q_i)^2}{n}}}{\overline{Q_i}}$$

式中, $S_i$ 为模拟值, $Q_i$ 为实测值, $\overline{Q_i}$ 为实测平均值, $n$ 为样本量。当  $\text{NRMSE} \leq 10\%$  时,表明模拟能力很好; $10\% < \text{NRMSE} \leq 20\%$ ,模拟能力较好; $20\% < \text{NRMSE} \leq 30\%$ ,模拟能力可接受; $\text{NRMSE} > 30\%$ ,表明无法在整体上模拟一季稻物候期和单产情况。

### 2.2.2 历史时期极端高温趋势分析

参照 Chavez 等<sup>[31]</sup>的研究,将极端高温阈值定义为日最高气温  $35^\circ\text{C}$ 。首先对各站点历年一季稻全生育期和高温敏感期(开花到成熟期)内极端高温频次进行统计,进而采用线性趋势估计法<sup>[32]</sup>推断极端高温的年际变化趋势和大小,最后利用 F 检验方法对极端高温变化趋势的稳定性进行检验。

### 2.2.3 极端高温致损率评估

高温致损率是指由极端高温导致的产量损失率,为气象产量和可达产量的比值。首先利用 CERES-Rice 模拟实际气象条件下的产量和无高温热害影响的可达产量,二者之差即为气象产量,进而计算灾损率<sup>[10]</sup>,即:

$$L_R = \frac{y - y'}{y}$$

式中: $L_R$ 为致损率, $y$ 为可达产量, $y'$ 为实际产量。

### 2.2.4 极端高温适应性措施的定量模拟

本文基于 1990—2012 年逐日气象数据,结合校准后的品种遗传参数,在假定土壤条件不变的情况下,利用 CERES-Rice 模拟了不同应对措施的水稻产量。通过调整品种高温忍耐系数(G4)的取值、提前或延迟播种期、增加不同的灌水量和施氮量来定量各个适应性措施对高温热害的缓解作用,具体模拟情景如表 2 所示。

表 2 不同适应性措施的模拟情景

Table 2 The simulation scenarios of different adaptive measures

| 适应性措施<br>Adaptive measures                     | 情景 1<br>Scenario 1 | 情景 2<br>Scenario 2 | 情景 3<br>Scenario 3 | 情景 4<br>Scenario 4 | 情景 5<br>Scenario 5 | 情景 6<br>Scenario 6 |
|------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 品种 Cultivar (G4)                               | 1.00               | 1.05               | 1.10               | 1.15               | 1.20               | 1.25               |
| 播种日期 Sowing date                               | 10 天(提前)           | 5 天(提前)            | 5 天(延后)            | 10 天(延后)           | 15 天(延后)           | 20 天(延后)           |
| 灌溉 Irrigation/cm                               | 4                  | 6                  | 8                  | 10                 | 12                 |                    |
| 施氮肥 Nitrogen application/(kg/hm <sup>2</sup> ) | 40                 | 60                 | 80                 | 100                | 120                |                    |

### 3 结果与分析

#### 3.1 一季稻品种参数

本文对 4 个一季稻站点的主栽品种汕优 63、金优 77、甘优 22 和川香优 6 号的遗传参数进行逐一率定。采用开花日期 (ADAT)、成熟日期 (MDAT) 和单产 (HWAM) 的模拟值与观测值之间的标准化均方根误差 (NRMSE) 评估模型的可靠性。由表 3 可见,一季稻开花期、成熟期和产量的模拟值与实测值的 NRMSE 分别为 7.35%—13.22%,6.67%—9.52% 和 6.12%—8.05%,除桑植站 ADAT 的误差为 13.22% 外,其余各参数的误差均<10%。结果表明,CERES-Rice 一经校准,就能够模拟不同天气和管理下水稻的物候和产量,具体品种参数见表 4。

表 3 各站点模拟的开花日期 (ADAT)、成熟日期 (MDAT) 和产量 (HWAM) 的标准均方根误差

Table 3 NRMSE for the simulated anthesis day (ADAT), maturity day (MDAT) and yield (HWAM) for different stations

| 站点<br>Stations | 开花日期<br>Anthesis day (ADAT) | 成熟日期<br>Maturity day (MDAT) | 产量<br>Yield (HWAM) |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 靖州             | 8.38%                       | 9.52%                       | 7.23%              |
| 怀化             | 7.35%                       | 6.67%                       | 8.05%              |
| 古丈             | 8.27%                       | 8.82%                       | 6.12%              |
| 桑植             | 13.22%                      | 7.92%                       | 7.75%              |

表 4 各站点主栽品种的遗传参数

Table 4 The genetic coefficients of main cultivars for each station

| 站点<br>Stations | 品种<br>Cultivar | 营养生长<br>所需温时<br>P1 | 光合<br>敏感期<br>P2R | 灌浆所<br>需温时<br>P5 | 关键<br>光合期<br>P20 | 潜在<br>穗粒数<br>G1 | 单粒重<br>G2 | 分蘖系数<br>G3 | 温度容<br>忍系数<br>G4 |
|----------------|----------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------|------------|------------------|
| 靖州             | 汕优 63          | 299.4              | 173.7            | 450.6            | 10.59            | 50.6            | 0.023     | 0.83       | 1.05             |
| 怀化             | 金优 77          | 299.9              | 173.0            | 410.2            | 12.35            | 63.5            | 0.023     | 0.92       | 1.15             |
| 古丈             | 甘优 22          | 340.5              | 153.3            | 486.0            | 10.94            | 77.8            | 0.021     | 0.62       | 1.08             |
| 桑植             | 川香优 6 号        | 307.9              | 77.47            | 498.0            | 11.04            | 74.6            | 0.03      | 0.56       | 1.21             |

P1:营养生长所需温时,Time period during vegetative phase;P2R:光合敏感期,Photosynthetic sensitive period;P5:灌浆所需温时,Time period from beginning of grain filling to physiological maturity;P20:关键光合期,Critical photoperiod;G1:潜在穗粒数,Potential spikelet number coefficient;G2:单粒重,Single grain weight;G3:分蘖系数,Tillering coefficient;G4:温度容忍系数,Temperature tolerance coefficient

#### 3.2 湖南省一季稻极端高温风险

##### 3.2.1 历史极端高温变化趋势

如图 2 所示,除靖州站 1991、1997 年、怀化站 1993 年外,其余各站每年均检测到了极端高温天气,且关键生育期的高温天数占全生育期极端高温总天数的 60% 以上。平均极端高温天数古丈最高 (22.4 天),其次为怀化 (13.7 天) 和桑植 (18.2 天),靖州最低 (6.2 天)。以上结果表明,研究区各站点均存在较高的高温热害风险。

其次,所有站点的极端高温天气均呈显著增加的趋势。虽然靖州站极端高温天数较低,但上升趋势最明显 ( $k=0.68, p<0.01$ )。怀化站高温胁迫亦显著增加,尤其是高温敏感期内的变化 ( $k=0.55, p<0.01$ ),且在研究时段的前期、中期和末期均出现较高的峰值,表明怀化站的极端高温风险持续较高。古丈站极端温度年均天数一直处于较高水平,但增加趋势不太显著。桑植站呈现波动上升的态势 ( $k=0.33, p<0.05$ ),出现了多个极端高温天数峰值。

##### 3.2.2 极端高温致损率

一季稻极端高温致损率与其高温热害水平有明显的一致性 (图 2 和图 3)。极端高温强度相对较低的靖州站热害致损率最低,除 2010 和 2011 年分别达到了 6.2% 和 7.1%,其余年份灾损率均<4%。怀化站平均致

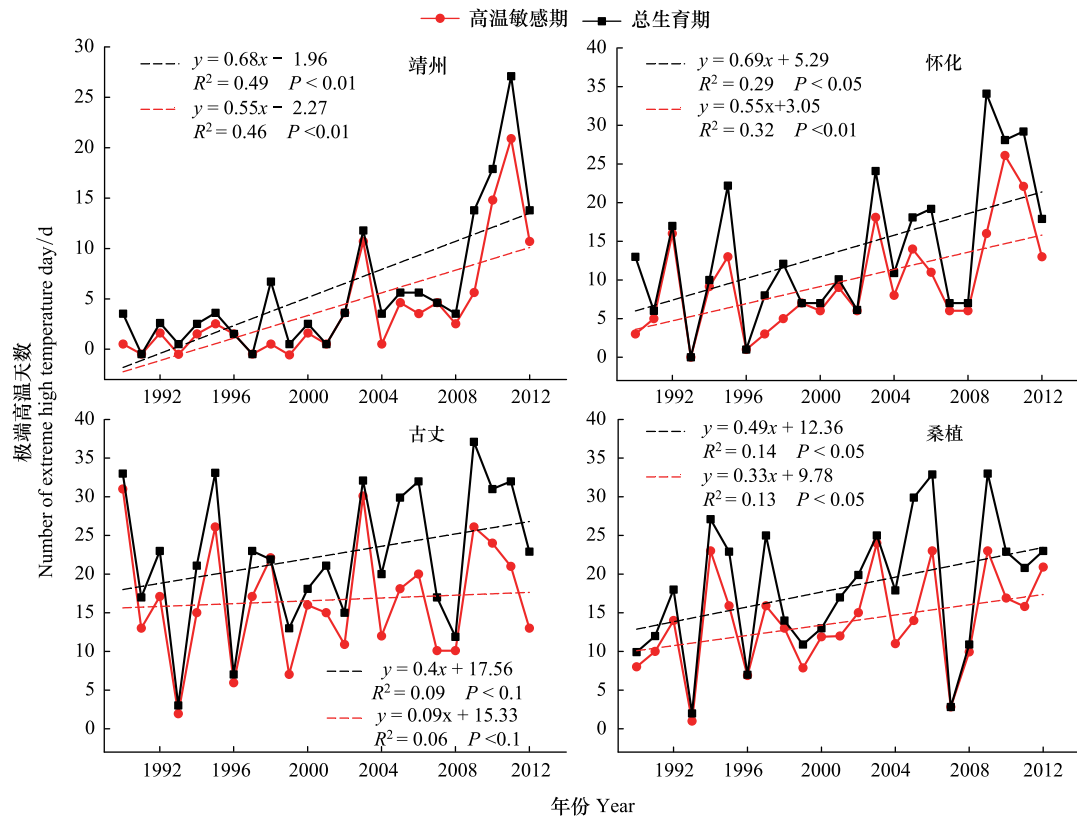


图2 1990—2012年湖南省一季稻生育期极端高温变化趋势

Fig.2 Trends of extreme high temperature during single rice growing season in Hunan Province from 1990 to 2012

损率为7.5%,而典型极端高温年份(2009—2011)的减产率达到了10%以上。桑植站灾损率为8.2%,在高温强度较大的1992、2003、2006和2009年,产量分别损失了8.6%,12.5%,11.2%和13.1%。古丈站产量损失最为突出,多年平均灾损率为10.4%,典型年份高达23.3%(2009),进一步表明古丈站的极端高温风险水平较高。结果显示极端高温确实对一季稻生产造成了严重的威胁,且在最近几年的灾损率均显著升高。随着全球变暖导致的极端高温事件的增加,水稻生产将面临日趋严重的减产风险。

### 3.3 极端高温适应性措施

#### 3.3.1 不同高温抗性品种对高温热害的缓解作用

由图4可见,种植高温忍耐系数( $G_4$ )低于1.05(实际品种高温忍耐系数)品种,均为减产效应,反之产量则会增加。当 $7^\circ\text{C} \leq I$ (高温强度) $\leq 12^\circ\text{C}$ 时,种植 $G_4$ 为1.25的品种产量可提高29.8%,但当 $I > 12^\circ\text{C}$ 时,各品种的产量无明显差异,表明耐高温品种一定程度上可降低高温热害的损失,但是强度过高的热害事件会使品种失去其高温抗性。

#### 3.3.2 调节播种期对高温热害的缓解作用

调节种植日期对一季稻产量影响显著,导致-25—20%的产量波动(图5)。提前种植可有效缓解高温热

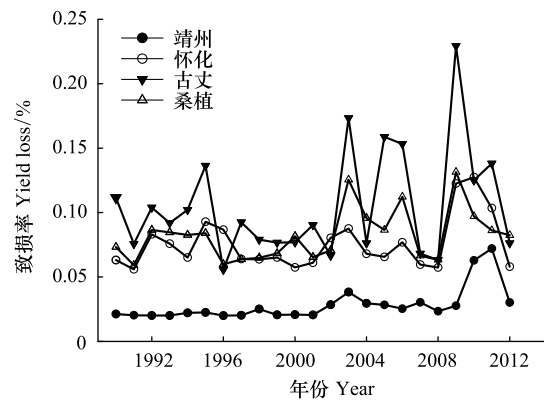


图3 湖南省一季稻极端高温致损率

Fig.3 The yield loss of the single rice caused by extreme high temperature in Hunan Province

害的影响,而延迟播种会导致减产,推迟天数越多,产量损失越大。提前 10 天或 5 天播种靖州站的产量最大可提高 10.3%,怀化站两者相差不大,而古丈站产量最大可增产 17.8%,表明对于极端高温严重的地区,提前播种的避灾效果更明显。调节播期对桑植站的影响略有不同,提早播种在会加剧损失,而延迟 10 天或 15 天最大可增产 10% 左右,即播种期调控策略应充分考虑区域条件的差异,因“地”而异。

### 3.3.3 灌溉对高温热害的缓解作用

极端高温期间进行适量的灌溉是缓解高温热害的一种有效手段(图 6),但各灌溉情景在不同站点的表现有所差异。靖州和怀化站灌溉的避热效果与灌溉量成正比,在极端高温期间灌水 12 cm 产量均可提高 5—7%。古丈和桑植站灌溉量的贡献“两端低,中间高”,

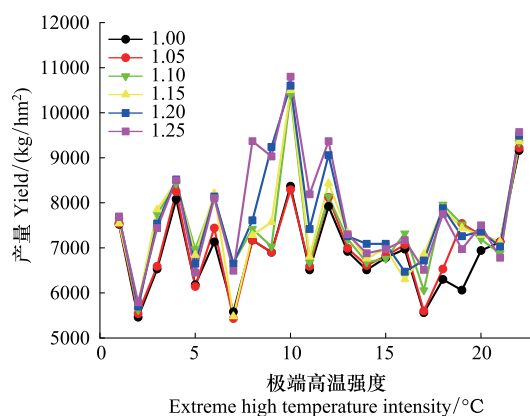


图 4 不同高温忍耐系数品种的产量与极端高温强度的关系

Fig.4 The relationship between yield of different temperature tolerance cultivars and extreme high temperate intensities

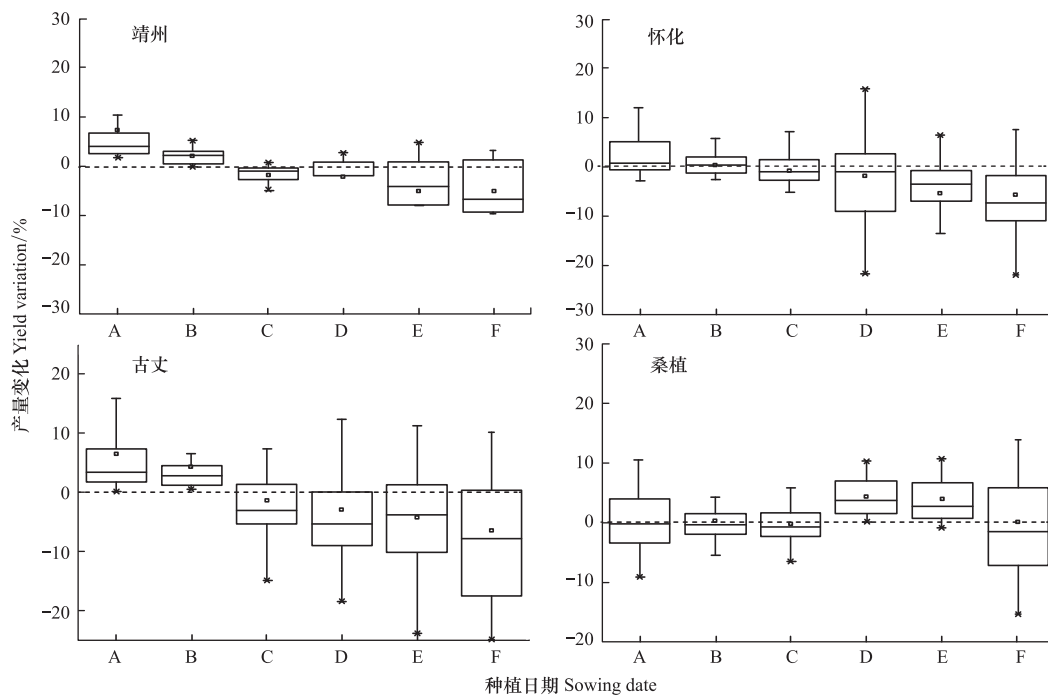


图 5 调整播种期对产量的影响

Fig.5 The effect of adjusting sowing date on yield

A, B, C, D, E, F 分别为提前 10 天、5 天,延后 5 天、10 天、15 天、20 天播种

即灌浅水和灌深水均无法达到缓解极端高温的作用,6—8 cm 的灌水可带来>5%的产量增长。虽然灌溉可使产量提高 1—8%,但极端高温期间的灌水量存在一定的阈值,额外灌溉可能导致产量损失。

### 3.3.4 施氮肥对高温热害的缓解作用

极端高温期间增施氮肥的贡献大于更新品种、调节播期和增加灌溉(图 7)。靖州和怀化站产量增长与施肥量呈正比。在最低氮肥增施量(40 kg/hm<sup>2</sup>)的情景下,增产幅度>4%。当增施量达 120 kg/hm<sup>2</sup> 时,产量提高了 15% 以上。考虑到实验的一致性,虽未设置高于 120 kg/hm<sup>2</sup> 的情景来探究这两个站点的施氮量阈值,但模拟结果显示,120 kg/hm<sup>2</sup> 的增施量已经能够达到较好的缓解极端高温的作用。古丈站各施肥情景下产量可增加 3—13%,与上述两站点相比,该站施氮量阈值偏低,当增施 100 kg/hm<sup>2</sup> 的氮肥时,产量已不再显著增

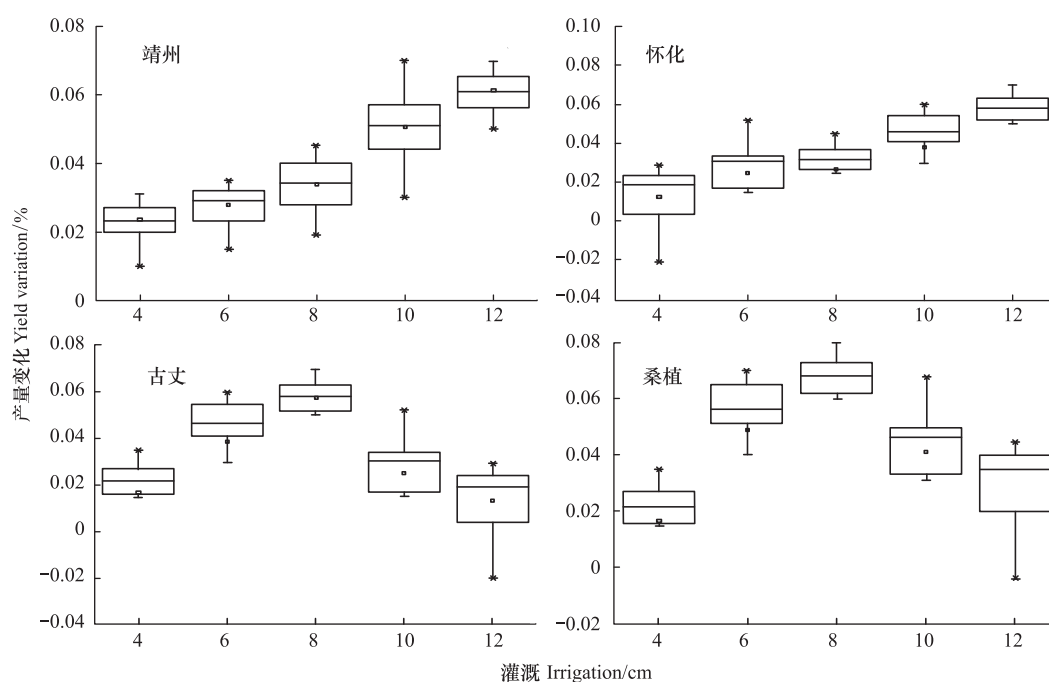


图6 极端高温期间不同灌溉量对产量的影响

Fig.6 The effect of different irrigation amounts on yield during extreme high temperature period

A, B, C, D, E:灌溉 4cm、6cm、8cm、10cm、12cm

加,其中  $80 \text{ kg/hm}^2$  左右的氮肥带来的产量波动较小,效果最佳。桑植站增施氮肥的可使产量提升 5—10%,  $100 \text{ kg/hm}^2$  的施氮量可有效缓解极端高温的影响。极端高温期间增施氮肥对产量的贡献为 2—20%,其中  $80—100 \text{ kg/hm}^2$  的施氮量具有良好的避热增产效果。

#### 4 讨论

湖南省纬度较低,温度相对较高,水稻高温热害频发,随着气候变暖的加剧,增强趋势突出,与长江流域高温热害的变化趋势相印证<sup>[33]</sup>。极端高温对一季稻产量影响较大,典型高温年份致损率高达 23.3%,与张倩等<sup>[14]</sup>基于 WOFOST 模型对整个长江中下游地区高温热害损失的评估结果(30%)相差不大。DSSAT 模型已经在许多国家得到广泛的验证<sup>[26]</sup>,本文考虑到品种差异对产量的影响,选用 4 个代表性品种率定了各地区的品种遗传参数。结果表明 CERES 模型一经校准,即可很好地捕捉不同天气和管理条件下的水稻生育期和产量,但本研究在模拟过程中假定土壤属性不变,并且未考虑病虫害以及  $\text{CO}_2$  等温室气体对作物生长的影响,对水稻的模拟存在一定的不确定性。

虽然目前基于作物模型探究极端高温适应性措施的研究较少,但田间实验结果也可对适应措施的可行性进行检验。赵海燕<sup>[34]</sup>基于 CERES-Rice 分析了长江中下游水稻生产应对气候变化的策略,表明早稻提前 15 天播种产量最大可提高 16.6%,适量增加品种耐热系数(G4)的值,最高可增产 20%。赵决建<sup>[35]</sup>在 2003 年长江中下游极端高温期间调查了施肥对水稻结实率的影响,发现  $80—160 \text{ kg/hm}^2$  的施氮量抗高温能力最强。以上研究皆佐证了本文的研究结果。宋忠华等<sup>[36]</sup>和张彬等<sup>[37]</sup>指出灌溉量越大( $>10 \text{ cm}$ ),效果越显著。但我们发现极端高温期间灌水量存在阈值,超额灌溉反而会导致减产,一方面归因于研究区和研究时段的差异,另外前人的研究是基于田间实验,未设置更多的试验来探讨灌溉量的阈值。虽然增加水肥对产量的贡献显著,但绿色发展是农业现代化的道路,如何以最低的投入和环境成本生产最多的粮食是当前努力的方向。相关研究表明,密集型农业通过优化灌溉时间、灌溉量、灌溉水源<sup>[38]</sup>以及种植系统<sup>[39]</sup>可有效提高作物的水分利用率,实现产量、水分生产力和环境保护之间的平衡。整体改善土壤—作物系统<sup>[40]</sup>、精细管理田块氮肥<sup>[41]</sup>、

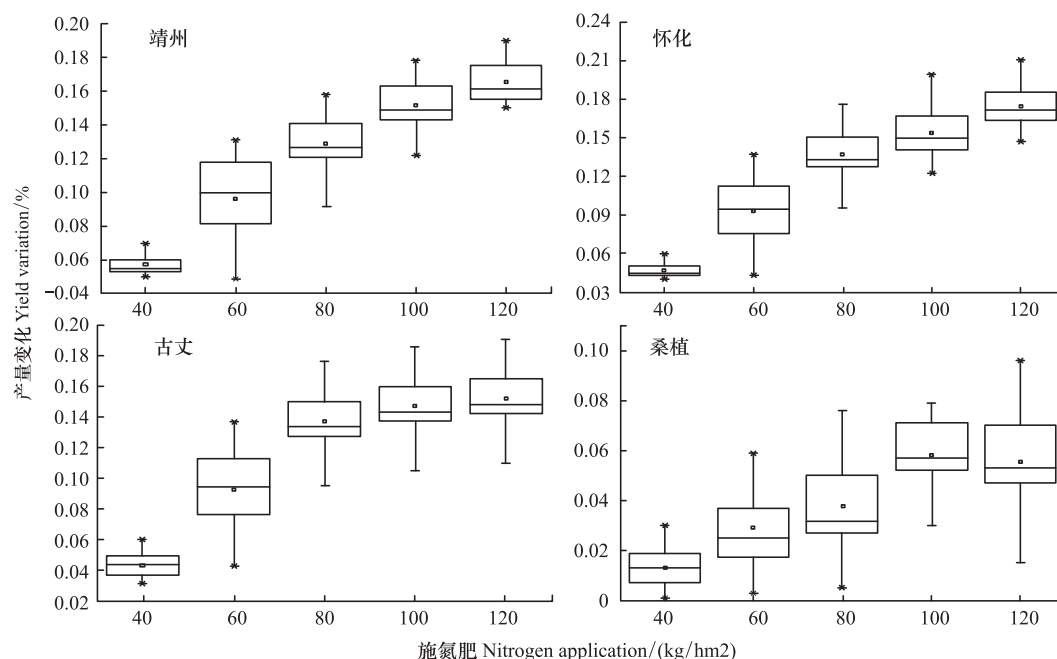


图7 极端高温期间增施氮肥对产量的影响

Fig.7 The effect of nitrogen application on yield during extreme high temperature period

A, B, C, D, E:增施 40 kg/hm<sup>2</sup>、60 kg/hm<sup>2</sup>、80 kg/hm<sup>2</sup>、100 kg/hm<sup>2</sup>、120 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥

高效利用作物残茬、与豆类作物互作<sup>[42]</sup>是我国农业系统实现丰产、高效、低污染的有效途径。实际上作物生长受多种管理措施的交错影响,如过量灌溉可能导致氮流失、不同熟性品种的最佳种植日期差异显著,未来研究有必要关注多种管理措施的综合效果。此外,气候变化是当前不变的主题,相比历史情况,人们更关心未来的极端高温风险以及可采取的缓解措施。因此,结合未来情景的定量分析将是进一步研究的方向。

## 5 结论

本文在分析湖南省一季稻站点 1990—2012 间生育期内极端高温年际变化的基础上,利用 CERES-Rice 模型评估了历史时期高温热害对一季稻产量致损率,并定制了缓解高温热害的最佳适应性措施,得到如下主要结论:

(1) 湖南省一季稻育期内均检测到了频繁的极端高温天气,峰值集中在研究时段的末期且在 2000 年以后显著增加,极端高温灾损率古丈>桑植>怀化>靖州,分别为 10.4%、8.2%、7.5%和 4%。高温热害对一季稻造成了不同程度的减产,随着气候变暖导致的极端高温事件增加,水稻面临着持续增大的减产风险。

(2) 选种耐高温的品种有利于缓解极端高温的影响,但当高温强度过高时,品种会失去其高温抗性。调节播种期引起-25—20%的产量波动,提前 10 天或 5 天种植可有效缓解高温热害的影响。灌溉对产量的贡献为 1%—8%,其中 6—8 cm 的灌水量效果最佳。极端高温期间增施氮肥的效果稳定且显著,平均增产 2%—20%,80—100 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量能带来较为理想的避热增产效果。

## 参考文献 (References):

- [1] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, Haddad L, Lawrence D, Muir J F, Pretty J, Robinson S, Thomas S M, Toulmin C. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 2010, 327(5967): 812-818.
- [2] Tilman D, Balzer C, Hill J, Befort B L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [3] Seck P A, Diagne A, Mohanty S, Wopereis M C S. Crops that feed the world 7: rice. *Food Security*, 2012, 4(1): 7-24.

- [4] Cheajesadagul P, Arnaudguilhem C, Shiowatana J, Siripinyanond A, Szpunar J. Discrimination of geographical origin of rice based on multi-element fingerprinting by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 3504-3509.
- [5] Wang P, Zhang Z, Song X, Chen Y, Wei X, Shi P J, Tao F L. Temperature variations and rice yields in China: historical contributions and future trends. *Climatic Change*, 2014, 124(4): 777-789.
- [6] Zhang Z, Chen Y, Wang C Z, Wang P, Tao F L. Future extreme temperature and its impact on rice yield in China. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(14): 4814-4827.
- [7] IPCC. Summary for policymakers//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [8] FAOSTAT database 2014. [2017-03-11]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- [9] Ray D K, Ramankutty N, Mueller N D, West P C, Foley J A. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nature Communications*, 2012, 3: 1293.
- [10] 何亮, 吴门新, 侯英雨, 赵刚, 靳宁, 于强. 基于极值概率分布函数的中国早稻高温热害时空分布统计特征. *中国生态农业学报*, 2018, 26(11): 1601-1612.
- [11] 杨秉臻, 金涛, 陆建飞. 长江中下游地区近 20 年水稻生产与优势的变化. *江苏农业科学*, 2018, 46(19): 62-67.
- [12] 刘文茹, 陈国庆, 曲春红, 居辉, 刘勤. RCP 情景下长江中下游麦稻二熟制气候生产潜力变化特征研究. *生态学报*, 2018, 38(1): 156-166.
- [13] 王琛智, 张朝, 张静, 陶福禄, 陈一, 丁浒. 湖南省地形因素对水稻生产的影响. *地理学报*, 2018, 73(9): 1792-1808.
- [14] 张倩, 赵艳霞, 王春乙. 长江中下游地区高温热害对水稻的影响. *灾害学*, 2011, 26(4): 57-62.
- [15] 郭安红, 何亮, 韩丽娟, 张蕾. 早稻高温热害强度指数构建及气候危险性评价. *自然灾害学报*, 2018, 27(5): 96-106.
- [16] 姚凤梅, 张佳华. 1981—2000 年水稻生长季相对极端高温事件及其气候风险的变化. *自然灾害学报*, 2009, 18(4): 37-42.
- [17] 杨太明, 陈金华. 江淮之间夏季高温热害对水稻生长的影响. *安徽农业科学*, 2007, 35(27): 8530-8531.
- [18] 杨舒畅, 申双和, 陶苏林. 长江中下游地区一季稻高温热害时空变化及其风险评估. *自然灾害学报*, 2016, 25(2): 78-85.
- [19] 王主玉. 未来气候变化对长江中下游稻区水稻生产的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [20] 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. *中国农业气象*, 2014, 35(2): 206-213.
- [21] Bai H Z, Tao F L, Xiao D P, Liu F S, Zhang H. Attribution of yield change for rice-wheat rotation system in China to climate change, cultivars and agronomic management in the past three decades. *Climatic Change*, 2016, 135(3/4): 539-553.
- [22] Liu Y J, Chen Q M, Ge Q S, Dai J H, Qin Y, Zou X T, Chen J. Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 518-526.
- [23] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [24] Vashisht B B, Jalota S K. Impact of temperature variability and management interventions on productivity of wheat. *Journal of Agrometeorology*, 2018, 20(1): 11-15.
- [25] Braga R P, Cardoso M J, Coelho J P. Crop model based decision support for maize (*Zea mays* L.) silage production in Portugal. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(3): 224-233.
- [26] Zhang H, Tao F L, Xiao D P, Shi W J, Liu F S, Zhang S, Liu Y J, Wang M, Bai H Z. Contributions of climate, varieties, and agronomic management to rice yield change in the past three decades in China. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10(2): 315-327.
- [27] 黎用朝, 刘三雄, 曾翔, 黄志才, 吴云天, 方宝华, 闵军. 湖南水稻生产概况、发展趋势及对策探讨. *湖南农业科学*, 2008, (2): 129-133.
- [28] Almorox J, Hontoria C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(9/10): 1529-1535.
- [29] Tao F L, Yokozawa M, Zhang Z. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: a new process-based model development, optimization, and uncertainties analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(5): 831-850.
- [30] 刘文茹, 陈国庆, 刘恩科, 居辉, 刘勤. 基于 DSSAT 模型的长江中下游冬小麦潜在产量模拟研究. *生态学报*, 2018, 38(9): 3219-3229.
- [31] Chavez E, Conway G, Ghil M, Sadler M. An end-to-end assessment of extreme weather impacts on food security. *Nature Climate Change*, 2015, 5(11): 997-1001.
- [32] 李洋, 王玉辉, 吕晓敏, 叶永昌, 汲玉河. 1961-2013 年东北三省极端气候事件时空格局及变化. *资源科学*, 2015, 37(12): 2501-2513.
- [33] 张蕾, 侯英雨, 杨冰韵, 黄大鹏. 长江流域一季稻高温热害分布特征及风险分析. *自然灾害学报*, 2018, 27(2): 107-115.
- [34] 赵海燕. 气候变化对长江中下游地区水稻生产的影响及适应性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006.

- [35] 赵决建. 氮磷钾施用量及比例对水稻抗高温热害能力的影响. 土壤肥料, 2005, (5): 13-16.
- [36] 宋忠华, 庞冰, 刘厚敖. 灌水深度对杂交稻生产中高温危害的缓解效果初探. 杂交水稻, 2006, 21(2): 72-73.
- [37] 张彬, 郑建初, 黄山, 田云录, 彭兰, 卞新民, 张卫建. 抽穗期不同灌水深度下水稻群体与大气的温度差异. 应用生态学报, 2008, 19(1): 87-92.
- [38] He G, Cui Z L, Ying H, Zheng H F, Wang Z H, Zhang F S. Managing the trade-offs among yield increase, water resources inputs and greenhouse gas emissions in irrigated wheat production systems. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 567-574.
- [39] Meng Q F, Wang H F, Yan P, Pan J X, Lu D J, Cui Z L, Zhang F S, Chen X P. Designing a new cropping system for high productivity and sustainable water usage under climate change. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41587.
- [40] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, Vitousek P, Zhao M, Ma W Q, Wang Z L, Zhang W J, Yan X Y, Yang J C, Deng X P, Gao Q, Zhang Q, Guo S W, Ren J, Li S Q, Ye Y L, Wang Z H, Huang J L, Tang Q Y, Sun Y X, Peng X L, Zhang J W, He M R, Zhu Y J, Xue J Q, Wang G L, Wu L, An N, Wu L Q, Ma L, Zhang W F, Zhang F S. Producing more grain with lower environmental costs. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.
- [41] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Zhong X H, Zou Y B, Yang J C, Wang G H, Liu Y Y, Hu R F, Tang Q Y, Gui K H, Zhang F S, Dobermann A. Improving nitrogen fertilization in rice by site specific N management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(3): 649-656.
- [42] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J, Cui Z L, Yin B, Christie P, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.