

谢志清, 杜银, 高苹, 等. 2013. 江淮流域水稻高温热害灾损变化及应对策略. 气象, 39(6): 774-781.

江淮流域水稻高温热害灾损变化及应对策略^{*1}

谢志清¹ 杜 银² 高 苹³ 曾 燕¹

1 江苏省气候中心, 南京 210008

2 南京信息工程大学气象灾害教育部共建重点实验室, 南京 210044

3 江苏省气象台, 南京 210008

提 要: 构建基于 Logistic 模型的规范化可累计高温热害综合指数, 研究了江淮流域高温热害与单季稻产量损失的时空对应关系, 发现江淮流域西北部为单季稻高温热害灾损关键区, 高温热害平均减产率从 20 世纪 70 年代的 8.9% 上升到 21 世纪的 17.9%, 花期处在高温集中时段是单季稻减产的主要原因。江淮流域单季稻生育关键期高温热害出现年代际波动, 20 世纪 60 年代高温热害最强, 21 世纪初覆盖范围最广。高温热害覆盖面积比例在 1971 年发生突变后迅速上升, 到 21 世纪初超过 63.6%。每年 7 月 11 日至 8 月 15 日为江淮流域高温集中时段, 高温出现比例超过 20%。20 世纪 70 年代以来高温集中时段的热害强度以增强为主, 江淮东南部趋势显著, 但通过采用晚熟品种和推迟播期, 江淮东南部单季稻花期成功避开高温集中时段。综合考虑气温稳定通过 20℃ 终日的气候平均值、高温热害变化和气候变暖背景下热量资源的改善, 借鉴江淮东南部成功经验, 建议全流域推广中晚熟品种, 自北向南播种期延迟到 5 月上、中、下旬, 花期安排在 8 月下旬至 9 月上旬, 避开高温同时能保证单季稻生育关键期处在 20℃ 以上安全生长期内。

关键词: 高温热害, 江淮流域, 单季稻

中图分类号: S42

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.06.014

Impact of High-Temperature on Single Cropping Rice over Yangtze-Huaihe River Valley and Response Measures

XIE Zhiqing¹ DU Yin² GAO Ping³ ZENG Yan¹

1 Jiangsu Climate Centre, Nanjing 210008

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of the Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

Abstract: On the basis of Logistic model, a normalized comprehensive heat injury index that can be accumulated is applied in studying the high temperature events and assessing their impacts on single rice yield. The results show that the northern-west part of Yangtze-Huaihe River Valley is the critical zone of rice yield loss due to heat injury through the analysis of the relationship between the heat injury index and rice yield loss. In this region, the average loss rate increases notably from 8.9% in 1970s to 17.9% in 2000s with the expanded loss areas. Rice flowering stage concentrates in the period of high temperature, which is the main cause for rice yield loss. Heat injury indexes and affected areas of high temperature reach their maxima respectively in 1960s and 2000s. An abrupt change occurs in 1971 for high temperature covered proportion. Since then high temperature covered proportion increases continuously and gets to 63.6% in

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106021)和中国气象局气候变化专项(CCSF201222)和江苏省自然科学基金项目(BK2011831)共同资助

2012 年 3 月 25 日收稿; 2012 年 8 月 8 日收修定稿

第一作者: 谢志清, 主要从事区域气候变化及其影响研究. Email: xiezhiqing9896@163.com

通信作者: 高苹, 主要从事农业气象研究. Email: gaoping5268@126.com

2000s. High temperature events concentrates in the period of 11 July and 15 August every year with proportions of more than 20%. With considering comprehensively the end dates of stable temperature above 20°C, concentrated period of high temperature, climate change and the successful experience of avoiding high temperature in the southeastern part of Yangtze-Huaihe River Valley, we suggest that late-maturing rice be promoted and its sowing date be delayed to May. These measures can ensure the flowering stage to occur in the period between late August and early September, avoiding the high temperature damages.

Key words: high-temperature heat damage, Yangtze-Huaihe River Valley, single cropping rice

引言

江淮流域是中国重要的水稻种植区,2009年水稻播种面积和产量分别占全国的15.5%和16.9%(陈晓华等,2009;马建堂等,2010)。在《全国新增1000亿斤粮食生产能力规划(2009—2020)》中将江淮流域确定为水稻增产核心区之一。受耕地面积下降和双季稻大面积改种单季稻影响,2009年水稻播种面积与1978年相比下降了12.6%(陈晓华等,2009;马建堂等,2010),水稻增产将主要依靠单位面积产量的提高,但在同等气象灾害条件下单产越高产量损失越大(高素华等,2009)。高温热害作为影响江淮流域水稻生产的主要气象灾害之一(高素华等,2009;许吟隆等,2005;曾凯等,2011),在全球变暖背景下,时空分布正在发生改变,高温日数和高温日平均最高气温呈上升趋势(史军等,2009;朱周平等,2010;刘梅等,2011;杨秋明等,2011)。20世纪90年代以来高温热害导致江淮流域水稻大面积减产的频率增加,产量波动幅度变大,特别是2003年水稻花期遭遇持续高温,造成约13.3万 hm^2 水稻减产30%以上(高素华等,2009)。气候变暖带来的高温热害变化正成为制约水稻增产的重要因素,在挖掘水稻增产潜力的同时,研究水稻高温热害灾损变化和应对策略十分重要。

高温热害对水稻的危害程度由其持续时间和强度共同决定,以往的研究将二者作为独立影响因子评估其对水稻的影响(高素华等,2009;Sun et al, 2011),着重分析开花—灌浆期高温持续时间和强度与结实率和千粒重的关系,研究高温热害影响产量的机理(赵海燕等,2006;Cao et al, 2009;Fu et al, 2008;童志婷等,2008;Kim et al, 2011;田小海等,2010),对高温热害大尺度时空变化规律有了深入认识(Tao et al, 2008),并从省级行政区域尺度上提出高温热害防御措施(高素华等,2009)。由于缺少考虑高温强度和持续时间的规范化可累计综合指标,对

高温热害与水稻产量损失的时空对应关系研究较少。对江淮流域单季稻花期高温热害强度无明显变化背景下(Sun et al, 2011),高温热害导致水稻减产加剧的原因认识不足(高素华等,2009)。本文将在构建水稻高温热害综合指数基础上,研究高温热害与单季稻产量损失的时空对应关系,找出水稻高温热害灾损关键区。探寻在气候变暖以及双季稻大面积改种单季稻背景下水稻高温热害的应对策略。

1 资料和方法

1.1 资料

研究中将江淮流域定义为安徽省、江苏省和上海市,以种植单季稻为主。每年7月下旬至9月下旬是江淮流域单季稻拔节—乳熟关键期,易遭受高温热害影响。所用数据资料如下。

农业统计资料:1961—2010年江淮流域分县逐年单季稻产量和播种面积数据,1991—2010年江淮流域单季稻生育期统计数据,1980—2010年江苏省农业气象观测数据;

气象资料:江淮流域150个地面气象观测站1961—2010年逐日平均气温、最高气温数据;

气象灾害统计资料:江苏省和安徽省1971—2010年气象灾害历史灾情统计数据,《中国气象灾害大典(江苏卷)》记录的高温热害灾情资料。

1.2 方法

(1) 水稻高温热害综合指数

水稻抽穗开花期适宜温度为24~29°C,超过此范围,结实率随温度上升呈S型递减(柳新伟等,2004),35°C以上高温持续胁迫1、3和5d,水稻花粉萌发率分别下降42.2%、60.9%和71.5%,也出现非线性递减特征(谢晓金等,2009;刘伟昌等,2009)。因此,高温热害对水稻产量的影响可用Logistic方程定量描述。利用常规气象站的气温数据时间序列

长、空间覆盖面广的特点,可评估大范围高温热害对水稻生产的影响等优势(高素华等,2009;Sun et al, 2011;赵海燕等,2009;Tao et al,2008),以高温持续日数和危害热积温两个影响水稻产量的最重要因子为基础(高素华等,2009;王钰,2010),构建基于气象站气温数据和 Logistic 曲线方程的水稻高温热害综合指数如下:

$$index = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + \alpha e^{-\beta H_i}} \times \frac{1}{1 + \gamma e^{-\lambda d_i}} \right) \quad (1)$$

式中, H_i 为第 i 次高温过程日最高气温超过 35°C 部分之和,称为危害热积温; d_i 为第 i 次高温过程持续日数; n 为高温过程总次数; $\alpha, \beta, \gamma, \lambda$ 为 Logistic 曲线方程系数。Logistic 规范化目标转换函数的常用表达式为:

$$y = \frac{1}{1 + a e^{-bx}} \quad (2)$$

其取值区间为 $(0, 1)$, 每次高温过程的各影响因子均可通过式(2)转换成 $(0, 1)$ 区间内的无量纲数,因此,式(1)是基于 Logistic 模型的规范化可累计的高温热害综合指数。将气象站某年水稻生育关键期所有高温过程的热害指数累加后可得到该站该年水稻生育关键期的高温热害综合指数。

受试验和技术条件限制,通过大规模观测试验来确定不同地区水稻高温热害 Logistic 模型参数非常困难。需要寻找简单实用的 Logistic 模型参数计算方法。Logistic 曲线式(2)是一个拉长的“S”形累积增长曲线,定义其一阶导数为速度函数。当速度

函数的二阶导数值为 0 时, Logistic 曲线方程的增长速率出现拐点,此时有:

$$x_l = \frac{\ln a - 1.317}{b}, \quad x_r = \frac{\ln a + 1.317}{b} \quad (3)$$

两个速度拐点将 Logistic 曲线划为渐增期 $(0 \sim x_l)$ 、快增期 $(x_l \sim x_r)$ 和缓增期 $(x_r \sim +\infty)$ 3 个区间。将气象站所在区县水稻产量“轻—中—重”损失对应的高温持续时间或强度临界值与 Logistic 模型两个速度拐点联系起来,根据式(3)可计算出 Logistic 模型参数。以江淮流域北部为例,根据高素华等(2009)和王钰(2010)的研究,当最高气温超过 35°C 并持续 $3 \sim 5$ d 且危害热积温低于 15.3°C 时,水稻出现轻度危害;当高温持续 $6 \sim 8$ d 且危害热积温在 $[15.3^\circ\text{C}, 30.3^\circ\text{C}]$ 之间时,水稻出现中度危害;当高温持续日数超过 8 d 且危害热积温大于 30.3°C 时,水稻出现重度危害。以高温持续日数两个临界值 5 和 8 d 对应 Logistic 曲线的 2 个速度拐点 x_l 和 x_r , 依据式(3)原理,可计算出参数 α 和 β 。同理,将危害热积温两个临界值 15.3 和 30.3°C 分别对应 Logistic 曲线的 2 个速度拐点 x_l 和 x_r , 可算出参数 γ 和 λ 。根据安徽、江苏和上海水稻高温热害的统计特征,将江淮流域分成长江以南和以北两个区,分别计算相应的高温热害指数方程参数,见表 1。各区参数适用于该区内所有气象站历年水稻生育关键期逐次高温过程热害指数的计算。

表 1 以危害热积温、持续日数和高温热害综合指数为判据的水稻高温热害强度等级划分

Table 1 Grades of rice heating harm divided by the harmfully hot accumulated temperature, days and heat injury index

| 区域 | 类型 | 危害热积温/ $^\circ\text{C}$ | 持续日数/d | 高温热害综合指数 | α | β | γ | λ |
|------|----|-------------------------|------------------|------------------------|----------|---------|----------|-----------|
| 长江以南 | 轻度 | $0.3 \leq Ha < 15.3^*$ | $3 \leq D < 6^*$ | $0 < index \leq 0.1$ | 54.799 | 0.176 | 724.151 | 0.878 |
| | 中度 | $15.3 \leq Ha < 30.3^*$ | $6 \leq D < 9^*$ | $0.1 < index \leq 0.6$ | | | | |
| | 重度 | $30.3 \leq Ha$ | $9 \leq D$ | $0.6 < index$ | | | | |
| 长江以北 | 轻度 | $0.3 \leq Ha < 15.3^*$ | $3 \leq D < 5^*$ | $0 < index \leq 0.1$ | 54.799 | 0.176 | 300.967 | 0.878 |
| | 中度 | $15.3 \leq Ha < 30.3^*$ | $5 \leq D < 8^*$ | $0.1 < index \leq 0.6$ | | | | |
| | 重度 | $30.3 \leq Ha$ | $8 \leq D$ | $0.6 < index$ | | | | |

注:数据来源于《水稻热害评价方法(征求意见稿)》^①、高素华等(2009)和王钰(2010)的研究成果,“*”表示速度变化拐点。

(2) 水稻减产率计算方法

以减产率 $\geq 3\%$ 作为高温热害是否造成水稻产量损失的依据(高素华等,2009)。减产率计算方法如下:

$$Y_d = \frac{Y - Y_t}{Y_t} \times 100\% \quad (Y_t < Y) \quad (4)$$

式中, Y_d 为减产率; Y 为实际产量; Y_t 为趋势产量,是当年之前的 5 年平均产量。挑选单季稻生育关键期有高温出现且单产减产率 $\geq 3\%$ 的年份作为水稻高温热害灾损年份,以排除如日照不足和阴雨低温等非高温热害造成水稻产量损失的年份。

① 吕厚荃,张艳红,冯明,等. 2011. 水稻热害评价方法. 中华人民共和国国家标准(征求意见稿).

(3) 基于 Chow 检验时间序列转折性分析

将区域高温热害综合指数或高温热害覆盖面积看作有序时间序列 Y , 以线性模型将时间序列表示成相邻的线段簇, 那么可以用一组线性函数描述时间序列 Y 的转折变化:

$$Y = \begin{cases} a_{10} + a_{11}t & 1 < t \leq k_1 \\ a_{20} + a_{21}t & k_1 < t \leq k_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_{m0} + a_{m1}t & k_{m-1} < t \leq n \end{cases} \quad (5)$$

式中, n 为序列长度; k_1, k_2, \dots, k_{m-1} 为线段起点和终点, 也称为转折点, m 为线段条数。那么, $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{m1}$ 表示在相应时段内时间序列的线性增长率。本文参照高仁祥等(1997)的方法, 采用基于 Chow 检验的最优两分段线性建模算法, 计算式(5)各参数。

2 高温热害综合指数有效性检验及单季稻高温热害灾损时空分布

2.1 水稻高温热害综合指数有效性检验

江淮流域单季稻拔节—乳熟的生育关键期为 7 月 16 日至 9 月 30 日。分析 1971—2010 年单季稻生育关键期高温热害综合指数与减产率相关系数的

空间分布, 并与水稻高温热害历史灾情统计资料进行对比, 检验高温热害综合指数反映单季稻历史灾损情况的能力。结果表明, 高温热害综合指数与单季稻减产率的相关关系空间分布以长江为界(图 1b), 长江以北大部分区域呈负相关, 其中西北部地区相关系数值小于等于 -0.3 , 极低值中心区相关系数小于 -0.5 , 负相关显著的区域与多年平均减产率高值区分布基本一致(图 1a 和 1b), 历史灾情统计资料也表明该区域为水稻高温热害多发区。江淮东北部地区以负相关为主, 而长江以南地区大部分呈正相关。因此, 单季稻生育关键期高温热害综合指数(图 1d)与减产率的空间分布存在较好的对应关系, 可用于单季稻高温热害灾损强度及其时空分布的研究。

2003 年作为江淮流域水稻高温热害典型年, 高温覆盖范围达到 87.4%(气象台站数占总台站数的比例), 减产范围高达 67.8%, 出现高温的气象站高温热害综合指数平均值为 0.7, 超过 0.6 的重度灾害临界值。在 Arcgis 中利用距离反倒数空间插值法将 2003 年单季稻抽穗扬花期高温热害指数和减产率网格化, 分析高温热害综合指数与水稻灾损强度和空间分布对应关系, 检验高温热害综合指数反映典型年份高温热害强度和单季稻产量损失程度的能力。结果表明, 2003 年江淮流域单季稻花期遭遇

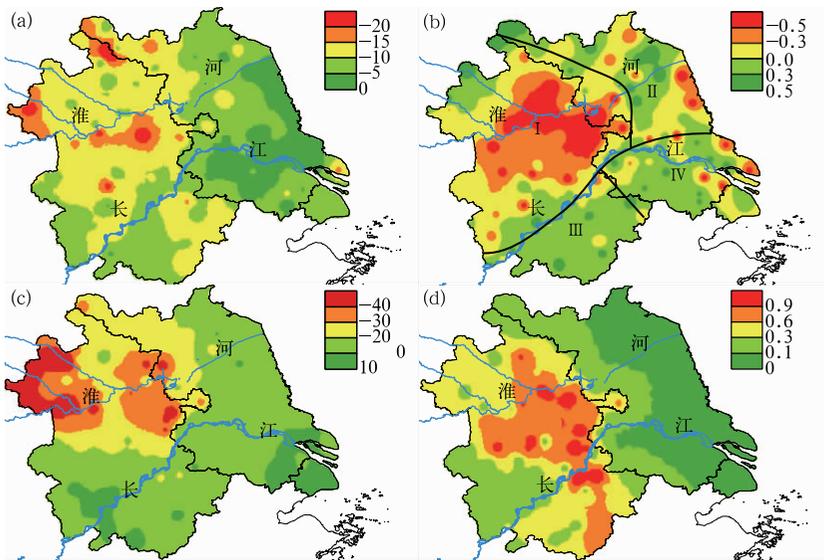


图 1 1971—2010 年单季稻减产率平均值(a, 单位: %)及减产率与高温热害指数相关系数空间分布(b)、2003 年江淮流域单季稻减产率(c, 单位: %)和关键期高温热害综合指数(d)
 Fig. 1 Averaged yield loss rate (a), distribution of correlation coefficients between yield loss rate and heat injury index (b) during 1971—2010, yield loss rate (c) and heat injury indexes in the heading-flowering stage (d) in 2003

持续高温天气,西北部减产 20%以上,沿淮部分地区减产超过 30%(图 1c)。相应地,江淮西部单季稻花期高温热害指数超过 0.6,为重度高温热害区(图 1d),与单季稻减产率的空间分布基本一致。因此,本文构建的水稻高温热害综合指数能够较好地反映高温热害强度,其空间分布与单季稻高温灾损空间分布有较好的对应关系,能较好地将水稻高温热害“轻—中—重”的定性描述转换为定量表达。

2.2 1971—2010 年单季稻高温热害灾损时空分布

综合考虑单季稻减产率与高温热害综合指数的相关系数、单季稻品种和生育期的空间分布差异,将江淮流域分成 4 个区(图 1b)。从图 1a 可以看出,江淮 I 区多年平均减产率超过 10%,是单季稻高温热害灾损关键区,III 区局部减产率也高于 10%。1971—2010 年 I 区单季稻单产减产率共有 194 站年次超过 3%,其中,20 世纪 70 年代为 45 站年次,平均减产率为 8.9%,20 世纪 90 年代为 72 站年次,

平均减产率 12.2%,21 世纪初为 68 站年次,平均减产率 17.9%,可见 90 年代到 21 世纪初是 I 区单季稻高温热害多发时期。而 II 区和 IV 区多年平均减产率小于 10%(图 1a)。

利用基于 Chow 检验的时间序列转折分析方法,检测单季稻生育关键期高温热害综合指数的突变特征和分段线性变化趋势,结果表明高温热害综合指数在 1968 年发生转折(通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验),1961—1967 年高温热害指数数值迅速上升,1968 年突降至 0.05,其后 1968—2010 年期间缓慢上升,线性变化趋势不显著,总体上以年代际波动变化为主(图 2a 粗实线)。20 世纪 60 年代高温热害最强,高温热害综合指数平均值为 0.3,20 世纪 70 至 80 年代中期,高温热害强度最低,平均值为 0.1。20 世纪 90 年代后再次进入高温热害较强时期,平均值为 0.2,低于 60 年代,2003 年遭遇历史第二强高温热害(0.7),略低于 1966 年的最强高温热害(0.8)。气象灾害历史灾情数据表明,20 世纪 90 年

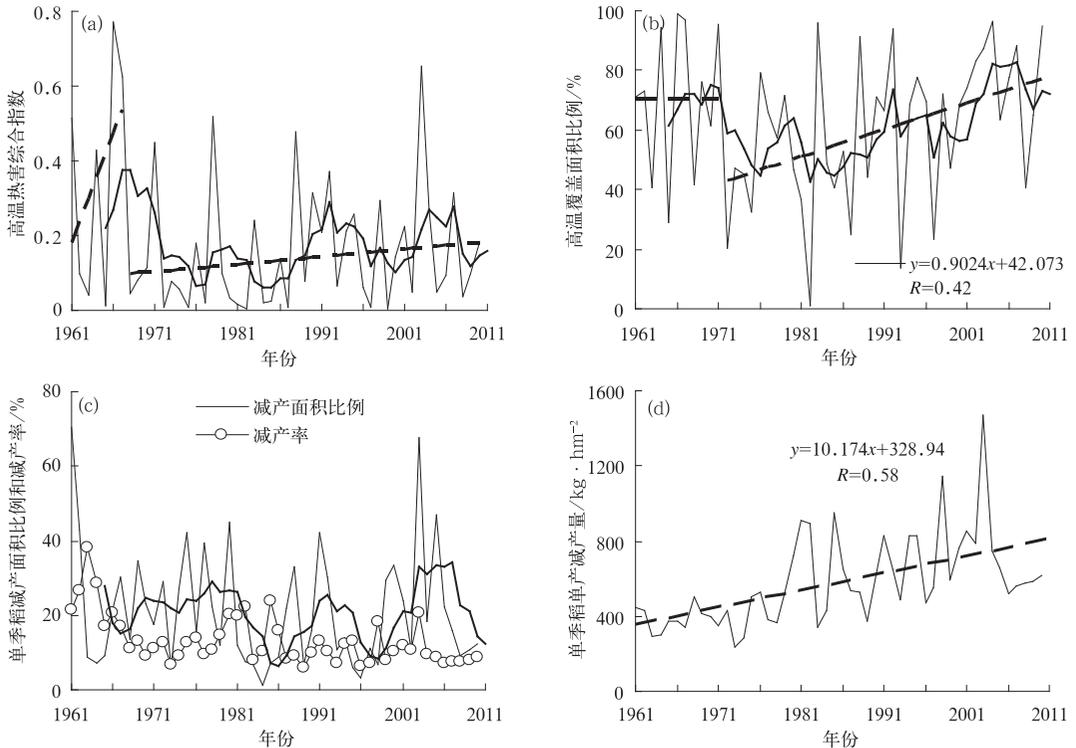


图 2 1961—2010 年江淮流域高温热害指数(a)、覆盖面积(b)、单季稻减产面积比例和减产率(c)及单产减产幅度(d)年代际变化
(虚线为线性趋势,粗实线为 5 年滑动平均)

Fig. 2 Temporal variations of heat injury index (a) in the key growth stages, proportion of high temperature covered area (b), yield loss rate and area proportion (c) and yield loss value (d) during 1961—2010
(Dashed line and thick solid line represent the linear trend and five-year moving average, respectively)

代以来江淮流域进入水稻高温热害高发期,除2003年外,虽然高温频率增加,但高温热害强度无明显上升趋势(高素华等,2009;史军等,2009),可见区域平均高温热害综合指数值的变化也反映出这一变化趋势。高温热害覆盖面积比例在1971年发生突变后,在1971—2010年期间显著上升(通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验),上升速率为 $9.0\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$,2000年以后高温覆盖比例在63.6%以上(图2b)。

1961—1980年单季稻种植面积约为300万 hm^2 ,占江淮流域稻谷种植总面积的一半,分布在江苏全省和安徽省的淮北地区,20世纪80年代到21世纪初以种植单季稻为主,面积超过400万 hm^2 ,占稻谷总面积的85%以上(陈晓华等,2009)。虽然20世纪60年代是江淮流域高温热害强,覆盖范围最大的时段,由于单季稻种植面积小,单产减产率和减产范围不大,70年代后期到80年代末期,单季稻种植面积迅速扩大,单产减产率也处于高位,超过15%,90年代到21世纪初减产率维持在10%左右,单产减产绝对值平均值却高达 $735.0\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,减产范围也明显增加(图2c和2d)。而且,80年代以来高温热害综合指数与高温覆盖面积比例、单季稻减产面积比例

的相关关系显著(通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验),相关系数分别为0.7和0.5,表明自80年代江淮流域大面积种植单季稻以来,当遭遇高温热害时,具有高温强则覆盖范围广、单季稻受害面积大的特点。

3 单季稻高温热害应对策略

3.1 推迟播种期规避高温热害集中时段

资料统计表明,1961—2010年江淮流域高温集中出现时段无明显变化,集中在7月11日至8月15日,高温比例超过20%,而9月1日以后,江淮流域各年代高温出现比例均低于10%(图3a)。各年代高温出现比例差异明显,20世纪60年代及21世纪初偏高,70和80年代偏低。80年代到21世纪初高温出现比例显著上升,使得江淮流域在2000年后进入高温热害多发期,高温出现比例明显高于先前各年代,其中7月21日至8月5日高温出现比例超过30%,江淮流域I区21世纪初高温集中时段高温比例最高可达37.4%,严重威胁单季稻安全生产(图3b)。

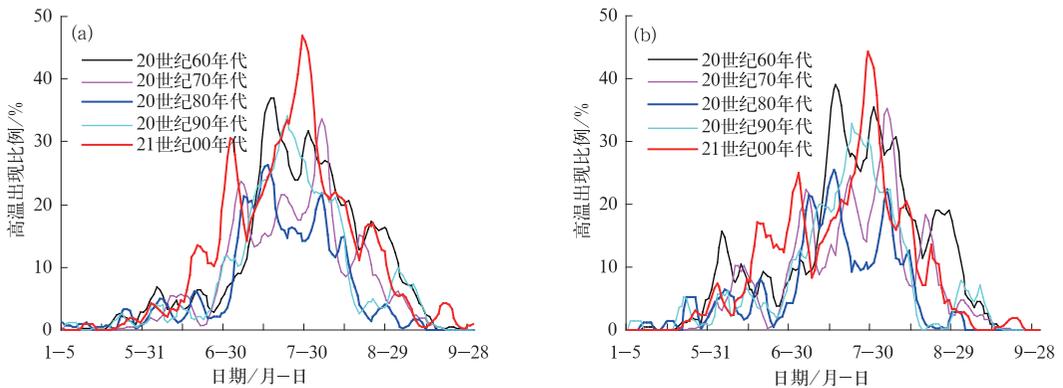


图3 1961—2010各年代江淮流域(a)和江淮I区(b)逐日高温发生比例

Fig. 3 Proportions of daily high temperatures over the Yangtze-Huaihe River Valley (a) and its No. I part (b) during 1961–2010

由图3可见,1961—2010年江淮流域高温集中出现时段无明显变化的特点,为单季稻抽穗开花期避开高温集中时段提供了条件。江淮流域IV区是通过推迟单季稻播种期应对高温热害的成功案例。20世纪80年代双季稻改单季稻期间,IV区以种植早熟中粳品种为主,播种期为5月19日,20世纪90年代种植迟熟中粳品种后,平均播种期仍为5月19日,抽穗开花期处于高温集中时段,易遭受高温热

害。21世纪初改种早熟和中熟晚粳品种后,推迟播种期到5月22日,抽穗开花期推迟到8月26日至9月4日,成功避开高温热害集中时段。在2003年江淮流域水稻花期遭遇长达20d的持续高温天气造成大面积减产情况下,IV区单季稻抽穗开花期仍成功避开了高温集中时段,结实率正常,产量损失较小(高素华等,2009)。因此,借鉴江淮IV区的成功经验,全流程单季稻适当推迟播种期,使抽穗开花期推

迟到高温集中时段之后,可有效应对高温热害。

3.2 充分利用热量资源改善,推广中晚熟品种应对高温热害变化

日平均气温稳定通过 20°C 的时段为水稻拔节—灌浆成熟的适宜期,对水稻产量形成具有重要作用,当平均气温低于 18°C ,最低气温低于 14°C 时,对开花授粉不利,容易形成空秕瘪粒。因此,合理选择单季稻品种和播种期,使抽穗开花期避开高温集中时段的同时,保障灌浆成熟期平均气温处于 20°C 以上的安全生长季内非常重要。

据统计,1971—2010 年江淮中南部气温稳定通过 20°C 初日明显提前,线性倾向率 $\leq -3.0 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,统计显著(通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验)

的区域集中在长江两侧(图 4a)。气温稳定通过 20°C 终日以推迟为主,21 世纪初气温稳定通过 20°C 终日平均值为 9 月 29 日,比 20 世纪 70 年代推迟了 9 d,其中沿长江一带推迟 12 d 以上(图 4b)。江淮流域东南部高温热害显著增强(通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验),线性倾向率为 $0.1 \sim 0.2 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其他地区高温热害强度无明显增减趋势(图 4c)。自 1981 年以来,江淮流域日平均气温稳定通过 20°C 终日 30 年(1981—2010 年)气候平均值推迟到 9 月 20 日至 10 月 8 日,从南到北空间差异在 10 d 以内(图 4d)。在高温集中时段无明显提前或推迟的背景下,气候变暖使得水稻安全生长季显著变长,为单季稻推迟播种或者选择中晚熟品种避开高温集中时段提供了必要的气候条件。

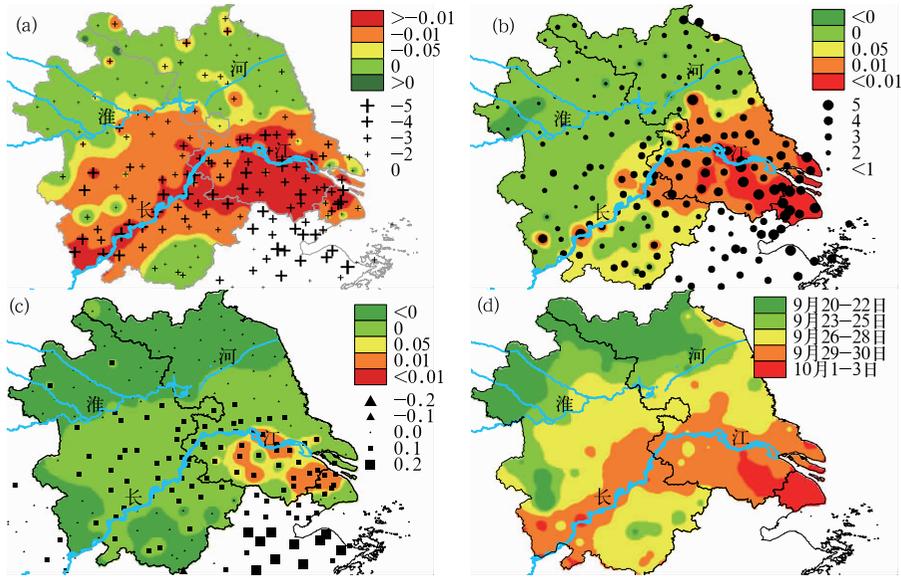


图 4 1971—2010 年日平均气温稳定通过 20°C 初日[a,单位: $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]和终日[b,单位: $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]变化趋势,7 月 16 日至 8 月 20 日高温热害综合指数变化趋势(c)和 1981—2010 年日平均气温稳定通过 20°C 终日 30 年气候平均值(d,单位: d)

Fig. 4 Climatic trends of start [a, unit: $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] and end [b, unit: $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] dates of daily mean temperature stabilized above 20°C from 1971 to 2010, heat injury index from 16 July to 20 August (c) and the climatic average of end dates of daily mean temperature stabilized more than 20°C (d) during 1981—2010

同样以江淮流域 IV 区的成功经验为例,虽然该区高温集中时段的高温强度显著上升(图 4c),但 21 世纪初气温稳定通过 20°C 终日比 20 世纪 70 年代推迟约 10 d,当地农业部门将单季稻播种期推迟到 5 月下旬,并选用生育期超过 150 d 的早熟和中熟晚粳品种,花期成功避开高温热害集中时段的同时,保

证了乳熟期日平均气温高于 20°C ,避免成熟期遭受低温冷害。根据 1981—2010 年气温稳定通过 20°C 终日的空间差异(图 4d),借鉴江淮流域 IV 区的成功经验,以水稻花期避开高温集中时段和充分利用秋季光热资源为主要应对措施,江淮流域可推广中、晚熟品种,确定最佳播种期,使抽穗开花期避开高温集

中时段,成熟期处在 20℃ 以上的安全生长季内,充分利用光温资源,提高土地产出率。具体措施为,江淮Ⅲ、Ⅳ区以种植早熟和中熟晚粳品种为主,播种期推迟到 5 月中下旬,随着纬度的北移,逐步提早播种期,扩大现有中晚熟品种的种植范围。江淮Ⅱ区以种植迟熟中粳品种为主,播种期推迟到 5 月中旬,而Ⅰ区宜种植早熟中粳品种或改种早熟中粳品种,推迟播种期到 5 月上旬。

4 结 论

(1) 基于 Logistic 模型构建规范化可累计的高温热害综合指数,并将 Logistic 曲线增长速率的两个拐点与水稻产量“轻-中-重”损失对应的气象站高温持续时间或强度的区间临界值与对应起来,找到计算 Logistic 模型参数的简便方法。为利用常规地面气温数据和 Logistic 模型,定量评估水稻高温热害灾损时空变化提供了新思路。

(2) 江淮流域高温热害以年代际波动变化为主,20 世纪 60 年代高温热害最强覆盖范围最广,70—80 年代强度最低,覆盖面积最小,90 年代后再次进入高温热害较强、覆盖范围大的时期,造成水稻大面积减产。江淮流域高温出现比例在 20% 以上的高温集中时段为 7 月 11 日至 8 月 15 日,9 月 1 日以后高温出现比例低于 10%。江淮流域西北部单季稻抽穗开花期处在高温集中时段,不利于水稻生产。

(3) 由于高温集中时段无明显变化,气候变暖使得江淮流域水稻安全生长季显著变长,为单季稻推迟播种或选择中晚熟品种规避高温热害提供了必要的气候条件。江淮东南部种植中晚熟品种和推迟播种期,成功避开高温集中时段,是应对高温热害变化的成功案例。以之为借鉴,全区宜推广单季中晚稻,自北向南适当延迟播种期,北部延迟到 5 月上旬,南部延迟到 5 月中下旬,既保证单季稻成熟期处在 20℃ 以上的安全生长季内,又能适当规避高温热害影响。此外,筛选培育抗高温水稻品种也是应对高温热害变化的有效方法之一。

参考文献

陈晓华,张玉香,钱克明,等. 2009. 新中国农业 60 年统计资料. 北京: 中国农业出版社.
高仁祥,张世英,刘豹. 1997. 基于 Chow 检验的最优分段建模. 信息与控制, 26(5): 340-345.
高素华,王培娟,万素琴,等. 2009. 长江中下游高温热害及对水稻的

影响. 北京: 气象出版社.
刘伟昌,张雪芬,余卫东,等. 2009. 水稻高温热害风险评估方法研究. 气象与环境科学, 32(1): 33-38.
刘梅,高苹,王静萍,等. 2011. 江苏夏季逐月高温日数与西太平洋海温相关分析及预测模型建立. 气象, 37(12): 1553-1559.
柳新伟,孟亚利,周治国,等. 2004. 水稻颖花与籽粒发育模拟的初步研究. 中国水稻科学, 18(3): 249-254.
马建堂,张为民,罗兰,等. 2010. 2010 年中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
史军,丁一汇,崔林丽. 2009. 华东极端高温气候特征及成因分析. 大气科学, 33(2): 347-358.
田小海,吴晨阳,袁立,等. 2010. 普通气候年景下江汉平原超级杂交稻结实率及其与气候条件的关系. 中国水稻科学, 24(5): 539-543.
童志婷,李守华,段维新,等. 2008. 中稻花期致害高温主导的田间气象特征及其对不同杂交组合水稻结实的影响. 中国生态农业学报, 16(5): 1163-1166.
王钰. 2010. 气象灾害对水稻生长的影响. 现代农业科技, (24): 302-305.
谢晓金,李秉柏,申双和,等. 2009. 抽穗期高温胁迫对水稻花粉活力与结实率的影响. 江苏农业学报, 25(2): 238-241.
许吟隆,赵海燕,姚凤梅,等. 2005. 长江中下游高温事件对中稻产量构成要素影响的统计分析. 中国农业气象, 25(增刊): 20-23.
杨秋明,李熠,钱玮,等. 南京地区夏季高温日数年际变化的主要模态及其与 200 hPa 经向风的联系. 气象, 37(11): 1360-1364.
曾凯,周玉,宋忠华. 2011. 气候变暖对江南双季稻灌浆期的影响及其观测规范探讨. 气象, 37(4): 468-473.
赵海燕,姚凤梅,张勇,等. 2006. 长江中下游水稻开花灌浆期气象要素与结实率和粒重的相关性分析. 中国农业科学, 39(9): 1765-1771.
朱周平,钱炳强. 2010. 中国东部地区夏季高温南北不均匀分布特征分析. 气象, 36(11): 26-31.
Cao Yunying, Duan Hua, Yang Linian, et al. 2009. Effect of high temperature during heading and early filling on grain yield and physiological characteristics in indica rice. Acta Agronomica Sinica, 35(3): 512-521.
Fu Guanfu, Tao Longxing, Song Jian, et al. 2008. Responses of yield characteristics to high temperature during flowering stage in hybrid Rice Guodao 6. Rice Science, 15(3): 215-222.
Kim J, Shon J, Lee C K, et al. 2011. Relationship between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature. Field Crops Research, 122(3): 207-213, doi: 10.1016/j.fcr. 2011. 03. 014.
Sun Wen, Huang Yao. 2011. Global warming over the period 1961—2008 did not increase high-temperature stress but did reduce low-temperature stress in irrigated rice across China. Agricultural and Forest Meteorology, 151(9): 1193-1201.
Tao F L, Yokozawa M, Liu J Y, et al. 2008. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends. Climate Research, 38: 83-94, doi: 10.3354/cr00771.