

江西省早稻高温热害灾损评估模型

田俊^{1,2} 杨军¹ 姚俊萌² 蔡哲² 段里成² 张坤²

(1. 江西省气象科学研究所,南昌 330096;

2. 江西省农业气象中心,南昌 330096)

摘要 针对江西省早稻高温热害灾损缺乏定量化评估技术的问题,采用主成分回归方法,对江西省早稻高温热害灾损评估模型进行研究和验证。结果表明:江西省早稻高温热害过程可分为相对高温胁迫和混合高温胁迫2类;在高温热害的影响因子中,热害积温、最高气温、热害日数对水稻热害具有同等重要的作用,单个或多个因子明显偏高亦可加重热害。本研究建立的早稻高温热害灾损评估模型验证结果表明:验证样本实际产量与模拟产量的平均相对误差为2.4%;分期播种试验期间,遭遇高温热害影响3个播期实际减产率与模型评估灾损率分别相差2.4%、0.7%、3.6%。研究表明模型模拟的结果比较客观,可利用该模型对高温热害年的早稻灾损率进行模拟和预测。

关键词 早稻; 高温热害; 灾损评估模型; 主成分回归; 江西省

中图分类号 S166

文章编号 1007-4333(2021)02-0032-08

文献标志码 A

Loss estimation model of high temperature damage to early rice in Jiangxi Province

TIAN Jun^{1,2}, YANG Jun¹, YAO Junmeng², CAI Zhe², DUAN Licheng², ZHANG Kun²

(1. Meteorological Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330096, China;

2. Agricultural Meteorological Center of Jiangxi, Nanchang 330096, China)

Abstract Due to the lack of quantitative assessment techniques for the yield loss of early rice caused by high temperature damage in Jiangxi Province, a loss estimation model of high temperature damage to early rice was developed and verified by using principal component regression method. The results showed that: The process of high temperature damage to early rice in Jiangxi Province was divided into two types, namely, relative high temperature stress and mixed high temperature stress; Among the influence factors of high temperature damage to early rice, the accumulated hot damage temperature, maximum temperature and hot damage days were equally important. When single or multiple factors were obviously high, the hot damage would be aggravated. The verification results of the model established showed the average relative error between actual and simulated yield was 2.4%. During the stage sowing test, the differences between actual reduction rate and estimation yield loss of three sowing periods under high temperature stress were 2.4%, 0.7% and 3.6%, respectively. In conclusion, the simulation results by the new model constructed in this study were objective, and the model could be used to simulate and predict the yield loss of early rice in the year of high temperature damage.

Keywords early rice; high temperature damage; estimation model of yield loss; principal component regression method; Jiangxi Province

早稻是江西省主要粮食作物,其种植面积和总产均占全省粮食生产总量的30%左右,在全省粮食

生产及国家粮食安全中占有重要地位。然而,该区域早稻抽穗至灌浆结实期,经常会出现高温天气,对

收稿日期:2020-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41965008);国内外作物产量气象预报专项(2019JX07);江西省科技计划项目(20142BBF60029);江西省重点研发计划项目(20192BBFL60040);南昌市农业气象重点实验室开放基金(2019NNZS101)

第一作者:田俊,高级工程师,主要从事农业气象研究,E-mail:tianjunccy@163.com

早稻产量产生明显影响^[1-4]。据统计,高温热害在江西省早稻种植区发生频率为80%,其中30%的年份减产3%以上^[1]。在全球气候变暖背景下,江西省早稻高温热害呈增多增强趋势^[2-4];预计2021—2050年,在RCP2.6和RCP8.5气候情景下,全国水稻孕穗至乳熟期高温日数、高温积温都呈增加趋势^[5],水稻高温热害风险将进一步加大。因此,研究高温热害对江西省早稻产量的影响,并给出定量的灾损评估模型对开展区域农业气象防灾减灾具有重要的科学意义和应用价值。

已有研究在高温热害对水稻产量影响的定量分析方面进行了探讨^[1-2,5-9],建立了分别以高于35℃的危害热积温(有效积温)^[2,5-6]、高温持续时间^[1-2,7]、最高气温^[8]作为主要影响因子的高温热害对水稻产量影响的简单线性回归关系式;在GB/T 37744—2019《水稻热害气象等级》标准中^[10],以水稻热害过程危害热积温、最高气温、高温持续时间分别作为独立因子评估水稻热害气象等级。上述研究对定量评估高温热害产量损失具有重要意义,但仍存在一些不足:1)高温热害具有过程性和累积效应^[11],不同的高温配置对水稻影响程度不一样^[12],单纯采用单一或部分指标来评估高温热害产量损失是不全面的,例如在生产实践中会出现热害积温一样,但是灾害损失程度有明显差别,也会出现灾害损失接近但高温持续天数相差大的的情况;2)在高温热害敏感发育期上,相关研究多采用平均发育期或固定时段^[1,5,7-9],没有考虑发育期实际和空间上的差异,实际上江西省不同区域不同年份早稻进入抽穗结实期的时间不同,例如江西省农业气象试验站观测到的早稻进入抽穗期的最早时间是6月8日,最晚的时间是6月28日,而只有进入抽穗至灌浆期这个敏感发育期出现的持续高温才造成高温热害;3)在模型建立方法上,多采用简单线性回归方法^[1-2,5-9],但简单的统计回归并不适于因子之间存在相关关系的问题分析^[13]。

鉴于此,为解决上述水稻高温热害灾损定量化评估模型分析中的问题,本研究拟从实际减产率出发,通过匹配早稻高温敏感发育期与高温天气过程,形成灾害研究样本;并在此基础上,综合考虑高温热害过程中的热害积温、最高温度和热害日数对早稻产量的影响,旨在构建江西早稻高温热害灾损定量评估模型,以期为该地区早稻灾损定量评估、产量预报、灾害保险等提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料及其来源

气象资料来源于江西省气象信息中心,为江西省1981—2018年14个农业气象观测站(图1)早稻全生育期内逐日气象资料,包括最高气温、最低气温、平均气温、降水量、日照时数等。早稻观测资料来源于上述14个农业气象观测站,包括生育期、实际产量以及农业气象灾害观测资料,其中婺源和瑞昌资料年限1981—2009年,湖口和樟树资料年限为1990—2015年,其它10站为1981—2018年。

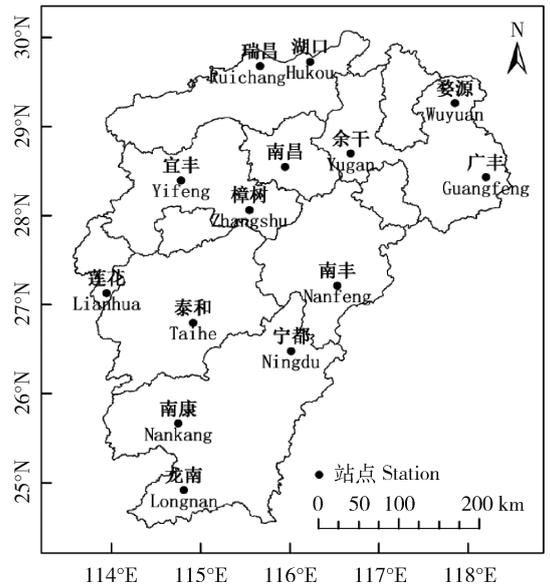


图1 江西省14个农业气象观测站分布

Fig. 1 Distribution of 14 agricultural meteorological observation stations in Jiangxi Province

1.2 研究方法

1.2.1 灾损率的表示方法

为减小不同区域、不同时期生产力水平对早稻产量的影响,采用相对气象产量即实际早稻产量低于趋势产量的幅度来表征早稻产量受气象灾害影响的损失情况^[14-17]。相对气象产量计算公式为:

$$y_u = \frac{y_s - y_t}{y_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: y_u 为相对气象产量; y_s 为实际产量, g/m^2 ; y_t 为趋势产量, g/m^2 。

以相对气象产量 y_u 的负值定义为灾损率 Y_s ; 利用5点滑动平均法计算趋势产量 y_t ^[16-17]。趋势产量主要反映农业技术水平的提高对产量的影响,具有渐进性和相对稳定性^[18]。因此,在计算趋势产

量前,先对各站原始产量数据序列进行处理,剔除低于实际产量序列平均值 10% 的数据,以消除各站异常偏低的实际产量数据对趋势产量稳定性的影响,剔除后缺失数据利用该站点邻近 2 年平均值插补。

1.2.2 高温热害典型年的确定

以灾损率 $\geq 3\%$ 作为高温热害是否造成早稻产量损失为依据^[5,19],参照文献^[20]和^[21]中提取典型灾害年的方法,对逐站逐年早稻生长季内逐日温、光、水气象条件进行分析,结合生育期和农业气象灾害观测资料,归纳总结逐站逐年影响早稻产量的主要农业气象灾害,从而筛选出产量损失主要由高温热害因素造成的典型年份。基于典型年份早稻生育期、产量以及逐日最高气温资料,构建本研究样本 60 组,其中随机留出 10 组样本作为模型验证样本。

1.2.3 高温热害影响期和影响因子的确定

高温热害对江西省早稻影响的敏感期主要在抽穗期和灌浆期;对于灌浆期来说,灌浆初期(齐穗后 20 d)是高温影响的关键时期^[22]。据此将早稻高温热害影响期确定为抽穗始期至齐穗后 20 d。

在高温热害影响因子中,热害积温,指高温热害影响期间连续 3 d 及以上日最高气温到达或超过 35 °C 部分的积累,用 X_1 表示, °C · d;最高气温,指高温热害影响期间日最高气温的最大值,用 X_2 表示, °C;热害日数,指高温热害影响期间连续 3 d 及以上日最高气温到达或超过 35 °C 的累积天数,用 X_3 表示, d。 X_1 、 X_2 、 X_3 计算公式分别为:

$$X_1 = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (T_{ij} - 35) \quad (2)$$

$$X_2 = \max \max(T_{ij}) \quad (3)$$

$$X_3 = \sum_{j=1}^m n_j \quad (4)$$

式中: m 为高温热害影响期内日最高气温连续 3 d 及以上超过 35 °C 的高温热害过程总次数($m \geq 1$); j 为多次高温热害过程的序号, $j=1,2,\dots,m$; n_j 为第 j 次高温热害过程的高温日数($n_j \geq 3$), d; i 为第 j 次高温热害过程中每天的序号, $i=1,2,\dots,n_j$; T_{ij} 为第 j 次高温热害过程中第 i 天的日最高气温, °C。

1.2.4 高温热害灾损评估模型的建立和检验

根据早稻生育期、产量以及逐日最高气温资料,计算高温热害典型年热害积温、最高气温、热害日数及其对应的早稻灾损率;在分析上述 3 个因子相关性的基础上,利用主成分回归方法建立早稻高温热害灾损定量评估模型,并与验证样本实际产量、分期

播种早稻试验产量比较对模型进行验证。利用 SPSS 进行主成分回归分析。

1.2.5 分期播种试验

选择本地推广应用的杂交早稻品种金优 458,于 2012 年在南昌县莲塘镇良种场进行分期播种试验,播种时间分别为 3 月 18 日、3 月 25 日、4 月 1 日、4 月 8 日。各播种期早稻播种方式、栽插密度、水肥管理、病虫害防治等均一致;试验过程进行发育期和农业气象灾害调查,成熟后进行测产。

2 结果与分析

2.1 高温热害过程及主要影响因子特征分析

已有研究指出^[23]:在水稻抽穗期和乳熟期,当日最高气温达 35 °C,籽粒首先受到伤害;达 38 °C 以上时,源库同时受到影响,危害加重。因此,本研究以 38 °C 为临界值,对所有灾害样本逐日最高气温变化进行了普查。由普查结果可知,江西省早稻高温热害过程可分为相对高温胁迫和混合高温胁迫 2 类,图 2 为这 2 类代表样本日最高气温的逐日变化。

由图 2 可以看出:第 1 类相对高温胁迫代表样本泰和 2006 年、宁都 2003 年和广丰 2010 年,其逐日最高气温在 35~38 °C 变化,即日最高气温在相对高于水稻适宜生长温度的温度区间波动;第 2 类混合高温胁迫代表样本婺源 1988 年、余干 1988 年和瑞昌 1988 年,其逐日最高气温除了在 35~38 °C 波动外,还有 1 个或者几个时间段(普查结果最多 3 个)上升至 38 °C 以上,即在相对高温胁迫的基础上,还叠加 1~3 段持续 38 °C 以上绝对高于水稻适宜生长温度的绝对高温胁迫。

代表样本高温热害主要影响因子及其灾损率统计结果见表 1。结合表 1 和图 2 可以看出,高温热害过程不一样,对早稻的危害程度不一样:在 6 个代表站中,瑞昌和婺源 1988 年热害积温、最高气温、高温持续日数均较大,其灾损率也高,分别为 28.5%、26.4%;泰和 2006 年和宁都 2003 年热害积温、最高气温偏低,其减产率也偏低,在 10% 以下;对比分析余干 1988 年和广丰 2010 年以及宁都 2003 年和余干 1988 年可以看出,在相同的热害积温或热害日数下,相比相对高温胁迫,绝对高温胁迫热害加重,如余干 1988 年和广丰 2010 年这 2 个样本热害积温接近,但广丰 2010 年观测地段早稻只遭遇了 14 d 相对高温胁迫,而余干 1988 年高温热害过程最高气温

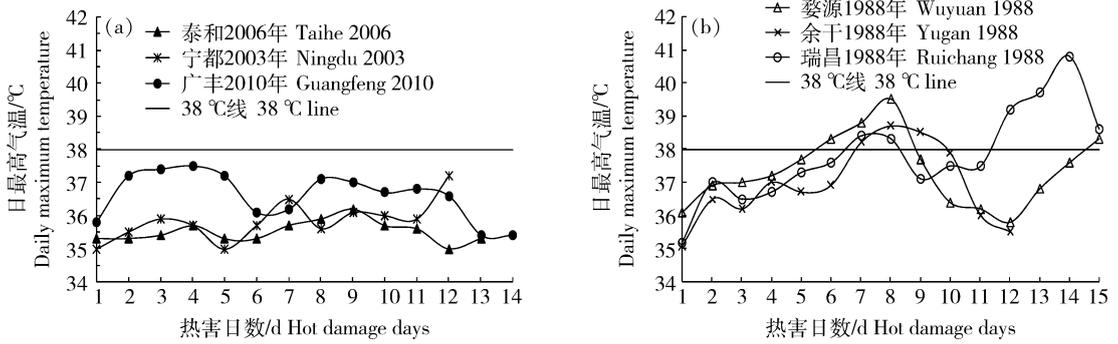


图 2 相对高温胁迫(a)和混合高温胁迫(b)代表样本逐日最高气温变化

Fig. 2 Daily maximum temperature variation of representative samples about relative high temperature stress (a) and mixed high temperature stress (b)

上升至 38.7 °C，不仅遭遇了相对高温胁迫，还遭遇了 3 d 绝对高温胁迫，导致早稻受害加重，其灾损率比广丰 2010 年偏高 9.4%；宁都 2003 年和余干 1988 年这 2 个样本热害日数一样，但宁都 2003 年热害积温、最高气温明显偏低，导致灾损率偏低 11.8%。

由此可见，在高温热害影响因子中，热害积温、最高气温、热害日数均对早稻产量产生影响，单个或多个因子明显偏高，热害加重。因此选择热害积温、最高气温、热害日数 3 个因子来建立灾损评估模型能较全面的反应各高温热害过程对早稻产量的影响。

表 1 代表样本高温热害主要影响因子及灾损率的统计结果

Table 1 Statistical results of loss rate and main impact factors about high temperature damage of representative samples

代表样本 Representative sample	$X_1 / (^\circ\text{C} \cdot \text{d})$	$X_2 / ^\circ\text{C}$	X_3 / d	$Y_s / \%$
瑞昌 1988 年	42.4	40.8	15	28.5
婺源 1988 年	35.3	39.5	15	26.4
余干 1988 年	23.2	38.7	12	20.6
广丰 2010 年	22.4	37.5	14	11.2
泰和 2006 年	6.7	36.2	13	9.1
宁都 2003 年	10.1	37.2	12	8.8

注： X_1 、 X_2 、 X_3 分别代表早稻高温热害过程中热害积温、过程最高气温、高温热害日数， Y_s 代表灾损率。下同。

Note: X_1 is accumulated hot damage temperature. X_2 is maximum temperature of the process. X_3 is days of heat damage and Y_s is loss rate. The same below.

进一步对所有样本影响因子和灾损率进行统计(表 2)。由表 2 可以看出，江西省早稻高温热害平均灾损率为 11.1%，85% 的样本灾损率为 3.6%~18.0%，热害严重时灾损率可达 32.6%。由影响因子的统计结果可知，江西省早稻高温热害日数平均为 8.8 d，95% 的过程持续 4~15 d，最长可达 26 d；最高气温平均为 37.5 °C，6% 的过程可升至 40.0 °C 以上；热害积温变化大，最小值仅 0.6 °C·d，最大可达 66.8 °C·d。

表 2 所有样本高温热害主要影响因子及灾损率的统计结果

Table 2 Statistical results of loss rate and main impact factors about high temperature damage of all samples

统计量 Statistics	$X_1 / (^\circ\text{C} \cdot \text{d})$	$X_2 / ^\circ\text{C}$	X_3 / d	$Y_s / \%$
最大值 Max	66.8	40.8	26.0	32.6
最小值 Min	0.6	35.3	4.0	3.6
平均值 Mean	12.6	37.5	8.8	11.1

2.2 灾损评估模型的构建

利用主成分回归方法建立高温热害主要影响因子 X_1 、 X_2 、 X_3 对早稻产量影响的灾损评估模型,以定量分析不同高温热害过程的高温强度、热害日数及其累积作用所造成的早稻产量损失。

首先分析影响因子序列之间的相关性(表3),可以看出影响因子两两之间存在较强的相关性,均达到0.01显著性水平。这表明影响因子之间并不独立,而是相互影响的。因此,采用主成分回归法建立早稻高温热害灾损率评估模型,它既能有效地反映原来影响因子的主要信息,同时新的评估指标之间又不存在相互关系^[16]。

表4为高温热害影响因子主成分分析结果。由

表4 主成分分析结果

Table 4 Results of principal component analysis

分量 Component	特征值 Eigenvalue	累积方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	因子载荷矩阵 Components load matrix		
			X_1	X_2	X_3
1	2.682	89.397	0.975	0.905	0.955
2	0.267	98.293	-0.141	0.425	-0.258
3	0.051	100.000	-0.171	0.031	0.145

计算第1主成分载荷向量 $\mathbf{A}_1 = [0.975, 0.905, 0.955]$ 与其特征值2.682算术平方根的商,得到第1主成分特征向量 $\mathbf{U}_1 = [0.595, 0.553, 0.583]$ 。根据 \mathbf{U}_1 ,得第1主成分 F_1 为

$$F_1 = 0.595X_1 + 0.553X_2 + 0.583X_3 \quad (5)$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 分别为热害积温、过程最高气温、热害日数经过数据标准化处理后的结果,量纲为1。

将 F_1 与灾损率 Y_s 建立回归方程,得到 Y_s 为:

$$Y_s = 0.549F_1 \quad (R^2 = 0.81^{**}) \quad (6)$$

式中: R^2 为0.81,表明模型对样本数据的拟合效果较好。对式(6)中回归方程及其回归系数进行显著性检验,检验结果均达到0.01显著性水平,表明回归模型和回归系数均具有极显著的统计学意义。将式(5)代入式(6),得到早稻高温热害灾损标准化评估模型为:

$$Y_s = 0.327X_1 + 0.303X_2 + 0.320X_3 \quad (7)$$

式(7)标准化评估模型中各项因子系数相差不大,说明在早稻高温热害过程中,热害积温、最高气温、热害日数对早稻灾损率有同等重要的作用,过程最高气温越高、热害日数越长、热害积温越多,对早

表3 影响因子间的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix among impact factors

影响因子 Impact factor	X_1	X_2	X_3
X_1	1		
X_2	0.81 **	1	
X_3	0.90 **	0.64 **	1

注:**在0.01水平相关。

Note: ** indicates the significant difference at 0.01 level.

表4可知,第1主成分对应的特征值大于1,且方差贡献率超85%,说明该主成分可反映原有变量的绝大部分信息,故提取第1主成分进行分析。

稻的危害越严重;3个因子同时偏高或部分因子明显偏高,亦可加重热害,本研究对高温热害过程及主要影响因子特征分析也证实了这一结论。

为应用方便,利用式(8)将式(7)中标准化变量还原成原始变量,计算公式为:

$$\frac{Y_s - \bar{Y}_s}{S_{Y_s}} = 0.327 \times \frac{X_1 - \bar{X}_1}{S_{X_1}} + 0.303 \times \frac{X_2 - \bar{X}_2}{S_{X_2}} + 0.320 \times \frac{X_3 - \bar{X}_3}{S_{X_3}} \quad (8)$$

式中: \bar{Y}_s 、 \bar{X}_1 、 \bar{X}_2 、 \bar{X}_3 分别为 Y_s 、 X_1 、 X_2 、 X_3 的平均值; S_{Y_s} 、 S_{X_1} 、 S_{X_2} 、 S_{X_3} 分别为 Y_s 、 X_1 、 X_2 、 X_3 的标准差。计算各变量平均值和标准差,代入式(8),最终得到早稻高温热害灾损评估模型为:

$$Y_s = 0.19X_1 + 1.82X_2 + 0.51X_3 - 63.86 \quad (9)$$

为计算方便,式(8)、式(9)中 \bar{Y}_s 和 S_{Y_s} 在参与运算时不带%。因此在实际应用时,需将式(9)中计算结果 Y_s 加上%。

2.3 灾损评估模型的检验

2.3.1 验证样本检验

将验证样本 X_1 、 X_2 、 X_3 值代入式(9)计算灾损

率,再将其与趋势产量一起通过式(1)计算早稻模拟产量,图 3 为模拟产量与实际产量对比结果。由图 3 可知,模拟产量与实际产量的回归系数为 0.92,相关系数为 0.99,达到了 0.01 显著性水平。对模拟产量数据进行相对误差分析表明,模拟产量

与实际产量平均相对误差为 2.4%,80%的样本相对误差为-2.4%~3.3%,表明建立的模型能够有效模拟典型高温热害年的早稻灾损率。

2.3.2 分期播种试验检验

2012 年南昌县 6 月 30 日—7 月 13 日连续 14 d 出现了日最高气温超过 35℃的高温天气。当高温天气发生时,分期播种试验第 1 播期早稻处灌浆后期,受高温热害影响小,而第 2、第 3、第 4 播期在高温热害影响敏感期内分别遭遇了 10、14、14 d 的高温热害,与第 1 播期相比,产量分别减少 15.5%、18.3%、14.0%。利用式(9)对第 2、第 3、第 4 播期早稻高温热害进行灾损评估(表 5),其评估灾损率分别为 13.1%、17.6%、17.6%,与实际减产率相比,3 个播期分别相差 2.4%、0.7%、3.6%,差值在合理的范围内,表明模型评估的结果比较客观。

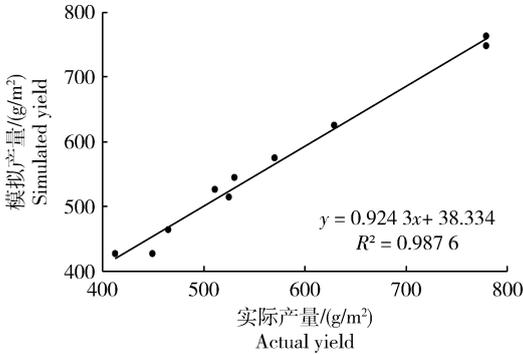


图 3 模拟产量与实际产量比较

Fig. 3 Comparison between the simulated and actual yield

表 5 分期播种试验的检验结果

Table 5 Test results of sowing experiment by stages

播期 Sowing period	$X_1 / (^\circ\text{C} \cdot \text{d})$	$X_2 / ^\circ\text{C}$	X_3 / d	$Y_s / \%$	实际减产率/ Actual reduction rate
第 2 播期 Second	17.8	37.6	10	13.1	15.5
第 3 播期 Third	28.1	37.9	14	17.6	18.3
第 4 播期 Fourth	28.1	37.9	14	17.6	14.0

注:实际减产率=(第 1 播期产量-各播期产量)/第 1 播期产量,第 1 播期早稻产量为 576 g/m²。

Note: Actual reduction rate = (yield of first sowing period - yield of each sowing period) / yield of first sowing period, the yield of first sowing period is 576 g/m².

3 讨论与结论

3.1 讨论

1) Berry 等^[24]将水稻高温胁迫划分为 2 类,即相对高于水稻适宜生长温度的高温胁迫和绝对高于水稻适宜生长温度的短期高温胁迫;本研究证实了这一结论,但还发现江西省早稻高温胁迫除了相对高温胁迫外,往往是上述 2 种高温胁迫的混合型,没有发现单一的绝对高温胁迫。同时,本研究还发现,不同的高温热害过程,对早稻产量的影响不一样;在相同的热害积温或者热害日数下,绝对高温胁迫比相对高温胁迫危害大。

2) 高温是影响水稻结实率主要因素^[25],以温度为因子建立高温热害灾损评估模型具有代表性,且实用性强、便于应用。本研究从高温热害过程特征

入手,综合考虑高温强度、热害日数及相互配置、累积效应对早稻产量的影响,比以往用单一因子评价^[1-2,5-8]的结果更客观。然而,水稻产量除了受气象条件影响外,还受田间管理、品种差异、病虫等其它灾害等因素的影响。因此,在实际对高温热害进行预测或灾损评估时,需结合田间生产状况,在与历史评估结果比较的基础上,开展相应的水稻气象服务。

3) 本研究对于灾害样本的提取方法,与文献^[20-21]中方法类似,方法的合理性得到了验证;有关高温热害造成早稻产量损失的结果与文献^[2]的结果基本一致,表明本研究提取的灾害样本具有典型性。但在样本提取过程中,完全准确界定高温热害灾害样本有一定难度,可能存在一些偏差,未来需要进一步结合田间试验或寻找其他更优的方法,对模型进

行补充研究,以提高模型的准确性。本研究在模拟早稻高温热害灾损率时,利用主成分回归方法,该方法已在其它灾害灾损评估模型的建立中得到了应用^[16,20],可解决线性回归方法中多重共线性问题,且能较好反应多个影响因子对产量的综合影响。然而,该模型为经验统计模型,只明确了产量与影响因子之间的关系,不能反映高温热害对早稻产量影响的机理,作物模型可以在一定程度上解决这个问题,但作物模型构成复杂、参数多。如何将本研究建立的统计模型与作物模型进行有效结合,将在下一步研究中进行。

3.2 结论

1)江西省早稻高温热害过程多维持4~15 d,最长达26 d;过程最高气温平均升至37.5℃,6%的过程可上升至40℃以上;热害积温变化大,最大达66.8℃·d,最小仅0.6℃·d,通常造成早稻产量损失3.6%~18.0%;热害严重时灾损率可达32.6%。

2)江西省早稻高温热害过程可分为相对高温胁迫和混合高温胁迫2类。在高温热害的影响因子中,热害积温、最高气温、热害日数对水稻热害具有同等重要的作用,单个或多个因子明显偏高亦可加重热害。

3)利用高温热害影响因子所建立的早稻高温热害灾损评估模型达到0.01显著性水平,以验证样本的实际产量对模型进行验证,两者相关系数为0.99,平均相对误差为2.4%;在分期播种试验期间,遭遇高温热害影响的3个播期实际减产率与模型评估灾损率分别相差2.4%、0.7%、3.6%,表明模型模拟的结果比较客观,可利用该模型对高温热害年的早稻产量损失进行模拟和预测。

参考文献 References

[1] 李迎春,帅细强,杨蓉,刘丹. 高温热害对江西省早稻产量影响的定量分析[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(20): 79-83
Li Y C, Shuai X Q, Yang R, Liu D. Quantitative analysis on influence of high temperature induced heat damage on early rice yields in Jiangxi Province [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58(20): 79-83 (in Chinese)

[2] 孔萍,殷剑敏,谢佳杏. 高温逼熟对江西省双季早稻产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 57-65
Kong P, Yin J M, Xie J X. Study on the yield of early rice by heat-forced maturing in Jiangxi Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4): 57-65 (in Chinese)

[3] 冯敏玉,祝必琴,雷俊,朱建章,刘文英. 南昌高温逼熟发生

规律及其对早稻产量的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 287-292
Feng M L, Zhu B Q, Lei J, Zhu J Z, Liu W Y. Characteristics of high-temperature forced maturity disaster and its impacts on early rice in Nanchang Area[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(3): 287-292 (in Chinese)

[4] 谢远玉,张智勇,刘翠华,张红林,聂秋生,张瑞祥. 赣州近30年气候变化对双季早稻产量的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 388-393
Xie Y Y, Zhang Z Y, Liu C H, Zhang H L, Nie Q S, Zhang R X. Effect of climate change on early rice yield in last 30 years in Ganzhou[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(3): 388-393 (in Chinese)

[5] 熊伟,冯灵芝,居辉,杨笛. 未来气候变化背景下高温热害对中国水稻产量的可能影响分析[J]. 地球科学进展, 2016, 31(5): 515-528
Xiong W, Feng L Z, Ju H, Yang D. Possible impacts of high temperatures on China's rice yield under climate change[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(5): 515-528 (in Chinese)

[6] 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[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(2): 78-85
Yang S C, Shen S H, Tao S L. Spatiotemporal variation and risk assessment of single-harvest rice heat injury along the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(2): 78-85 (in Chinese)

[7] 刘伟昌,张雪芬,余卫东,薛昌颖,张弘,杜子璇. 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
Liu W C, Zhang X F, Yu W D, Xue C Y, Zhang H, Du Z X. Assessment method study on high temperature damage to rice [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2009, 32(1): 33-38 (in Chinese)

[8] 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[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 107-115
Zhang L, Hou Y Y, Yang B Y, Huang D P. Spatial-temporal characteristics and risk analysis of heat stress hazard of single-season rice across Yangtze River reaches [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(2): 107-115 (in Chinese)

[9] 陈超,庞艳梅,刘佳. 四川省水稻高温热害风险及灾损评估[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(4): 554-562
Cheng C, Pang Y M, Liu J. Assessment of risk and yield loss of rice in Sichuan Province due to heat stress [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(4): 554-562 (in Chinese)

[10] GB/T 37744—2019. 水稻热害气象等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019
GB/T 37744—2019. Meteorological grades of hot damage to rice[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019 (in Chinese)

[11] 郭红安,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[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 96-105
- Guo H A, He L, Han L J, Zhang L. Construction of heat damage intensity index of early rice and its climate risk assessment[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(5): 96-105 (in Chinese)
- [12] 田俊, 聂秋生, 崔海建. 早稻乳熟初期高温热害气象指标试验研究[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 710-714
- Tian J, Niu Q S, Cui H J. Experimental research on meteorological index of high temperature damage to early rice at the early milk stage[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(6): 710-714 (in Chinese)
- [13] Yang S B, Zhao X Y, Li B B, Hua G Q. Interpreting RADARSAT-2 quad-polarization SAR signatures from rice paddy based on experiments[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 65-69
- [14] 刘瑞娜, 杨天明, 陈鹏, 王晓东. 安徽省油菜花期连阴雨灾害损失评估指标[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 471-478
- Liu R L, Yang T M, Chen P, Wang X D. Evaluation index of continuous rain to rape during anthesis in Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(4): 471-478 (in Chinese)
- [15] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 叶彩玲. 华北北部冬小麦干旱和产量灾损的风险评估[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 131-139
- Xue C Y, Huo Z G, Li S K, Ye C L. Risk assessment of drought and yield losses of winter wheat in the northern part of North China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1): 131-139 (in Chinese)
- [16] 陈斐, 杨沈斌, 申双和, 江晓东, 胡继超, 胡凝. 基于主成分回归法的长江中下游双季早稻相对气象产量模拟模型[J]. 中国农业气象, 2014, 35(5): 522-528
- Chen F, Yang S B, Shen S H, Jiang X D, Hu J C, Hu N. Simulation model of relative meteorological yield of double-cropping early rice in middle and lower reaches of Yangtze River based on principal component regression[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(5): 522-528 (in Chinese)
- [17] 商蒙非, 杨萌, 冯宇鹏, 贾浩, 李硕, 宋英杰, 陈阜, 褚庆全. 近35年吴桥县夏玉米水分亏缺变化趋势分析[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 1-10
- Shang M F, Yang M, Feng Y P, Jia H, Li S, Song Y J, Chen F, Chu Q Q. Study on the water deficit trend of summer maize in recent 35 years in Wuqiao County, Hebei Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(9): 1-10 (in Chinese)
- [18] 李德, 孙义, 孙有丰. 淮北平原夏玉米花期高温热害综合气候指标研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 1035-1044
- Li D, Sun Y, Sun Y F. Use of integrated climatic index to determine high temperature damage to summer maize at florescence in the Huaibei Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(8): 1035-1044 (in Chinese)
- [19] 谢志清, 杜银, 高苹, 曾燕. 江淮流域水稻高温热害灾损变化及应对策略[J]. 气象, 2013, 39(6): 774-781
- Xie Z Q, Du Y, Gao P, Zeng Y. Impact of high-temperature on single cropping rice over Yangtze-Huaihe River Valley and response measures[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(6): 774-781 (in Chinese)
- [20] 田俊, 霍治国. 江西省早稻雨洗花灾害指标构建与灾损评估[J]. 应用气象学报, 2018, 29(6): 657-666
- Tian J, Huo Z G. Index and loss estimation of rain washing damage to early rice pollen in Jiangxi Province[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2018, 29(6): 657-666 (in Chinese)
- [21] 陈家金, 林晶, 李丽纯, 徐宗焕, 潘卫华. 暴雨灾害对福建水稻产量影响的灾损评估方法[J]. 中国农业气象, 2010, 31(增1): 132-136
- Chen J J, Lin J, Li L C, Xu Z H, Pan W H. Study of damage assessment method of the rice yield affected by rainstorm disasters in Fujian[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(S1): 132-136 (in Chinese)
- [22] 龚金龙, 张洪程, 胡雅杰, 龙厚元, 常勇, 王艳, 邢志鹏, 霍中洋. 灌浆结实期温度对水稻产量和品质形成的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 482-491
- Gong J L, Zhang H C, Hu Y J, Long H Y, Chang Y, Wang Y, Xing Z P, Huo Z Y. Effects of air temperature during rice grain-filling period on the formation of rice grain yield and its quality[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 482-491 (in Chinese)
- [23] 李健陵, 张晓艳, 杜尧东, 王华, 吴丽姬, 胡飞. 高温对抽穗开花期至灌浆结实期水稻源库特性的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(1): 23-29
- Li J L, Zhang X Y, Du Y D, Wang H, Wu L J, Hu F. Effects of high temperature on rice source-sink characteristics during heading stage to grain filling stage[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(1): 23-29 (in Chinese)
- [24] Berry J, Bjorkman O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, 31(1): 491-543
- [25] 喻莎, 陆魁东, 谢佰承, 胡雪媛, 黄晚华. 高温时数和热积温对超级早稻结实率的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 454-463
- Yu S, Lu K D, Xie B C, Hu X Y, Huang W H. Effects of high temperature hours and thermal accumulated temperature on seed setting rate of super hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(4): 454-463 (in Chinese)