

田俊,霍治国. 江西省早稻雨洗花灾害指标构建与灾损评估. 应用气象学报,2018,29(6):657-666.
DOI: 10.11898/1001-7313.20180602

江西省早稻雨洗花灾害指标构建与灾损评估

田俊¹⁾ 霍治国^{2)3)*}

¹⁾(江西省气象科学研究所,南昌 330096) ²⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

³⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044)

摘 要

构建早稻雨洗花灾害指标及适于早稻产量估算的灾损评估模型,对开展早稻雨洗花灾害监测、损失评估、灾害保险等具有重要意义。该文以江西省早稻为研究对象,利用 1981—2015 年 14 个水稻气象观测站逐日气象资料和农业气象观测资料,筛选出基于早稻抽穗扬花期过程降水量、最大降水量、降水日数及实际产量的雨洗花灾害样本 78 个,在此基础上,利用相关分析、正态分布以及主成分回归法,建立了雨洗花灾害指标和灾损评估模型,并对其进行了验证。结果表明:抽穗扬花期降水对雨洗花灾害形成有显著影响,其主要影响时段为抽穗扬花普遍期前后 5 d 内,关键时段为抽穗扬花普遍期前后 3 d 内。日降水量 40 mm 可作为早稻抽穗扬花期雨洗花灾害临界指标。以该指标为基础,统计日降水量不低于 40 mm 的降水日数及其对应的累积降水量,当累积降水量为 40~170 mm 时,为轻度雨洗花灾害,早稻一般减产小于 15%,平均减产 10%;当累积降水量不小于 170 mm 时,为重度雨洗花灾害,早稻一般减产不低于 15%,平均减产 22%。指标验证结果与历史实际灾害发生情况有较好的一致性。雨洗花灾损评估模型检验结果表明:雨洗花年模拟产量与实际产量吻合度较高,平均相对模拟误差为 4.3%,78.0%的资料相对误差在 5%以内,可利用该模型对雨洗花年的早稻减产率进行模拟和预测。

关键词: 早稻雨洗花灾害指标;灾损评估模型;主成分回归

引 言

早稻是江西省主要粮食作物,其产量占江西省粮食总产的 38%左右^[1],在江西全省种植业发展及国家粮食安全中占有重要地位。江西省早稻抽穗扬花期一般出现在 6 月中下旬^[2],也是江西省降水集中期的主要时段^[3],期间降水过程频繁,雨量集中,常有不同程度降雨发生,即使未形成洪涝灾害,也易使处在抽穗扬花期早稻遭受拍打危害,造成“雨打禾花,花而不实”,俗称雨洗花。雨洗花灾害指在早稻抽穗扬花期,因降水过多,造成水稻花粉吸水过多过快而膨胀破裂,失去生活力,同时柱头上分泌的液体被雨水冲洗稀释,不适宜花粉粒萌发,从而使结实率降低,导致减产的一种灾害^[4]。如 2006 年 6 月 27

日,江西北部的婺源县出现日降水量 109.3 mm 的强降水天气,观测表明:观测田块未形成洪涝灾害,但该地段早稻正处抽穗扬花普遍期,强降水天气使 50%以上早稻遭受暴雨洗花,最终导致地段实际产量仅为 $455.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,减产 18%。在气候变化背景下,全球大部分陆地区域降水强度和频率有所增加^[5],我国也不例外,1961—2015 年我国平均暴雨日数增加 8.2%^[6],且降水时空差异加剧,南方区域性洪涝事件呈增多趋势,大雨、暴雨频次增加^[7-8]。江西省降水也随之发生变化,表现为降水不均匀性更加明显,强降水事件增加^[9-11]。雨洗花灾害已成为江西省早稻生产的主要农业气象灾害之一。

对于抽穗扬花期的水稻而言,降水对水稻的危害主要有洪涝灾害和雨洗花。目前,国内外学者对水稻洪涝灾害研究取得了重要进展,主要有淹涝胁

2018-06-22 收到,2018-09-03 收到再改稿。

资助项目:中国气象科学研究院科技发展基金(2018KJ012),“十二五”国家科技支撑计划(2012BAD20B02)

* 通信作者,邮箱:huozg@cma.gov.cn

迫对水稻生长发育、产量、生理指标^[12-14]等的影响,水稻洪涝灾害指标及时空变化特征^[15-17]、水稻洪涝灾害风险和灾损评估^[18-19]、水稻洪涝受灾面积遥感监测^[20-21]等。但针对雨洗花灾害的研究明显偏少,张玉焯等^[22]利用人工模拟阴雨条件分析抽穗扬花期降水对早稻开花和受精的影响,得出降水是对早稻开花和受精影响最大的因素;伍智文等^[23]通过简单求算个别代表站早稻抽穗开花期气象条件与空秕率的相关性,得到降水量、降水日数、日平均相对湿度与早稻空秕率成正相关。上述相关研究仅限于定性描述,涉及到雨洗花灾害指标以及灾损预测模型的研究匮乏,导致在现代农业气象服务中,缺乏明确、有针对性的雨洗花灾害判定及灾损评估依据。因此,开展雨洗花灾害指标和灾损评估模型研究,对提升气象为农服务水平具有重要作用。

鉴于此,本文以江西省早稻雨洗花灾害为研究对象,基于长年代逐站逐年早稻全生育期气象条件分析,结合农业气象灾害和病虫害调查史料,筛选雨洗花灾害种类清晰的典型年样本,通过典型年样本

减产率与降水过程相结合的方法,反演早稻抽穗扬花期雨洗花灾害的降水量、降水日数及最大降水量,以此为基础,构建江西地区早稻雨洗花灾害指标和灾损评估模型,以期为开展区域早稻雨洗花灾害监测、损失评估、灾害保险等提供支撑依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源与处理

气象资料来源于江西省气象信息中心,包括江西省早稻种植区域内 14 个农业气象观测站(见图 1)1981—2015 年早稻生长发育期间逐日气象资料,包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数等,其中南昌县农业气象观测站 1988—1998 年逐日气象数据缺测,缺测值由南昌市气象观测站历史同期逐日气象数据代替。早稻生育期、地段产量以及农业气象灾害和病虫害等农业气象观测资料来自上述 14 个农业气象观测站,生育期资料为早稻实际观测的各生育期出现日期,包括播种、出苗、移栽、返

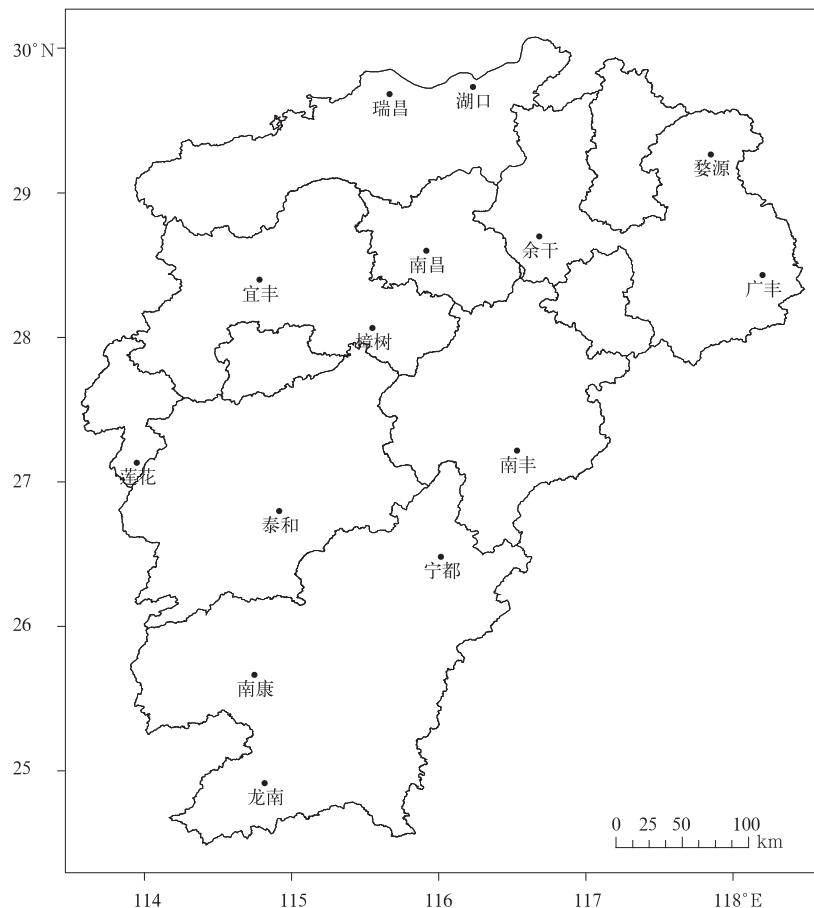


图 1 江西省 14 个农业气象观测站分布

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

青、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟和成熟期;地段产量为地段早稻成熟后单独收获称重的产量资料,各农业气象观测站观测地段均选择在早稻成片种植区,观测地段面积一般不低于 0.1 hm^2 ;农业气象灾害和病虫害观测资料为地段早稻生长发育期间灾害发生时不定期观测,其中瑞昌站、婺源站农业气象观测资料年限为1981—2009年,湖口县、樟树县为1990—2015年,其他10个站为1981—2015年。

1.2 研究方法

1.2.1 研究样本的构建

江西省早稻生长期间,干旱、暴雨洪涝、高温、低温等气象事件发生频繁,导致早稻生产不稳定性较大,出现不同程度的减产^[24-25]。减产可能是一种或者多种灾害综合影响的结果,因此,在雨洗花灾害指标的研究过程中,如何确定典型雨洗花年,即确定产量损失主要由雨洗花灾害影响的年份,是本文研究基础。首先对长年代逐站、逐年早稻全生育期气象条件进行分析,结合农业气象灾害和病虫害观测史料,厘清逐站、逐年观测地段早稻生产过程中遭遇到的主要农业气象灾害种类,筛选出产量损失主要由雨洗花灾害引起的年份,尤其要注意剔除这些年份中有洪涝灾害记录的年份,最终得到雨洗花灾害种类清晰的典型年样本。基于雨洗花年早稻产量和抽穗扬花期间逐日降水量资料,构建本文研究样本78组,其中随机留出10组样本进行雨洗花灾害等级指标验证。

1.2.2 减产率计算

在不考虑其他因素影响的情况下,农作物实际产量可以分解为趋势产量和气象产量^[26]。气象产量是一个非平稳序列,则引入相对气象产量:

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

式(1)中, y_u 为相对气象产量, y_s 为实际产量, y_t 为趋势产量。本文采用线性、正交多项式、5年滑动平均等多种方式对江西省14个农业气象观测站1981—2015年趋势产量进行模拟,并对分解的趋势产量进行正态性检验,若符合正态分布,则认为分解合理。以相对气象产量的负值定义为减产率。

1.2.3 雨洗花灾害指标构建和检验方法

通过对早稻减产率与雨洗花年降水因子的相关分析,筛选出对早稻产量影响相关的降水因子,并统计雨洗花年早稻抽穗扬花期间日降水量通过不同界限值($0\sim 80\text{ mm}$, 5 mm 为1个等级)的日数、累积降

水量与对应年份减产率的相关关系,得到雨洗花灾害临界指标,并运用正态分布置信区间方法对指标进行验证。

利用减产率累积距平法对雨洗花灾害等级指标进行划分。具体计算方法如下:在雨洗花灾害样本中,早稻抽穗扬花期累积降水量序列与对应年份的减产率序列一一对应,据此将减产率序列按照累积降水量序列从小到大的顺序排列,得到新的减产率序列 y_1, y_2, \dots, y_n 和从小到大排序的累积降水量序列 t_1, t_2, \dots, t_n 。对于减产率序列 y_1, y_2, \dots, y_n ,在某一累积降水量 t 处对应的累积减产率距平值表示为

$$D_t = \sum_{i=1}^t (y_i - \bar{y}), \quad (2)$$

式(2)中, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, n 为雨洗花灾害样本量, \bar{y} 为雨洗花减产率序列平均值。

点绘出 D_t-t 曲线,即为减产率累积距平曲线,以累积距平曲线明显转折点为界,划分雨洗花灾害等级指标,并运用历史个例进行检验。

1.2.4 灾损评估模型的建立和检验

对雨洗花灾害主要影响因子进行多重共线性诊断,多重共线性是指自变量之间存在线性相关关系^[27],造成的主要后果是自变量对预测变量的估计不可靠,因此,在进行多重回归分析时有必要进行多重共线性诊断^[28]。对共线性的度量,通常是将条件指数和方差比结合起来,若最大条件指数不小于10且相应的最大方差比大于0.5,可认为自变量间存在共线性^[28-29]。如果因子间存在多重共线性,则采用主成分回归方法建立模型,否则选择线性回归方法^[29-30],并与实际产量比较对模型进行验证。利用SPSS(statistical product and service solutions)进行主成分回归分析,方法见文献^[31]。

2 结果与分析

2.1 早稻雨洗花灾害主要影响因子

统计样本序列减产率与对应年份早稻抽穗扬花期间累积降水量(X_1)、降水日数(X_2)、最大降水量(X_3)的相关系数可知,减产率与累积降水量、最大降水量的相关性较强,相关系数分别为0.69和0.48,均达到0.01显著性水平;与降水日数的相关系数为0.23,达到0.05显著性水平。由此说明抽

穗扬花期降水对早稻产量具有显著影响,日降水量越多、持续时间越长,对早稻产量的影响越明显。相比累积降水量、最大降水量,减产率与降水日数的相关性明显偏小,表明雨洗花灾害具有一定的界限指标,当日降水量超过一定界限值时,才造成雨洗花灾害;当日降水量未超过雨洗花灾害指标时,对早稻产量影响不明显,此时的降水日数对于雨洗花灾害来说,是无效降水日数,所以导致降水日数与减产率的相关系数偏小。

2.2 雨洗花灾害指标构建和等级划分

2.2.1 指标构建

以当日降水量超过一定界限值时的降水日数为雨洗花灾害的有效降水日数。将各样本逐日降水量序列按照 5 mm 为 1 个等级给予不同的界线值,即各界限值分别为 0, 5 mm, 10 mm, …… , 80 mm, 分别统计样本序列即雨洗花年早稻抽穗扬花期间逐日降水量超过不同界限值的日数(图 2a)、累积降水量(图 2b)与对应减产率的相关关系。由图 2a 可以看到,当日降水量界限值为 40 mm 时,雨洗花年早稻抽穗扬花期日降水量不小于 40 mm 的日数与对应

减产率的相关关系最显著,在该界限值两侧,相关系数下降较快,说明日降水量 40 mm 为雨洗花灾害的门限状态;由图 2b 亦可以看到,日降水量界限值 40 mm 处曲线拐点位置,当日降水量为 0~40 mm 时,超过各界限值的累积降水量与对应减产率的相关关系变化不大,且均维持在一个较高的水平上,这是因为不小于 0.5 mm, …… , 35 mm 等各界限值的累积降水量包括了不小于 40 mm 的累积降水量,其对减产率的贡献主要来自于不小于 40 mm 的累积降水量;但当日降水量大于 40 mm 时,超过各界限值的累积降水量与减产率的相关系数开始下降,越往后下降越明显,这是因为在计算日降水量不小于 45 mm 的累积降水量时,没有将对减产率有明显影响的 40~45 mm 的日降水量计算在内,依次类推,在计算日降水量不小于 80 mm 累积降水量时,没有将对减产率有明显影响的 40~80 mm 的日降水量计算在内,导致最终与减产率的相关系数越来越小,由此说明日降水量 40 mm 可以作为雨洗花灾害的临界指标。

为了进一步确定雨洗花灾害指标,统计各站雨

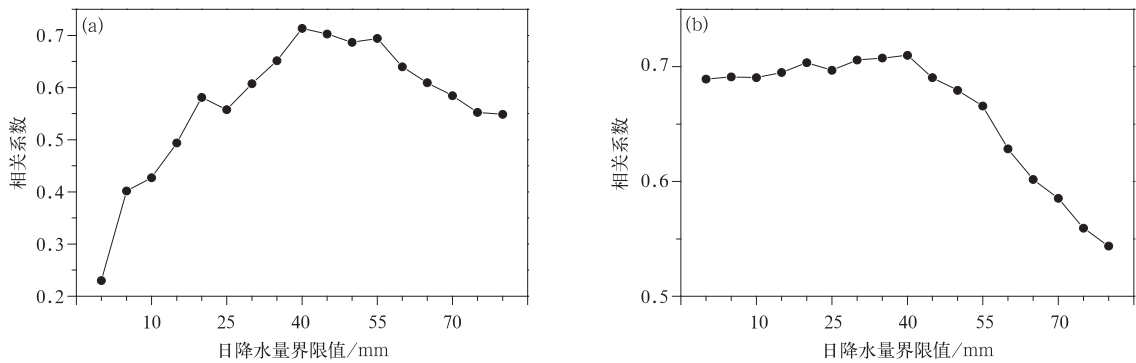


图 2 日降水量超过不同界限值的日数(a)、累积降水量(b)与对应减产率的相关关系

Fig. 2 Correlation of yield reduction rate to the number of days(a), accumulative precipitation(b) of daily precipitation above different boundary values

洗花灾害年早稻抽穗扬花期间日降水量不小于 40 mm 的累积降水量,并绘制其频率分布(如图 3 所示)。由图 3a 可以看到,样本集合呈正偏态分布,需要进行某种正态化的变换。对数变化是一种很常用的正态化变换方法,且计算简便^[32],因此,选择对数转换。经对数变换后雨洗花灾害样本集合累积降水量频率和概率检验如图 3b 所示。由图 3b 可以看到,通过变换后样本符合正态分布。以样本集合的累积降水量序列的正态分布置信水平在 95%或以

上的降水量作为雨洗花灾害指标的阈值,则落在阈值外的累积降水量值仅有 5%或者以下的概率属于考察的早稻雨洗花灾害范围。因为当累积降水量大于一定的界限值时,则为异常,所以只需计算服从正态分布总体的雨洗花灾害样本累积降水量序列在 95%置信水平的左侧临界值。对转换后的样本序列进行正态分布运算,结果表明:在 95%置信水平下雨洗花灾害样本累积降水量序列对数变换之后的左侧临界值为 3.70,再转回对应的实际值为 41 mm,该

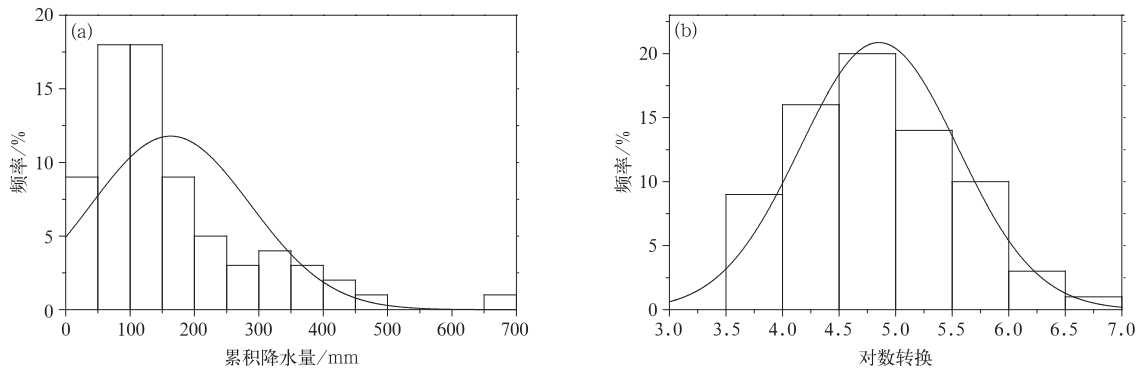


图 3 雨洗花灾害样本集合累积降水量(a)及其对数转换(b)频率分布

Fig. 3 Frequency charts about accumulative precipitation(a) and its log transformation(b) of rain washing damage to pollen sample sets

值与上述确定的雨洗花灾害临界值相吻合。由此说明,日降水量 40 mm 可以作为雨洗花灾害的临界指标。

2.2.2 等级划分

根据雨洗花灾害指标,计算得雨洗花灾害样本平均减产率为 15%。根据 1.2.3 节介绍的减产率累积距平法,将减产率序列按照累积降水量序列从小到大的顺序排列,以从小到大排序的累积降水量序列为自变量,绘制对应的减产率累积距平曲线(图 4)。由图 4 可知,减产率累积距平曲线呈 V 字型,最小值对应的累积降水量为 164 mm。反查其减产率可知,当累积降水量为 40~170 mm 时,平均减产率为 10%,其中 83% 的样本减产率小于 15%,17% 的样本减产率为 15%~20%;当累积降水量超过 170 mm 时,83% 的样本减产率不小于 15%,17% 的样本减产率为 10%~14%,平均减产率为 22%。以 170 mm 为界,将序列分成前后两部分,对前后两部分样本对应的减产率进行独立样本

t 检验,检验结果表明:前后两部分减产率差异达到 0.001 显著性水平,据此划分雨洗花灾害等级指标(如表 1 所示)。

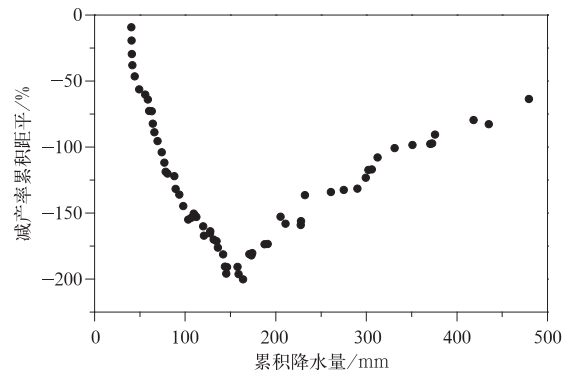


图 4 样本累积降水量序列对应的减产率累积距平曲线

Fig. 4 Accumulative anomaly of yield reduction rate based on accumulative precipitation

表 1 雨洗花灾害等级指标

Table 1 Level indicators of rain washing damage to pollen

灾害等级	累积降水量 (日降水量不小于 40 mm)	减产率		
		平均	83% 样本	17% 样本
轻度	[40 mm, 170 mm)	10%	小于 15%	15%~20%
重度	不小于 170 mm	22%	不小于 15%	10%~14%

2.2.3 指标验证

统计验证样本抽穗扬花期间日降水量不小于 40 mm 的累积降水量,根据表 1 对验证样本雨洗花灾害发生程度进行判定:当累积降水量为 [40 mm, 170 mm) 时,为轻度雨洗花灾害;当累积降水量不小于 170 mm 时,为重度雨洗花灾害。根据表 1 中统

计的各等级雨洗花灾害实际减产率情况,对雨洗花灾害指标进行验证。具体验证方法如下:根据雨洗花灾害指标,当验证样本被判定为轻(重)度雨洗花灾害时,若该样本减产率小于 15% (不小于 15%),则表明判定的雨洗花灾害发生程度与减产率相符合;若该样本减产率大于 20% (小于 10%),则表明

判定的雨洗花灾害发生程度与减产率不符合;若该样本减产率为 15%~20%(10%~14%),则表明判定的雨洗花灾害发生程度与减产率基本符合。

表 2 给出了江西省早稻雨洗花灾害等级指标的验证情况。在 10 个样本中,由雨洗花灾害等级指标所得的发生程度与早稻减产率相符合的有 7 个,基

本符合的 2 个,不符合的仅 1 个。完全符合的 7 个样本与表 1 中 83%样本减产率一致,基本符合的 2 个样本与表 1 中 17%样本的减产率一致,完全不符合的仅占 10%,表明构建的雨洗花灾害等级指标所得的灾害发生程度与减产率的吻合度较高,能较好地反映早稻雨洗花灾害的实际发生情况。

表 2 雨洗花灾害等级指标验证

Table 2 Verification about level indicators of rain washing damage to pollen

观测站	年份	降水(不小于 40 mm)出现时期	累积降水量/mm	发生程度	减产率/%	符合程度
南康	1992	抽穗扬花普遍期当日	49.1	轻度	5	符合
南丰	2015	抽穗扬花普遍期后第 2 日	56.8	轻度	2	符合
广丰	2015	抽穗扬花普遍期前第 2 日	71.9	轻度	7	符合
宜丰	2015	抽穗扬花普遍期当日及其后第 4 日	108.9	轻度	14	符合
婺源	2006	抽穗扬花普遍期后第 1 日	109.3	轻度	18	基本符合
南昌市	1981	抽穗扬花普遍期后第 2 日和第 3 日	119.9	轻度	8	符合
南昌县	1999	抽穗扬花普遍期当日及其后第 1 日	146.3	轻度	20	基本符合
湖口	1991	抽穗扬花普遍期后第 1 日和第 4 日	157.9	轻度	15	符合
莲花	1983	抽穗扬花普遍期后第 2 日和第 3 日	204.9	重度	36	符合
樟树	2014	抽穗扬花普遍期前 2 日	204.9	重度	5	不符合

由表 2 还可以看到,雨洗花灾害程度还与降水出现的时间有关,降水越接近抽穗扬花普遍期,对早稻产量的影响越明显,如南康县 1992 年、南丰县 2015 年早稻抽穗扬花期降水量分别为 49.1 mm, 56.8 mm,但南康县降水出现在抽穗扬花普遍期当日,而南丰县降水出现在抽穗扬花普遍期后第 2 日,导致南康县当年减产率 5%,南丰县只减产 2%。表 2 中基本符合的 2 个样本,婺源县 2006 年和南昌县 1999 年也是这种情况。婺源县 2006 年降水出现在抽穗扬花普遍期后第 1 日,南昌县 1999 年降水出现在抽穗扬花普遍期当日及其后第 1 日,导致减产率比降水仅出现在抽穗扬花始期或末期偏高。婺源县 2008 年早稻抽穗扬花期降水为 143.8 mm,比 2006 年的 109.3 mm 偏多,但降水出现在抽穗扬花始期,全田只有约 10%的植株处抽穗扬花期,导致减产率低于 2006 年,仅减产 6%;南昌县 1986 年早稻抽穗扬花期降水为 145.2 mm,与 1999 年相差不多,但降水出现时,田间早稻已接近抽穗扬花末期,因此,减产率低于 1999 年,仅减产 10%。

为了分析上述情况是否具有普遍性,本文对所有样本降水出现的时间段进行普查。由普查结果可知,当雨洗花灾害发生时,降水一般出现在抽穗扬花普遍期前后 5 d 内,72%的样本降水出现在抽穗扬花普遍期前后 3 d 内,在抽穗扬花普遍期当日或者

前后 1~2 d 内时出现降水,对早稻产量影响最明显,在抽穗扬花始期或者末期发生降水,对早稻产量的影响相对减小。即雨洗花灾害影响时段为抽穗扬花普遍期前后 5 d 内,关键时段为抽穗扬花普遍期前后 3 d 内。雨洗花灾害程度与降水出现时全田水稻进入抽穗扬花的植株所占的百分率密切相关,降水越接近抽穗扬花普遍期,影响越严重,在抽穗扬花始期或末期遭遇雨洗花,影响相对减小。因此,在利用雨洗花灾害等级指标(表 1)对雨洗花灾害进行判别时,需要结合田间早稻抽穗扬花所处的不同阶段,利用历史雨洗花灾害情况对当前雨洗花灾害进行类比辅助判断。

2.3 灾损评估模型的建立

2.3.1 模型的建立

基于上述雨洗花灾害指标,利用主成分回归分析法建立雨洗花灾害影响因子 X_1, X_2, X_3 对减产率影响的回归模型,以定量评价不同降水强度、降水日数对早稻产量造成的综合影响。

首先利用 SPSS 对 X_1, X_2, X_3 进行共线性诊断。由共线性诊断结果可知,最大条件指数为 30,大于 10,且对应的方差比均大于 0.5,说明所选的 3 个因子间存在多重共线性。若直接采用线性回归方法建立模型,会影响模型的可靠性,因此,采用主成分回归模型建立早稻减产率模拟模型。

表 3 为雨洗花灾害影响因子主成分分析结果。根据主成分数量提取原则为主成分对应的特征值大

于 1 的前 m 个主成分。由表 3 可见,第 1 主成分方差贡献率达 82.50%,说明该主成分已经能充分说

表 3 主成分分析结果

Table 3 Results of principal component analysis

分量	特征值	累积贡献率/%	因子载荷矩阵		
			X_1	X_2	X_3
1	2.475	82.50	0.994	0.889	0.834
2	0.511	99.53	-0.057	-0.453	0.550
3	0.014	100.00	-0.092	0.063	0.042

明数据间的波动原因,故只需提取第 1 主成分。将第 1 主成分载荷向量 $A=[0.994,0.889,0.834]$ 除以对应特征值 $\lambda_1=2.475$ 的算术平方根,得到特征向量 $U=[0.632,0.571,0.530]$ 。根据第 1 主成分特征向量值,得第 1 主成分表达式

$$F = 0.632X_1 + 0.571X_2 + 0.530X_3。 (3)$$

式(3)中, X_1, X_2, X_3 分别代表早稻抽穗扬花期日降水量不小于 40 mm 的累积降水量、降水日数、最大降水量经过数据标准化处理后的结果,量纲为 1。

将上述主成分与减产率 Y 建立回归方程,得到

$$Y = 0.57F。 (4)$$

对于式(4), R^2 为 0.805,说明模型对数据的拟合程度较好。对上述回归方程和回归系数进行显著性检验,检验结果均达到 0.001 显著性水平。将式(3)代入式(4),得到以降水因子为自变量的标准化回归模型

$$Y = 0.360X_1 + 0.326X_2 + 0.302X_3。 (5)$$

由式(5)可知,标准化回归模型中各项因子系数相差不大,表明在雨洗花降水过程中,日降水量不小于 40 mm 的累积降水量、降水日数、最大降水量对早稻减产率有同等重要的作用,降水日数越多、累积降水量越大或者最大降水量越大、累积降水量越大均可以造成重度雨洗花灾害。

为了应用方便,将式(5)中标准化变量还原为原始变量

$$\frac{Y - \bar{Y}}{S_Y} = 0.360 \times \frac{X_1 - \bar{X}_1}{S_1} + 0.326 \times \frac{X_2 - \bar{X}_2}{S_2} + 0.302 \times \frac{X_3 - \bar{X}_3}{S_3}。 (6)$$

式(6)中, $\bar{Y}, \bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3$ 分别为 Y, X_1, X_2, X_3 的平均值, S_Y, S_1, S_2, S_3 分别为 Y, X_1, X_2, X_3 的标准差。将各变量平均值和标准差代入式(6),整理得最终回归方程

$$Y = 1.811X_1 + 0.022X_2 + 0.050X_3 + 1.100。 (7)$$

2.3.2 模型的验证

为验证建立的灾损评估模型,首先将各样本 3 个降水因子值分别代入式(7)计算减产率,再将其与趋势产量一并通过式(1)实现对早稻产量的模拟,将模拟产量与实际产量进行对比(图 5)。由图 5 可知,模拟产量与实际产量的回归系数为 0.85,相关系数为 0.96,达到了 0.01 显著性水平。对模拟产量资料进行相对误差分析表明,其相对误差在 0.1%~18.0%,平均为 4.3%,其中 78.0%的资料其相对误差在 5%以内,7%的资料相关误差超过 10%,表明建立的模型能够有效模拟早稻减产率,可以利用该模型对实际生产中发生的雨洗花年早稻减产率进行模拟和预测。

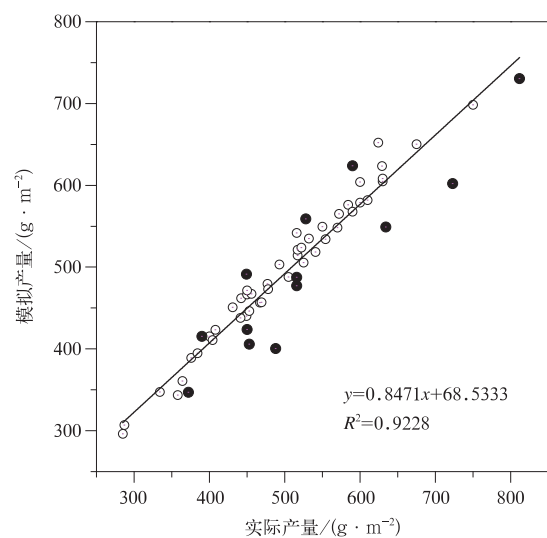


图 5 模拟产量与观测地段实际产量比较 (黑点代表模拟产量相对误差超过 5%)

Fig. 5 Comparison between simulated yield and actual yield of observation section (black dots denote simulated yields with relative error above 5%)

3 结论与讨论

本文根据1981—2015年江西省14个农业气象观测站逐日气象和农业气象观测资料,对雨洗花灾害样本进行了筛选,系统分析了典型雨洗花年早稻抽穗扬花期间降水因子与减产率的相互关系,并在此基础上建立了江西省雨洗花灾害指标和灾损评估模型。研究表明:

1) 抽穗扬花期降水对雨洗花灾害形成有显著影响,降水强度越强、持续时间越长,雨洗花灾害越严重。其主要影响时段为抽穗扬花普遍期前后5 d内,关键时段为抽穗扬花普遍期前后3 d内。在主要影响时段内,降水越接近抽穗扬花普遍期,影响越严重;在抽穗扬花始期或者末期,影响相对减小。

2) 日降水量40 mm可作为雨洗花灾害的临界指标。以该指标为基础,统计早稻抽穗扬花期日降水量不小于40 mm的降水日数及其对应的累积降水量,当累积降水量为40~170 mm时,为轻度雨洗花灾害,早稻一般减产小于15%,平均减产10%;当累积降水量不小于170 mm时,为重度雨洗花灾害,早稻一般减产不小于15%,平均减产22%。历史资料验证表明:构建的雨洗花灾害等级指标能较好地反映研究区域内早稻雨洗花灾害的实际发生情况,可为农业气象服务提供理论依据。在实际应用该等级指标时,需要根据田间早稻所处的抽穗扬花不同阶段辅助判断。

3) 利用雨洗花灾害主要影响因子所建立的早稻灾损评估模型达到0.01显著性水平,以实际产量对模型进行验证,二者相关系数为0.96,平均相对模拟误差为4.3%,78.0%的资料相对误差在5%以内。由此说明,模型可用于江西省早稻雨洗花灾害年减产率的模拟和预测。

本研究是基于雨洗花灾害典型年的筛选,筛选过程中,虽然对逐年逐站的农业气象灾害种类进行了梳理,但气象条件对早稻产量影响综合且复杂,完全准确界定雨洗花灾害样本还有一定难度,未来需进一步结合田间试验或其他模拟方法,开展短时强降水对早稻抽穗扬花影响的补充研究,以便对雨洗花灾害指标进行深入验证和改进。在模拟雨洗花年早稻减产率时,采用主成分回归方法,以提取的主成分指标与减产率回归建模,可解决线性回归分析中多重共线性问题,且能较好反映原来多个指标的综

合信息,使得到的回归方程更为可靠^[33-34]。然而根据本文收集的样本可能存在一些统计偏差。基于作物模型的预报方法研究是农业气象灾害预报的一个发展方向^[35-37],其缺点是过于复杂,需要确定多个参数变量。因此,如何将经验统计模型、作物模型等多种预报方法相结合,建立综合模型值得进一步研究^[38]。

引起雨洗花灾害最主要的原因是降水,因此,在雨洗花灾害主要影响时段内,尤其是关键影响时段内,降水对早稻产量影响大小主要取决于降水强度和降水持续时间,但还需要考虑水稻开花授粉特性。正常情况下,早稻大多数在09:00(北京时,下同)开始开花,09:00—11:00为开花盛期^[39],在该时间段内遭遇日降水量不小于40 mm的大雨,会影响颖花授粉受精的正常进行,使受精的子房停止发育而形成秕粒,或不受精而成空粒,对早稻产量影响较大。如果降水发生在傍晚或夜间,且不是连续几日的降水,如阵雨对产量影响不大,因为水稻授粉受精以午前最多,16:00开花少^[39];但如果是连续的降水,也会造成花药败裂、柱头过湿从而导致授粉不良引起减产,降水持续时间越长,减产越严重。

建立的灾害判定指标和减产率模拟模型仅从降水这个角度出发,未考虑其他不利的气象因素,如相对湿度、温度、大风等,但这些因子大多可同时归结为由降水引起^[23],如暴雨往往伴随大风,可引起相对湿度增大和温度降低等。因此,以降水作为灾害判定指标和模型因子具有代表性,且相对简单实用,便于农业气象业务服务应用和气象灾害预报预警等相关工作的开展。雨洗花灾害发生时,气象因子之间的相互影响复杂,且除气候因子之外,水稻产量还受农事管理、品种差异等因素的影响。因此,在实际对雨洗花灾害进行判别和影响预测时,需结合田间实际生产状况综合考虑雨洗花灾害的发生情况,开展相关的农业气象业务和服务。

参考文献

- [1] 江西省统计局. 江西统计年鉴. 北京:中国统计出版社,2000-2016.
- [2] 黎毛毛,余丽琴,熊玉珍,等. 抽穗扬花期耐热水稻种质资源的筛选鉴定. 江西农业学报,2016,28(6):1-5.
- [3] 杨爱萍,杜筱玲. 江西省降水集中程度的变化特征. 中国农业气象,2010,31(4):512-516.
- [4] 刁操铨. 作物栽培学各论(南方本). 北京:中国农业出版社,1994:83-84.

- [5] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [6] 王玉洁, 周波涛, 任王玉, 等. 全球气候变化对我国气候安全影响的思考. 应用气象学报, 2016, 27(6): 750-758.
- [7] 周广胜, 何奇瑾, 汲玉河. 适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 527-533.
- [8] 李维京, 张若楠, 孙丞虎, 等. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 577-591.
- [9] 任王玉, 任国玉. 1960—2008年江西省极端降水变化趋势. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 462-469.
- [10] 王怀清, 赵冠男, 彭静, 等. 近50年鄱阳湖五大流域降水变化特征研究. 长江流域资源与环境, 2009, 18(7): 615-619.
- [11] 胡菊芳, 张超美, 彭静, 等. 江西省主要气象灾害年际变化特征分析. 气象与减灾研究, 2007, 30(4): 37-42.
- [12] 周永进, 王斌, 许有尊, 等. 孕穗期淹水胁迫对早稻生长发育及产量的影响. 中国稻米, 2013, 19(4): 86-90.
- [13] 宁金花, 霍治国, 陆魁东, 等. 不同生育期淹水胁迫对杂交稻形态特征和产量的影响. 中国农业气象, 2013, 34(6): 678-684.
- [14] Gouranga K, Narayan S, Ashwani K. Deep-water rice production as influenced by time and depth of flooding on the east coast of India. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, 58(6): 573-592.
- [15] 殷剑敏, 孔萍, 李迎春, 等. 我国南方早稻洪涝灾害指标试验研究. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 1-5.
- [16] 汪天颖, 霍治国, 李旭辉, 等. 基于生育时段的湖南省早稻洪涝等级指标及时空变化特征. 生态学杂志, 2016, 35(3): 709-718.
- [17] 吕晓敏, 周广胜. 双季稻主要气象灾害研究进展. 应用气象学报, 2018, 29(4): 385-395.
- [18] 杨建莹, 霍治国, 吴立, 等. 西南地区水稻洪涝灾害风险评估与区划. 中国农业气象, 2016, 37(5): 564-577.
- [19] 张爱民, 马晓群, 杨太明, 等. 安徽省旱涝灾害及其对农作物产量的影响. 应用气象学报, 2007, 18(5): 619-626.
- [20] Sakamoto T, Cao P V, Nguyen N V, et al. Agro-ecological interpretation of rice cropping systems in flood-prone areas using MODIS Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, 75(4): 413-424.
- [21] Son N T, Chen C F, Chen C R, et al. Satellite-based investigation of flood-affected rice cultivation areas in Chao Phraya River Delta, Thailand. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 86(4): 77-88.
- [22] 张玉焯, 张桂和, 朱国奇, 等. 阴雨对早稻开花及受精结实的影响. 中国水稻科学, 1995, 9(3): 173-178.
- [23] 伍智文, 解娜, 肖建中, 等. 早稻空秕率与抽穗开花期气象条件分析. 作物研究, 2013, 27(5): 423-426.
- [24] 黄淑娥, 田俊, 吴慧峻. 江西省双季水稻生长季气候适宜度评价分析. 中国农业气象, 2012, 33(4): 527-533.
- [25] 田俊, 黄淑娥, 祝必琴, 等. 江西双季早稻气候适宜度小波分析. 江西农业大学学报, 2012, 34(4): 646-651; 670.
- [26] 张浩, 马晓群, 彭妮, 等. 淮河流域冬小麦涝渍灾害损失评估研究. 气象与环境学报, 2015, 31(6): 123-129.
- [27] 马雄威. 线性回归方程中多重共线性诊断方法及其实证分析. 华中农业大学学报(社会科学版), 2008(2): 78-81.
- [28] 丁元林, 孔丹莉, 毛宗福. 多重线性回归分析中的常用共线性诊断方法. 数理医药学杂志, 2004, 17(4): 299-300.
- [29] 陈斐, 杨沈斌, 申双和, 等. 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. 中国农业气象, 2014, 35(5): 522-528.
- [30] 吴诚鸥, 秦伟良. 近代实用多元统计分析. 北京: 气象出版社, 2007: 86-87.
- [31] Liu R X, Kuang J, Gong Q, et al. Principal component regression analysis with SPSS. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2003, 71(2): 141-147.
- [32] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版). 北京: 气象出版社, 2007: 34-35.
- [33] Yang S B, Zhao X Y, Li B B, et al. Interpreting RADARSAT-2 quad-polarization SAR signatures from rice paddy based on experiments. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2012, 9(1): 65-69.
- [34] Kebede Gurmessa T, Bárdossy A. A principal component regression approach to simulate the bed-evolution of reservoirs. *J Hydrol*, 2009, 368(1-4): 30-41.
- [35] 帅细强, 王石立, 马玉平, 等. 基于水稻生长模型的气象影响评价和产量动态预测. 应用气象学报, 2008, 19(1): 71-81.
- [36] 秦鹏程, 刘敏, 万素琴, 等. 不完整气象资料下基于作物模型的产量预报方法. 应用气象学报, 2016, 27(4): 407-416.
- [37] 刘春, 张春辉, 郭萨萨. 基于能量模型的水稻生长模型. 应用气象学报, 2013, 24(2): 240-247.
- [38] 帅细强, 陆魁东, 黄晚华. 不同方法在湖南省早稻产量动态预报中的比较. 应用气象学报, 2015, 26(1): 103-111.
- [39] 丁颖. 丁颖稻种作论文选集. 北京: 农业出版社, 1983: 155-156.

Index and Loss Estimation of Rain Washing Damage to Early Rice Pollen in Jiangxi Province

Tian Jun¹⁾ Huo Zhiguo²⁾³⁾

¹⁾ (*Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330096*)

²⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

³⁾ (*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

Abstract

Rain washing damage to pollen is one of the main agrometeorological disasters of early rice in Jiangxi Province. However, there are few studies on the disaster index and loss estimation model of this disaster. And in routine agrometeorological service, there are no definite and targeted criterion and loss assessment basis of rain washing damage to pollen. Therefore, studies on disaster index and loss estimation mode of rain washing damage to pollen are of great importance to the disaster monitoring, loss assessment and agricultural disasters' insurance management of early rice. Taking the disaster of rain washing damage to pollen in Jiangxi Province as research object, 78 disaster samples of rain washing damage to pollen are picked out based on analysis of long-term (1981—2015) meteorological conditions during the whole growth period of early rice in 14 agrometeorological stations, and historical data about the observation of agrometeorological disasters, diseases and insect pests. Afterwards, index and loss estimation model of rain washing damage to early rice pollen are determined based on correlation analysis, normal distribution and principal component regression method, and verified by independent samples. Results show that the rainfall during heading-flowering stage of early rice has a significant effect on the formation of rain washing damage to early rice pollen. Main and key influence periods are 5 and 3 days before and after the heading-flowering stage, respectively. The daily precipitation 40 mm can be used as the threshold for rain washing damage to pollen in heading-flowering stage of early rice. Based on this index, the number of days with total precipitation exceeding 40 mm and their corresponding accumulative precipitation are counted. When the accumulative precipitation is between 40 mm and 170 mm (light disaster), the yield reduction rate of early rice is generally less than 15%, and the average reduction rate is 10%. When the accumulative precipitation exceeds 170 mm (severe disaster), the yield reduction rate is generally more than 15%, and the average reduction rate is 22%. The grading indexes are detected to be basically consistent with the historical occurrence levels of rain washing damage to early rice pollen. And simulation results of loss estimation model show that simulated early rice yields are highly accordant with the actual yields, the average relative error is 4.3%, and the relative error of 78% data is within 5%. It indicates that the model can be used to simulate and predict the yield reduction rate of early rice when rain washing damages rice pollen.

Key words: index of rain washing damage to early rice pollen; loss estimation model; principal component regression method