

江西省双季晚稻寒露风影响评估

田俊¹ 崔海建²

(1. 江西省气象科学研究所,南昌 330046;
2. 南昌工学院 基础教学部,南昌 330108)

摘要 为定量评价寒露风对江西省双季晚稻的影响,依据 1981—2013 年江西省 81 个常规气象观测站 9 月 1 日—10 月 10 日逐日平均气温、最低气温资料和 1991—2012 年江西省 14 个农业气象观测站双季晚稻灾害调查资料,研究江西省双季晚稻寒露风影响评估模型和等级划分标准,并利用江西省农业气象试验站 2010—2013 年晚稻分期播种试验资料进行验证。结果表明,在晚稻寒露风发生期间,降温幅度、过程平均气温、极端最低温度和低温持续时间对水稻冷害具有同等重要的作用,4 个因子同时出现或部分出现异常均可以造成不同程度的冷害。在综合考虑了上述 4 个因子的基础上,结合主成分分析法构建寒露风影响评估模型和等级划分标准,其分期播种试验检验评估等级与实际等级完全一致的占 80%;运用模型对江西省 2006、2011 年 2 次明显寒露风天气过程进行评估,评估准确率较高,达 87.5%;表明所建立的模型可以用来定量评价江西省各市(县)晚稻寒露风发生程度。据此确定的寒露风评价指标为:寒露风指数(CDWI)≥0.70 时为重度寒露风,晚稻减产 >15%;CDWI 在 0.50~0.70 时,发生中度寒露风,晚稻减产 10%~15%;CDWI 在 0.30~0.50 时,发生轻度寒露风,晚稻减产 5%~10%。

关键词 水稻;寒露风;模型与等级评估;主成分分析;江西省

中图分类号 S 166 **文章编号** 1007-4333(2016)02-0107-08 **文献标志码** A

Impact assessment of cold-dew wind on double-cropping late rice in Jiangxi Province

TIAN Jun¹, CUI Hai-jian²

(1. Meteorological Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China;
2. Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108, China)

Abstract In order to quantify the impact of cold-dew wind on double-cropping late rice in Jiangxi Province, an impact assessment model and grading standards of cold-dew wind to late rice were studied based on 1981 – 2013 daily average and minimum temperature data from 81 stations, and 1991 – 2012 disaster investigation data of late rice from 14 agricultural meteorological observation stations. The model was verified through sowing by stage experiment data in agrometeorological experiment station of Jiangxi Province during 2010 – 2013. The results showed that the decreasing extent of temperature, average temperature of the process, extreme minimum temperature, and low temperature duration had the same important role in the chilling injury of rice. Four factors appeared at the same time or part of four factors appeared could cause different degree of chilling injury. Considering the above four factors, the assessment model and grading standards of cold-dew wind to late rate were established by using principal component analysis method, and were tested through sowing rice by stage. The testing results proved the assessment and the actual grade were 80% identical, and the accurate rate of model used to assessment two obviously cold dew wind weather process in 2006 and 2011 reached 87.5% accuracy. The model established in this paper could be used to quantify the impact of cold-dew wind on late rice of each county (city). When the index of cold-dew wind was more than 0.70 (severe damage cold-

收稿日期: 2015-04-08

基金项目: 江西省气象科技面上项目(JXQX201406); 科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406025)

第一作者: 田俊, 工程师, 主要从事农业气象研究, E-mail: 75356122@qq.com

dew wind) the yield reduction rate of late rice was more than 15%; When the index was between 0.50 – 0.70 (moderate damage cold-dew wind) the yield reduction rate of late rice was between 10% – 15%; When the index was between 0.30 – 0.50 (slight damage cold-dew wind) the yield reduction rate of late rice was between 5% – 10%.

Keywords rice; cold-dew wind; assessment model and grading assessment; principal component analysis; Jiangxi Province

寒露风通常指双季晚稻孕穗-抽穗扬花期间,因冷空气入侵引起明显降温,影响水稻正常开花授粉,使空壳率增加,千粒重下降,导致水稻减产甚至失收的一种灾害性天气^[1]。它具有危害范围大,影响时间长,发生频率高,成灾严重等主要特征^[2],是影响江西省双季晚稻生产的主要农业气象灾害。值得注意的是,在气候变暖的影响下,绝大部分农业气象灾害危害程度加重,特别是极端气候事件时有发生,给农业生产带来了一些新问题^[3];据研究^[4],江西省寒露风有提前的趋势,重度寒露风有增多趋势。以往对寒露风的研究,主要侧重于寒露风时空分布、演变趋势^[4-5],对水稻花粉性状^[6-8]、理化特性^[8-9]以及产量结构^[9-11]的影响等方面,针对寒露风影响评估方面的研究少见报道。实际应用中,寒露风评估也仅建立在寒露风指标的基础上,以一定的低温强度配置不同持续时间来确定寒露风发生程度,缺乏对寒露风灾害影响程度的具体及定量的评估。

引起寒露风灾害最主要的原因就是降温。研究表明,低温出现的早晚(初日)、强度和持续时间是构成冷害的三要素,三要素同时出现或三要素之一出现异常均可以造成不同程度的冷害^[2];最低温度、日平均气温、低温持续天数对水稻冷害有重要意义^[12];温度愈低,持续时间越长,危害愈重^[13]。因此,在综合考虑了上述因子的基础上,拟选取寒露风天气过程中最大降温幅度、过程平均气温、极端最低气温和低温持续日数作为寒露风主要影响因子,以1981—2013年江西省双季晚稻寒露风天气过程为研究对象,结合主成分分析法和分期播种试验研究江西省双季晚稻寒露风影响评估模型和等级划分标准,旨在为农业生产趋利避害、减灾防灾提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料及其来源

1)1981—2013年江西省81个常规气象观测站每年9月1日—10月10日逐日平均气温和最低气温资料,来自江西省气象信息中心,用于寒露风评估模型的构建;1991—2012年14个农业气象观测站

(图1)双季晚稻灾害调查资料,来自各观测站,为寒露风等级划分依据。

2)2010—2013年江西省农业气象试验站(南昌县莲塘镇敷林村)晚稻分期播种试验所获得的生育期、产量资料,用于寒露风评估模型的检验。

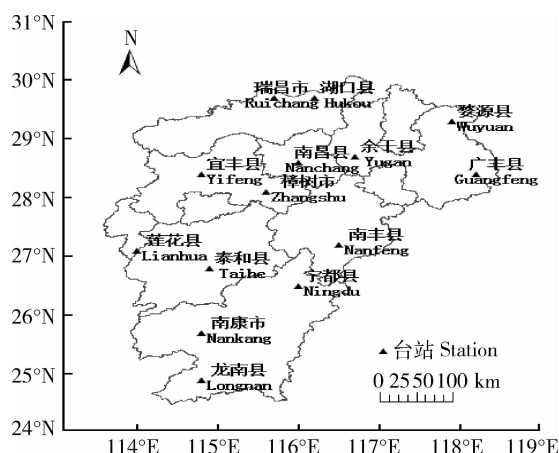


图1 江西省14个农业气象观测站分布

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

1.2 分期播种试验

以江西省推广应用的杂交稻品种岳优9113为材料,于2010—2013年在江西省农业气象试验站(南昌县莲塘镇敷林村)进行分期播种试验,播种时间分别为2010年6月17日、6月26日和7月6日;2011年6月10日、6月21日、7月6日和7月20日;2012年6月17日、6月26日和7月6日;2013年6月18日、6月23日、6月28日、7月3日和7月8日。将晚稻全生育期生长状况良好的播种期作为该年对照播期,2010—2013年对照播期分别为2010年6月17日、2011年6月10日、2012年6月17日和2013年6月28日。在分期播种试验中,全生育期田间水肥管理和病虫害防治按照常规栽培方式进行。试验过程中进行发育期观测和灾害调查,成熟后进行考种测产,计算减产率。

$$\text{减产率}/\% =$$

$$(\text{实际产量} - \text{对照产量}) / \text{对照产量} \times 100 \quad (1)$$

式中:对照产量指对应年份对照播期的实际产量。

1.3 寒露风天气过程的定义

根据《江西省双季稻气象灾害指标》标准^[14],定义寒露风天气过程为:9月1日—10月10日,当市(县)气象观测站日平均气温 $\leq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$,持续 $\geq 3\text{ d}$ 或日平均气温 $\leq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$,持续2d,且期间有1d日最低气温 $\leq 16\text{ }^{\circ}\text{C}$,为寒露风天气过程开始,当日平均气温 $\geq 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,为寒露风天气过程结束。寒露风天气过程中最大降温幅度,指寒露风天气过程前一天日平均气温与寒露风天气过程中日平均气温最小值的差值;过程平均气温,指寒露风天气过程中日平均气温平均值;极端最低气温,指寒露风天气过程中日最低气温最小值。

1.4 分析方法

利用主成分分析方法构建寒露风评估和指数计算模型。依据1991—2012年江西省14个农业气象观测站灾害调查资料,对寒露风等级进行划分;并用2010—2013年分期播种试验资料对模型进行验证。

Min-max 标准化计算方法为

$$\text{新数据} = (\text{原数据} - \text{最小值}) / (\text{最大值} - \text{最小值}) \quad (2)$$

采用 SPSS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 晚稻寒露风主要影响因子特征分析

为建立晚稻寒露风影响评估模型,首先统计江西省81个常规气象观测站1981—2013年9月—10月上旬共2479个寒露风天气过程中最大降温幅度(X_1)、过程平均气温(X_2)、极端最低气温(X_3)和低温持续日数(X_4),结果见表1。由表可见,分析期间江西省寒露风天气过程平均最大降温幅度 $4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大值可达 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,87%分布在 $1.0\sim 7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;过程平均气温平均值为 $19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,变化范围 $13.5\sim 21.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,90%分布在 $17.5\sim 21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;极端最低气温平均值为 $14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,87%分布在 $11.0\sim 18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,5%在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;低温持续时间平均值为 4.7 d ,最长持续时间达 14 d ,96%持续 $3\sim 8\text{ d}$ 。

表1 9月—10月上旬寒露风天气过程中主要影响因子的统计结果(1981—2013年)

Table 1 Statistics results of main impact factors about the low temperature process during September to last ten-day of October(1981—2013)

指标 Index	$X_1/{}^{\circ}\text{C}$	$X_2/{}^{\circ}\text{C}$	$X_3/{}^{\circ}\text{C}$	X_4/d
最大值 Max	16.0	21.8	20.0	14
最小值 Min	0.4	13.5	6.0	3
平均值 Mean	4.9	19.0	14.1	4.7

注: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别代表寒露风天气过程中最大降温幅度、过程平均气温、极端最低气温和低温持续日数。下表同。

Note: X_1 is decreasing extent of temperature, X_2 is average temperature of the process, X_3 is extreme minimum temperature, and X_4 is low temperature days. The same as below.

2.2 晚稻寒露风评估模型的建立

借鉴文献[15-16]中有关农业气象灾害指数的构建方法——主成分分析法,来建立水稻寒露风评估模型,以定量评价不同降温幅度、低温水平和持续时间对水稻造成的综合影响。首先对81个常规气象观测站1981—2013年寒露风天气过程中最大降温幅度(X_1)、过程平均气温(X_2)、极端最低气温(X_3)和低温持续日数(X_4)进行序列间相关分析(表2)。由表2可知,这4个主要影响因子序列间

相关性较高($P < 0.01$),适合进行主成分分析。

应用 SPSS 软件对4个影响因子序列进行主成分分析,结果见表3和表4。表3为各主成分的特征值 λ 和贡献率,表4为前2个因子载荷矩阵。

由表3可知,前2个主成分的累积贡献率为86.21%,故只需提取第一、第二主成分进行分析。将表4中第一、第二主成分载荷向量除以各自特征值的算术平方根,得到特征向量 U 。其结果见表5。

表2 影响因子间的相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix among impact factors

影响因子 Impact factors	X_1	X_2	X_3	X_4
X_1	1.000			
X_2	-0.496**	1.000		
X_3	-0.665**	0.911**	1.000	
X_4	0.311**	-0.126**	-0.308**	1.000

注：**表示相关系数通过0.01水平的显著性检验。

Note: ** represents significant difference at $P < 0.01$.

表3 主成分的特征值和贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution rates of principal components

因子 Component	特征值 λ Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate
1	2.52	62.92	62.92
2	0.93	23.29	86.21
3	0.50	12.43	98.64
4	0.05	1.36	100.00

表4 前2个因子载荷矩阵

Table 4 Load matrix of the first three components

影响因子 Impact factors	因子 Component	
	1	2
X_1	-0.80	-0.10
X_2	0.88	0.36
X_3	0.96	0.15
X_4	-0.43	-0.88

表5 前2个因子特征向量

Table 5 Eigenvectors of the first two components

影响因子 Impact factors	特征向量 Eigenvector	
	U_1	U_2
X_1	-0.50	-0.11
X_2	0.55	0.37
X_3	0.61	0.16
X_4	-0.27	-0.91

由表5可知,第一、第二主成分分别为

$$F_1 = -0.50X_1 + 0.55X_2 + 0.61X_3 - 0.27X_4 \quad (3)$$

$$F_2 = -0.11X_1 + 0.37X_2 + 0.16X_3 - 0.91X_4 \quad (4)$$

式中: F_1 、 F_2 分别代表第一、第二主成分。根据第一、第二主成分及各自的权重计算主成分综合模型,即

$$F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} F_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} F_2 \quad (5)$$

式中: F 代表综合主成分, λ_1 、 λ_2 分别代表第一、第二主成分特征值,根据式(5),可得主成分综合模型为

$$F = -0.40X_1 + 0.50X_2 + 0.49X_3 - 0.44X_4 \quad (6)$$

根据式(6)即可计算综合主成分得分,综合得分越高,表明晚稻受寒露风的影响越小。为了使模型更好地在实际工作应用,将寒露风指数(CDWI)定义为

$$CDWI = 1 - F \quad (7)$$

即

$$CDWI = 1 + 0.40X_1 - 0.50X_2 - 0.49X_3 + 0.44X_4 \quad (8)$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别代表寒露风天气过程中最大降温幅度、过程平均气温、极端最低气温、低温持续日数经过数据 Min-max 标准化处理后的结果,

无量纲。Min-max 数据标准化需要对照数据见表 1。根据式(8)即可计算寒露风指数,由式(8)可知,寒露风指数的计算是基于台站气象资料,因此该模型是针对当地特定气象条件下的评估模型,若需要对全省或区域寒露风进行整体评估,则以寒露风出现的站数和等级为基础,参考寒露风行标中有关区域寒露风等级的划分标准来进行^[17]。

由式(8)还可以看出,寒露风指数与最大降温幅度、低温持续日数成正相关关系,与过程平均气温、极端最低气温成负相关关系。寒露风评估模型揭示的意义是,在晚稻寒露风发生期间,过程降温幅度越大,过程平均气温、极端最低气温越低,低温持续日数越长,寒露风指数越大,寒露风越严重。在评估寒露风发生程度的 4 个主要影响因子中,各项系数绝对值相差不大,表明在寒露风天气过程中,降温幅

度、日平均气温、最低温度和低温持续时间对水稻冷害具有同等重要的作用,4 个因子同时出现或部分出现异常均可以造成不同程度的冷害。

2.3 晚稻寒露风等级的划分

根据 1991—2012 年江西省 14 个农业气象观测站晚稻寒露风灾害调查资料,得出各站寒露风发生年份实际灾害等级,并利用式(8)计算对应年份的 CDWI 值。根据实际灾害等级,对 CDWI 值进行归类,结果见表 6。由表 6 可知,轻度危害、中度危害、重度危害 3 个等级寒露风所对应的 CDWI 平均值分别为 0.37、0.59、0.78,各等级对应的 CDWI 有 85% 以上的值分别落在区间 0.30~0.50、0.50~0.70 和 ≥ 0.70 ,据此对 CDWI 进行等级划分,并反推出相应的发生程度和灾害等级(表 7),以便于在农业气象业务服务中应用。

表 6 实际灾害等级和对应的 CDWI 值

Table 6 Actual disaster grade and its corresponding CDWI

实际灾害等级 Actual disaster grade	寒露风指数 Index of cold-dew wind (CDWI)		
	平均值 Average value	变化范围 Variation range	85% 值分布范围 Distribution range of 85% values
轻度危害 Light	0.37	0.19~0.52	0.30~0.50
中度危害 Mild	0.59	0.48~0.71	0.50~0.70
重度危害 Severe	0.78	0.63~0.99	≥ 0.70

表 7 寒露风等级划分标准

Table 7 Grading standards of cold-dew wind

指数 Index	发生程度 Occurrence degree	灾害等级 Disaster grade
CDWI < 0.30	无灾害	0
0.30 ≤ CDWI < 0.50	轻度	1
0.50 ≤ CDWI < 0.70	中度	2
CDWI ≥ 0.70	重度	3

2.4 晚稻寒露风评估模型的检验

2.4.1 模型检验

首先根据水稻冷害评估技术规范^[18],利用分期播种产量资料对各播种期寒露风实际灾害等级进行判别:减产率 > 15% 为严重冷害,寒露风等级为 3 级;10% < 减产率 ≤ 15% 为中度冷害,寒露风等级为

2 级;5% < 减产率 ≤ 10% 为轻度冷害,寒露风等级为 1 级;减产率 ≤ 5%,无灾害,寒露风等级为 0 级。然后根据式(8)对江西省农业气象试验站 2010—2013 年晚稻各分期播种期间相关气象资料进行回代,计算各播种期 CDWI 值,结合寒露风等级划分标准(表 7),得出评估等级,其结果见表 8。由表

可见,2010—2013年,在江西省农业气象试验站开展的15期分期播种试验中,有10个播期遭遇了寒露风天气。在这10个播期中,80%的播期寒露

风评估等级与实际发生等级完全一致,表明评估结果有较高的准确性,可以应用到气象业务服务中。

表8 分期播种试验模型验证结果

Table 8 Results of model verification about sowing experiment by stages

播期(年-月-日) Sowing period	评估等级 Assessment grade	实际等级 Actual grade	结果 Result
1(2010-06-17)	未出现寒露风天气		
2(2010-06-26)	未出现寒露风天气		
3(2010-07-06)	2	2	√
4(2011-06-10)	未出现寒露风天气		
5(2011-06-21)	2	2	√
6(2011-07-06)	3	3	√
7(2011-07-20)	3	3	√
8(2012-06-17)	未出现寒露风天气		
9(2012-06-26)	1	1	√
10(2012-07-06)	1	3	×
11(2013-06-18)	0	2	×
12(2013-06-23)	0	0	√
13(2013-06-28)	未出现寒露风天气		
14(2013-07-03)	2	2	√
15(2013-07-08)	3	3	√

注:√、×分别表示评估等级与实际等级完全一致、不符。

Note:√ is consistent; × is inconsistent between assessment and actual level.

2.4.2 个例分析

2006、2011年江西省出现了明显的寒露风天气过程。2006年寒露风出现时间早、强度大、范围广;2011年寒露风出现在9月19—26日,期间全省各地平均气温普遍在17.0~22.0℃。针对这2次寒露风天气过程,江西省气象和农业部门联合对部分市(县)进行了灾害调查。调查结果表明,这2次寒露风均导致部分二晚种植区出现了包颈、抽穗速度缓慢、部分田块开花不受粉等现象,其中2006年新建县、上高县、宜黄县、上饶市、黎川县、乐安县和万安县等地受灾严重,二晚田块结实率低于30%;2011年新建县、进贤县、南昌市、安义县、永修县、都昌县、德安县、广昌县和永新县等县多个乡镇受灾,晚稻减产40%以上。

利用寒露风评估模型和标准对2006、2011年各调查市(县)寒露风等级进行评估,结果见表9。由表9可知,在16个调查县中,有14个县评估结果与实际发生等级完全一致,评估准确率达87.5%,只有2个县评估结果比实际发生等级差一个等级,属于基本正确,表明评估结果与实际灾害发生情况有较高的吻合性,可以利用该模型对实际生产中发生的寒露风天气过程进行灾害评估。

3 结论与讨论

江西省晚稻寒露风天气一般维持3~8d,少数可达14d;通常引起降温1.0~7.5℃,最大降温可达16.0℃;90%过程平均气温下降至17.5~21.5℃,其中5%的过程极端最低气温可降至10℃以下。

表 9 2006、2011 年各调查市(县)寒露风评估等级与模型检验
Table 9 Model verification and assessment grade of cold-dew wind of
each investigated city (county) in 2006 and 2011

台站 Station	年份 Year	评估等级 Assessment grade	实际等级 Actual grade	结果 Result
新建 Xinjian	2006	3	3	√
上高 Shanggao	2006	2	3	○
宜黄 Yihuang	2006	3	3	√
上饶 Shanrao	2006	3	3	√
黎川 Lichuan	2006	3	3	√
乐安 Lean	2006	3	3	√
万安 Wanan	2006	3	3	√
新建 Xinjian	2011	2	3	○
进贤 Jinxian	2011	3	3	√
南昌 Nanchang	2011	3	3	√
安义 Anyi	2011	3	3	√
永修 Yongxiu	2011	3	3	√
都昌 Duchang	2011	3	3	√
德安 Dean	2011	3	3	√
广昌 Guangchang	2011	3	3	√
永新 Yongxin	2011	3	3	√

注：√、○分别表示评估等级与实际等级完全一致、相差 1 个等级。

Note: √ is consistent; ○ differ a grade.

在晚稻寒露风发生期间,降温幅度、平均气温、最低温度和低温持续时间对水稻冷害具有同等重要的作用,4 个因子同时出现或部分出现异常均可以造成不同程度的冷害;降温幅度越大,过程平均气温、极端最低气温越低,低温持续日数越长,寒露风指数越大,寒露风越严重。

利用主成分分析法构建的江西省晚稻寒露风评估模型和指数计算模型,其分期播种试验检验的准确率较高,评估等级与实际等级完全一致的占 80%;利用模型对近 10 年江西省 2 次较严重的寒露风天气过程进行评估,结果表明评估结果与实际灾害发生情况有较高的吻合性,可以用来定量评价江西省各市(县)晚稻寒露风发生程度。各市(县)寒露风指数在 0.70 以上时,为重度寒露风,晚稻减产 15%以上;寒露风指数在 0.50~0.70 时,为中度寒露风,晚稻减产 10%~15%;寒露风指数在 0.30~0.50 时,为轻度寒露风,晚稻减产 5%~10%;寒露风指数在 0.30 以下时,灾害不明显。若需要对全省或区域寒露风进行整体评估,可参考寒露风行标中有关区域寒露风等级的划分标准来进行^[17]。

目前寒露风评估还没有一个客观、定量的方法,文中应用主成分分析法的原理,综合考虑了降温幅度、平均气温、最低气温和低温持续日数这 4 个主要影响因子,探讨了寒露风定量评估模型。根据该模型,可以具体计算出某个寒露风天气过程的评估值,有利于定量评价江西省晚稻寒露风发生程度,便于各个寒露风天气过程之间的相互比较,而以往对寒露风的评估仅建立在寒露风指标的基础上,缺乏对寒露风影响程度的具体及定量的评估^[14,17]。

引起寒露风灾害最主要的原因就是降温,建立的评估模型仅从温度这个角度来对寒露风过程进行评估,未考虑其他不利的气象因素,比如台风、降水和相对湿度等,也未考虑不同品种对低温冷害的耐受程度等非气象要素的影响。在实际对寒露风过程进行评估时,应在该模型的基础上,结合其他因素综合考虑寒露风的发生情况,开展相关的农业气象业务和服务。

参 考 文 献

[1] 殷剑敏,辜晓青,林春. 寒露风灾害评估的空间分析模型研究

- [J]. 气象与减灾研究, 2006, 29(3): 30-33
Yin J M, Gu X Q, Lin C. The space analysis model of cold-dew wind disaster evaluation [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2006, 29(3): 30-33 (in Chinese)
- [2] 艾婉秀, 杨义文, 吴孔榕. 中国南方秋季低温冷害的评估分析[J]. 中国农业气象, 1998, 19(1): 5-9
Ai W X, Yang Y W, Wu K R. Assessment and analysis of chilling damage in South China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1998, 19(1): 5-9 (in Chinese)
- [3] 李祎君, 王春乙, 赵蓓, 刘文军. 气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增1): 263-271
Li Y J, Wang C Y, Zhao B, Liu W J. Effects of climate change on agricultural meteorological disaster and crop insect's diseases [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Sup. 1): 263-271 (in Chinese)
- [4] 刘文英, 张显真, 简海燕. 江西近 50 年寒露风演变趋势及其对双季晚稻的影响[J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(4): 67-71
Liu W Y, Zhang X Z, Jian H Y. Evolution trend of cold-dew wind in recent 50 years in Jiangxi Province and its influence on late double-harvest rice [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2009, 32(4): 67-71 (in Chinese)
- [5] 李军, 邓先瑞, 陈龙祥. 江西省寒露风的时空分布与预防措施[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 1994, 28(1): 123-128
Li J, Deng X R, Chen L X. The characters of space-time distribution of cool-wind in cool dew period and its protections in Jiangxi Province [J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 1994, 28(1): 123-128 (in Chinese)
- [6] Satake T. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XXX. Relation between fertilization and the number of engorged pollen grains among spikelets cooled at different pollen developmental stages [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1991, 60: 523-528
- [7] Satake T, Shibata M. Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XXXI. Four components participating in fertilization [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1992, 61: 454-462
- [8] 邓化冰, 车芳璐, 肖应辉, 唐文帮, 盘毅, 刘志贤, 陈立云. 开花期低温胁迫对水稻花粉性状及剑叶理化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 66-72
Deng H B, Che F L, Xiao Y H, Tang W B, Pan Y, Liu Z X, Chen L Y. Effects of low temperature stress during flowering period on pollen characters and flag leaf physiological and biochemical characteristics of rice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 66-72 (in Chinese)
- [9] 余焰文, 杨再强, 殷剑敏, 俞开炬, 孙擎. 开花期寒露风对江西晚稻功能叶生理特性及产量的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(5): 537-543
Yu Y W, Yang Z Q, Yin J M, Yu K J, Sun Q. Effect of autumn low temperature during flowering stage on physiological property and yield of late rice in Jiangxi Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(5): 537-543 (in Chinese)
- [10] 朱寿燕, 郭小弟. 秋季低温对杂交稻结实率的影响[J]. 中国农业气象, 1999, 20(3): 31-32
Zhu S Y, Guo X D. Effects of autumn low temperature on seed set of hybrid rice [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1999, 20(3): 31-32 (in Chinese)
- [11] 王兆骞, 潘德云. 秋季低温对水稻空瘪率的影响和有关指标值的研究[J]. 中国水稻科学, 1989, 3(1): 17-22
Wang Z Q, Pan D Y. Effect of cool temperature in autumn on the seed-set percentage of rice and the relevant temperature index [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1989, 3(1): 17-22 (in Chinese)
- [12] 高庆芳. 水稻抽穗开花期的低温冷害研究[J]. 江苏农业科学, 1982(2): 7-9
Gao Q F. Study on low temperature damage during flowering stage of rice [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 1982(2): 7-9 (in Chinese)
- [13] 王立斌. 寒露风对杂交晚稻结实影响的初步探讨[J]. 作物研究, 1988, 2(2): 22-23
Wang L B. Primary discussion on the influence of autumn low temperature to seed-setting of late hybrid rice [J]. *Crop Research*, 1988, 2(2): 22-23 (in Chinese)
- [14] DB36/T 511—2007. 江西省双季稻气象灾害指标[S]. 南昌: 江西省气象局, 2007
DB36/T 511—2007. Meteorological disaster index of double-cropping rice in Jiangxi Province [S]. Nanchang: Jiangxi Meteorological Service, 2007 (in Chinese)
- [15] 田俊, 崔海建. 江西省双季早稻灌浆乳熟期高温热害影响评估[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 67-73
Tian J, Cui H J. Impact assessment on high temperature damage to early rice at filling-milk stage in Jiangxi Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(1): 67-73 (in Chinese)
- [16] 杨凯, 林晶, 陈惠, 王加义, 陈彬彬, 马治国. 福建枇杷低温害临界温度和综合气候指标[J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 468-473
Yang K, Lin J, Chen H, Wang J Y, Chen B B, Ma Z G. Critical temperature and integrated climatic index of low temperature injury for loquat in Fujian Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(3): 468-473 (in Chinese)
- [17] QX/T 94—2008. 寒露风等级[S]. 北京: 中国气象局, 2008
QX/T 94—2008. Grade of autumn low temperature [S]. Beijing: China Meteorological Administration, 2008 (in Chinese)
- [18] QX/T 182—2013. 水稻冷害评估技术规范[S]. 北京: 中国气象局, 2013
QX/T 182—2013. Technical standard on rice cool damage evaluate [S]. Beijing: China Meteorological Administration, 2013 (in Chinese)