

# 基于湿润指数距平率的水稻干旱灾损评估

——以四川省为例

庞艳梅<sup>1</sup>, 陈超<sup>1,2</sup>, 郭晓艺<sup>3</sup>, 徐富贤<sup>3</sup>

1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;  
2. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066; 3. 四川省农科院 水稻高粱研究所, 四川 德阳 618000

**摘要:** 利用四川省水稻主要种植区 6 个典型代表站点 1961—2015 年的逐日气象资料、水稻生育期和产量等资料, 计算了水稻各生育阶段内的湿润指数距平率, 建立干旱影响下水稻气象产量与湿润指数距平率的统计模型, 开展了水稻干旱灾损评估。结果表明: 移栽到孕穗期和孕穗到开花期, 蓬安的干旱指数有显著增加的趋势; 开花到成熟期, 仁寿、蓬安、开江、甘洛的干旱指数有显著的增加趋势。分离水稻气象产量后, 构建了干旱影响下水稻各生育阶段干旱指数与气象产量的统计模型, 验证结果表明该模型能反映各生育阶段干旱对水稻产量的影响。灾损评估结果指出, 干旱影响下, 四川水稻种植区代表站点水稻减产率在 1.7%~7.2%。

**关键词:** 湿润指数距平率; 水稻; 干旱; 灾损; 四川

**中图分类号:** S511; S423

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2020)05-0042-09

水稻是我国第一大粮食作物, 在粮食生产中举足轻重<sup>[1]</sup>。四川是中国水稻主产区之一, 水稻生产在该区域农业生产中占有十分重要的位置。气候变化背景下, 农业气象灾害的发生呈频率增加、强度增强、危害加大的趋势<sup>[2-4]</sup>, 且对农业生产的不利影响已经逐渐显现出来<sup>[5]</sup>。在众多的因子中, 干旱常被认为是最主要的胁迫因子之一<sup>[6-8]</sup>。科学、准确、及时地评估干旱对水稻产量的影响, 对于提高作物抗旱能力和保证粮食安全具有重要意义。

前人针对作物干旱评估方面开展了大量研究, 而在干旱评估中指标的选择极其重要。目前干旱监测气象指数分两类, 一类是以降水为基础, 包括 SPI, CI, Z 指数, 降水距平百分率等指数, 另一类基于土壤水分平衡, 包括 PDSI、湿润指数等。近年来, 相对湿润指数在西南地区的应用较多<sup>[9-11]</sup>, 该指标是降水与蒸散量之差与蒸散量的比值, 能表现土壤水分的收支平衡<sup>[12]</sup>, 但相对湿润指数并没有与实际作物相结合, 同时也没有考虑到作物的实际蒸散量, 因此不能反映单一作物的干旱情况。鉴于此, 张建平<sup>[13]</sup>对相对湿润指数进行了改进, 即湿润指数距平率, 该指数对于缺少灌溉资料和灌溉条件有限的地区具有一定的参考价值, 并利用湿润指数距平率研究了西南地区水稻干旱的时空分布特征; 陈超等<sup>[14]</sup>利用湿润指数距平率分析了四川不同种植区不同生育阶段的干旱时空变化特征及风险分布。同时, 前人针对干旱灾损评估方面也取得了一定的成果; 谭方颖等<sup>[15]</sup>基于逐日综合气象干旱指数建立华北冬小麦干旱累积标准指数, 构建了冬小麦干旱产量损失评估模型; 栾庆祖等<sup>[16]</sup>基于 WOFOST 模型开展了北京地区玉米干旱灾害损失评估; 刘静等<sup>[17]</sup>通过土壤水分平衡方程各分量的订正, 求算了中国西北旱作小麦生长期间的实际耗水量和水分满足率, 并运用期望产量和作物水分生产函数建立了小麦单产的干旱灾损监测与损失评估模型; 何永坤等<sup>[18]</sup>利

收稿日期: 2019-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300400); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目(省重点实验室 2018-重点-05-01); 中国气象局成都高原气象研究所基本科研费业务项目(BROP201817)。

作者简介: 庞艳梅(1983-), 女, 副研究员, 主要从事气候变化对农业的影响评估研究。

通信作者: 陈超, 正高级工程师。

用作物水分盈亏指数建立干旱指数,构建西南地区玉米干旱产量损失模型.由此可看出,作物灾损评估的方法主要集中于统计分析和作物模型模拟两种,这些方法在不同地区已取得较好的效果,但存在区域适应性问题.此外,针对中国西南地区干旱的研究主要集中于作物干旱时空分布特征及风险评估的研究.因此,本研究利用相对湿润指数距平率研究了四川水稻不同生育期干旱对产量的影响,拟为四川水稻的抗旱减灾提供理论依据.

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区域和数据来源

根据气候相似性、水稻发育阶段基本相同及农业生产水平相近原则,将四川省水稻种植区划分为6个区,分别为盆西平丘地区、盆南丘陵地区、盆中浅丘地区、盆东平行岭谷地区、盆周边缘山地区和川西南地区.

本研究所用的资料为四川水稻种植区6个代表站点(仁寿、蓬安、荣县、开江、旺苍、甘洛)1961—2015年逐日气象资料(平均气温、最低气温、最高气温、日照时数、降水量、平均风速和相对湿度)和水稻灾情资料,以及1981—2012年水稻生育期和产量资料.其中气象资料、水稻生育期和产量资料由四川省气象探测数据中心提供;实际旱情资料来源于中国气象数据网和《中国气象灾害大典》(四川卷)<sup>[19]</sup>.

### 1.2 水稻各生育期的划分

本文研究对象为单季稻,收集分析农业气象观测站的水稻生育期资料,结合大田实际调查数据,得出水稻各种植区内移栽、孕穗、开花、成熟期的时间<sup>[14]</sup>(表1).

表1 四川水稻各生育期的日期

站点(所属区域)	移栽期	孕穗期	开花期	成熟期
仁寿(盆西平丘区)	5月中旬	7月下旬	8月中旬	9月中旬
蓬安(盆中浅丘区)	5月中旬	7月下旬	8月上旬	9月中旬
荣县(盆南丘陵区)	4月中旬	7月上旬	7月中旬	8月中旬
开江(盆东平行岭谷区)	5月中旬	7月下旬	8月中旬	9月上旬
旺苍(盆周边缘山地区)	5月下旬	7月下旬	8月下旬	9月下旬
甘洛(川西南地区)	5月中旬	7月下旬	8月中旬	9月中旬

### 1.3 湿润指数距平率和干旱等级指标

相对湿润指数可以客观真实地反映作物干旱的发生强度,湿润指数距平率指偏离多年平均相对湿润指数值的变化程度,可表示作物受水分胁迫的程度.本研究以湿润指数距平率来表征水稻农田水分动态变化状况,公式<sup>[13]</sup>为:

$$M = \frac{P - ET_c}{ET_c} \quad (1)$$

$$M_a = \begin{cases} abs\left(\frac{M - \bar{M}}{\bar{M}}\right) \\ 0, M \geq 0 \text{ 或 } M \geq \bar{M} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $M_a$  是湿润指数距平率;  $M$  是某时段的相对湿润指数;  $ET_c$  是作物需水量<sup>[20-21]</sup>(mm);  $P$  是降水量(mm);  $\bar{M}$  是某时段多年平均相对湿润指数.当  $M \geq 0$  或  $M \geq \bar{M}$  时,表示该时段降雨量多于平均状态,作物不受干旱的影响.

干旱等级指标:根据陈超等<sup>[14]</sup>的研究结果,将干旱等级指标划分为4个等级,具体如表2所示.

表2 水稻干旱等级评价指标

干旱等级	湿润指数距平率( $M_a$ )	干旱强度
无旱	$\leq 1.3$	0
轻旱	$1.3 < M_a \leq 3.3$	1
中旱	$3.3 < M_a \leq 5.3$	2
重旱	$> 5.3$	3

## 1.4 水稻干旱灾损评估模型

### 1.4.1 分离水稻气象产量

历史统计产量等于气象产量与趋势产量之和<sup>[22]</sup>, 公式为:

$$Y = Y_w + Y_i + \epsilon \quad (3)$$

式中:  $Y$  为历史统计产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Y_w$  为趋势产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Y_i$  为气象产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $\epsilon$  为随机误差, 在本研究中可以忽略不计. 因而, 水稻气象产量为:

$$Y_i = Y - Y_w \quad (4)$$

### 1.4.2 建立水稻不同生育阶段干旱指数与气象产量的统计模型

本文建立水稻移栽到孕穗期、孕穗到开花期、开花到成熟期干旱指数与气象产量的统计模型:

$$Y_i = A \times MA_1 + B \times MA_2 + C \times MA_3 + D \quad (5)$$

式中:  $Y_i$  为气象产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $MA_1$  为标准化后移栽到孕穗期的干旱指数;  $MA_2$  为标准化后孕穗到开花期的干旱指数;  $MA_3$  为标准化后开花到成熟期的干旱指数;  $A, B, C$  为系数;  $D$  为常数.

### 1.4.3 建立水稻干旱灾损评估模型

发生干旱后的水稻实际产量与未发生干旱的正常预测产量的减产百分比, 公式为:

$$Y_d = (Y_p - Y)/Y_p \quad (6)$$

式中:  $Y_d$  为减产率;  $Y_p$  为未发生干旱的正常预测产量(公式 5 中各生育阶段标准化后干旱指数取 0);  $Y$  为历史统计产量.

## 2 结果与分析

### 2.1 各生育期干旱指数的年代变化

#### 2.1.1 移栽到孕穗期

1961—2015 年四川 6 大水稻种植区内移栽到孕穗期干旱指数的变化趋势如图 1 所示, 图中点表示为当年的干旱指数, 曲线为干旱指数的五日滑动平均值. 近 55 年来, 荣县、仁寿干旱指数的平均值远高于其他地区, 分别为 1.90, 1.08; 其次为蓬安、甘洛、旺苍、开江, 分别为 0.45, 0.32, 0.26, 0.21.

仁寿的干旱指数(图 1a)从 1960s 到 1980s 呈波动式变化趋势, 1981—2008 年呈升高的趋势, 而后降低. 蓬安(图 1b)在 1980s 到 2000s 呈显著升高的趋势, 年增加率为 0.03, 一度达到近 50 年来的最高值, 但到了 2000s 后期略有下降. 荣县(图 1c)的干旱指数只表现为年代间的变化趋势. 旺苍(图 1e)的干旱指数经历了两次先升后降的过程. 在整个时间序列中开江(图 1d)和甘洛(图 1f)的干旱指数无明显变化.

#### 2.1.2 孕穗到开花期

1961—2015 年四川 6 大水稻种植区内孕穗到开花期干旱指数的变化趋势如图 2 所示. 近 55 年来, 孕穗到开花期干旱严重的地区主要是甘洛, 干旱指数均值为 3.89; 开江和蓬安次之, 分别为 2.23, 1.61; 旺苍、仁寿、荣县最低, 分别为 0.78, 0.57, 0.48.

仁寿(图 2a)的干旱指数从 1960s 至 1980s 经历了一次先升后降的过程, 随后出现升高的趋势, 在 1990s 初期达到最高值, 从 1990s 起干旱指数呈现出明显的下降趋势, 年减少率为 0.06. 蓬安(图 2b)的干旱指数自 1980s 到 1990s 中期呈明显的上升趋势, 年增加率 0.23, 随后持续降低到 2000 年, 之后又开始出现升高的趋势. 其他 4 个种植区的干旱指数变化趋势不显著.

#### 2.1.3 开花到成熟期

1961—2015 年四川 6 大水稻种植区内开花到成熟期干旱指数的变化趋势如图 3 所示. 近 55 年来, 开花到成熟期干旱严重的地区主要是开江和蓬安, 干旱指数的均值分别为 1.09, 0.90, 其次为荣县、甘洛、仁寿, 旺苍最低.

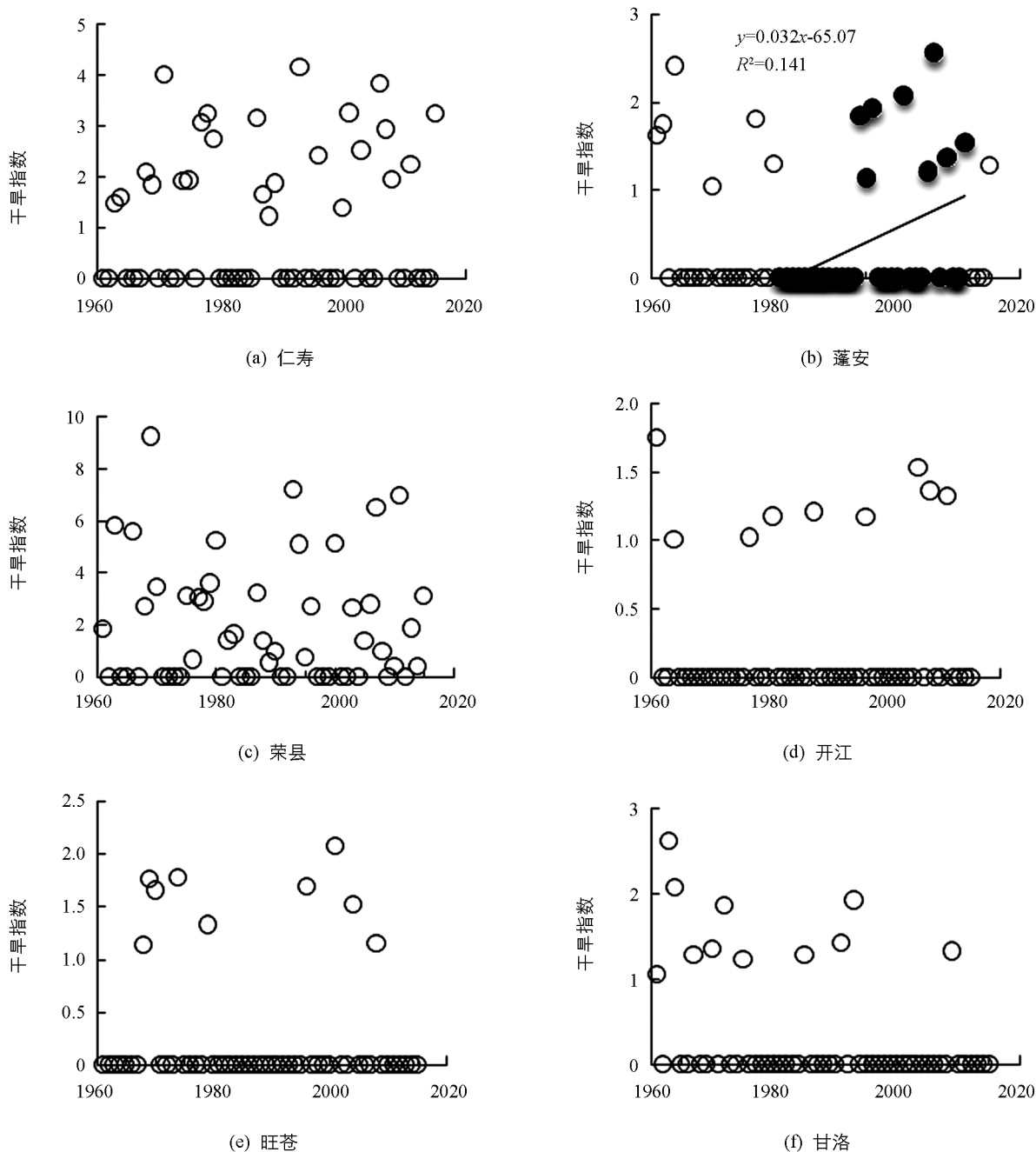


图 1 1961—2015 年移栽到孕穗期干旱指数的变化

仁寿(图 3a)的干旱指数从 1960s 至 1980s 经历了一次先升后降的过程, 随后出现明显的升高趋势, 年增加率为 0.02, 一度达到近 50 年来的最高值. 蓬安(图 3b)的干旱指数在 19 世纪八十年代至九十年代后期呈明显上升趋势, 年增加率为 0.15, 随后呈波动式的降低趋势. 开江(图 3d)的干旱指数自 19 世纪八十年代开始呈现出明显的升高趋势, 年升高率为 0.05. 甘洛(图 3f)的干旱指数在 1980s 达到最低值, 之后呈显著升高的趋势, 年升高率为 0.04. 荣县、旺苍等 2 个种植区的干旱指数变化趋势不显著.

## 2.2 代表站点水稻趋势产量和气象产量的统计模型

建立仁寿、蓬安、荣县、开江、旺苍、甘洛等 6 个代表站点 1981—2012 年水稻趋势产量的统计模型. 趋势产量是采用正交多项式对实际产量数据进行分离获得, 不同水稻种植区内代表站点的水稻趋势产量统计模型如表 3 所示.

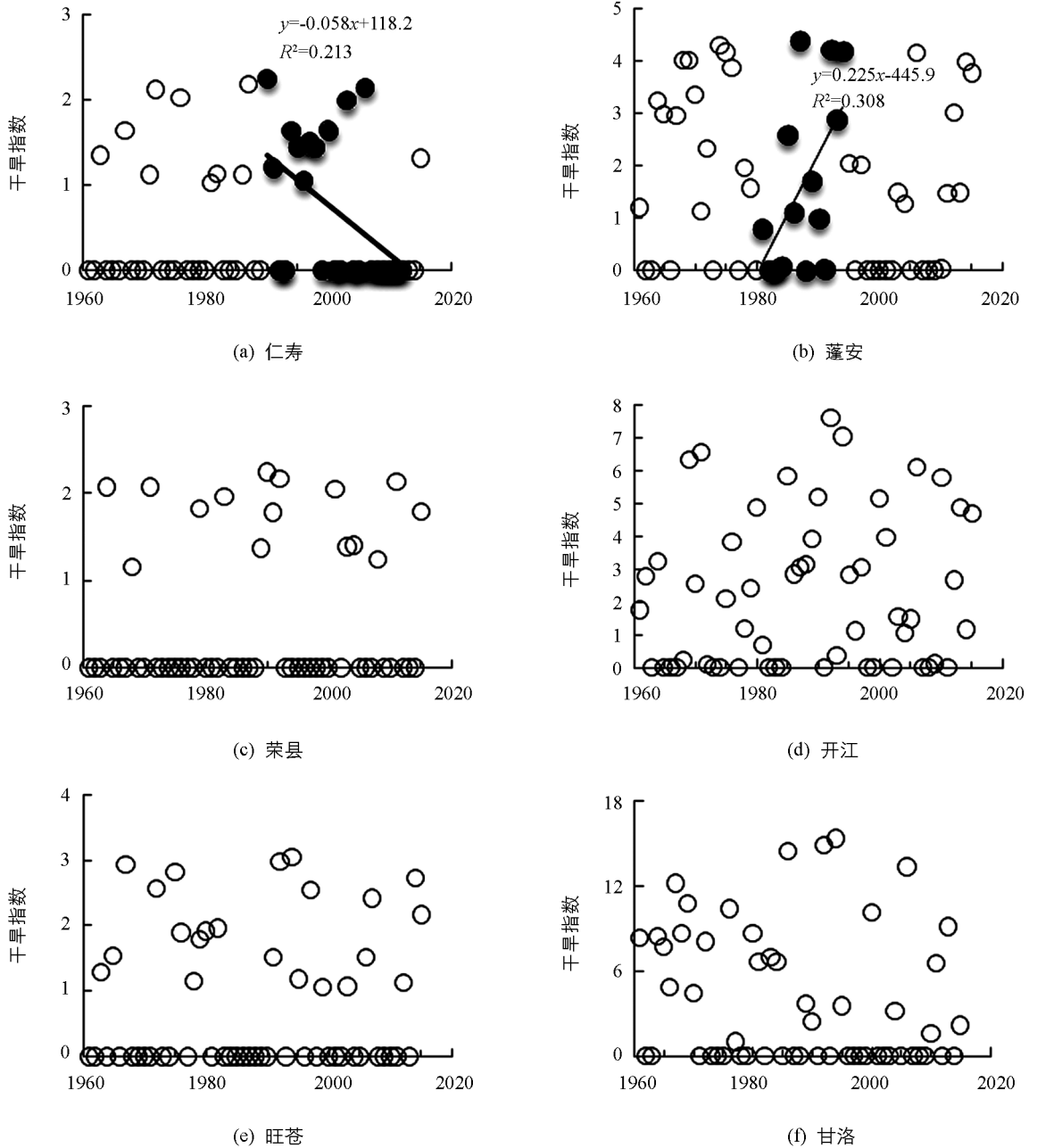


图 2 1961—2015 年孕穗到开花期干旱指数的变化

表 3 代表站点水稻趋势产量的统计模型

代表站点	所属区域名称	统计模型
仁寿	盆西平丘区	$Y_w = -0.046t^3 + 0.573t^2 + 54.589t + 6818.5 (R^2 = 0.5849)$
蓬安	盆中浅丘区	$Y_w = -0.2343t^3 + 8.34t^2 + 17.732t + 6020.2 (R^2 = 0.745)$
荣县	盆南丘陵区	$Y_w = 0.4354t^3 - 23.54t^2 + 433.28t + 4961.6 (R^2 = 0.892)$
开江	盆东平行岭谷区	$Y_w = -0.0356t^3 - 2.63t^2 + 167.32t + 5349.8 (R^2 = 0.696)$
旺苍	盆周边缘山区	$Y_w = 1.0291t^3 - 56.582t^2 + 996.73t + 3389 (R^2 = 0.8049)$
甘洛	川西南山区	$Y_w = 0.4425t^3 - 24.312t^2 + 449.54t + 5014.2 (R^2 = 0.8487)$

注:  $Y_w$  为趋势产量(kg/hm<sup>2</sup>);  $t$  为年序(1981 年,  $t=1$ );  $R^2$  为决定系数。

在干旱年份,分析水稻移栽到孕穗期、孕穗到开花期、开花到成熟期的干旱指数与气象产量的关系,建立的统计模型如表 4 所示。

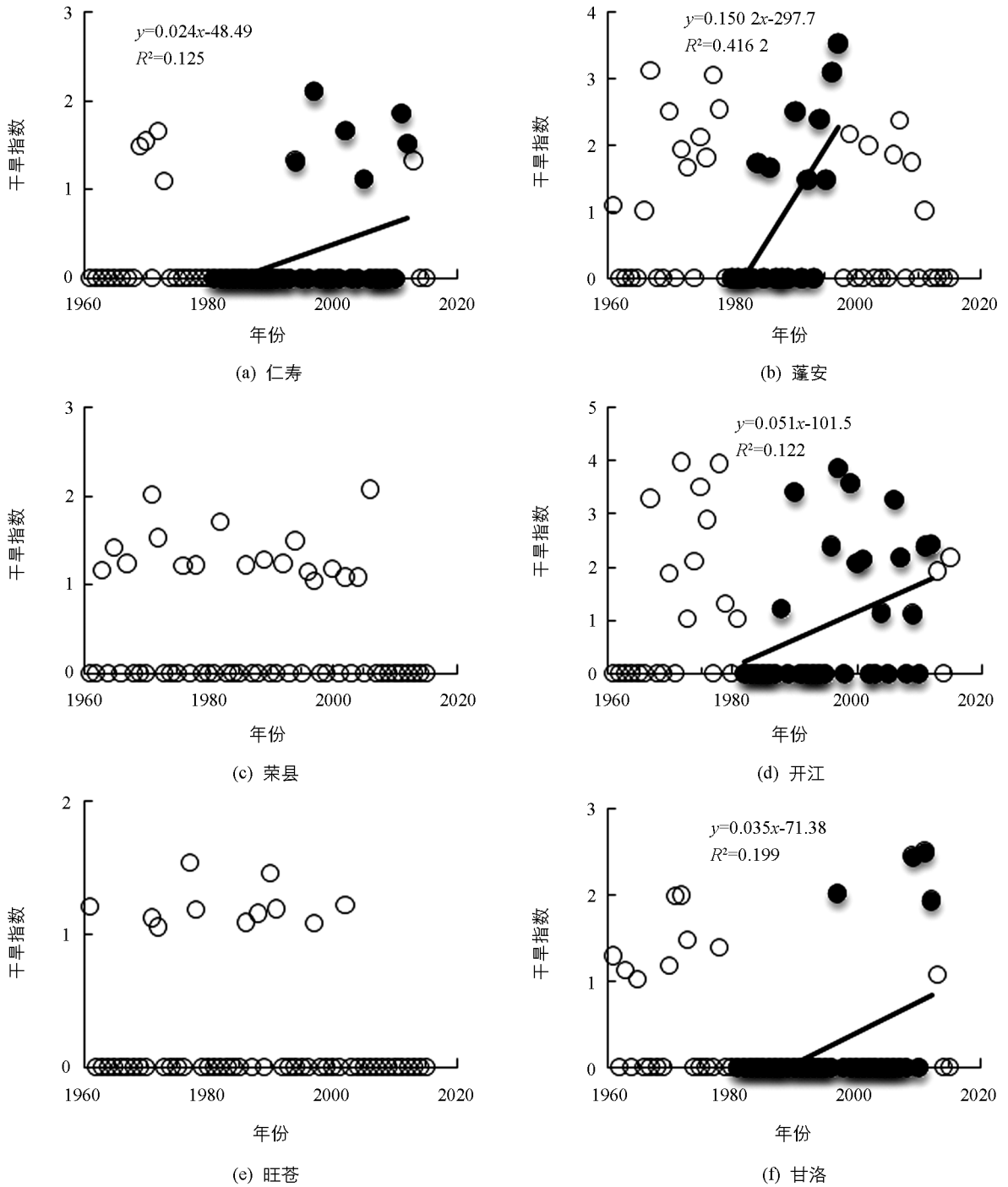


图 3 1961—2016 年开花到成熟期干旱指数的变化

表 4 代表站点水稻气象产量与干旱指数关系的统计模型

站点	所属区域名称	统计模型
仁寿	盆西平丘区	$Y_i = 60.48 - 488.14MA_1 + 136.03MA_2 - 126.72MA_3 (p = 0.000)$
蓬安	盆中浅丘区	$Y_i = 133.4 - 602.19MA_1 - 230.31MA_2 + 116.68MA_3 (p = 0.028)$
荣县	盆南丘陵区	$Y_i = 115.63 - 483.74MA_1 + 209.11MA_2 - 258.88MA_3 (p = 0.001)$
开江	盆东平行岭谷区	$Y_i = 399.76 - 1534.8MA_1 - 931.25MA_2 - 379.91MA_3 (p = 0.043)$
旺苍	盆周边缘山地区	$Y_i = 218.385 - 971.7MA_1 - 2111.69MA_2 + 186.33MA_3 (p = 0.046)$
甘洛	川西南山地区	$Y_i = 133.914 - 411.5MA_1 - 327.13MA_2 - 186.89MA_3 (p = 0.048)$

注:  $MA_1$  为标准化后移栽到孕穗期的干旱指数;  $MA_2$  为标准化后孕穗到开花期的干旱指数;  $MA_3$  为标准化后开花到成熟期的干旱指数;  $p$  是显著性检验的概率。

### 2.3 水稻干旱灾损评估

对比分析代表站点干旱年水稻实测产量与模拟产量的差别,由表 5 可知两者之间的相对误差绝对值均小于 3.5%,这不仅说明建立的模型能客观地反映不同生育期水稻干旱对产量的影响,也能较好地评估干旱影响下水稻产量的损失.同时依据水稻干旱灾损评估模型,分析了各种植区域内代表站点发生干旱后的实测产量与未受灾后的正常预测产量的减产百分比.由表 6 可知,干旱影响下,各代表站点的水稻减产率是 1.7%~7.2%,平均值为 4.9%.

表 5 四川干旱年水稻统计产量与模拟产量的比较

站点	干旱年	干旱年水稻统计产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	干旱年水稻模拟产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	相对误差绝对值/ %
仁寿	2006	7 490	7 565	1.0
	1986	6 840	6 915	1.1
蓬安	1994	6 905	6 819	1.2
	1987	6 495	6 376	1.8
荣县	1994	7 290	7 196	1.3
	2007	7 905	7 749	2.0
开江	2001	7 275	7 077	2.7
	2010	6 975	6 731	3.5
旺苍	2004	8 505	8 495	0.1
	1988	8 340	8 634	3.5
甘洛	1986	6 630	6 757	1.9
	1992	7 545	7 489	0.7

表 6 干旱条件四川水稻的灾损评估

站点	干旱年	气象产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	趋势产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	统计产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	正常投入的产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	减产率/ %
仁寿	2006	-336	7 826	7 490	7 886	5.0
	1986	-317	7 157	6 840	7 217	5.2
蓬安	1994	-355	7 260	6 905	7 393	6.6
	1987	22	6 473	6 495	6 605	1.7
荣县	1994	-318	7 608	7 290	7 724	5.6
	2007	-165	8 070	7 905	8 186	3.4
开江	2001	-98	7 373	7 275	7 773	6.4
	2010	-65	7 039	6 975	7 440	6.2
旺苍	2004	-441	8 946	8 505	9 164	7.2
	1988	71	8 268	8 340	8 487	1.7
甘洛	1986	-301	6 932	6 630	7 066	6.2
	1992	-127	7 672	7 545	7 806	3.3

## 3 结论与讨论

1) 1961—2015 年,不同种植区代表站点水稻生育期干旱的变化趋势不同,移栽到孕穗期干旱的明显变化趋势主要出现在蓬安(盆中浅丘区),年变化率为 0.03;孕穗到开花期干旱指数呈显著变化的主要出现

在仁寿(盆西平丘区)、蓬安(盆中浅丘区),变化率为 $-0.06, 0.2$ ;开花到成熟期的干旱指数的增加趋势主要出现在仁寿(盆西平丘区)、蓬安(盆中浅丘区)、开江(盆东平行岭谷区),甘洛(川西南山地区)增幅分别为 $0.02, 0.15, 0.05, 0.04$ 。

2) 建立水稻移栽到孕穗、孕穗到开花、开花到成熟期的干旱指数与气象产量的统计模型,用来评估干旱影响下水稻的减产率。以水稻种植区内代表站点为例,对比了6个站点水稻历史统计产量与模拟产量的差异,其相对误差绝对值均不超过5%,由此可知构建的模型既能客观地反映不同生育阶段干旱对水稻产量的影响,也能较好地评估干旱影响下水稻的产量损失。从评估结果可知,1981—2012年四川水稻种植区代表站点的减产率在 $1.7\% \sim 7.2\%$ 之间。

3) 干旱灾害从古至今都是西南地区的主要自然灾害之一<sup>[23]</sup>,也是限制农业持续稳定发展的主要农业气象灾害之一<sup>[24]</sup>,对水稻产量的形成影响很大。干旱指标有很多<sup>[25-26]</sup>,选择哪种指标,直接关系到研究的结果。本研究结合四川稻区的综合考虑作物、大气和土壤等情况,选取了湿润指数距平率,并利用实际灾情资料对干旱指数进行了验证,效果较好<sup>[13]</sup>。在计算湿润指数距平率时,因各元素具有不同量纲,为了消除其对结果的影响,本研究利用标准化的方法进行处理,使得该指数能较好地反映各生育阶段干旱对水稻的影响。

4) 本研究将四川水稻种植区分为6个区域,每个区域选择1个代表站点进行分析,但同一区域内地形地貌复杂,气象因子、作物生育期存在着差异,区域内在进行评估时存在一定的差异;其次,干旱过程中伴随着高温、洪涝、阴雨、病虫害等其他灾害的影响,导致水稻产量损失的原因可能包括其他气象灾害,而如何完全分离出旱灾对作物产量的影响还有待深入研究。另外,获取数据的客观性和准确性也影响研究结果,而如今各地的农业气象观测数据准确性不高,加上数据不足,造成结果存在很大的不确定性,当然,随着观测数据的完善和研究指标的提高,结果会越来越准确。

#### 参考文献:

- [1] 毕晶,崔俊涛. 水稻旱育苗研究进展及展望[J]. 北方水稻, 2011, 41(2): 75-76.
- [2] 石兴琼,肖天贵,房玉洁,等. 西南地区不同地质灾害影响区的降水阈值研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 63-67.
- [3] 李瀚,韩琳,贾志军,等. 中国西南地区地面平均相对湿度变化分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 42-47.
- [4] 齐冬梅,周长艳,李跃清,等. 西南区域气候变化原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 35-42.
- [5] 矫梅燕,周广胜,陈振林. 气候变化对中国农业影响评估报告(No. 1)[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2014.
- [6] 周婷婷,徐刚,白基恒,等. 重庆市农作物生长季干旱时空分布规律研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 14-24.
- [7] 蔡元刚,王明田,周志君,等. 帕默尔旱度模式在绵阳干旱研究中的应用[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(2): 55-59.
- [8] 陈东东,栗晓玮,张玉芳,等. 四川省水稻关键生育期不同等级干旱评估研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(10): 69-77.
- [9] 王明田,王翔,黄晚华,等. 基于相对湿度度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 85-92, 295.
- [10] 纪智荣,黄中艳,谢国清. 1961—2010年云南干湿气候变化[J]. 气象科技, 2013, 41(6): 1073-1079.
- [11] 王婷,袁淑杰,王鹏,等. 基于两种方法的四川水稻气候干旱风险评价对比[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4): 455-461.
- [12] 冯建设,王建源,王新堂,等. 相对湿度度指数在农业干旱监测业务中的应用[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 766-772.
- [13] 张建平,刘宗元,何永坤,等. 西南地区水稻干旱时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3103-3110.
- [14] 陈超,庞艳梅,徐富贤,等. 四川水稻不同生育阶段的干旱风险评估[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 184-193.
- [15] 谭方颖,王建林,郑昌玲,等. 华北冬小麦干旱产量损失评估方法[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 696-702.
- [16] 栾庆祖,叶彩华,莫志鸿,等. 基于WOFOST模型的玉米干旱损失评估:以北京为例[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 311-316.



- [17] 刘 静, 王连喜, 马力文, 等. 中国西北旱作小麦干旱灾害损失评估方法研究 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 201-207.
- [18] 何永坤, 唐余学, 张建平. 中国西南地区干旱对玉米产量影响评估方法 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 185-191.
- [19] 温克刚, 詹兆渝. 中国气象灾害大典-四川卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [21] 陈 超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 四川地区参考作物蒸散量的变化特征及气候影响因素分析 [J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 35-40.
- [22] 王 东, 张 勃, 张调风, 等. 1960—2011 年西南地区干旱时空格局分析 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 152-156.
- [23] 代姝玮, 杨晓光, 赵 孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 II. 西南地区农业气候资源时空变化特征 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442-452.
- [24] 张家发, 唐文坚, 李少龙. 中国西南易旱地区识别的探讨 [J]. 中国水利, 2012(5): 18-21, 39.
- [25] 梁 丰, 刘丹丹, 徐红梅, 等. 不同干旱指数集对 1961—2009 年东北地区干旱描述的比较 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 183-189.
- [26] 穆 佳, 邱美娟, 谷 雨, 等. 5 种干旱指数在吉林省农业干旱评估中的适用性 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2624-2632.

## Assessment of Yield Loss of Rice Caused by Drought Based on Wetness Index Anomaly Rate ——Take Sichuan Province for Example

PANG Yan-mei<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1,2</sup>, GUO Xiao-yi<sup>3</sup>, XU Fu-xian<sup>3</sup>

1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;
2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu 610066, China;
3. Institute of Rice and Sorghum, Sichuan Academy of Agricultural Science, Deyang Sichuan 618000, China

**Abstract:** In this study, based on rice production data (development stage and yield) and the meteorological observation data during 1961—2015 at six typical meteorological stations of Sichuan Province, the wetness index anomaly rate of different growth stages of rice was calculated, a statistical model of the meteorological yield of rice under drought and wetness index anomaly rate was established to estimate the risk and yield loss of rice caused by drought disasters in the province. The results showed that the drought index from transplanting to booting and from booting to flowering increased significantly in Peng'an, and that from flowering to maturity increased significantly in Renshou, Peng'an, Kaijiang and Ganluo. After clarifying the meteorological yields of rice during the years in which drought occurred, a statistical model describing the relationships between drought index and meteorological yield was constructed. The model could comprehensively reflect the impact of drought on rice at different growth stages. Yield loss assessment showed that the yield loss of rice caused by drought was between 1.7% and 7.2%.

**Key words:** wetness index anomaly rate; rice; drought; yield loss; Sichuan