

四川水稻不同生育阶段的干旱风险评估

陈超^{1,2}, 庞艳梅¹, 徐富贤³, 郭晓艺³

(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, 四川 成都 610072;
2. 南方丘陵区节水农业研究四川省重点实验室, 四川 成都 610066; 3. 四川省农科院水稻高粱研究所, 四川 德阳 618000)

摘要: 水稻是四川最主要的粮食作物, 而干旱是制约水稻生产的主要因素, 四川省春旱、夏旱和伏旱灾害频发, 常导致水稻减产。本研究基于气象资料、水稻灾情史料和生育期资料, 选取湿润指数距平率作为水稻干旱指标, 构建了四川水稻干旱等级, 并利用灾情样本进行了验证。在此基础上, 分析了1961–2015年四川水稻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状况。结果表明: 从时间变化看, 近55年来, 水稻移栽~孕穗期干旱总站数平均每10年增多0.56个, 其中轻旱和重旱平均每10年分别增多0.20个和0.41个, 而中旱基本不变; 孕穗~开花期干旱总站数平均每10年减少0.49个, 其中中旱和重旱平均每10年均减少0.22个, 而轻旱基本不变; 开花~成熟期干旱总站数平均每10年增多0.54个, 其中轻旱和重旱平均每10年分别增多0.23个和0.55个, 而中旱基本不变。干旱频率的分布特征为: 移栽~孕穗期的干旱频率呈现中部高、西南部和东北部低的特征, 高发区主要分布在北部的绵阳–南部的宜宾一线(36%~58.2%); 孕穗~开花期的干旱频率由西向东递增, 高发区主要分布在盆地北部和东北部(36%~61.9%); 开花~成熟期的干旱频率呈由西向东递增的趋势, 高发区主要分布在盆地东北部和盆南的局部地区(30%~47.3%)。水稻干旱风险分布为: 移栽~孕穗期较高风险区和高风险区主要集中在德阳、资阳和宜宾等地; 孕穗~开花期较高风险区和高风险区主要在盆地中部和东北部; 开花~成熟期较高风险区和高风险区主要在盆地东北部和盆南的局部地区。

关键词: 水稻; 生育期; 旱灾; 湿润指数距平率; 风险评估; 分布特征; 四川省

中图分类号: S166 **文献标志码:** A

Risk assessment of drought on rice at different growth stages in Sichuan Province

CHEN Chao^{1,2}, PANG Yan-mei¹, XU Fu-xian³, GUO Xiao-yi³

(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, Sichuan 610072, China;

2. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu, Sichuan 610066, China;

3. Institute of Rice and Sorghum, Sichuan Academy of Agricultural Science, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: Rice is the most important crop in Sichuan Province, however, drought is a major limiting factor for the rice production in the region. The frequent droughts in spring, summer, and late-summer have been significantly impacting rice yield in Sichuan. We collected daily meteorological data from 84 meteorological stations and corresponding historical disaster and phenology data of rice of 1961 to 2015 in Sichuan and used the wetness index anomaly rate as rice drought index, the spatial and temporary changes and risk of rice growth were evaluated at different development stages. The results showed that during the stage of transplanting to booting, the number of stations showing drought increased in a rate of 0.56 sites · (10a)⁻¹ in the studied period (55 years). Among them, the

收稿日期: 2017-08-21

修回日期: 2018-09-27

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(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(2018-05-01); 中国气象局西南区域重大科研业务项目(2014-08); 中国气象局成都高原气象研究所基本科研业务项目(BROP201817)

作者简介: 陈超(1982–), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 主要从事气候变化影响评价、生物气候模型与信息系统的研究。E-mail: chen-chao16306@sina.com

通信作者: 庞艳梅(1983–), 女, 北京人, 高级工程师, 主要从事气候变化对农业的影响评价研究。E-mail: pangyanm@126.com

number of stations with mild and severe droughts showed an increased trend of $0.20 \text{ sites} \cdot (10\text{a})^{-1}$ and $0.41 \text{ sites} \cdot (10\text{a})^{-1}$, respectively, but no significant changes for moderate drought situations. During the stage from booting to flowering, the number of stations with drought decreased in a rate of $-0.49 \text{ sites} \cdot (10\text{a})^{-1}$. The number of stations with moderate and severe droughts decreased in a rate of $-0.22 \text{ sites} \cdot (10\text{a})^{-1}$, but no significant change for mild drought. In the stage of flowering to maturity, the number of stations with drought increased at a rate of $0.54 \text{ sites} \cdot (10\text{a})^{-1}$. Among them, the number of stations showing mild and severe droughts increased in a trend of $0.23 \text{ sites} \cdot (10\text{a})^{-1}$ and $0.55 \text{ sites} \cdot (10\text{a})^{-1}$, respectively, but, no significant changes for moderate drought. From transplanting to booting, the highest values of rice drought frequency appeared in the central part of study area ($36\% \sim 58.2\%$), but the lowest values appeared in the southwestern and northeastern parts of study area. From booting to flowering, spatial distribution of drought frequency showed a band shape, gradually increasing from the western to eastern parts of study area, and the highest frequency appeared in the northern basin and northeastern basin ($36\% \sim 61.9\%$). From flowering to maturity, spatial distribution of drought frequency also showed a band shape, gradually increasing from the western to the eastern, and the highest frequency appeared in the southern basin and northeastern basin ($30\% \sim 47.3\%$). During the stage of transplanting to booting, high-risk areas and sub-high risk areas of drought mainly concentrated in Deyang, Ziyang and Yibin. From booting to flowering, high-risk areas and sub-high risk areas distributed in central basin and northeastern basin. During the next stage, flowering to maturity, high-risk areas and sub-high risk areas appeared in the southern basin and northeastern basin.

Keywords: rice growth stage; drought disaster; wetness index anomaly rate; risk assessment; distribution characteristics; Sichuan Province

水稻是四川最主要的粮食作物,常年种植面积约 200 万 km^2 ,占粮食总面积的 30% ,产量占粮食总产的 40% 以上。然而,四川水稻种植区地形复杂多样、丘陵山地面积大,气候类型的区域分布错综复杂,自然灾害多,其中干旱灾害尤为严重^[1]。气候变化背景下,四川干旱发生频率高,分布范围广,既有明显的区域性又有叠加交错性。1961–2010年干旱影响范围变化大致为春旱呈减少趋势,夏旱变化不显著,伏旱呈增多态势^[2]。但是,四川地区水利工程设施有限,几乎每年都会出现水库、池塘干涸、河流水位明显下降、部分河流断流等现象,加之区内降水时空分布与水稻生长季节性不相匹配,造成该区域水稻极易发生季节性干旱。因此,分析四川水稻干旱情况,对水稻干旱开展风险评估有利于提升该区域灾害风险管理和决策水平。

近些年来,国内外学者针对干旱评估开展了大量研究,建立了一系列的干旱指标,主要包括气象指标、土壤墒情指标、作物生理生态指标及其它综合监测指标等。其中较为常用的农业干旱指标有相对湿润度指数、降水量距平百分率、标准化降水指数、作物水分亏缺距平指数等。就西南地区而言,以往常利用相对湿润指数进行干旱监测研究。如王明田等^[3]利用相对湿润指数研究了西南季节性干旱的时空变化特征;纪智荣等^[4]利用相对湿润指数研究了云南各季节干湿状况的时空变化特征;王

婷等^[5]利用降雨距平指数与相对湿润指数对比研究了四川水稻的干旱状况;袁淑杰等^[6]采用相对湿润度指数分析了四川省水稻不同生育期的干旱等级,评估了水稻的干旱风险。以上研究在采用相对湿润指数作为干旱指标时均未考虑作物的实际蒸散状况,因而不能真实反映单一作物的受旱状况,鉴于此,张建平^[7]改进了相对湿润指数,从西南的气候特点和水稻生产条件出发,提出了湿润指数距平率,分析了西南水稻生育期内的受旱状况,该指数弥补了灌溉资料难以获取的不足。然而,利用湿润指数距平率计算出的干旱状况没有经过实际灾情数据的检验,尤其是干旱等级值的划分是否能反映水稻的实际旱情还需要进一步探究。

综上所述,本研究拟选用湿润指数距平率作为水稻干旱指标,以历史实际灾情数据为检验样本,识别该指数在四川稻区的适用性,对干旱等级进行校正和验证;利用修正后的干旱指标解析四川水稻不同生育期旱灾发生频率的时空格局;构建水稻干旱风险指数模型,完成四川水稻干旱灾害风险评估。

1 资料与方法

1.1 研究区域和数据来源

按照气候相似性、水稻发育阶段基本相同及农业生产水平相近原则,将四川省划分为6个水稻种植区(图1),包括盆西平原丘陵区、盆中浅丘陵区、

盆南丘陵区、盆东平行岭谷区、盆周边缘山地区、川西南地区。

气象资料源于四川省气象探测数据中心,包括 1961–2015 年四川水稻种植区 84 个地面气象台站逐日最高气温、最低气温、平均气温、降水量、日照时数、相对湿度和平均风速资料。实际旱情资料来源于《中国气象灾害大典》(四川卷)^[8]和中国气象数据网。

1.2 水稻各生育期的划分

四川以种植单季稻为主,本研究通过统计分析农业气象观测站的水稻生长观测资料,并与大田生产调查数据相结合,得到了四川省 6 个区域单季稻播种、移栽、孕穗、开花和成熟的时间(表 1)。本文分析移栽~孕穗期、孕穗~开花期及开花~成熟期的水稻干旱状况^[9]。

1.3 湿润指数距平率

相对湿润指数是常年灌溉条件下作物生长的基线值,而湿润指数距平率是偏离多年平均相对湿

润指数值的变化程度,表示作物受水分胁迫的程度。本研究以湿润指数距平率(M_a)来表达作物农田水分动态变化情况^[7]。计算公式为:

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

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

式中, M 表示某阶段的相对湿润指数; P 表示降水量(mm); ET_c 表示作物需水量(mm); $\overline{M}$ 表示某阶段多年平均相对湿润指数。当 $M \geq 0$ 或 $M \geq \overline{M}$,表明该阶段降雨量多于多年平均状态时,作物不受干旱的影响。

1.4 作物需水量

作物需水量(ET_c) 根据作物系数修正参考作物蒸散量的方法获得^[10–13]。计算公式为:

$$ET_c = K_c \times ET_0$$
 (3)

其中, K_c 是水稻的作物系数; ET_0 是参考作物蒸散量(mm)。

ET_0 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法进行计算^[10]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$
 (4)

式中, R_n 是水稻表面的净辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); γ 是湿度计的常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 是平均气温($^\circ\text{C}$); U_2 是 2 m 高处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 是空气的饱和水汽压(kPa); e_a 是空气的实际水汽压(kPa); Δ 是气温和饱和水汽压关系曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。

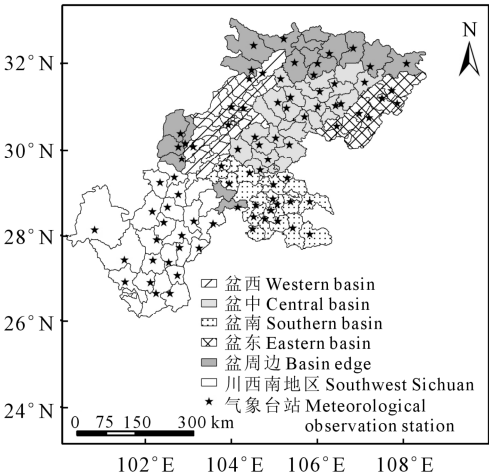


图 1 研究区域内气象台站的分布

Fig.1 Distribution of weather stations in the study region

表 1 四川水稻各生育时期
Table 1 Rice growth stages in Sichuan Province

区域 Region	移栽期 Transplanting stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
盆西平原丘陵区 Plain and hill areas of western basin	5 月中旬 Mid-May	7 月下旬 Late July	8 月中旬 Mid-August	9 月中旬 Mid-September
盆中浅丘陵区 Hilly area of central basin	5 月中旬 Mid-May	7 月下旬 Late July	8 月上旬 Early August	9 月中旬 Mid-September
盆南丘陵区 Hilly area of southern basin	4 月中旬 Mid-April	7 月上旬 Early July	7 月中旬 Mid-July	8 月中旬 Mid-August
盆东平行岭谷区 Equal ridge-valley region of eastern basin	5 月中旬 Mid-May	7 月下旬 Late July	8 月中旬 Mid-August	9 月上旬 Early September
盆周边缘山地区 Mountain area around basin	5 月下旬 Late May	7 月下旬 Late July	8 月下旬 Late August	9 月下旬 Late September
川西南地区 Southwestern Sichuan	5 月中旬 Mid-May	7 月下旬 Late July	8 月中旬 Mid-August	9 月中旬 Mid-September

作物系数 K_c 的计算采用 FAO 的分段单值平均法^[14-16],把水稻发育过程分为初始生长阶段(从播种直到覆盖率为 10%,该时期的作物系数 K_{cini})、迅速发育阶段(从覆盖率达 10% 直到作物充分覆盖,作物系数由 K_{cini} 升至 K_{cmid})、中期阶段(从完全覆盖直到开始成熟期,作物系数 K_{cmid})、成熟阶段(从叶片泛黄直到收获,作物系数由 K_{cmid} 降至 K_{cend})。FAO 提出的水稻在特定标准下的 K_{cini} 、 K_{cmid} 和 K_{cend} 值分别为 1.05、1.20 和 0.75。四川省大部分区域的情况不能满足特定标准条件,因而本研究使用了王明田等^[17] 订正后的作物系数值。

1.5 干旱等级的确定

计算四川省 1961–2015 年 84 个气象台站水稻移栽~孕穗期、孕穗~开花期及开花~成熟期的湿润指数距平率。综合分析四川稻区旱情资料,在前人研究^[7] 的基础上校正了四川水稻农业干旱指标的分级,并利用《中国气象灾害大典》(四川卷)和中国气象数据网中的实际旱情资料对典型站点、典型旱灾发生年的计算结果进行验证。通过对比分析确定水稻干旱等级评价指标,将其分为无旱、轻旱、中旱、重旱 4 个等级(表 2),对应的干旱强度分别为 0、1、2、3。

1.6 干旱频率和干旱强度

利用干旱等级指标,计算水稻各生育期内某一站点的干旱发生频率和干旱强度^[18-20],计算公式为:

$$F_a = \frac{G}{N} \times 100\%$$

$$T_a = \frac{E}{N}$$

式中, F_a 表示某一站点水稻某个生育阶段的干旱频率; G 表示某一站点水稻某个生育阶段发生干旱的总年份; T_a 表示某一站点水稻某个生育阶段多年平均干旱强度; E 表示某一站点水稻某个生育阶段多年干旱强度之和; N 表示某一站点的总年数。

1.7 干旱风险指数

风险指数(A) 是考虑风险程度大小的指标,计算方法是将各站点水稻各生育期干旱频率(F_a) 与平均干旱强度(T_a) 相乘^[19],公式为:

$$A = F_a \times T_a \tag{7}$$

2 结果与分析

2.1 干旱评价指标的等级验证

中国气象局行业标准中规定了相对湿润度指数的计算方法和干旱等级,然而该指标的计算是针对全国平均状况而言。张建平等^[7] 在研究西南地区水稻干旱时空分布特征时提出了湿润指数距平率的干旱评价指标和等级,但未对该指标的等级进行验证。本文为使湿润指数距平率更适用于研究区域,在前人研究的基础上,结合四川稻区历史旱情资料,进一步校正了该农业干旱指标的分级标准(表 2)。本文的验证年限为 1961–2015 年,每一年又分移栽~孕穗期、孕穗~开花期及开花~成熟期 3 个时段,并按照四川 6 个水稻种植区来分别验证。通过比较各等级校正前后的变化情况(表 3),可以看到,在各个水稻种植区,利用校正后的湿润指数距平率等级计算出的干旱结果与实际旱情的符合程度均明显提高,这说明经过校正的干旱等级更适用于本文的研究区域,可以作为研究四川地区水稻干旱状况的湿润指数距平率指标等级。

2.2 研究区域水稻干旱的变化趋势

1961–2015 年,水稻移栽~孕穗期(图 2a),各研究区域发生轻旱的站均次数总体呈 U 型的变化趋势,20 世纪 80 年代以前偏多,为 0.1~0.3 次/站,1981–2000 年期间偏少(0.1~0.2 次/站),2000 年以后明显增加;盆西平原丘陵区相对较多,其次是盆中、盆南地区。各研究区域发生中旱及以上的站均次数在 1971 年以前偏多(0.1~0.4 次/站),1971–1990 年期间偏少(0.1~0.2 次/站),1990 年以后偏多(0.1~0.3 次/站);盆南、盆西相对较多,其次是盆东平行岭谷区(图 2b)。

1961–2015 年,水稻孕穗~开花期(图 2c),各研究区域发生轻旱的站均次数总体呈不显著的下降趋势;盆中、盆南地区相对较多,其次是川西南地区。各研究区域发生中旱及以上的站均次数在盆中浅丘陵区最多,多年平均为 0.39 次/站,其次是盆东平行岭谷区(图 2d)。

表 2 水稻干旱等级评价指标
Table 2 Evaluation indexes of drought on rice

干旱等级 Drought degree	前人的湿润指数距平率(M_a) ^[7] Values of M_a from literatures	本文订正的湿润指数距平率(M_a) Revised values of M_a in this study	干旱强度 Drought intensity
无旱 Normal	$M_a \leq 2.5$	$M_a \leq 1.3$	0
轻旱 Mild drought	$2.5 < M_a \leq 4.5$	$1.3 < M_a \leq 3.3$	1
中旱 Moderate drought	$4.5 < M_a \leq 6.5$	$3.3 < M_a \leq 5.3$	2
重旱 Severe drought	$M_a > 6.5$	$M_a > 5.3$	3

表 3 水稻干旱评价指标的等级验证

Table 3 Grade verification of drought evaluation index on rice

区域 Region	时间段 Growth stage	历史记录经常发生灾害的地点 Historic disaster sites	符合程度 Degree of conformity/%	
			校正前 Before correction	校正后 After correction
盆西平原丘陵区 Plain and hill areas of western basin	移栽~孕穗期 Transplanting~booting	成都、绵阳地区 Chengdu, Mianyang	58.1	67.1
	孕穗~开花期 Booting~flowering	成都和绵阳地区、仁寿 Chengdu, Mianyang, Renshou	60.2	70.2
	开花~成熟期 Flowering~maturity	成都和绵阳地区、仁寿 Chengdu, Mianyang, Renshou	51.2	60.3
盆中浅丘陵区 Hilly area of central basin	移栽~孕穗期 Transplanting~booting	威远、射洪、南充和巴中 Weiyuan, Shehong, Nanchong, Bazhong	53.2	68.2
	孕穗~开花期 Booting~flowering	威远、安岳、射洪、南充和巴中 Weiyuan, Anyue, Shehong, Nanchong, Bazhong	61.6	73.6
	开花~成熟期 Flowering~maturity	威远、安岳、射洪和巴中 Weiyuan, Anyue, Shehong, Bazhong	53.2	63.3
盆南丘陵区 Hilly area of southern basin	移栽~孕穗期 Transplanting~booting	宜宾、自贡、泸州 Yibin, Zigong, Luzhou	60.3	75.4
	孕穗~开花期 Booting~flowering	宜宾、自贡、泸州 Yibin, Zigong, Luzhou	59.4	72.7
	开花~成熟期 Flowering~maturity	宜宾、自贡、泸州 Yibin, Zigong, Luzhou	52.2	68.3
盆东平行岭谷区 Equal ridge-valley region of eastern basin	移栽~孕穗期 Transplanting~booting	万源、达县、岳池 Wanyuan, Daxian, Yuechi	48.2	61.2
	孕穗~开花期 Booting~flowering	达县、大竹、岳池 Daxian, Dazhu, Yuechi	53.5	66.3
	开花~成熟期 Flowering~maturity	达县、大竹、岳池 Daxian, Dazhu, Yuechi	56.3	69.4
盆周边缘山地区 Mountain area around basin	移栽~孕穗期 Transplanting~booting	广元和雅安地区、北川 Guangyuan, Ya'an, Beichuan	49.2	61.6
	孕穗~开花期 Booting~flowering	广元和雅安地区、北川 Guangyuan, Ya'an, Beichuan	60.3	69.8
	开花~成熟期 Flowering~maturity	广元和雅安地区、北川 Guangyuan, Ya'an, Beichuan	58.3	70.5
川西南地区 Southwestern Sichuan	移栽~孕穗期 Transplanting~booting	西昌、盐边 Xichang, Yanbian	55.2	60.2
	孕穗~开花期 Booting~flowering	西昌、汉源 Xichang, Hanyuan	53.9	66.8
	开花~成熟期 Flowering~maturity	西昌、汉源 Xichang, Hanyuan	61.3	72.6

1961–2015 年,水稻开花至成熟期(图 2e),各研究区域发生轻旱的站均次数总体呈 U 型的变化趋势,1961–1980 年偏多(0.1~0.6 次/站),1980 年偏少(0.1 次/站),1990 年以后增加。盆中、盆东地区相对较多,其次是盆南丘陵区。各研究区域发生中旱及以上的站均次数在 1990 年以后呈增多趋势;盆东平行岭谷区最多,多年平均为 0.11 次/站,其它区域均较少(图 2f)。

1961–2015 年,四川水稻移栽~孕穗期干旱总发生站数整体呈现弱的增多趋势(图 3a),变化率为 0.56 个站/10a,其中发生最多的年份为 1969 年(47 个站点),其次是 1979 和 2006 年(45 个站点),发生

最少的年份为 1984 年;年代际呈 U 型的变化趋势,20 世纪 60 年代到 80 年代干旱发生站数呈下降趋势,20 世纪 90 年代则开始呈现增加趋势,特别是 21 世纪的前 10 年达最高值(共 251 个站次发生旱灾)。近 50 多年来,轻旱和重旱发生站数呈弱的增多趋势,变化率分别为 0.20 个站/10a 和 0.41 个站/10a,而中旱基本不变。

1961–2015 年,四川水稻孕穗~开花期干旱总发生站数整体呈现弱的减少趋势(图 3b),变化率为 -0.49 个站/10a,其中发生最多的年份为 1994 年(60 个站点),其次是 1992 年(59 个站点),发生最少的年份为 1996 年、2008 年和 2009 年(9 个站点);

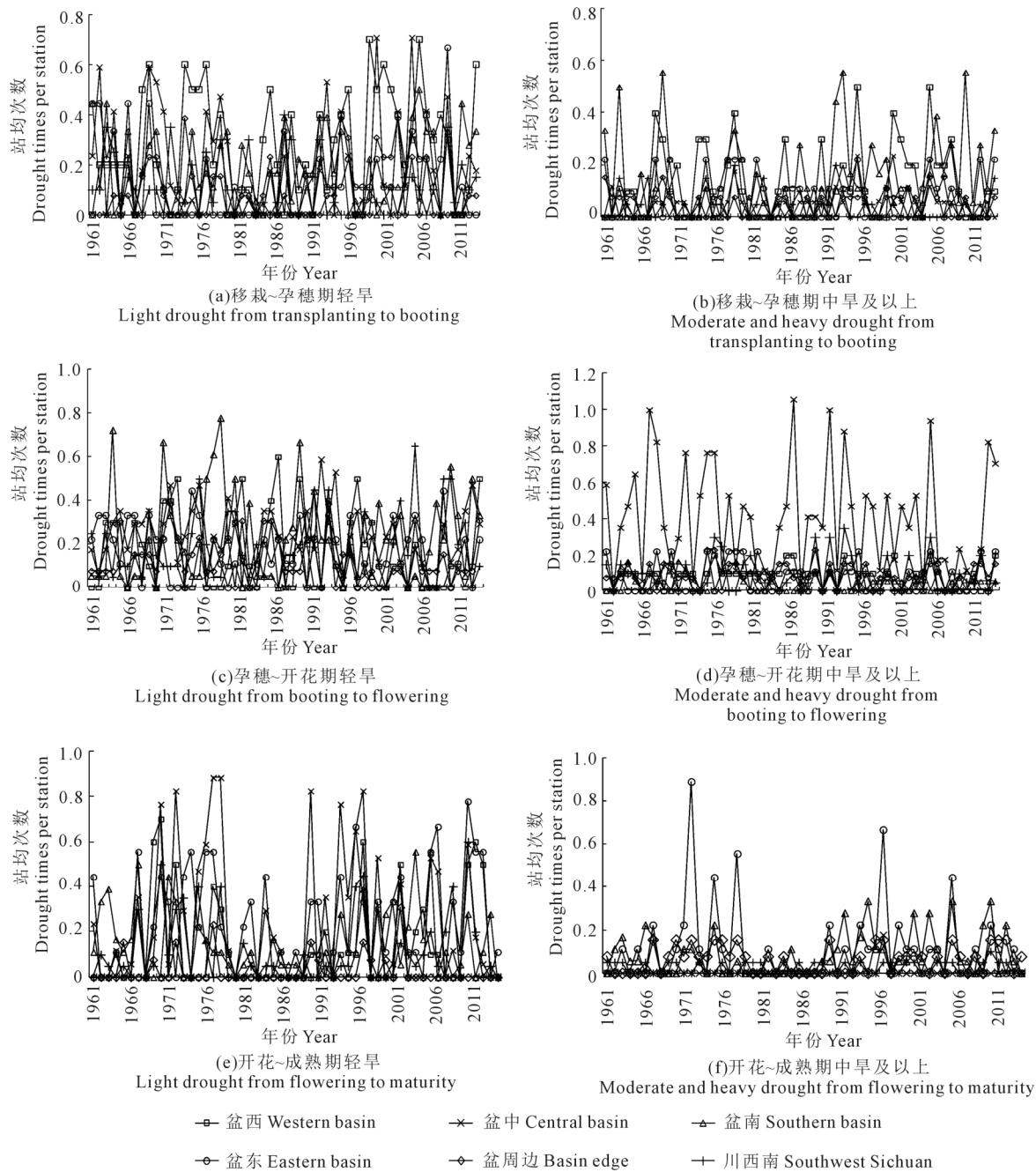


图 2 1961–2015 年四川水稻各种植区不同生育阶段发生干旱灾害站均次数的年际变化

Fig.2 Annual variations of drought times per station at different growth stages in six rice farming regions of Sichuan from 1961 to 2015

1970~1979 年干旱发生站数最多(共 356 个站次发生旱灾),21 世纪的前 10 年最少。近 50 多年来,中旱和重旱发生站数呈弱的减少趋势,变化率均为 -0.22 个站/10a,而轻旱基本不变。

1961–2015 年,四川水稻开花~成熟期干旱总发生站数整体呈现弱的增加趋势(图 3c),变化率为 0.54 个站/10a,其中发生最多的年份为 1997 年(55 个站点),其次是 2001 年(51 个站点),发生最少的年份为 1968 年和 1983 年;年代际呈 M 型的变化趋势,20 世纪 70 年代干旱发生站数最多(共 223 个站次发生旱灾),20 世纪 80 年代最少。近 50 多年来,轻旱和重旱发生站数均呈弱的增多趋势,变化率均分别为 0.23 个站/10a 和 0.55 个站/10a,而中旱基本不变。

2.3 水稻不同生育期干旱频率的空间分布

移栽~孕穗期,水稻轻旱发生频率的分布特征为:四川盆地东北部、盆地西南部和川西南的部分地区低于 16%,其它区域在 16%~40%之间,其中成都、绵阳、眉山、遂宁的部分地区达 32%~40%(图 4a)。中旱发生频率的分布特征为:盆地中北部、盆地南部在 4%~21.8%,其中绵阳北部最高,其它区域大部均在 4%以下(图 4b)。重旱发生频率的分布特征为:大部区域在 0~12%,仅在德阳、资阳和宜宾的部分地区达 24%~57.9%(图 4c)。

孕穗~开花期,水稻轻旱发生频率的分布特征为:盆地西部、盆地中部和东北部的部分地区在 0~18%,其它大部区域在 18%~45.5%之间,其中资阳和巴中的个别地区达 36%~45.5%(图 4d)。中旱发

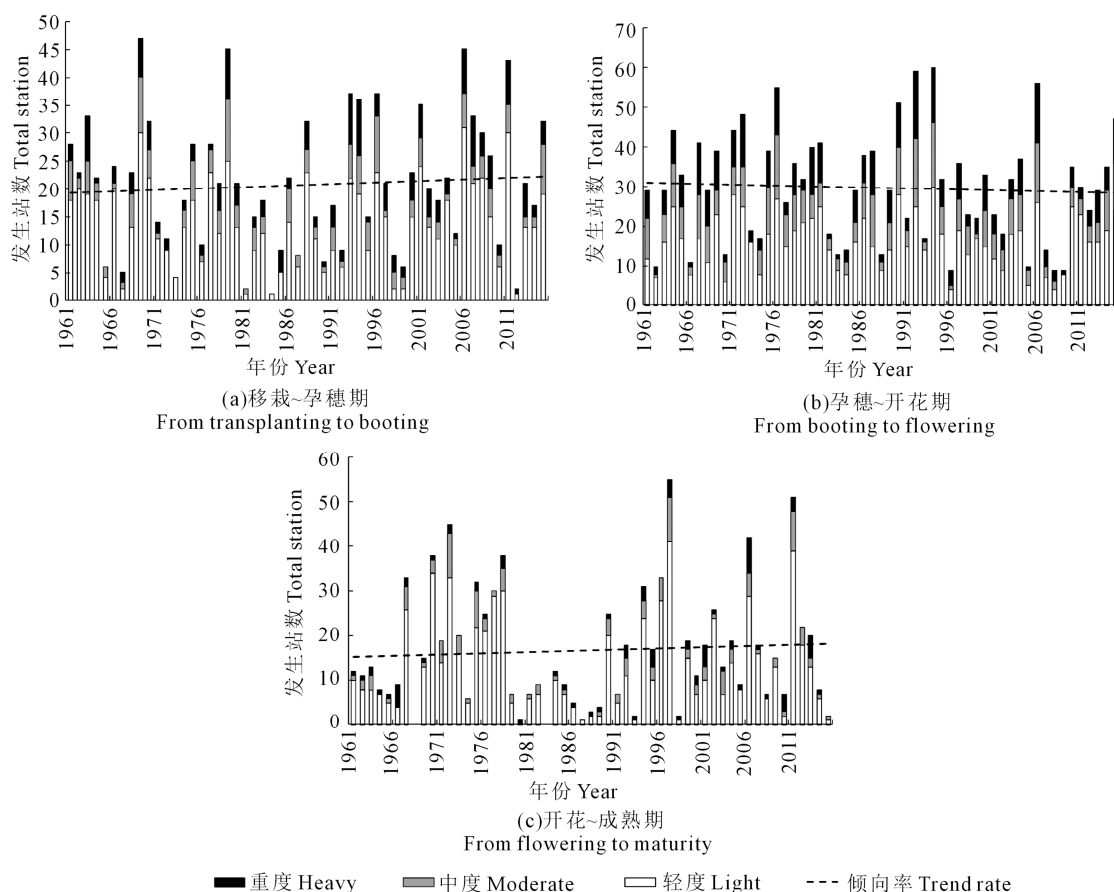


图 3 1961–2015 年四川水稻不同生育阶段干旱灾害发生总站数的年际变化

Fig.3 Annual variation of number of stations in drought at different growth stages of rice in Sichuan during 1961–2015

生频率的分布特征为:大部区域在 0~18%之间,仅在内江、遂宁和南充的个别地区达 24%~32.8%(图 4e)。重旱发生频率的分布特征为:大部区域在 0~12%之间,仅在盆地中部和东北部的部分地区达 36%~60%(图 4f)。

开花~成熟期,水稻轻旱发生频率的分布特征为:从西南向东北递增的趋势,川西南地区 and 盆地西部在 0~16%,盆地中部和南部大多在 16%~24%,盆地东北部最高,在 24%~38.2%(图 4g)。中旱发生频率的分布特征为:大部区域在 3%以下,仅在宜宾、泸州、达州和广安的部分地区达 6%~18.2%(图 4h)。重旱发生频率的分布特征为:大部区域在 4%以下,仅宜宾和泸州的部分地区达 14%~20%(图 4i)。

将图 4 中四川水稻各生育期 3 个干旱等级的发生频率相加,得到四川水稻各生育期内发生干旱的频率。图 5 为四川水稻 3 个生育阶段发生干旱频率的空间分布图,由图 5 可知,四川水稻在移栽~孕穗期发生干旱的频率呈现研究区域中部高、西南部和东北部低的分布特征,干旱高发区主要分布在北部的绵阳~南部的宜宾一线,发生频率在 36%~58.2%,干旱少发区分布在川西南地区 and 盆地东北

部的部分地区,发生频率在 24%以下(图 5a)。孕穗~开花期,水稻发生干旱的频率呈由西向东递增的变化趋势,干旱高发区主要分布在盆地北部和东北部,发生频率在 36%~61.9%,干旱少发区分布在盆地西部和川西南的西南部,发生频率在 24%以下(图 5b)。开花~成熟期,水稻发生干旱的频率呈由西向东递增的变化趋势,干旱高发区主要分布在盆地东北部和盆南的部分地区,发生频率在 30%~47.3%,干旱少发区分布在盆地西部和北部、川西南的大部地区,发生频率在 20%以下(图 5c)。

2.4 水稻干旱发生风险的空间分布

利用不同等级干旱灾害的发生频率和发生强度,计算了水稻干旱风险度指数。在此基础上,参考 GIS 默认的 Natural Breaks 分类方法,并综合分析《中国气象灾害大典》(四川卷)和中国气象数据网四川稻区的旱情资料,尤其将典型区域、典型旱灾发生年的实际旱情与计算出的风险度指数进行对比,最终确定了四川水稻干旱风险区划等级。按照表 4 给出的干旱风险区划等级,绘制了 1961–2015 年四川水稻移栽~孕穗期、孕穗~开花期及开花~成熟期的干旱风险度分布图(图 6)。

移栽~孕穗期,较高风险区和高风险区主要集中

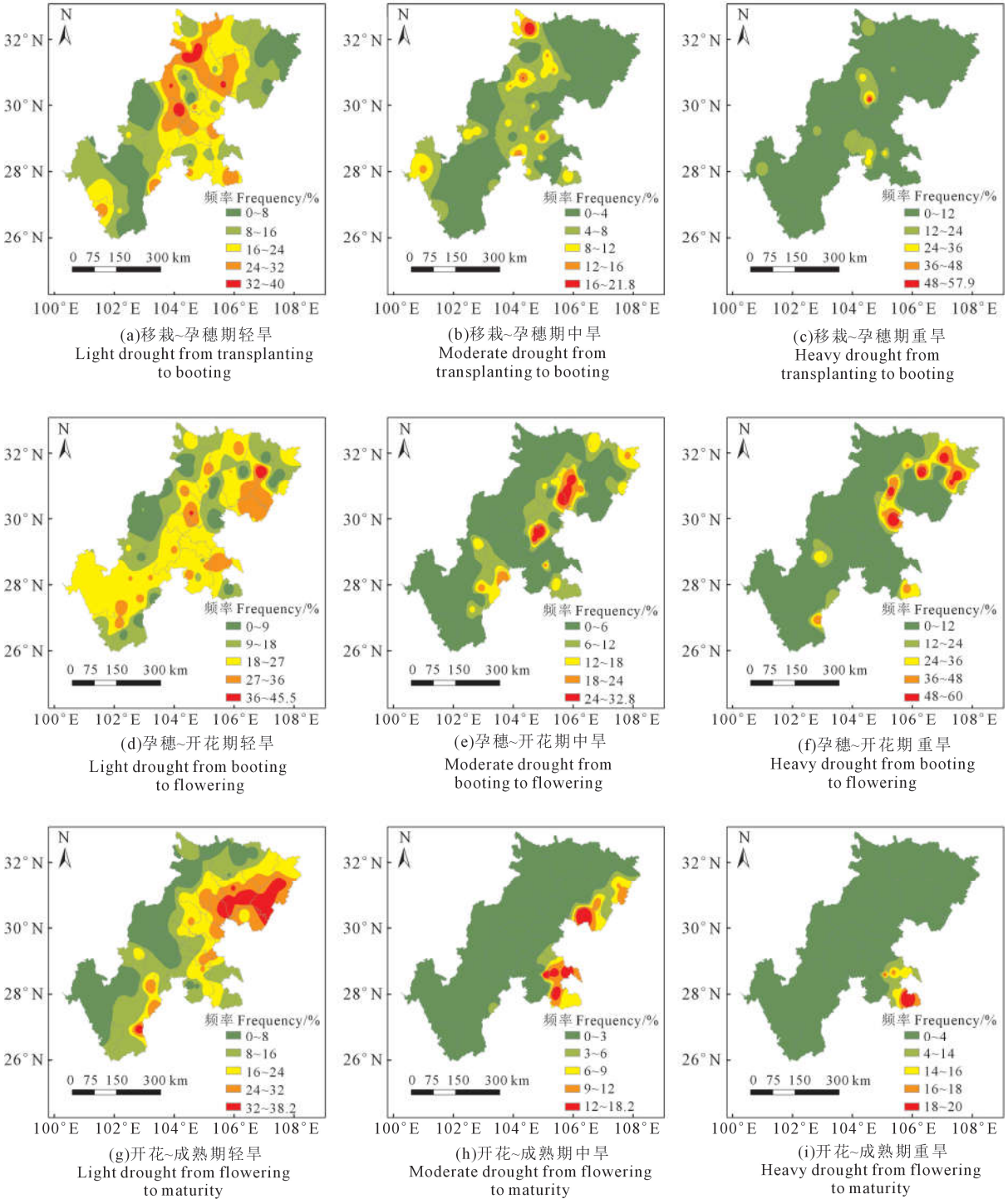


图 4 1961–2015 年四川水稻不同生育阶段各级干旱发生频率的空间分布

Fig.4 Spatial frequency distribution of each drought at different rice growth stages in Sichuan during 1961–2015

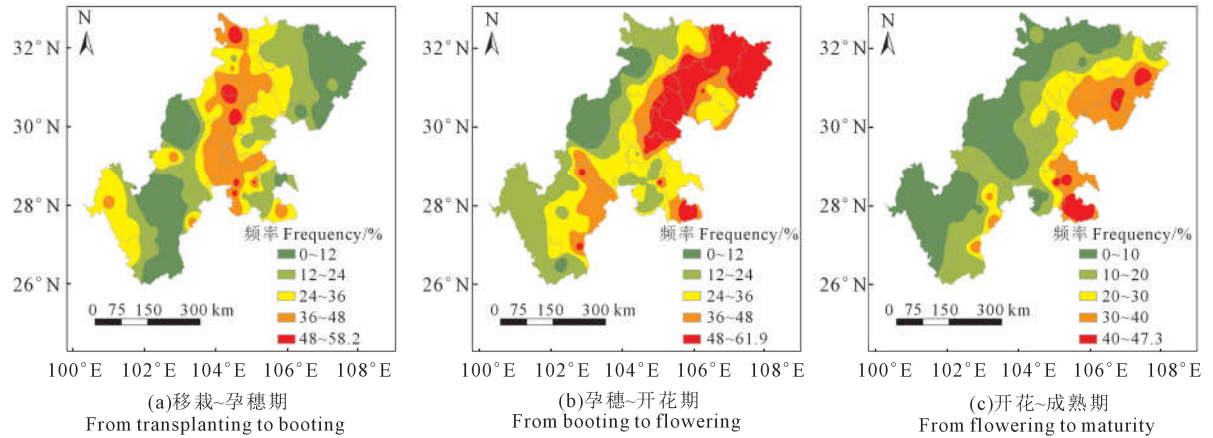


图 5 1961–2015 年四川水稻不同生育阶段干旱频率的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of drought frequency at different rice growth stages in Sichuan during 1961–2015

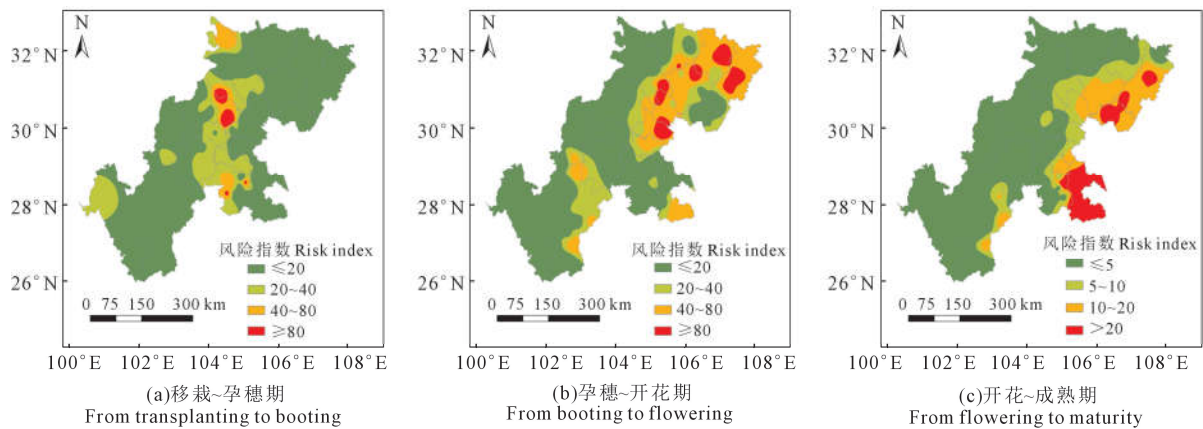


图 6 四川水稻干旱风险度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of drought risk index of rice in Sichuan

表 4 四川水稻干旱风险度指数

Table 4 Drought risk index of rice in Sichuan

生育期 Growth stage	风险等级 Risk grade			
	低风险区 Low risk area	中风险区 Middle risk area	较高风险区 Sub-high risk area	高风险区 High risk area
移栽~孕穗期 Transplanting-booting	≤ 20	20~40	40~60	≥ 60
孕穗~开花期 Booting-flowering	≤ 20	20~40	40~80	≥ 80
开花~成熟期 Flowering-maturity	≤ 5	5~10	10~20	≥ 20

相似性、水稻发育阶段基本相同及农业生产水平相近的原则,将四川省划分为 6 个水稻种植区,每个种植区内的水稻生育期一致,而不同种植区之间水稻生育期存在差异。本研究在分析四川不同区域水稻不同生育期旱灾发生状况的时空分布特征的基础上,进行了四川水稻不同生育阶段干旱灾害风险评估,以期对四川不同水稻种植区不同生育阶段采取适宜的防旱减灾措施有一定指导意义。

本文的研究表明:移栽~孕穗期,各种植区域 1961-2015 年水稻发生轻旱的站均次数在 1981-2000 年期间偏少(0.1~0.2 次/站),其它时段偏多(0.1~0.3 次/站),盆西平丘区旱情相对较多;发生中旱及以上的站均次数在 1971-1990 年期间偏少(0.1~0.2 次/站),其他时段偏多(0.1~0.4 次/站),盆南、盆西旱情相对较多;近 50 多年来,干旱总站数呈现弱的增多趋势,年代际呈 U 型的变化趋势,轻旱和重旱发生站数呈弱的增多趋势,而中旱基本不变。孕穗~开花期,发生轻旱的站均次数总体呈不显著的下降趋势,盆中、盆南旱情相对较多;发生中旱及以上的站均次数在盆中浅丘区最多;近 50 多年来,干旱总站数整体呈现弱的减少趋势,轻旱、中旱和重旱发生站数均呈弱的减少趋势。开花~成熟期,发生轻旱的站均次数在 20 世纪 80 年代以前偏多(0.1~0.6 次/站),20 世纪 80 年代偏少(0.1 次/站),20 世纪 80 年代以后增加,盆中、盆东旱情相对较多;发生中旱及以上的站均次数在 1990 年以后呈增多趋势,盆东平行岭谷区旱情最多;近 50 多年来,干旱总站数整体呈现弱的增加趋势,轻旱、中旱和重旱发生站数均呈弱的增多趋势。

移栽~孕穗期,水稻轻旱发生频率在四川盆地东部和西南部、川西南的部分地区低于 16%,其它区域在 16%~40%之间;中旱频率在盆地中北部和南部为 4%~21.8%,其它大部区域均在 4%以下;重旱频率在大部区域低于 12%;总体来看,发生干

在德阳、资阳和宜宾等地,其中广汉、简阳、高县和江安等地为高风险区。中风险区主要分布在盆西的成都、盆南大部 and 川西南的西部。而低风险区主要分布在盆地的北部、东北部和西南部,以及川西南地区的大部(图 6a)。

孕穗~开花期,较高风险区和高风险区主要集中在盆地中部和东北部,其中绵阳的盐亭、资阳的安岳、遂宁的射洪、南充的仪陇、巴中的通江等地为高风险区。中风险区主要分布在盆地的西南部、盆地中北部的个别地区。而低风险区主要分布在盆地的西部和南部,以及川西南地区的大部(图 6b)。

开花~成熟期,高风险区主要集中在泸州、宜宾、达州和广安等地。较高风险区主要集中在盆地东部和南部。中风险区主要分布在盆地东部和中部的部分地区。而低风险区主要分布在盆地西部和北部,以及川西南地区的大部(图 6c)。

3 结论与讨论

干旱指标是评估干旱发生程度的主要依据,指标的选取关系到评估结果的准确性。本研究选用湿润指数距平率作为四川水稻干旱指标,以历史实际灾情数据为检验样本,对张建平^[7]划分的干旱等级指标进行了修正,经过验证,修正后的干旱等级指标与实际旱情的符合程度更高。另外,考虑到四川水稻种植区域跨度较大的特点,本文按照气候

旱的频率呈现中部高、西南部和东北部低的分布特征,干旱高发区主要分布在北部的绵阳-南部的宜宾一线,发生频率在36%~58.2%。孕穗~开花期,水稻轻旱频率在盆地西部、中部和东北部的部分地区低于18%,其它大部区域在18%~45.5%;中旱频率在大部区域低于18%,仅在内江、遂宁和南充的个别地区达24%~32.8%;重旱频率在大部区域低于12%,仅在盆地中部和东北部的部分地区达36%~60%;总体来看,发生干旱的频率呈由西向东递增的变化趋势,干旱高发区主要分布在盆地北部和东北部,发生频率在36%~61.9%。开花~成熟期,水稻轻旱频率呈从西南向东北递增的趋势,川西南和盆地西部低于16%,盆地中部和南部在16%~24%,盆地东北部在24%~38.2%;中旱频率在大部区域低于3%,仅在宜宾、泸州、达州和广安等地达6%~18.2%;重旱频率在大部区域低于4%,仅宜宾和泸州的部分地区达14%~20%;总体来看,发生干旱的频率呈由西向东递增的变化趋势,干旱高发区主要分布在盆地东北部和盆南的部分地区,发生频率在30%~47.3%。

移栽~孕穗期,重度干旱风险以上的区域主要集中在德阳、资阳和宜宾等地,其中广汉、简阳、高县和江安等地为极重干旱风险区;中度风险区在成都、盆南大部 and 川西南的西部;低风险区在盆地的北部、东北部和西南部,以及川西南地区的大部。孕穗~开花期,重度干旱风险以上的区域主要集中在盆地中部和东北部,其中盐亭、安岳、射洪、仪陇、通江等地为极重干旱风险区;中度风险区在盆地的西南部、盆地中北部的个别地区;低风险区在盆地的西部和南部,以及川西南的大部。开花~成熟期,极重度干旱风险的区域主要集中在泸州、宜宾、达州和广安等地;重度风险区在盆地东北部和南部;中度风险区域在盆地中部的部分地区。低风险区在盆地西部和北部,以及川西南大部。

综上所述,本文的结论与其他学者^[3-7,21-22]的研究结果在分布规律上基本保持一致,但在分布范围上存在一定差异,这主要是因为站点和资料长度的选取不同。另外,选取不同的干旱指标对结果的影响也很大。比较发现,不同研究方法各有利弊,气象指标、土壤墒情指标与作物生理生态指标分别从大气干燥程度、土壤供水能力和作物耐旱能力方面反映了作物的缺水程度,并且各类干旱指标都具有一定的时间与空间尺度范围,还不能综合反映不同地区的自然条件、下垫面、作物品种、人类活动等因素影响^[23-24]。因此,未来有必要将各种干旱指标进行结合,建立干旱监测的综合模型,以不断提高干旱评估的准确性。

参考文献:

- [1] 陈淑全,罗富顺,熊志强,等.四川气候[M].成都:四川科学技术出版社,1997.
- [2] Ma Z F, Liu J, Zhang S Q, et al. Observed climate changes in Southwest China during 1961–2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 4(1): 30-40.
- [3] 王明田,王翔,黄晚华,等.基于相对湿润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.
- [4] 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.
- [5] 王婷,袁淑杰,王鹏.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.
- [6] 袁淑杰,王婷,王鹏.四川省水稻气候干旱灾害风险研究[J].*冰川冻土*, 2013, 35(4): 1036-1043.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陈超,庞艳梅,张玉芳,等.四川单季稻产量对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J].*自然资源学报*, 2016, 31(2): 331-342.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 徐新良,刘纪远,庄大方. GIS 环境下 1999–2000 年中国东北参考作物蒸散量时空变化特征[J].*农业工程学报*, 2004, 20(2): 10-14.
- [13] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等.甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究[J].*农业工程学报*, 2004, 20(1): 99-103.
- [14] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J].*农业工程学报*, 2000, 16(5): 26-30.
- [15] 刘钰,汪林,倪广恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J].*农业工程学报*, 2009, 25(12): 6-12.
- [16] 符娜,刘小刚,张岩,等.西南地区水稻灌溉需水量变化规律[J].*生态学报*, 2014, 33(7): 1895-1901.
- [17] 王明田,曲辉辉,杨晓光,等.基于降水保证指数的四川省种植制度优化研究[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 82-92.
- [18] 邓国,李世奎.中国粮食作物产量风险评估方法[C]//李世奎.中国农业灾害风险评价与对策.北京:气象出版社,1999.
- [19] 陈晓艺,马晓群,孙秀邦.安徽省冬小麦发育期农业干旱发生风险分析[J].*中国农业气象*, 2008, 29(4): 472-476.
- [20] 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等.基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J].*农业工程学报*, 2009, 25(8): 28-34.
- [21] 张文江,陆其峰,高志强,等.基于水分距平指数的 2006 年四川盆地东部特大干旱遥感响应分析[J].*中国科学 D 辑:地球科学*, 2008, 38(2): 251-260.
- [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(8): 152-158.
- [23] 李柏贞,周广胜.干旱指标研究进展[J].*生态学报*, 2014, 34(5): 1043-1052.
- [24] Richard R, Heim Jr. A review of twentieth-century drought index used in the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1149-1165.