

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2017.10.013

# 四川省水稻关键生育期不同等级干旱评估研究<sup>①</sup>

陈东东<sup>1,2</sup>, 栗晓玮<sup>3</sup>, 张玉芳<sup>2</sup>, 陈超<sup>4</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. 四川省农业气象中心, 成都 610072; 3. 重庆第二师范学院, 重庆 400065;
4. 四川省气候中心, 成都 610072

**摘要:** 水稻在四川粮食生产中占重要地位, 干旱一直是制约水稻生产的主要因素, 夏旱、伏旱频发, 造成水稻减产. 结合水稻生产的特点和气候条件, 选取水分盈亏指数作为干旱评估指标, 分析了 1961—2014 年四川水稻 7 大种植区不同生育期的干旱时空变化特征及其风险分布情况. 结果表明: 从时间变化看, 各区不同生育期旱站均次数变化趋势大体相近, 尤其是发生次数较高的盆中、盆东和川西南山地, 趋势大体相同. 干旱相对高值出现在 70 年代末、90 年代末期以及 2005 年前后, 自此以后出现了明显的下降趋势. 干旱频率分布特征为全生育期以轻旱为主, 以盆中频率最高; 孕穗—抽穗期发生轻旱的频率较低, 中旱以上发生频率超过 50% 的地区主要分布在盆中、盆西及盆周地区; 抽穗—成熟期以发生轻旱为主, 频率较高值分布在盆中、盆南局部和川西南山地部分地区(多在 50% 以上), 中等以上干旱则很少发生. 水稻干旱风险分布为全生育与孕穗—抽穗期发生重度及以上风险区域大体一致, 主要集中在盆西、盆中的大部、盆周的北部以及川西南山地大部; 抽穗—成熟期发生重度及以上风险区域集中在盆东、盆中、盆南和川西南山地局部地区.

**关键词:** 干旱; 水稻; 水分盈亏指数; 分布特征; 干旱发生风险度

**中图分类号:** S166

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5471(2017)10-0069-09

四川是我国水稻最适宜生长区之一, 水稻产量约占全年粮食总产量的 50% 左右, 水稻生产在该区域农业生产中占有十分重要的位置. 该地区丘陵山地面积大、地域广、地形复杂多样, 气候类型的区域分布错综复杂, 自然灾害多<sup>[1]</sup>. 近些年来, 由于气候变化所带来的气温升高和降水分布的变化, 以及降水量季节性分配不均出现的季节性干旱成为影响水稻生长发育、导致产量下降的重要因素. 其危害大小取决于干旱程度, 同时与水稻生长阶段密切相关. 随着全球变暖, 干旱对水稻的影响程度持续增加<sup>[2]</sup>. 因此, 分析四川水稻干旱情况、对水稻干旱进行风险评估有助于提升该区域灾害风险管理和决策水平, 减轻干旱造成的损失.

随着人们灾害风险意识的提高, 国内许多学者针对干旱评估方面做了较多的研究<sup>[3-5]</sup>. 有学者基于自然灾害风险理论建立了西南地区玉米干旱灾害风险评估模型<sup>[6]</sup>. 还有学者利用相对湿润度指数分析了西南地区季节性干旱的分布情况<sup>[7]</sup>. 在四川有研究运用水分盈亏指数分析了玉米生育期发生干旱时空变化特征以及干旱风险分布情况<sup>[8-9]</sup>. 还有研究利用相对湿润指数分析了西南地区水稻干旱的时空分布情况<sup>[10]</sup>. 以往干旱研究针对旱地作物相对较多, 且多数是反映区域内整体干旱分布情况, 针对水稻的生育期进行干旱风险评估的研究并不多见. 水分盈亏指数是研究农业干旱的综合性指标之一, 它不仅考虑了农田水分主要收入项、支出项以及水分供需矛盾的具体大小, 又反映了作物正常生长发育及产量形成对水分的需求, 同时还考虑了前期水分盈亏量的影响. 该指标能较好地反映各站点主要生长季作物水分盈亏与农业干旱情况. 由于水稻移栽后田中有水前期很少受到干旱胁迫, 所以本研究按照水稻易发生干旱且是产量形成的关键生育期, 评估干旱发生风险, 以期对四川水稻生产风险管理及可持续发展提供一定的理论依据.

① 收稿日期: 2016-06-06

基金项目: 中国气象局西南区域重大科研业务项目(2014-8); 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题(PAEBL-2017-C4); 四川省三农服务专项.

作者简介: 陈东东(1983-), 男, 河北河间人, 硕士, 工程师, 主要从事农业气象的研究.

# 1 研究区域及方法

## 1.1 研究区概况

四川位于亚热带范围,因不同地貌和不同季风环流的交替影响,形成了独特的气候类型,四川水稻种植主要分布在以下两个区域:1)攀西地区:此地区属于干湿季节分明的季风气候,降水区域差异大,大部分地区年降水量 800~1 200 mm. 2)四川盆地:该区属于亚热带季风气候,雨量充沛,年降水量在 800~1 600 mm.

## 1.2 数据来源

四川省 118 个气象台站 1961—2014 年逐年最高气温、最低气温、日平均温、降水量、平均风速等资料来自四川省农业气象中心,生育期资料参考 1981—2012 年 26 个农业气象站观测报表.

## 1.3 水稻种植区域及生育时段划分

根据气候相似性、农业生产水平相近、作物发育阶段基本相同的原则<sup>[11]</sup>,将四川省的攀西和四川盆地水稻种植区细分为 7 个亚区<sup>[12]</sup>.攀西地区包括川西南宽谷和川西南山地 2 个亚区.川西南宽谷包括攀枝花及凉山州部分共计 8 个县市,川西南山地包括凉山州大部分,共计 14 个县.盆地区域包括:盆南、盆西、盆中、盆东和盆周 5 个亚区.(盆南包括自贡、泸州、宜宾市的大部分县,以及乐山市的犍为、内江的隆昌等,共计 19 个县市;盆西包括成都市全部,德阳市、绵阳市少部,雅安市及其名山等,共 30 个县市;盆中包括遂宁、资阳以及内江和南充的大部分县,巴中的平昌,德阳的中江,共计 23 个县市;盆东包括达州的部分地区及广安的部分县,共 9 个县市;盆周包括盆周各山区县以及广元的苍溪等,共 15 个县市.通过统计水稻生育期观测资料得出各区域水稻生育期时间(表 1).在以下分析中主要以种植区为研究对象,空间插值操作则采用 ArcGIS 软件提供的样条内插方法,绘制生成空间分布图(图 1).

表 1 四川省不同区域水稻生育时段划分

区域	全生育期(移栽-成熟)	孕穗-抽穗	抽穗-成熟
川西南宽谷	5.11—9.10	7.21—8.10	8.11—9.10
川西南山地	5.01—9.10	7.21—8.10	8.11—9.10
盆南	4.11—8.10	7.01—7.10	7.11—8.10
盆西	5.11—9.10	7.21—8.10	8.11—9.10
盆中	5.11—9.10	7.21—7.31	8.01—9.10
盆东	5.11—8.31	7.21—8.10	8.11—8.31
盆周	5.21—9.30	7.21—8.20	8.21—9.30

## 1.4 作物水分盈亏指数计算

作物水分盈亏指数是常用的农业干旱诊断指标之一,该指标考虑了前期降水的影响,是实际供水量与作物需水量之差与作物需水量的比值,以百分率(%)表示<sup>[13]</sup>.计算公式为

$$I = \frac{(R_{10} - W_{10}) + (R - W)}{W} \quad (1)$$

其中:

$$W = K_c ET_0 \quad (2)$$

式中,  $R_{10}$  为前 10 日累积降水量,  $W_{10}$  为前 10 日累积作物需水量,  $R$  为固定时段的累计降水量,  $W$  为固定时段累计作物需水量,  $ET_0$  为参考作物蒸散量,采用 Penman-Monteith 公式计算,  $K_c$  为作物系数<sup>[14]</sup>.

## 1.5 指标选取及干旱等级确定

计算全省 1961—2014 年 118 个台站水稻孕穗-抽穗、抽穗-成熟及全生育期作物水分盈亏指数.由四川省已有资料和田间试验结果<sup>[15]</sup>并参考 FAO 推荐值得出各种植区域各月  $K_c$  值,详见表 2.依据干旱标准<sup>[16]</sup>

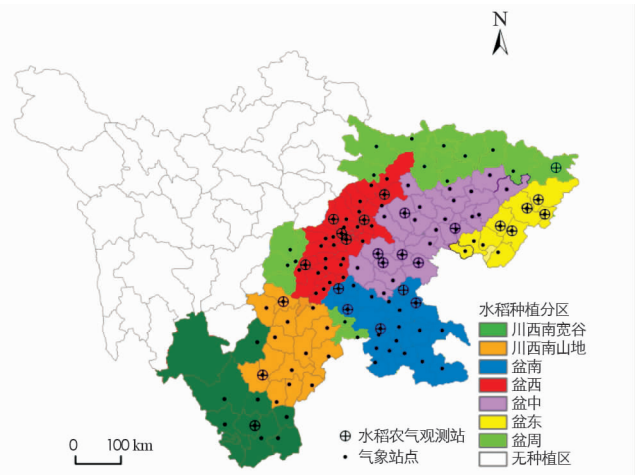


图 1 研究区分区及气象站点和  
水稻农业观测站点的分布

结合《中国气象灾害大典·四川卷》所记载干旱情况<sup>[17]</sup>, 参照 7 个区域发生干旱的年份, 选取典型站点计算水稻各生育阶段的水分盈亏指数进行实际旱情的验证, 在验证过程中使划分结果与实际记载基本相符. 通过对比分析确定水稻干旱等级指标, 将其分为无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱 5 个级别(表 3), 对应的干旱强度为 0,1,2,3,4.

表 2 四川省水稻各生育期的作物系数(Kc 值)

区域	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
川西南宽谷	1.20	0.75	1.05	1.30	1.45	1.40	1.35
川西南山地	1.20	0.75	1.25	1.40	1.60	1.55	1.30
盆南	1.20	0.75	0.95	1.15	1.15	1.25	1.20
盆中	1.20	0.75	0.95	1.40	1.50	1.30	1.20
盆西	1.20	0.75	1.25	1.45	1.60	1.50	1.35
盆东	1.20	0.75	1.05	1.15	1.10	1.20	1.20
盆周	1.20	0.75	1.00	1.15	1.25	1.25	1.20

表 3 水稻干旱等级及强度划分

干旱等级	水稻干旱评估指数(I)	干旱强度
无旱	$I \geq -0.4$	0
轻旱	$-0.8 \leq I < -0.4$	1
中旱	$-1.2 \leq I < -0.8$	2
重旱	$-1.6 \leq I < -1.2$	3
特旱	$I < -1.6$	4

## 1.6 干旱频率

### 1.6.1 全生育期干旱频率

逐年统计各站点水稻全生育期内不同等级干旱的级别和次数, 得到各站相应等级干旱的发生频率( $F$ )、干旱强度等级( $T$ )和各区域不同等级干旱站均次数( $C$ )、逐年干旱站均次数( $D$ )<sup>[18]</sup>.

$$F = \frac{H}{N} \times 100\% \quad (3)$$

$$T = \frac{\sum_{a=1}^n T_a}{n} \quad (4)$$

$$C = \frac{H}{M}, D = \frac{L}{M} \quad (5)$$

式中,  $H$  为 1961—2014 年各站相应等级干旱的总次数,  $N$  为总年数,  $T_a$  为各区域第  $a$  发育期 54 年平均干旱强度,  $\alpha$  为生育期,  $n$  为总生育期数,  $L$  为逐年各干旱等级区域总次数,  $M$  为区域内的台站个数.

### 1.6.2 各生育期干旱频率

逐年统计各站水稻不同生育期干旱发生次数, 得到各站不同生育期的干旱频率和强度.

$$F_a = \frac{G}{N} \times 100\% \quad (6)$$

$$T_a = \frac{E}{N} \quad (7)$$

式中,  $F_a$  为各站点水稻第  $\alpha$  生育阶段干旱频率,  $G$  为水稻第  $\alpha$  生育阶段干旱总次数,  $E$  为研究区内各站水稻第  $\alpha$  生育阶段 54 年平均干旱强度之和, 其他符号同上.

## 1.7 风险指数

风险指数( $A$ )是考虑风险程度大小的指标, 把干旱强度和干旱发生频率结合在一起, 计算方法是各台站各生育期干旱频率( $F$ )与平均干旱强度( $T$ )相乘<sup>[18]</sup>, 即:

$$A = F \times T \quad (8)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻不同生育期干旱站均次数的时间变化

通过计算水稻各种植区各级干旱站均次数, 绘制 54 年来各区域发生干旱和中旱以上站均次数 5 年滑动

平均变化图(图 2). 由图 2a 可看出, 孕穗-抽穗期各区发生干旱站均次数在 20 世纪 80 年代中期以前是盆中、川西南山地以及盆东相对较多, 其余依次是盆周、盆西、盆南和川西南宽谷地区. 80 年代中期以后以盆西、川西南山地、盆中相对较多, 其余依次是盆周、盆东、盆南和川西南宽谷地区. 各区高值区主要出现在 20 世纪 70 年代末期至 80 年代初期, 90 年代中期以及 21 世纪初期, 其中发生干旱站均次数盆西区域多年平均值为川西南河谷的 2.6 倍. 发生中旱及以上干旱站均次数(图 2b)与发生干旱(图 2a)站均次数趋势大体一致.

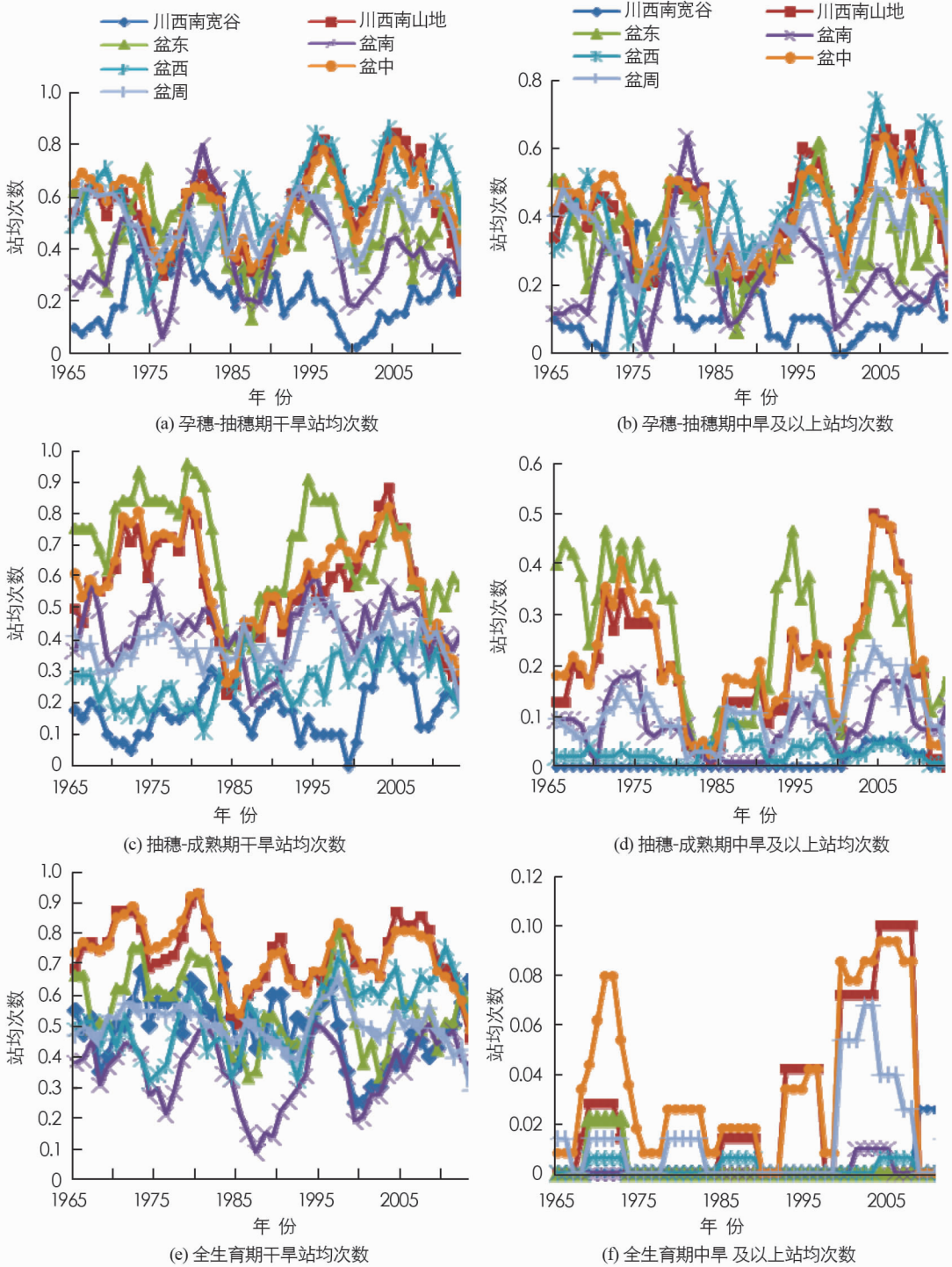


图 2 1961—2014 年间四川省水稻各种植区不同生育期干旱站均次数变化

抽穗-成熟期发生干旱站均次数(图 2c)最多为盆东、盆中、川西南山地, 其余依次是盆南、盆周、盆西和川西南宽谷地区. 以最多的 3 个区为例, 在 20 世纪 60 年代至 70 年代末期呈现一个上升的趋势, 而后出现了下降, 在 80 年代中期达到最低, 之后呈现不断升高的趋势. 其中盆东在 90 年代中期达到最大, 值为

0.91, 盆中和川西南山地在 2004 年达到最高值, 再之后呈现不断降低趋势, 直到 21 世纪 10 年代初略有回升的态势, 整体呈现近似“M”的形态. 中旱及以上(图 2d)各区域在发生次数上有明显的降低, 但从年代的变化来看仍和发生干旱次数相似.

全生育期干旱站均次数从高到低依次是盆中、川西南山地、盆东、盆西、盆周、川西南宽谷和盆南地区. 以盆中为例: 干旱站均次数(图 2e)在 20 世纪 70 年代末 80 年代初达到最大, 值为 0.93, 之后出现较为明显波动, 在 90 年代末期以及 2005 年前后站均次数相对较高, 普遍在 0.8 左右, 其余各区变化趋势相似. 值得注意的是发生中旱及以上(图 2f)在全生育期只有盆中、川西南山地、盆东在 20 世纪 70 年代和 21 世纪初偶有发生.

## 2.2 水稻不同区域干旱站均次数情况

根据确定的水稻干旱等级标准, 不同生育期各级干旱站均次数统计结果见表 4. 四川省各区域 54 年水稻孕穗-抽穗期各级干旱均有发生, 川西南宽谷和盆南以轻旱最多, 其余各区以中旱次数最高, 盆西最高值为 10.57 次, 最低是川西南宽谷为 3.80 次; 重旱次数最高是盆中为 8.39 次, 特旱次数最低是川西南宽谷为 0.89 次; 合计值以盆中最高, 其次是盆西, 最低值为川西南宽谷. 抽穗-成熟期以轻旱为主, 最高的盆中为 21.24 次, 最低是川西南宽谷为 9.33 次; 中旱以盆东最高, 值为 14.42 次, 最低的川西南宽谷为 0.39 次; 重旱发生次数均较低, 最多的盆中也仅有 0.13 次, 无特旱发生; 合计值盆东最高为 38.00 次, 其次是盆中为 32.32 次, 最低为川西南宽谷, 次数为 9.72. 全生育期四川水稻种植区轻旱发生次数较高, 其中盆中发生次数最高, 值为 37.56 次, 最低的盆南为 19.40 次. 中旱发生次数明显降低, 盆中最高仅为 1.77 次, 而重旱和特旱各区都不曾发生, 合计值盆中最高为 39.33 次, 其次是川西南山地为 38.99 次, 最低为盆周, 为 26.5 次.

表 4 1961—2014 期间水稻各生育期不同等级干旱站均次数

生育期	区域	轻旱	中旱	重旱	特旱	合计
孕穗-抽穗	川西南宽谷	5.35	3.80	1.78	0.89	11.82
	川西南山地	8.51	9.56	8.33	2.97	29.37
	盆南	8.39	6.76	4.15	1.11	20.41
	盆中	8.85	9.34	8.39	3.54	30.12
	盆西	9.37	10.57	8.17	2.00	30.11
	盆东	7.17	9.71	5.95	3.21	26.04
	盆周	8.08	8.33	6.98	2.83	26.22
抽穗-成熟	川西南宽谷	9.33	0.39	0	0	9.72
	川西南山地	20.47	9.89	0.07	0	30.43
	盆南	18.65	4.57	0.10	0	23.32
	盆中	21.24	10.95	0.13	0	32.32
	盆西	12.59	1.45	0	0	14.04
	盆东	23.47	14.42	0.11	0	38.00
	盆周	14.95	5.40	0	0	20.35
全生育期	川西南宽谷	26.99	0.13	0	0	27.12
	川西南山地	37.71	1.28	0	0	38.99
	盆南	19.40	0.05	0	0	19.45
	盆中	37.56	1.77	0	0	39.33
	盆西	27.27	0.09	0	0	27.36
	盆东	30.22	0.11	0	0	30.33
	盆周	25.75	0.75	0	0	26.50

## 2.3 水稻不同生育期干旱频率的空间分布

孕穗-抽穗期发生轻旱频率的分布情况(图 3 中干旱频率取值包括前值): 整个盆地大部分区域不足 20%, 个别区域轻旱频率在 20%~28%之间, 零星分布在盆周、盆中和盆南地区(图 3a). 川西南山地和川西南宽谷地区轻旱频率多在 10%~15%之间. 中等以上干旱分布特点(图 3b): 川西南宽谷大多在 2%~15%, 最低出现在冕宁县, 值为 2%; 川西南山地大多在 28%~53%, 其中美姑县最小, 最高值为石棉县. 盆南大部分集中在 15%~30%之间; 盆周地区大部分在 9%~59%, 高值主要分布在靠北的部分包括北川县、剑阁县和旺苍县. 盆中各县普遍在 30%以上, 其中遂宁、蓬溪县、苍溪县、梓潼县达到了 50%以上, 蓬溪县最高, 值为 67%. 盆西部分多在 30%~60%之间, 高发区主要在安县、绵阳、德阳、绵竹、什邡一带,

值普遍在 46%以上;盆东区域值多在 20%~48%,仅渠县地区发生频率相对较高。

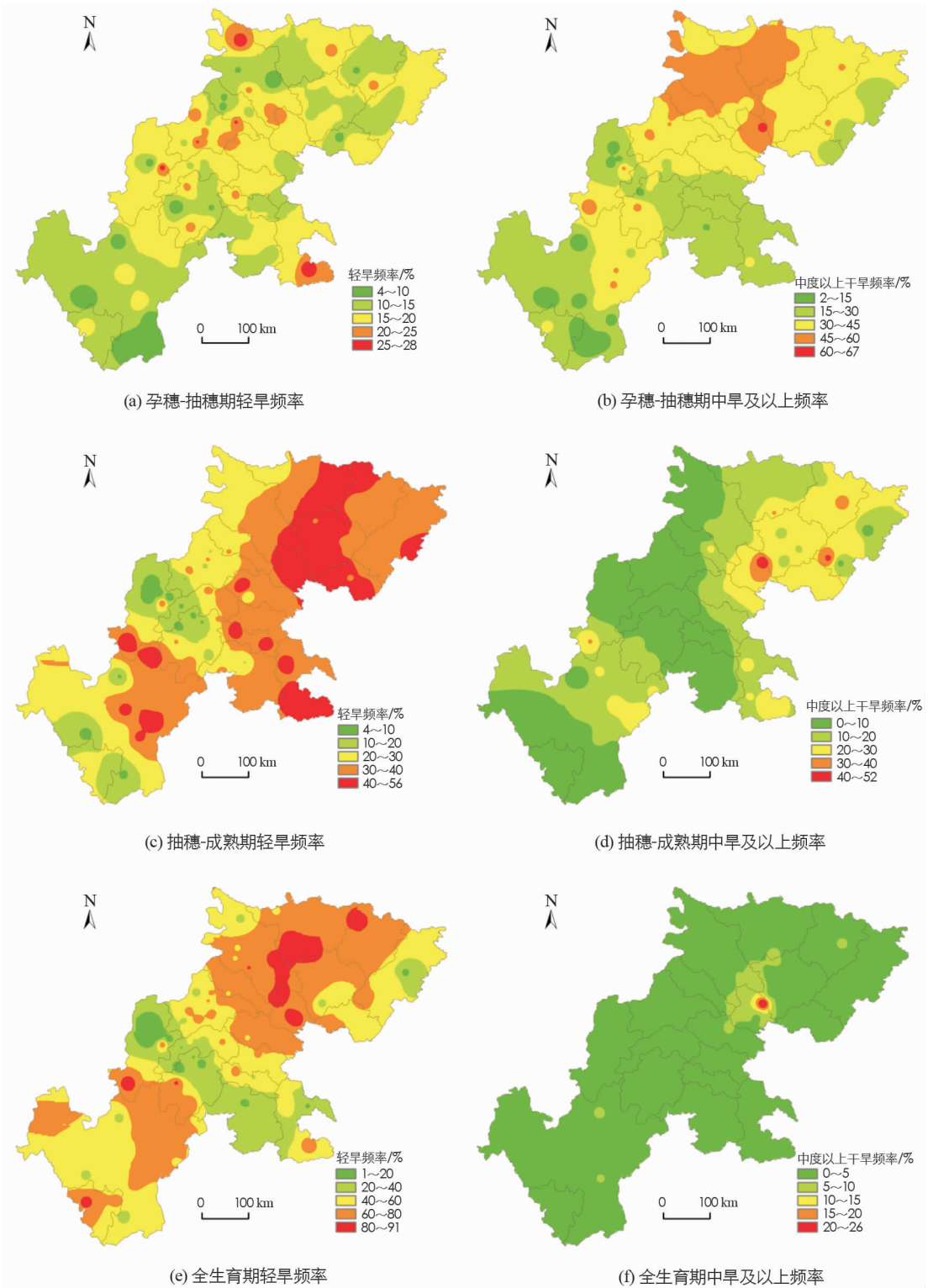


图 3 四川省水稻种植区不同生育阶段各旱级干旱频率空间分布

抽穗-成熟期发生轻旱频率的分布情况(图 3c):川西南宽谷大多在 7%~33%,最低出现在盐源县、会理县一带,值为 2%;川西南山地大多在 33%以上,其中石棉县、布拖县、甘洛县达到 50%以上,甘洛县最高达 56%。盆地区大体上呈现出由西南向东北方向递增的趋势,盆周部分、盆西大部在 4%~28%,以天全县、峨眉一带值最小;盆地其余大部发生轻旱的频率都在 30%以上,其中,盆中的大部、盆周部分地区、盆东部分以及盆南的局部地区可达 44%以上,最大值出现在旺苍县,为 54%。中等以上干旱分布特点(图

3d): 川西南宽谷大部分地区都不发生, 仅盐边县发生频率为 4%; 川西南山地大多在 13%~31%之间, 以金阳县和石棉县较高, 分别为 30%和 31%. 就整个盆地而言, 只有盆中、盆东大部以及盆周局部发生概率在 20%以上, 以遂宁、蓬溪县、渠县和通江县相对较高, 均在 30%以上, 其中蓬溪最高, 达 53%. 其余各地发生概率大部分不足 15%, 其中盆西大部和盆周靠南部分均不发生.

全生育期发生轻旱频率的分布情况(图 3e): 川西南宽谷大多地区在 31%~85%, 其中盐源县最低, 最高为盐边县, 值为 85%; 川西南山地大部分在 60%以上, 最高的石棉县更是高达 91%. 盆南大部分集中在 19%~69%之间, 最高值出现在叙永县; 盆周地区大部分在 0%~85%, 高值主要分布在靠北地区的南江县、剑阁县和旺苍县, 值普遍在 80%以上; 盆中各县大部分在 31%~91%之间, 其中巴中、苍溪县、遂宁达到了 80%以上, 以遂宁县最高, 为 91%. 盆西部分多在 19%~81%之间, 高发区主要在绵阳、三台县、德阳、中江县一带, 值普遍在 72%以上; 盆东区域值多在 15%~80%, 仅营山县、武胜县地区发生频率相对较高, 值分别达 76%和 80%. 中等以上干旱分布特点(图 3f): 研究区内, 仅蓬溪县发生频率相对较高为 26%, 其余各地发生频率较低, 多在 0~7%.

### 2.4 水稻干旱发生风险空间分布

按照表 5 划分风险度等级(数值包括后值), 绘制四川省水稻孕穗-抽穗期、抽穗-成熟期以及全生育期干旱风险分布图, 见图 4.

表 5 水稻干旱风险度分级

风险度	≤30	30~50	50~80	>80
等级	轻度	中度	重度	极重

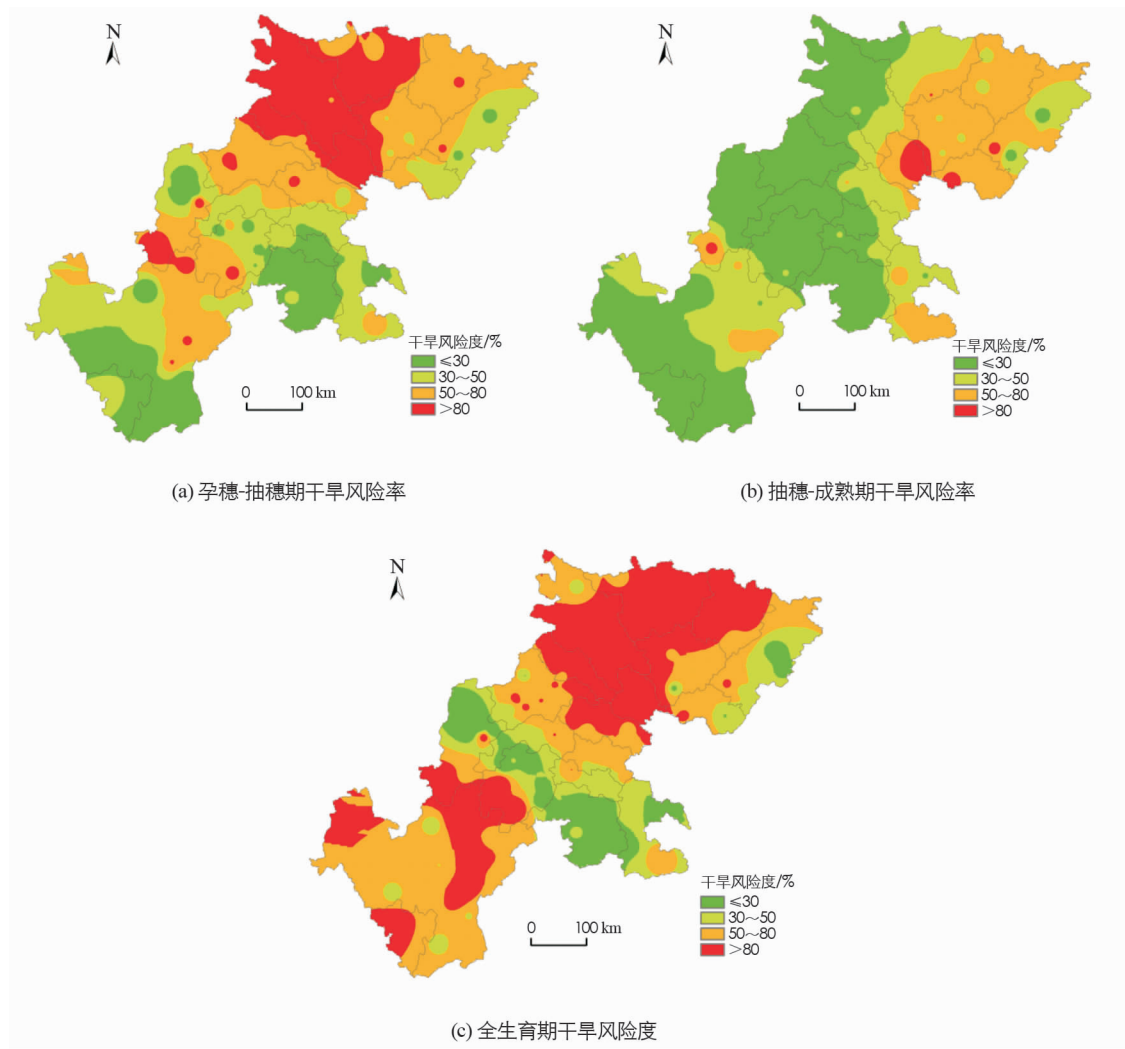


图 4 四川省水稻各种植区干旱风险度分布

从图 4 来看, 孕穗-抽穗期分布情况(图 4a): 发生极重度风险的区域主要集中在盆周大部、盆西部分、盆

中局部及川西南山地部分地区,主要包括遂宁、苍溪县、绵阳、平武县、剑阁、石棉等地。重度风险区域分布在盆中的大部、川西南山地大部、盆东局部和盆周一小部分;中度风险主要分布在盆东、盆南大部,川西南宽谷的部分地区;低风险区则比较分散,主要在川西南宽谷的大部、盆南部分地区以及盆周和盆东的局部。

抽穗—成熟期分布情况(图 4b):发生极重度风险的区域较小,集中在遂宁、蓬溪、渠县、武胜县和石棉 5 个地区。重度风险区域分布在盆中、盆东的大部、川西南山地局部以及盆南部分地区;中度风险主要分布在川西南山地大部、盆中部分地区和盆东局部地区;低风险区则主要在川西南宽谷的大部、盆西大部分地区以及盆周局部地区。

全生育期分布情况(图 4c):发生极重度风险的区域集中在盆中、盆西、川西南山地的大部及盆周部分地区。重度风险区域分布比较分散,主要在盆东部分、盆西局部、盆中部分区域以及川西南宽谷的大部地区;中度风险和低风险区主要分布在盆南大部、盆东局部、盆周的靠南部分和盆西的小部分区域。

### 3 讨论与结论

干旱指标的选取是衡量干旱的主要依据,作物水分盈亏指数是指某时段农业有效雨量与同一时段作物需水量之差与作物需水量的比值。考虑到四川种植区域跨度较大,生育期划分会出现较大差异,将研究区划分成 7 个种植区分别计算水分盈亏值,其结果更符合实际情况。水稻是水生植物,不同于旱地作物。有研究认为,西南地区水稻灌溉需水量中指出四川地区净灌溉需水量较少<sup>[19]</sup>,分析过程中虽未考虑人为灌溉的因素,但是结合灾害大典的记载和实际情况来看,水分盈亏指数能较好地反映出水稻生育阶段水分盈亏的动态变化,特别是非灌溉区有很大的参考价值。另外,种植区内站点数量的多少也影响了空间差值的精度,随着遥感技术的发展,如何结合其大范围监测的优势建立综合的干旱监测模型<sup>[20]</sup>,值得进一步深入探讨研究。

综合水稻发生干旱情况来看,在全生育期间发生干旱的概率和风险度虽然较高,但均以轻旱为主,究其原因水稻生育期主要集中在 3—9 月,该段时间正是四川省的汛期,降水量较多,时间跨度长,使得在某段时间发生的干旱会被掩盖掉或者程度降低,这也正是要单独分析关键生育期的重要原因。由于季节性分配不均出现的季节性干旱是四川干旱的特点,从分析结果来看,水稻在关键生育期出现中度以上干旱亦较多,只是不同的生育期发生干旱的等级和区域不同。

本文结合四川省 1961—2014 年 118 个气象站点逐日气象资料,基于水分盈亏指数,统计了四川省水稻不同生育阶段各区域的干旱逐年站均次数以及干旱频率、干旱风险度的分布特征。结果表明:1)从水稻发生干旱的逐年站均次数来看,全生育期以盆中、川西南山地、盆东地区相对较多,高值出现在 20 世纪 70 年代末 80 年代初、90 年代中期以及 2005 年站均次数也相对较高,自此后出现了明显的下降趋势。全生育期内中等以上干旱发生较少,以盆中最多也仅在 70 年代初和 2000 年初有发生,次数只有 0.1。在水稻的孕穗—抽穗和抽穗—成熟阶段发生干旱最多的分别是盆中、盆东地区;发生中等以上干旱趋势与前者大体一致。2)综合各生育期干旱频率分布特征,全生育期以轻旱为主,中旱仅在盆中局部发生频率较高。孕穗—抽穗阶段发生轻旱的频率整个种植区域都较低,中旱以上发生频率超过 50%的地区主要分布在盆中、盆西及盆周。抽穗—成熟阶段发生轻旱的频率较高,中等以上干旱频率发生则较低、区域也较小。从发生的区域和程度上来看,这与张建平等<sup>[10]</sup>在分析西南地区水稻灌浆至成熟阶段干旱频率空间分布情况较为一致。3)全生育期发生干旱风险分布来看,种植区内仅盆南、盆周部分以及盆东局部风险度较小,其余大部风险度普遍在重度及以上。孕穗—抽穗阶段发生极重度风险的区域主要集中在盆周大部、盆西部分、盆中局部。抽穗—成熟阶段发生重度及以上风险区域主要集中在盆东、盆中,盆南和川西南山地有零星分布。

#### 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] 董朝阳,刘志娟,杨晓光.北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J].农业工程学报,2015,31(11):157—164.
- [3] 徐羽,吴艳飞,徐刚,等.基于相对湿润指数的重庆市气象干旱时空分布特征[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(4):96—103.
- [4] 李金建,张菡,王锐婷,等.基于湿润指数的四川盆地农业干旱时空变化特征[J].西南大学学报(自然科学版),2014,36(1):129—136.
- [5] 何永坤,唐余学,范莉,等.近 50 年西南地区玉米干旱变化规律研究[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(1):34—42.



- [6] 贾建英, 贺楠, 韩兰英, 等. 基于自然灾害风险理论和 ArcGIS 的西南地区玉米干旱风险分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 152-159.
- [7] 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿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.
- [8] 张玉芳, 王明田, 刘娟, 等. 基于水分盈亏指数的四川省玉米生育期干旱时空变化特征分析 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 236-242.
- [9] 张玉芳, 王锐婷, 陈东东, 等. 利用水分盈亏指数评估四川盆地玉米生育期干旱状况 [J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 615-620.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 甘书龙, 付绥宁, 唐洪潜, 等. 四川省农业资源与区划 [M]. 成都: 四川省社会科学院出版社, 1986.
- [13] 苏永秀, 李政, 吕厚荃. 水分盈亏指数及其在农业干旱监测中的应用 [J]. 气象科技, 2008, 36(5): 592-595.
- [14] KARL T R. Some Spatial Characteristics of Drought Duration in the United States [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(8): 1356-1366.
- [15] 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.
- [16] 黄会平. 1994—2005 年全国干旱灾害若干统计特征 [J]. 气象科技, 2008, 36(5): 551-555.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 符娜, 刘小刚, 张岩, 等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1895-1901.
- [20] 杜灵通, 候静, 胡悦, 等. 基于遥感温度植被干旱指数的宁夏 2000—2010 年旱情变化特征 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 209-216.

## Assessment of Different Grade Drought on Critical Growing Period of Rice in Sichuan Province

CHEN Dong-dong<sup>1,2</sup>, LI Xiao-wei<sup>3</sup>, ZHANG Yu-fang<sup>2</sup>, CHEN Chao<sup>4</sup>

1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

2. Sichuan Provincial Agricultural Meteorological Centre, Chengdu 610072, China;

3. Chongqing University of Education, Chongqing 400065, China;

4. Sichuan Provincial Climate Centre, Chengdu 610072, China

**Abstract:** Rice plays an important role in the food production of Sichuan Province, where drought has been the primary limited factor—summer drought occurs frequently and reduces rice yield. In this study, water deficit index has been used as a measure of drought and the spatiotemporal variation and the risk distribution of drought been analyzed in different rice growth stages from 1961 to 2014 in the seven rice planting area of Sichuan Province. The results show that the trend of drought is similar in different growth stages, especially in the middle, east and southwest mountainous area of Sichuan, where drought occurred very often. The relatively high value of water deficit index occurred in the late 1970s, late 1990s and around 2005, and then it shows a significant decreasing trend afterwards. In terms of the characteristics of drought distribution, it was found that light drought dominated the whole development stage and occurred most frequently in the middle of Sichuan. For booting and heading stages, it had lower occurrence of light drought, and the middle level drought with  $>50\%$  frequency occurred in the middle, west and the surrounding area of Sichuan. As for the heading to mature stage, light drought dominated this period and it was mainly distributed in the middle, east and southwest mountainous area of Sichuan (with  $>50\%$  light drought frequency), whereas middle level or more severe drought rarely happened during this stage. When it came to drought risk, severe and above drought risk area was roughly the same for the whole stage and the booting-heading stage, and they were concentrated in the west, large middle, north, and southwest mountainous area of Sichuan. For the heading-mature stage, severe and above drought risk occurred in east, middle, south, and southwest mountainous region of Sichuan.

**Key words:** drought; rice; water deficit index; distribution characteristics; drought risk degree

责任编辑 周仁惠