

西南地区水稻灌溉需水量变化规律*

符娜 刘小刚** 张岩 杨启良

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要 研究作物需水变化规律是制订灌溉计划和水资源规划的重要依据。本文基于西南地区 38 个气象站点 1951—2012 年逐日气象观测资料, 根据 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算水稻需水量, 并分析了参考作物蒸散量分布及变化趋势、水稻生育期各阶段需水量变异性及灌溉需求指数分布。结果表明: 近 62 年来西南地区参考作物蒸散量随时间变化不明显且随纬度增加而减少, 各站点多年平均水稻生育期内参考作物蒸散量占到全年参考作物蒸散量的 47.6%; 对水稻生育期需水量分析发现, 分蘖和抽穗阶段为水稻生长需水关键期, 各阶段需水变化均为中等变异; 西南地区水稻多年平均需水量、灌溉需水量和灌溉需求指数分别为 304.5 mm、76.9 mm 和 0.24, 需求指数分布自西向东呈逐渐增大, 但均低于 0.5, 整体对灌溉依赖程度较低。

关键词 参考作物蒸散量; 生育期需水量; 净灌溉需水量; 灌溉需求指数; 西南地区; 水稻
中图分类号 S275.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)7-1895-07

Variation pattern of rice irrigation water requirement in Southwest of China. FU Na, LIU Xiao-gang**, ZHANG Yan, YANG Qi-liang (*Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1895-1901.

Abstract: Crop water requirement is an important basis for irrigation scheduling and water resources planning. Based on the daily meteorological data from 38 stations in Southwest of China during 1951-2012, the rice water requirement was estimated by using FAO Penman-Monteith equation, and the change of reference crop evapotranspiration trend was analyzed for rice. Meanwhile, the variation of rice water requirement in the growth period and the spatial distribution characteristics of reference crop evapotranspiration and irrigation requirement index for rice in Southwest of China were analyzed. The results showed that in recent 62 years, the reference crop evapotranspiration in the southwest area changed insignificantly over time and decreased with increasing the latitude, which in the growth period accounted for 47.6% of the yearly average value. The water requirements in different growth stages showed a moderate variability, and the tillering and heading stages were the critical period. In Southwest of China, the averages of rice water requirement and irrigation water requirement were 304.5 mm and 76.9 mm per year, respectively. The rice irrigation requirement index was averaged as 0.24, and increased from the west to the east but was generally less than 0.5. As a result, the degree of dependence of rice on irrigation water requirement was low in the study area.

Key words: reference crop evapotranspiration; water requirement in growth period; irrigation water requirement; irrigation requirement index; Southwest of China; rice.

中国西南地区光热条件优越, 自然资源丰富, 优势农作物种类颇多。由于该区降水时空分布不均匀, 季节性干旱缺水问题突出, 水利基础设施建设发

展滞后, 灌溉技术相对落后, 水资源利用率低, 限制了农业的优质高效生产。水稻是中国耗水量最多的粮食作物之一, 全国平均年耗水量达 $2550.1 \times 10^7 \text{ m}^3$, 占到粮食作物总耗水量的 51.06%, 其中每生产 1000 kg 水稻, 平均年耗水量为 1177 m^3 (马振锋等, 2006; 李宝贵和彭世祺, 2009; 王卫光等, 2013)。作为西南地区的主要粮食作物, 水稻到 2010 年的播种

* 国家自然科学基金项目(51109102, 51379004)、云南省应用基础研究项目(2010ZC043, 2013FB024, KKS201223076)和云南省教育厅重点项目(2011Z035)资助。

** 通讯作者 E-mail: liuxiaogang888@tom.com

收稿日期: 2013-12-29 接受日期: 2014-04-08

面积比例达 27.3% (陈晓华等, 2011), 研究西南地区水稻灌溉需水的时空变化特征, 为水资源管理和农业相关部门提供参考依据。

作物灌溉需水量是灌溉决策和水资源规划的重要基础 (Dalezios *et al.*, 2002; 方文松等, 2009; 杨琪等, 2013), 国内部分学者对水稻需水量进行了深入的研究。李勇等 (2011) 分别计算了长江中下游地区内单季稻和双季稻需水量, 探讨了不同地区单季稻和双季稻的水分利用效率, 分析得出长江中下游地区总体更适宜种植双季稻。王卫光等 (2012) 基于联合国粮食及农业组织推荐的作物系数法, 并考虑有效性降雨和不同地区深层渗漏量, 分析历史和未来的水稻灌溉需水时空变化特征。罗玉峰等 (2009) 通过计算江苏省高邮灌区多年水稻灌溉需水量, 并结合 Mann-Kendall 检验, 分析了气候变化对高邮灌区水稻灌溉需水量的影响。国内外学者对其他作物需水量的研究也取得一定成果 (Ashraf *et al.*, 1997; 王宏等, 2012; Tabar *et al.*, 2012)。本研究利用西南地区 38 个气象站点 1951—2012 年逐日的气象资料, 研究了西南地区水稻灌溉需水量及灌溉需求指数变化规律, 旨在为该地区水稻科学灌溉提供理论和实践参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所采用气象资料来自中国气象科学数据共享服务网, 选取西南地区 (云南、贵州、四川、重庆) 38 个有代表性的地面气象站点 (图 1)。收集 38 个站点 1951—2012 年逐日的气象资料, 包括日降水量、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日平均水汽压、日平均相对湿度、日照时数和日平均风速等。

1.2 需水量

作物需水量是为满足作物健壮生长并发挥全部生产潜力而蒸发蒸腾的水分总量 (刘宏谊等, 2005), 不仅包括作物本身生长对水分的需求量, 还包括农田水热状况对水分的需求量 (山仑等, 2009)。作物需水量可由实测土壤水通过水量平衡法计算得到, 也可由综合性的气候学方法计算得到。本研究采用作物系数计算水稻日需水量 (刘晓英等, 2005), 计算公式如下

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

式中, ET_c 为作物日需水量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; ET_0 为参考作物日蒸散量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; K_c 为作物系数。其中, 参考

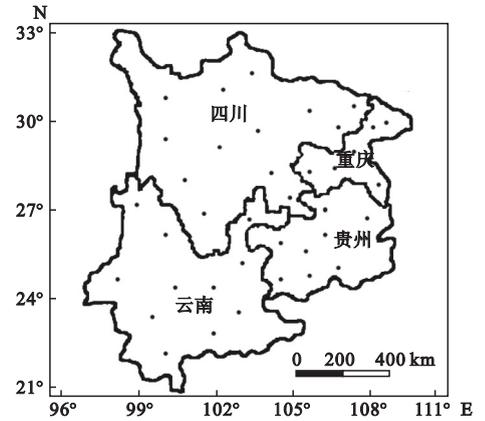


图 1 研究区域气象站点分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in study area

作物日蒸散量 ET_0 的计算采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算 (Allen *et al.*, 1998; Nkomozepi & Chung, 2012; 张勃和张调风, 2013), 以能量平衡和水汽扩散论为基础 (孙宏勇等, 2007; 王琼等, 2013), 同时考虑作物的生理特征和空气动力学参数的变化, 具有较充分的理论依据和较高的计算精度 (阮本清等, 2007)。计算公式如下

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中, Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线在 T 处的切线斜率, $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$; R_n 为冠层表面净辐射, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; G 为土壤热通量, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; γ 为干湿比常数, $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$; T 为平均温度, C ; U_2 为 2 m 高处的平均风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; e_a 为实际水汽压, kPa ; e_d 为饱和水汽压, kPa 。其中 Δ 、 R_n 、 G 、 U_2 可以通过气象台站观测资料计算获得。作物系数 K_c 参考中国的相关研究成果 (陈玉民等, 1995), 并结合西南地区水稻生育期为 5 月下旬至 9 月上旬的具体情况, 确定研究区水稻生育期内 5 至 9 月作物系数多年平均值分别为 1.066、1.216、1.298、1.344 和 1.213。本研究结合式 (1) 和式 (2), 根据逐日气象资料计算西南地区水稻各生育期逐日需水量, 并统计全生育期需水量。

1.3 净灌溉需水量与需求指数

净灌溉需水量是农业灌溉用水量的参考依据 (马黎华等, 2012), 某种作物的净灌溉需水量等于生育期内作物需水量与有效降水量之差。灌溉需求指数为净灌溉需水量与需水量的比值, 反映作物生长对灌溉的依赖程度 (刘玉春等, 2013)。公式如下

$$IR = ET_c - P_e \quad (3)$$

$$IDI = IR / ET_c \quad (4)$$

式中, IR 为作物日净灌溉需水量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; P_e 为日有效降水量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; IDI 为作物灌溉需求指数。

有效降水量是指用于满足作物蒸发蒸腾需要的那部分降水量(刘战东等, 2007)。有效降水量是制定作物灌溉制度、灌溉排水规划、灌溉用水管理等的重要依据。影响有效降水量的因素多而复杂, 本研究采用应用最广的美国农业部土壤保持局推荐方法计算有效降水量(Smith, 1992; Doll & Siebert, 2002)。公式如下

$$P_e = \begin{cases} (4.17 - 0.2P) / 4.17 & P < 8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \\ 4.17 + 0.1P & P \geq 8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中, P 为日降水量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

1.4 变异系数

标准差与平均值的比值称为变异系数, 是衡量研究区域不同站点某要素离差程度的一个统计量。 n 个站点某要素的变异系数 C_v (马开玉等, 1993) 的计算公式如下

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2} \quad (6)$$

$$C_v = \frac{S}{x'} \quad (7)$$

式中, S 为均方差, x_i 为 i 站的某要素值, x' 为该要素的区域平均值。变异系数越大, 说明地区间该要素的差异越大, 越不稳定; 变异系数越小, 说明研究区域该要素的地区间差异越小, 越稳定(李勇等, 2011)。本文主要利用变异系数分析西南地区水稻生育期各阶段及全生育期需水量的地区间差异, 得出研究区域水稻生育期需水量变化特征。

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸散量

计算西南地区 38 个站点近 62 年的全年参考作

物蒸散量及水稻生育期参考作物蒸散量, 统计多年平均结果(表 1), 从而得到各站点全年参考作物蒸散量和水稻生育期参考作物蒸散量具体分布情况(图 2)。研究表明: 西南地区多年(1951—2012 年)平均年参考作物蒸散量为 771.9 mm, 平均日蒸散量为 $2.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; 多年平均水稻生育期内参考作物蒸散量为 367.2 mm, 占多年平均年参考作物蒸散量的 47.6%, 平均日蒸散量为 $2.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从总体分布情况来看, 全年参考作物蒸散量及水稻生育期参考作物蒸散量均呈自南向北递减趋势, 即参考作物蒸散量随纬度的增加而减少。具体云南南部参考作物蒸散量最大, 全年参考作物蒸散量为 1150 mm 以上, 水稻生育期参考作物蒸散量为 450 mm 以上, 占到全年参考作物蒸散量的 40.3%; 另外云南西北部、贵州东部及四川盆地全年参考作物蒸散量最小, 为 550 ~ 700 mm, 其中四川北部水稻生育期参考作物蒸散量最小, 为 250 ~ 300 mm, 占到全年参考作物蒸散量的 47.2%。

根据各省市每年参考作物蒸散量均值变化进行分析, 从总体来看, 研究区域水稻生育期内参考作物蒸散量差异较小, 在 300 ~ 450 mm; 但全年参考作物蒸散量差异较大, 在 550 ~ 1150 mm。其中云南地处高原区域, 太阳辐射量与风速较大, 导致全年参考作物蒸散量较大, 为 850 ~ 1150 mm。云南地区全年参考作物蒸散量年际变化最大, 最大值和最小值相差 223.3 mm。贵州、四川、重庆地区气候湿润, 全年降水量丰富, 故全年参考作物蒸散量较小, 为 550 ~ 850 mm。四川地区全年参考作物蒸散量年际变化最小, 最大值和最小值相差 124.8 mm。另外, 西南地区参考作物蒸散量随时间变化不明显。其中仅云南地区参考作物蒸散量为增加趋势, 全年参考作物蒸散量平均每 10 年增加 7.0 mm, 水稻生育期内参考作物蒸散量平均每 10 年增加 1.5 mm; 贵州、四川、重庆地区参考作物蒸散量略呈减少趋势, 减速最

表 1 西南地区参考作物蒸散量多年平均

Table 1 Average annual reference crop evapotranspiration in Southwest of China

省份	全年参考作物蒸散量			水稻生育期参考作物蒸散量		
	mm	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	变化趋势回归方程	mm	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	变化趋势回归方程
云南	977.2	2.7	$y = 0.7015x + 954.39$	389.2	2.5	$y = 0.1472x + 384.39$
贵州	717.4	2.0	$y = -0.4306x + 730.98$	369.7	2.4	$y = -0.2102x + 376.35$
四川	730.1	2.0	$y = -0.1234x + 734.12$	346.1	2.3	$y = -0.0656x + 348.24$
重庆	662.9	1.8	$y = -0.6422x + 683.75$	363.7	2.4	$y = -0.329x + 374.42$
平均值	771.9	2.1	$y = -0.1237x + 775.79$	367.2	2.4	$y = -0.1144x + 370.79$

回归方程中的 x 表示时间序列, 从 1 开始, 代表 1951; y 表示随时间序列变化的参考作物蒸散量。

快的为重庆地区,全年参考作物蒸散量平均每10年减少6.4 mm,水稻生育期内参考作物蒸散量平均每10年减少3.3 mm。

2.2 水稻需水量

水稻生育期划分为返青、分蘖、拔节、抽穗、乳熟和黄熟六个阶段。按水稻生育期分别计算西南地区38个站点水稻各生育阶段需水量,并对不同阶段需水量情况进行统计分析(表2)。西南地区多年平均水稻全生育期需水量为304.5 mm,平均日需水量为

$3.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,变异系数为10.2%,除贵州地区水稻全生育期需水量变异系数为3.9%外,其他研究区变异系数均在10%~15%,云南地区的变异系数最高,为12.1%。按照变异系数的划分等级看,云南、四川、重庆地区都属于中等变异强度。分析水稻生育期各阶段需水情况,得出各阶段平均总需水量大小依次为分蘖>拔节>抽穗>乳熟>黄熟>返青,各阶段平均日需水量大小依次为抽穗>乳熟>拔节>黄熟>分蘖>返青。各阶段变异系数均在10%~20%,为

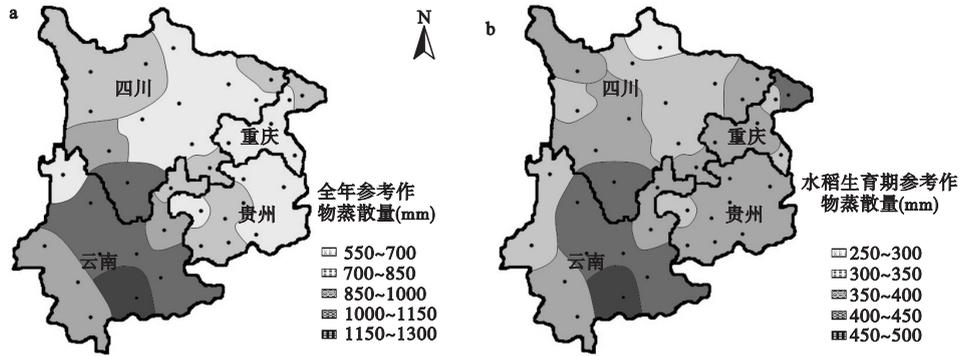


图2 西南地区参考作物蒸散量空间分布示意图

Fig. 2 Spatial distribution of reference crop evapotranspiration in Southwest of China

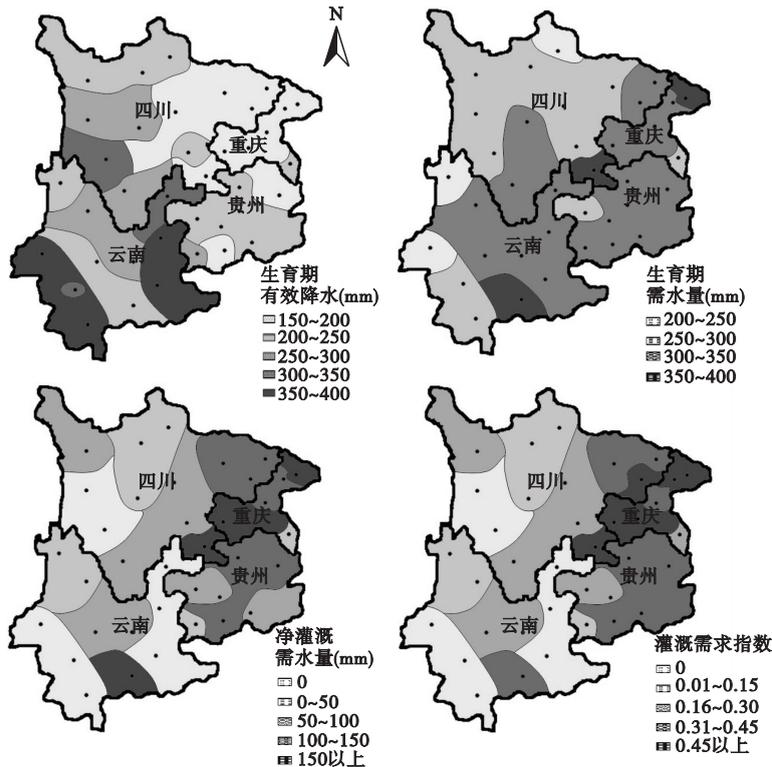


图3 西南地区水稻生育期有效降水、生育期需水量、净灌溉需水量和灌溉需求指数空间分布示意图

Fig. 3 Spatial distribution of effective rainfall and water requirement of rice in growth period, irrigation water requirement and irrigation requirement index in Southwest of China

表2 西南地区水稻各生育阶段需水量

Table 2 Average annual water requirement in growth period of rice in Southwest of China

省份	生育阶段	需水量(mm)				日需水量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)				变异系数(%)
		最大值	最小值	标准差	平均值	最大值	最小值	标准差	平均值	
云南	返青期	36.3	23.7	4.1	29.3	4	2.6	0.5	3.3	13.8
	分蘖期	137.4	82.4	15.5	107	3.9	2.4	0.4	3.1	14.5
	拔节期	65.2	39.3	7.3	51.2	3.8	2.3	0.4	3	14.3
	抽穗期	48.5	31.5	4.6	39.9	3.7	2.4	0.4	3.1	11.6
	乳熟期	47.4	32.6	3.9	40.3	3.6	2.5	0.3	3.1	9.6
	黄熟期	44.7	29.5	3.8	36.9	3.7	2.5	0.3	3.1	10.2
	全生育期	379.5	246.5	36.8	304.7	3.8	2.5	0.4	3.1	12.1
贵州	返青期	24.7	20.6	22.6	1.6	2.7	2.3	2.5	0.2	7.0
	分蘖期	106.9	92.3	99.1	5.5	3.1	2.6	2.8	0.2	5.6
	拔节期	64.4	57.3	59.4	2.4	3.8	3.4	3.5	0.1	4.0
	抽穗期	49.9	44.7	46.6	1.9	3.8	3.4	3.6	0.1	4.0
	乳熟期	48.8	43.1	45.3	1.8	3.8	3.3	3.5	0.1	4.0
	黄熟期	43.9	37.7	40.5	1.8	3.7	3.1	3.4	0.1	4.4
	全生育期	338.1	295.8	313.5	12.2	3.4	3	3.2	0.1	3.9
四川	返青期	30.5	19.4	3.1	24.3	3.4	2.2	0.3	2.7	12.9
	分蘖期	106.9	78.7	8.6	94.7	3.1	2.2	0.2	2.7	9.1
	拔节期	69.3	44	6.9	52.1	4.1	2.6	0.4	3.1	13.3
	抽穗期	57.5	35	6.5	43.1	4.4	2.7	0.5	3.3	15.1
	乳熟期	53.7	34.6	5.8	42.2	4.1	2.7	0.4	3.2	13.7
	黄熟期	46.2	29.7	4.9	35.5	3.8	2.5	0.4	3	13.8
	全生育期	351.7	241.7	31	291.8	3.6	2.4	0.3	2.9	10.6
重庆	返青期	26.6	19.6	2.7	22.1	3	2.2	0.3	2.5	12.2
	分蘖期	111.4	82.5	9.8	94.3	3.2	2.4	0.3	2.7	10.4
	拔节期	66.1	50.7	6	59.1	3.9	3	0.4	3.5	10.1
	抽穗期	59.1	43.2	5.5	52.1	4.5	3.3	0.4	4	10.5
	乳熟期	57.8	40	6.4	48.6	4.4	3.1	0.5	3.7	13.2
	黄熟期	51.3	35.5	5.2	43.4	4.3	3	0.4	3.6	12.1
	全生育期	372.4	271.5	33.7	319.4	3.8	2.7	0.3	3.2	10.6
区域统计	返青期	36.3	19.4	25	4.2	4	2.2	2.8	0.5	16.7
	分蘖期	137.4	78.7	99.1	11.7	3.9	2.2	2.8	0.3	11.8
	拔节期	69.3	39.3	54.5	7.1	4.1	2.3	3.2	0.4	13.0
	抽穗期	59.1	31.5	44.3	6.4	4.5	2.4	3.4	0.5	14.5
	乳熟期	57.8	32.6	43.3	5.4	4.4	2.5	3.3	0.4	12.5
	黄熟期	51.3	29.5	38.2	5	4.3	2.5	3.2	0.4	13.0
	全生育期	379.5	241.7	304.5	31.1	3.8	2.4	3.1	0.3	10.2

中等变异强度,返青期变异系数最大,为16.7%,变异系数最小阶段为分蘖阶段,为11.8%。其中分蘖阶段平均需水量为99.1 mm,为全生育期需水量的32.5%,为生育期需水量最大阶段;另外抽穗阶段平均日需水量最大,为 $3.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,该阶段平均总需水量为44.4 mm,为全生育期需水量的14.6%,因此分蘖和抽穗阶段为水稻生长需水关键期。

分析研究区各站点水稻生育期需水量特征,由于研究区地处海洋性与大陆性气候交接地带的亚热带季风区,受大气环流季节转换支配,以及季风气候的长周期变化和自然条件差异造成的降水量时空分布不均,从而不同阶段需水量变化有所区别。其中,

云南地区水稻返青期日需水量最大,为 $3.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,该阶段总需水量为29.3 mm;贵州、四川、重庆地区水稻生育期日需水量最大值均出现在抽穗阶段,分别为 3.6 、 3.3 和 $4.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,该阶段总需水量为46.6、43.1和52.1 mm。另外,各地区水稻生育期各阶段需水量变异性不同,其中云南地区水稻乳熟期、四川地区水稻分蘖期及贵州地区水稻生育期各阶段变异系数低于10%,为弱变异性;云南、四川地区其他水稻生育阶段及重庆地区水稻生育期各阶段变异系数在10%~20%,为中等变异强度。

2.3 水稻净灌溉需水量和灌溉需求指数

灌溉需求指数(IR/ET_c)指净灌溉需水量占作

物需水量的比例,反映不同地区作物生长对灌溉的依赖程度。西南地区水稻生育期有效降水多年均值为237.6 mm,水稻生育期需水量多年均值为304.5 mm,多年平均灌溉需水量为76.9 mm,因此多年平均灌溉需求指数为0.24。其中云南地区平均灌溉需求指数仅为0.10,对灌溉依赖程度最低;四川地区多年平均水稻生育期需水量最小,为291.8 mm,且有效降水较多,为223.3 mm,故四川地区净灌溉需水量较少,为70.2 mm,灌溉需求指数也比较低,为0.23。此外,贵州和重庆地区多年平均水稻生育期需水量相近,分别为313.5和319.4 mm,但由于重庆地区水稻生育期有效降水量较少,为176.5 mm,而贵州地区水稻生育期有效降水量为215.2 mm,故贵州和重庆地区净灌溉需水量差异较大,分别为98.3和142.9 mm,贵州和重庆地区灌溉需求指数为0.31和0.44。

从具体分布情况来看(图3),云南东部及干热河谷地区水稻生育期有效降水量最多,在350~400 mm,贵州北部及四川盆地水稻生育期有效降水量最少,在150~200 mm;四川东南部及重庆北部水稻生育期需水量最多,均在350~400 mm,云南西北部及四川北部水稻生育期需水量最小,均在200~250 mm;云南南部、四川东南部及重庆大部净灌溉需水量最多,在150 mm以上,云南东部和干热河谷地区及四川西部净灌溉需水量为0,对灌溉依赖程度很低;西南地区水稻灌溉需求指数分布自西向东呈逐渐增大的趋势,总体来看,西南地区水稻灌溉需求指数均低于0.5,整体对灌溉依赖程度较低。

3 讨论

据相关研究,全球年平均地表温度持续上升(刘晓英和林而达,2004),近年来西南地区气温也呈显著上升趋势(马振峰等,2006),但西南地区近62年参考作物蒸散量呈微弱下降趋势,随时间变化并不明显,这与陈超等(2011)对四川地区参考作物蒸散量变化特征的研究结果相同,参考作物蒸散量并没有随气温增高而增大的规律变化,表明气温变化可能不是影响参考作物蒸散量变化的主导因子。为进一步了解水稻生育期需水规律,本文还研究了水稻生育期的参考作物蒸散量,变化趋势与全年参考作物蒸散量相一致。

具体来看,水稻生育期中分蘖和抽穗阶段为水稻生长需水关键期,其中分蘖阶段平均需水量最大,

占到全生育期需水量的32.5%;抽穗阶段平均日需水量最大,为 $3.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,该阶段占全生育期需水量的14.6%。利用变异系数法分析水稻生育期需水量,发现除贵州地区水稻全生育期需水量变异系数为3.9%外,其他研究区变异系数均在10%~15%,即云南、四川、重庆地区均为中等变异强度。

此外,参考作物蒸散量及水稻灌溉需求指数的空间分布与环境密切相关(李春强等,2009),西南地区参考作物蒸散量呈自南向北递减趋势,即参考作物蒸散量随纬度的增加而减少;水稻灌溉需求指数自西向东呈递增趋势。研究得出西南地区水稻灌溉需求指数均低于0.5,符合刘钰等(2009)对中国主要作物灌溉需水量研究中云贵区主要作物平均灌溉需求指数 <0.5 的结论,从而确定西南地区水稻生长对灌溉的依赖程度较低。

对西南地区水稻灌溉需水量变化规律的研究有助于指导该区科学灌溉,但西南地区地势复杂,水稻种植区域地貌类型颇多,降水量及光热资源空间变异性也较大,本文仅根据西南地区38个气象站点62年的气象数据分析该区参考作物蒸散量及水稻生育期需水量的时空变化特征,因此时间尺度和空间分辨率略差。此外,除了气象要素会直接影响参考作物蒸散量外,包括气溶胶浓度、下垫面、云量、气温日较差等因素也会间接影响参考作物蒸散量(王媛媛等,2013),这些仍停留在定性统计关系上的影响因素尚待深入研究。本文仅从气候变化角度对西南地区参考作物蒸散量和水稻生育期需水量变化规律及分布特征进行研究,若将西南地区地形地貌与气象因子结合,可以更加准确地分析参考作物蒸散量及水稻生育期需水量的变化规律和分布特征。因此,在今后的研究中,需考虑地形地势、土壤状况及灌溉条件等多种因子对参考作物蒸散量和作物需水量影响。

参考文献

- 陈超,庞艳梅,潘学标,等. 2011. 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. 中国农业气象, 32(1): 35-40.
- 陈晓华,张玉香,张合成,等. 2011. 中国农业统计资料 2010. 北京:中国农业出版社.
- 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 1995. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京:中国水利电力出版社.
- 方文松,刘荣花,朱自玺,等. 2009. 黄淮平原冬小麦灌溉需水量的影响因素与不同年型特征. 生态学杂志, 28(11): 2177-2182.

- 李勇, 杨晓光, 叶清, 等. 2011. 1961—2007年长江中下游地区水稻需水量的变化特征. 农业工程学报, **27**(9): 175-183.
- 李宝贵, 彭世祺. 2009. 1998—2007年中国农业用水报告. 北京: 中国农业出版社.
- 李春强, 李保国, 洪克勤. 2009. 河北省近35年农作物需水量变化趋势分析. 中国生态农业学报, **17**(2): 359-363.
- 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 2009. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征. 农业工程学报, **25**(12): 6-12.
- 刘宏谊, 马鹏里, 杨兴国, 等. 2005. 甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析. 干旱地区农业研究, **23**(1): 39-44.
- 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 2005. 华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因. 农业工程学报, **21**(10): 155-159.
- 刘晓英, 林而达. 2004. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响. 水利学报, **35**(2): 77-87.
- 刘玉春, 姜红安, 李存东, 等. 2013. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析. 农业工程学报, **29**(19): 98-104.
- 刘战东, 段爱旺, 肖俊夫, 等. 2007. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展. 灌溉排水学报, **26**(3): 27-34.
- 罗玉峰, 彭世彰, 王卫光, 等. 2009. 气候变化对水稻灌溉需水量的影响——以高邮灌区为例. 武汉大学学报: 工学版, **42**(5): 609-613.
- 马开玉, 丁裕国, 屠其璞, 等. 1993. 气候统计原理与方法. 北京: 气象出版社.
- 马黎华, 康绍忠, 粟晓玲, 等. 2012. 农作区净灌溉需水量模拟及不确定性分析. 农业工程学报, **28**(8): 11-18.
- 马振锋, 彭骏, 高文良, 等. 2006. 近40年西南地区的气候变化事实. 高原气象, **25**(4): 633-642.
- 阮本清, 韩宇平, 蒋仁飞. 2007. 灌区生态用水研究. 北京: 中国水利水电出版社.
- 山仑, 黄占斌, 张岁岐. 2009. 节水农业(修订版). 北京: 清华大学出版社.
- 孙宏勇, 刘昌明, 王振华, 等. 2007. 太行山前平原近40年降水的变化趋势及其对作物生产的影响. 中国生态农业学报, **15**(6): 18-21.
- 王宏, 谭国明, 孙庆川, 等. 2012. 承德春玉米需水量变化及其与气象因子的关系. 气象与环境学报, **28**(4): 69-72.
- 王琼, 张明军, 潘淑坤, 等. 2013. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征. 生态学杂志, **32**(5): 1292-1302.
- 王卫光, 彭世彰, 孙凤朝, 等. 2012. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征. 水科学进展, **23**(5): 656-664.
- 王卫光, 孙凤朝, 彭世彰, 等. 2013. 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟. 农业工程学报, **29**(14): 90-98.
- 王媛媛, 张勃, 尹海霞. 2013. 1961—2010年陇东参考作物蒸散量时空变化及气候影响因子. 生态学杂志, **32**(6): 1511-1517.
- 杨琪, 张勃, 尹海霞, 等. 2013. 甘肃河东地区近50年小麦需水量变化趋势及影响因子. 生态学杂志, **32**(11): 3074-3081.
- 张勃, 张调风. 2013. 1961—2010年黄土高原地区参考作物蒸散量对气候变化的响应及未来趋势预估. 生态学杂志, **32**(3): 733-740.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO.
- Ashraf M, Loftis JC, Hubbard KG. 1997. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. *Agricultural and Forest Meteorology*, **84**: 255-271.
- Dalezios NR, Loukas A, Bampzelis D. 2002. Spatial variability of reference evapotranspiration in Greece. *Physics and Chemistry of the Earth*, **27**: 1031-1038.
- Doll P, Siebert S. 2002. Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, **38**: 1-10.
- Nkomozepi T, Chung SO. 2012. Assessing the trends and uncertainty of maize net irrigation water requirement estimated from climate change projections for Zimbabwe. *Agricultural Water Management*, **111**: 60-67.
- Smith M. 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Rome: Food and Agriculture Organization.
- Tabari H, Kisi O, Ezani A, et al. 2012. SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment. *Journal of Hydrology*, **444**: 78-89.

作者简介 符娜,女,1990年生,硕士研究生,主要从事计算机农业应用技术研究。E-mail: fnsnow@163.com
责任编辑 李凤芹
