

贵州水稻有效降水量和需水量特征分析

张波^{1,2}, 谷晓平^{1,*}, 古书鸿¹, 胡家敏¹¹

摘要: 为了分析贵州水稻生育期内有效降水量和需水量等水资源的变化特征, 研究基于贵州 80 个气象站点 1961—2015 年的逐日气象资料, 采用美国农业部 (USDA) 土壤保持局推荐的有效降水量和联合国粮食及农业组织 (FAO) 推荐的参考作物蒸散量计算方法, 计算贵州水稻不同生育期内的有效降水量和需水量, 并分析水稻不同生育阶段缺水量和灌溉需求指数的变化特征。结果表明: 1961—2015 年, 贵州水稻全生育期有效降水量为 324 mm, 呈递减趋势, 其中, 移栽—抽穗期是有效降水量最大的阶段, 呈递增趋势, 其他生育期有效降水量均为递减趋势; 水稻全生育期需水量为 737 mm, 呈递减趋势, 其中, 移栽—抽穗期、抽穗—灌浆期需水量呈递减趋势, 其他生育期需水量呈递增趋势; 水稻全生育期多年平均缺水量为 413 mm, 呈递增趋势, 其中, 移栽—抽穗期缺水量呈递减趋势, 其他生育期呈递增趋势。全生育期作物水分盈亏指数为 0.56, 其中, 抽穗—灌浆期对灌溉依赖程度最高。

关键词: 水稻; 有效降水; 需水量; 水分盈亏指数; 贵州

中图分类号: S161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-1524(2019)02-0191-09

水资源是限制农业发展的重要因素之一, 是农业生产最重要的资源支撑和保证。研究表明, 气候变化背景下, 水稻、玉米和小麦等作物的需水量和水分盈亏量都发生了显著变化, 且区域性差异显著。水稻是贵州省主要的粮食作物, 其生长季内水资源的变化势必影响水稻生育期长度与产量, 因此研究贵州地区水稻有效降水量和灌溉需水量等水资源指标的变化特征具有现实意义^[1, 2, 3]。

目前, 关于有效降水量和需水量的研究已有不少报道: 曹永强等^[3]针对河北省典型区主要作物有效降水量和需水量特征进行分析; 胡惠杰等^[4]基于 SIMETAW 模型计算东北农作区大豆生育期作物需水量; 庞艳梅等^[5]、环海军等^[6]、陈超等^[7]、何俊欧等^[8]、白芳芳等^[9]、谢娟等^[10]、李勇等^[11]、罗玉峰等^[12]分别以不同地区的水稻、小麦等粮食作物为研究对象, 分析了其各自生育期内有效降水量和需水量的变化规律; 符娜等^[13]分析了西南地区水稻灌溉需水量变化规律, 但其研究选取的贵州地区气象站点数据较少, 不能很好地反映贵州实际情况。

贵州省处于云贵高原东斜坡, 是全国唯一没有平原支撑的山区省份。贵州雨热同季, 夜间降雨多, 昼夜温差大, 不仅能满足水稻喜温喜湿的双重需要, 还有利于减少夜间的呼吸消耗, 除西部威宁等地不适宜种植水稻外, 全省其他区域均有水稻种植, 但因地形复杂, 容易受灾害影响, 部分区域水稻产量不高^[14]。本研究基于贵州地区 80 个气象站点 1961—2015 年的逐日气象资

¹ 1. 贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵州 贵阳 550002

*通信作者, 谷晓平, E-mail: 16114331@qq.com

作者简介: 张波 (1985—), 男, 山东临沂人, 硕士, 工程师, 从事农业气象研究。E-mail: nj0622@126.com

收稿日期: 2018-05-15

基金资助: 国家自然科学基金 (41365008); 贵州省气象局青年基金 (黔气科合 (2015) 13 号); 贵州省山地环境气候研究所院士工作站项目 (黔科合院士站 (2014) 4010 号)

料, 采用美国农业部 (USDA) 土壤保持局推荐的有效降水量和联合国粮食及农业组织 (FAO) 推荐的参考作物蒸散量分别计算了研究区域内水稻的有效降水量和需水量, 并分析了水稻不同生育阶段缺水量和水分盈亏指数的变化特征, 以期为贵州地区水稻科学灌溉提供理论和实践参考, 也为合理利用水资源、实现区域农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

贵州省现有 85 个地面气象观测站, 由于各站建站时间不一致, 为了保证资料的完整性, 剔除数据缺测较多的站点, 选用贵州省 1961—2015 年 80 个气象观测站的逐日平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速和日照时数等气象观测资料, 气象数据来源于贵州省气象信息中心。研究区域及气象观测站的分布如图 1 所示。

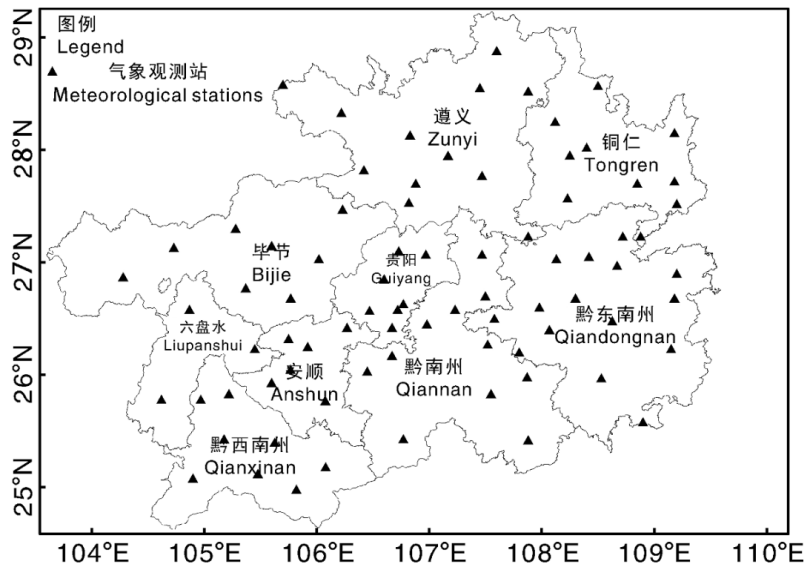


图 1 研究区域及站点分布

将水稻全生育期(4 月上旬— 9 月下旬)分成播种— 移栽(4 月上旬— 5 月中旬)、移栽— 抽穗(5 月下旬— 7 月下旬)、抽穗— 灌浆(8 月上旬— 9 月上旬)和灌浆— 成熟(9 月中旬— 9 月下旬)4 个生育阶段, 各生育期及全生育期的需水系数(KC)分别为 1.066、1.216、1.298、1.344 和 1.213。

1.2 有效降水量

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。本研究中有有效降水量采用 USDA 土壤保持局推荐的方法^[15, 16], 公式如下:

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.2P)/4.17, & (P < 8.3) \\ 4.17 + 0.1P, & (P \geq 8.3) \end{cases} \quad (1)$$

1.3 作物需水量

水稻生育期需水量(TC, mm • d-1)由作物需水系数^[13]与参考作物蒸散量乘积而得, 其中, 参考作物蒸散量依 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型^[17, 18]计算。

1.4 缺水量

水稻缺水量(W)系水稻生育期内总作物需水量与总有效降水量之差^[19, 20]。

1.5 水分盈亏指数

水分盈亏指数(I)可以较好地表征农田湿润程度和作物旱涝状况, 其计算公式如下:

$$I = \frac{TC - P_e}{TC} \quad (2)$$

若 I 为正值, 则表示作物需水量大于有效降水量, 说明有效降水量不能满足作物需水需求, 若 I 为 0 或负值, 则说明有效降水能够满足作物需水需求。I 值越高表明对灌溉的依赖程度越大, 反之越小。

1.6 气候倾向率

气候倾向率^[20]一般以历年气候要素变化过程的拟合直线的斜率的 10 倍表示, 表征多年气象数据序列变化倾向度。在统计上, 用 y_i 表示样本量为 n 的某一气候变量, 用 x_i 表示 y_i 所对应的时间, 建立 y_i 与 x_i 之间的一元线性回归方程:

$$y_i = ax_i + b, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式(3)中:a 为回归系数, b 为回归常数。a 和 b 可以用最小二乘法进行估计, 以 a 的 10 倍作为气候要素倾向率。

1.7 空间插值

利用 ArcGIS 10.2 软件中的反距离权重插值方法(IDW)^[21]对各研究要素进行插值。

2 结果与分析

2.1 水稻生育期有效降水变化特征

1961—2015 年贵州地区水稻生育期有效降水量分布特征如图 2 所示, 水稻全生育期年均有效降水量为 280~394 mm, 多年平均值为 324 mm, 空间分布上自西向东、由南向北呈递减趋势, 高值区域分布在六盘水市南部、黔西南州西部和北部, 以及安顺市西部边缘区域, 低值区域主要分布在毕节市北部、遵义市西北部和黔东南州局地区。贵州省大部分地区水稻全生育期有效降水量气候倾向率为-13.7~18.3 mm • 10 a-1(图 3), 多年平均值为-6.6 mm • 10 a-1, 除东部局部地区呈递增趋势外, 其他地区均呈递减趋势, 其中有 38.7%的站点通过显著性检验(P< 0.05)。

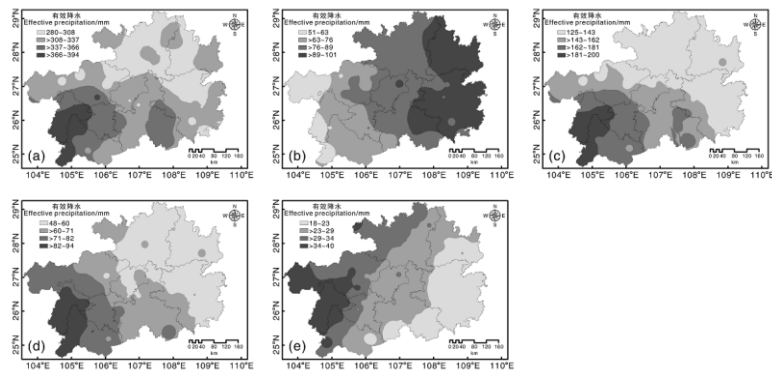


图2 水稻生育期有效降水量分布特征

a, 全生育期; b, 播种— 移栽期; c, 移栽— 抽穗期; d, 抽穗— 灌浆期; e, 灌浆— 成熟期。下同。

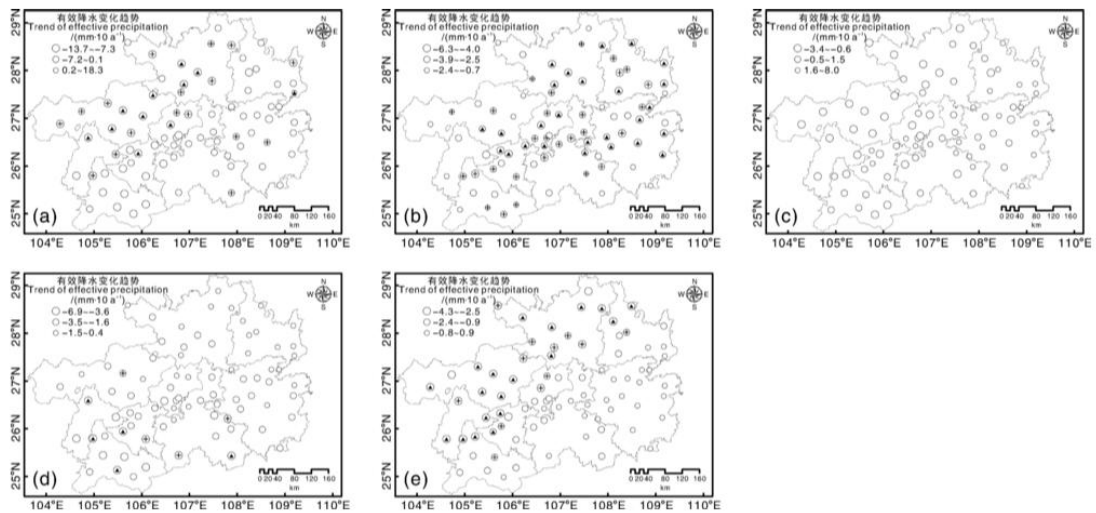


图3 水稻生育期有效降水量变化趋势分布特征

▲, $P < 0.01$; +, $P < 0.05$ 。下同。

水稻播种— 移栽期的年均有效降水量为51~101 mm, 多年平均值为82 mm, 空间分布差异显著, 自东南向西北呈递减趋势, 高值区域主要分布在黔东南州和铜仁市大部分区域。移栽— 抽穗期的有效降水量为125~200 mm, 多年平均值为151 mm, 空间分布上自西南向东北呈递减趋势。抽穗— 灌浆期有效降水量为48~94 mm, 多年平均值为64 mm, 空间分布与移栽— 抽穗期基本一致, 但低值区域向东南方向发生偏移。灌浆— 成熟期的有效降水量为18~40 mm, 多年平均值为27 mm, 空间分布上高值区域向北偏移, 低值区域向南偏移。从水稻不同生育阶段有效降水量可以看出, 移栽— 抽穗期有效降水量最大, 播种— 移栽期次之, 灌浆— 成熟期最小。

播种— 移栽期的气候倾向率为 $-6.3 \sim -0.7 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 多年平均值为 $-3.3 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 呈递减趋势, 其中, 有55%的站点通过显著性检验($P < 0.05$)。移栽— 抽穗期有效降水量气候倾向率为 $-3.4 \sim 8.0 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 多年平均值为 $0.4 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 除了中部和东部部分区域呈递增趋势外, 其他区域均呈递减趋势, 但均未通过显著性检验。抽穗— 灌浆期有效降水量气候倾向率为 $-6.9 \sim 0.4 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 多年平均值为 $-2.2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 整体呈递减趋势, 其中有8.7%的站点通过显著性检验($P < 0.05$),

呈显著递减趋势。灌浆—成熟期有效降水量气候倾向率为 $-4.3 \sim 0.9 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，平均值为 $-1.7 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，有效降水在东南大部区域呈递增趋势，但未通过显著性检验，在西北部和北部大部区域呈递减趋势，其中有 38.7% 的站点通过显著性检验 ($P < 0.05$)。

2.2 水稻生育期需水量变化特征

1961—2015 年贵州水稻生育期需水量变化特征如图 4 所示，水稻全生育期年均需水量为 $683 \sim 808 \text{ mm}$ ，多年平均值为 737 mm 。空间分布上，高值区域分布在黔西南州大部、遵义市和铜仁市局地、黔东南州南部边缘等地区，低值区域主要分布在毕节市和贵阳市局部地区。贵州省大部分地区水稻需水量气候倾向率为 $-23.7 \sim 29.6 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ (图 5)，多年平均值为 $-4.02 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。在空间分布上，西南部和东部部分地区的需水量呈递增趋势，其余地区呈递减趋势，全省有 35% 的站点通过显著性检验 ($P < 0.05$)，其中有 31.3% 的站点呈显著递减趋势，3.7% 的站点呈显著递增趋势。

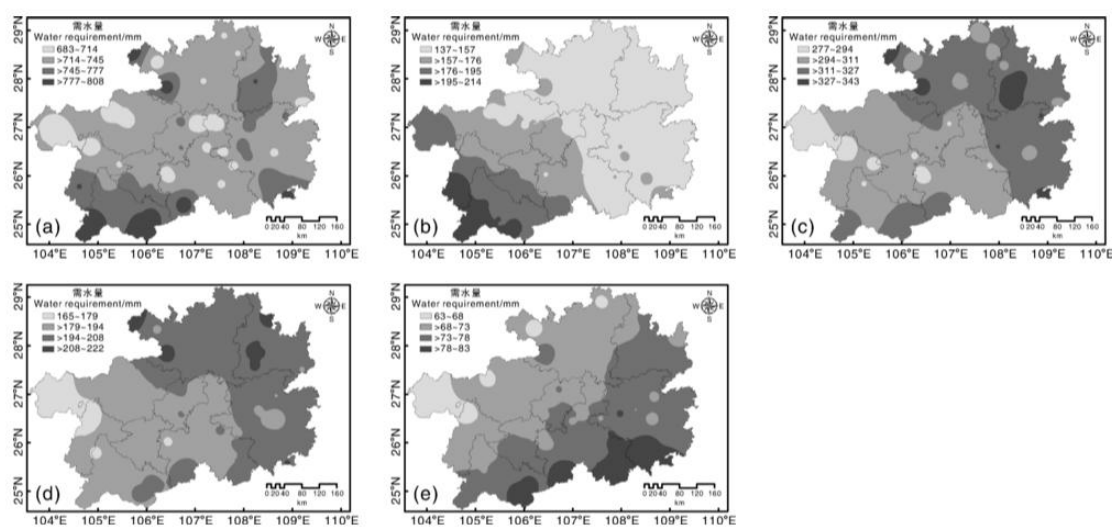


图 4 水稻不同生育期需水量分布特征

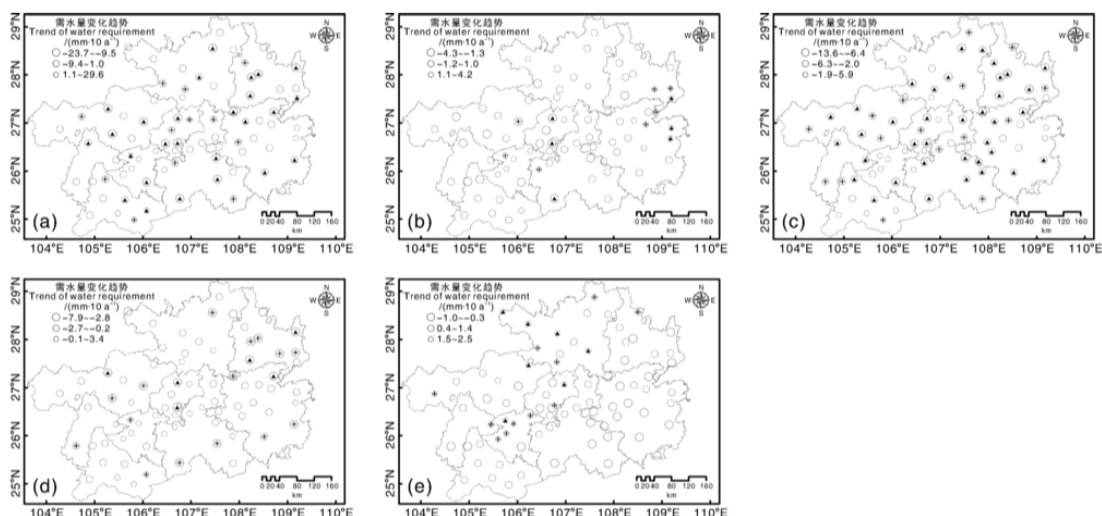


图5 水稻生育期需水量变化趋势分布特征

水稻播种—移栽期的年均需水量为137~214 mm，多年平均值为160 mm，在空间分布上呈现出自西南向东北递减的趋势，高值区域分布在黔西南边缘等地，低值区域分布在东部大部。移栽—抽穗期的年均需水量为277~343 mm，多年平均值为310 mm，在空间分布上呈现出由东部向西递减的变化趋势。抽穗—灌浆期的年均需水量为165~222 mm，多年平均值为193 mm，需水量明显低于移栽—抽穗期，但空间分布基本一致。灌浆—成熟期的年均需水量为63~83 mm，多年平均值为73 mm，空间分布上自南部向北部呈递减变化趋势。对比水稻不同生育期的需水量可以看出，移栽—抽穗期最大，灌浆—成熟期最小。

水稻播种—移栽期需水量气候倾向率为 $-4.3 \sim 4.2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，多年平均值为 $0.15 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，空间分布上，除东部部分区域及安顺市等地呈递增趋势外，其他区域均呈递减趋势。移栽—抽穗期需水量气候倾向率为 $-13.6 \sim 5.9 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，多年平均值为 $-4.2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，空间分布上，除黔西南州南部局地等地呈递增趋势外，其他地区均呈递减趋势，其中50%的站点通过显著性检验($P < 0.05$)，呈显著递减趋势。抽穗—灌浆期需水量气候倾向率为 $-7.9 \sim 3.4 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，多年平均值为 $-1.3 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，空间分布上，除安顺市大部及黔西南州南部等地呈递增趋势外，其余大部均呈递减趋势，其中有8.7%的站点通过显著性检验($P < 0.05$)，呈显著递减趋势。灌浆—成熟期气候倾向率为 $-1.0 \sim 2.5 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，多年平均值为 $0.7 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，空间分布上呈现出自北向南递减的趋势，有8.7%的站点通过显著性检验($P < 0.05$)，呈显著递增趋势。

2.3 水稻生育期缺水变化特征

1961—2015年贵州水稻生育期缺水空间分布如图6所示：水稻全生育期年均缺水量为317~509 mm，多年平均值为413 mm，空间分布上自东向西呈递减趋势。贵州水稻缺水气候倾向率为 $-18.5 \sim 18.3 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ (图7)，多年平均值为 $2.6 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ，整体呈递增趋势，在空间分布上自西向东呈递减趋势，有7.5%的站点通过显著性检验($P < 0.05$)，呈显著递增趋势。

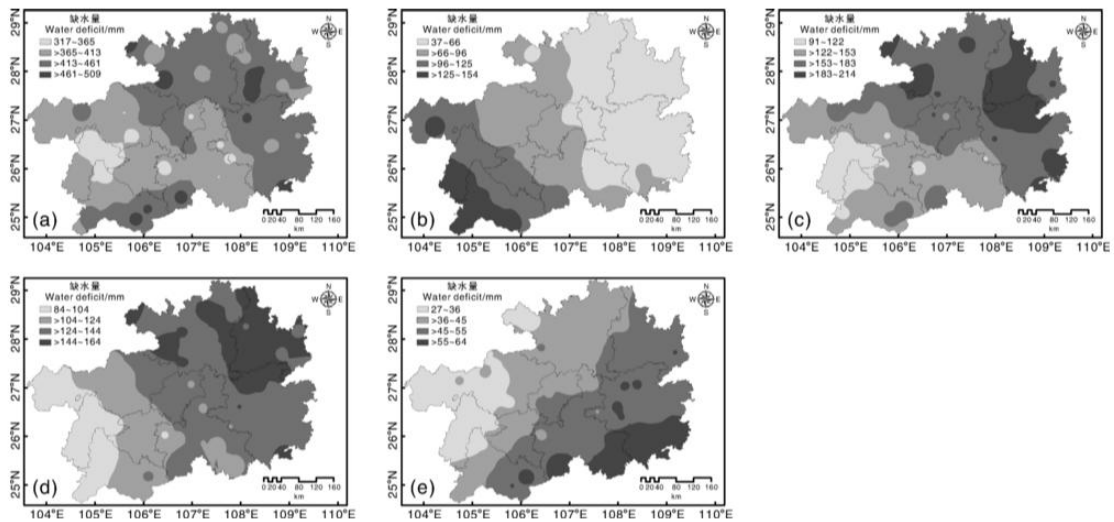


图6 水稻生育期缺水分布特征

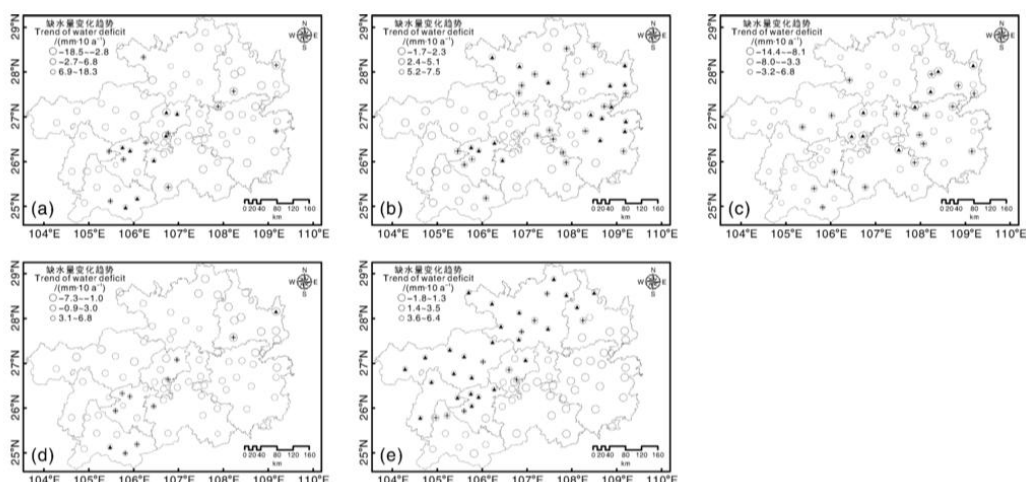


图 7 水稻不同生育期缺水变化趋势分布特征

水稻播种— 移栽期的年均缺水量为 37~154 mm，多年平均值为 77 mm，空间分布呈自西向东递减的变化趋势。移栽— 抽穗期的年均缺水量为 91~214 mm，多年平均值为 159 mm，空间分布上自东北向西南呈递减趋势。抽穗— 灌浆期的年均缺水量为 84~164 mm，多年平均值为 128 mm，空间分布上自东向西呈递减趋势。灌浆— 成熟期的年均缺水量为 27~64 mm，多年平均值为 46 mm，空间分布上自东南向西北呈递减趋势，高值区域分布在黔南州南部和黔东南州西部等地。对比水稻不同生育期的缺水量可以看出，水稻移栽— 抽穗期缺水量最大，灌浆— 成熟期缺水量最小。

水稻播种— 移栽期缺水气候倾向率为 $-1.7\sim 7.5\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ，多年平均值为 $3.4\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ，高值区域分布在东部边缘及安顺市北部等地区，其中有 21.3%的站点通过显著性检验($P<0.05$)，呈显著递增趋势。移栽— 抽穗期的缺水气候倾向率为 $-14.4\sim 6.8\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ，多年平均值为 $-4.6\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ，整体呈递减趋势，其中有 11.3%的站点通过显著性检验($P<0.05$)，呈显著递减趋势。抽穗— 灌浆期缺水气候倾向率为 $-7.3\sim 6.8\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ，多年平均值为 $0.9\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ，空间上呈现西南高、东北部低的变化趋势。灌浆— 成熟期的缺水气候倾向率为 $-1.8\sim 6.4\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ，多年平均值为 $2.4\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ，空间分布上北部大多呈递增趋势，递减区域主要分布在东南部分区域，有 33.7%的站点通过显著性检验($P<0.05$)，呈显著递增趋势。

2.4 水分盈亏指数变化特征

从表 1 可以看出:水稻不同生育期对灌溉需求差异不明显(0.46~0.65)，全生育期水分盈亏指数为 0.56，表明贵州水稻对灌溉依赖程度较高，其中，播种— 移栽期对灌溉的依赖程度相对较低，水分盈亏指数为 0.46，抽穗— 灌浆期对灌溉依赖程度相对最高，水分盈亏指数为 0.65。

表 1 水稻不同生育期水分盈亏指数

生育期 Growth stage	I
播种— 移栽期 Seeding-transplanting	0.46

移栽— 抽穗期 Transplanting-heading	0.49
抽穗— 灌浆期 Heading-filling	0.65
灌浆— 成熟期 Filling-mature	0.62
全生育期 Whole growth season	0.56

3 结论与讨论

有效降水量和需水量是水稻栽培管理和灌溉制度制定的主要依据，也是影响水稻产量的关键因子。本研究基于逐日气象数据，计算了贵州省水稻不同生育期的有效降水量和需水量，并分析了水稻不同生育阶段缺水量的变化特征。结果表明：1961—2015 年贵州省水稻全生育期年均有效降水量为 280~394 mm，多年平均值为 324 mm，呈递减趋势，这与张琪等^[22]、王芬等^[23]研究结果基本一致，空间分布上自西向东、由南向北呈递减趋势；年均需水量为 683~808 mm，多年平均值为 737 mm，呈递减趋势；年均缺水量为 317~509 mm，多年平均值为 413 mm，呈递增趋势，空间分布上自东向西呈递减趋势。

本研究从气象要素的角度，利用水分盈亏指数，分析贵州有效降水量对水稻需水量的满足状况。研究区域水稻在抽穗—灌浆期对灌溉依赖程度最高，需补充灌溉水最多，这与符娜等^[13]关于西南地区水稻整体对灌溉依赖程度较低的结论有所不同，但与李双双等^[24]研究结果基本一致。实际生产过程中，影响水稻灌溉需水总量的因素较复杂。贵州省稻田绝大多数为梯田，灌溉设施严重滞后，保水性能差，因此应该加大水利工程建设，以提高灌溉水利用系数，并推广作物节水灌溉模式。这是提高当地水稻产量和实现水资源可持续发展的重要途径^[25]。此外，蓄雨型节水灌溉模式提高了各生育期灌溉水深上限值，田面蓄水深度增加，灌水周期有所延长，减少了灌溉次数，在雨量丰富、灌溉水源相对较差的地区具有较好的适应性^[26]。

参考文献：

- [1] 闫旖君，徐建新，肖恒. 2021—2050 年河南省夏玉米净灌溉需水量对气候变化的响应[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(2): 138-148.
- [2] 黄志刚，肖烨，张国，等. 气候变化背景下松嫩平原玉米灌溉需水量估算及预测[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2368-2381.
- [3] 曹永强，朱明明，李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 560-570.
- [4] 胡惠杰，王猛，尹小刚，等. 气候变化下东北农作区大豆需水量时空变化特征分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 21-31.
- [5] 庞艳梅，陈超，潘学标. 1961—2010 年四川盆地玉米有效降水和需水量的变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 133-141.
- [6] 环海军，杨再强，刘岩，等. 鲁中地区冬小麦水分盈亏及灌溉需水量的时空变化特征[J]. 干旱气象, 2016, 34(5): 866-872.
- [7] 陈超，庞艳梅，潘学标. 气候变化背景下四川省单季稻水分盈亏的变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9):

1508-1519.

[8] 何俊欧, 凌霄霞, 张建设, 等. 近 35 年湖北省低丘平原区玉米需水量及早涝时空变化[J]. 作物学报, 2017, 43(10): 1536-1547.

[9] 白芳芳, 乔冬梅, 庞颖, 等. 河南省冬小麦各生育期水分亏缺的空间分布及降水量突变检验[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 100-108.

[10] 谢娟, 栗晓玲. 石羊河流域小麦净灌溉需水量全局敏感性分析[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 25-29.

[11] 李勇, 杨晓光, 叶清, 等. 1961—2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 175-183.

[12] 罗玉峰, 彭世彰, 王卫光, 等. 气候变化对水稻灌溉需水量的影响: 以高邮灌区为例[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 609-613.

[13] 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.

[14] 康为民, 吴战平, 陈娟, 等. 适宜复杂气候的农业气候区划方法初探: 基于气候资源的区划方法在贵州水稻农业气候区划中的应用[J]. 贵州气象, 2008, 32(4): 9-11.

[15] DOLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 1-8.

[16] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2367-2377.

[17] 王瑶, 赵传燕, 田风霞, 等. 黑河中游春小麦需水量空间分布[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2374-2382.

[18] 尹海霞, 张勃, 王亚敏, 等. 黑河流域中游地区近 43 年来农作物需水量的变化趋势分析[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 409-417.

[19] 曹红霞, 栗晓玲, 康绍忠, 等. 关中地区气候变化对主要作物需水量影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 6-9.

[20] 张顺谦, 邓彪, 杨云洁. 四川旱地作物水分盈亏变化及其与气候变化的关系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 105-111 .

[21] 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.

[22] 张琪, 李跃清. 近 48 年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 372-383.

[23] 王芬, 曹杰, 李腹广, 等. 贵州不同等级降水日数气候特征及其与降水量的关系[J]. 高原气象, 2015, 34(1):

145-154.

[24] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 西南地区水稻水分亏缺率时空变化特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5798-5808.

[25] 吴士章, 李坡, 卢兰, 等. 贵州生态退化区域稻田节水控制灌溉试验研究[J]. 贵州科学, 2011, 29(4): 36-37.

[26] 陈德军, 方小宇, 张和喜. 蓄雨技术在贵州山区水稻节水灌溉中的应用[J]. 节水灌溉, 2008 (5): 54-56.