

# 贵州烤烟需水量及灌溉需求指数特征

张波<sup>1,4</sup>, 裴兴云<sup>2</sup>, 曹华<sup>3</sup>, 古书鸿<sup>1</sup>, 莫建国<sup>1</sup>

(1.贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550002; 2.贵州省气象服务中心, 贵阳 550002;

3.贵州省气象信息中心, 贵阳 550002; 4.贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵阳 550002)

**摘 要:**为了合理配置烤烟的灌溉计划和提高水资源的利用效率,基于贵州省 1961—2015 年 81 个气象观测站逐日气象资料,采用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量和 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式分别计算研究区域内烤烟不同生育阶段的有效降水量和需水量,并分析了烤烟不同生育阶段灌溉需求指数的变化特征。结果表明:近 55 年,贵州省烤烟伸根期、旺长期、成熟期和大田生育期有效降水量分别为 26.9~75.4 mm,45.2~88.9 mm,66.4~167.6 mm 和 152.8~284.8 mm;需水量分别为 51.9~78.8 mm,148.8~202.2 mm,85.2~122.8 mm 和 332.5~412.6 mm,以旺长期日均需水量最大;多年平均灌溉需求指数分别为 0.20,0.32,0.26,0.35;烤烟不同生育阶段有效降水量和需水量随时间变化均呈递减趋势,伸根期灌溉需求指数呈递增变化趋势,其他生育期呈递减趋势;空间分布上,烤烟伸根期有效降水量自东向西呈递减趋势;伸根期、旺长期灌溉需求指数自西南向东北递减的变化趋势,而成熟期和大田期呈相反趋势。

**关键词:**烤烟; 需水量; 有效降水; 灌溉需求指数; 贵州省

中图分类号:S572

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0215-07

## Spatial and Temporal Characteristics Characteristics of Flue-Cured Tobacco Water Requirement and Irrigation Requirement Index in Guizhou Province

ZHANG Bo<sup>1,4</sup>, PEI Xingyun<sup>2</sup>, CAO Hua<sup>3</sup>, GU Shuhong<sup>1</sup>, MO Jianguo<sup>1</sup>

(1.Guizhou Institute of Mountainous Environment and Climate, Guiyang 550002, China;

2.Guizhou Meteorological Service Center, Guiyang 550002, China; 3.Guizhou Meteorological Information Center,

Guiyang 550002, China; 4.Guizhou Key Laboratory of Mountainous Climate and Resources, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** In order to configure the irrigation plan for flue-cured tobacco properly and improve the efficiency of water use, based on the daily meteorological data of 81 meteorological stations in Guizhou during the past 55 years, the effective precipitation and water requirement in different growth stages of flue-cured tobacco in Guizhou were calculated by an effective precipitation recommended by the USDA soil conservation agency and a reference crop evapotranspiration and the United Nations Food and Agriculture Organization, and the variation characteristics of irrigation demand index of flue-cured tobacco in different growth stages were analyzed. The results showed that, in the past 55 years, the effective precipitation amounts during the root extending, vigorous, mature periods and field growth period of flue-cured tobacco in Guizhou Province were 26.9~75.4 mm, 45.2~88.9 mm, 66.4~167.6 mm and 152.8~284.8 mm, respectively; the water requirements were 51.9~78.8 mm, 148.8~202.2 mm, 85.2~122.8 mm and 332.5~412.6 mm respectively, and the water requirement of vigorous period was the highest; the average annual irrigation demand indexes were 0.20, 0.32, 0.26 and 0.35, respectively; the effective precipitation and water demand of flue-cured tobacco showed a decreased trend with time, and the irrigation demand index showed an increased trend during the root-extension period. The irrigation demand indexes showed a decreasing trend in other growth periods. With respect to the spatial distribution, the effective precipitation in the root extending period of flue-cured tobacco

收稿日期:2018-11-27

修回日期:2018-12-17

资助项目: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)

第一作者:张波(1985—),男,山东临沂人,硕士,工程师,研究方向:农业气象。E-mail:nj0622@126.com

通信作者:莫建国(1963—),男,贵州贵阳人,本科,正研级高工,研究方向:农业气象。E-mail:mogj@sina.com

decreased from east to west; the trend of the irrigation demand index in the root extending and the vigorous period decreased from the southwest to the northeast, while it showed opposite tendency in mature period and field growth period.

**Keywords:** flue-cured tobacco; water demand; effective precipitation; irrigation demand index; Guizhou Province

作物需水量是进行农业水资源规划的依据,也是水利工程规划设计及节水农业研究中重要的参数,研究作物的需水规律是制定作物合理灌溉制度和作物水分科学管理的基础<sup>[1]</sup>。烤烟作为贵州省重要的经济作物之一,在国民经济中占有重要地位,同时烤烟是一种需水量较多的作物,贵州降水资源相对丰富,但各产烟地区水资源时空分布严重不均,严重制约区域农业生产,因此明确贵州烤烟需水量及灌溉需求指数变化特征很有必要的现实意义<sup>[2]</sup>。

目前关于作物需水量和灌溉需求指数的相关研究已有报道,曹永强等<sup>[2]</sup>分析了气候变化背景下辽西北春玉米生育期需水量,研究结果为辽西北春玉米种植的农业用水以及合理灌溉提供依据;邱美娟<sup>[3]</sup>、郭晓丽<sup>[4]</sup>等分析了吉林省和内蒙古玉米生长季水分亏缺指数的变化特征;庞艳梅等<sup>[5]</sup>、环海军等<sup>[6]</sup>、陈超等<sup>[7]</sup>分别以不同地区的水稻、小麦等粮食作物作为研究对象,分析了生育期内有效降水量和需水量的变化规律。而针对烤烟需水量的研究一般是通过测定伸根期、旺长期和成熟期 3 个阶段的需水量或需水模系数,来研究烟草不同时期的需水规律<sup>[8]</sup>,高晓丽等<sup>[9]</sup>在修文县中心试验站开展烤烟等相关作物需水规律与作物系数的研究,确定了烤烟不同生育阶段的作物系数;冷璐等<sup>[10]</sup>通过田间试验研究烤烟需水特征和各生育期土壤水分的动态变化,表明烤烟生长季内需水量具有明显的阶段性;陈佳勃<sup>[11]</sup>采用大田试验法确定了烤烟各生育期的蒸散量,为优化烟田水分管理提供依据。对于大田试验来说,方便、可操作性强,但容易忽略气候因素的影响,尤其在气候变化的大背景下,贵州气温逐渐升高,夏季降水显著增加<sup>[12-13]</sup>,势必会影响研究结果科学性和准确性。

因此本研究基于贵州省 1961—2015 年 81 个气象观测站逐日气象资料,在前人研究基础上,采用美国农业部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研究区域内烤烟不同生育阶段的有效降水量和需水量,并分析了烤烟不同生育阶段灌溉需求指数的变化特征,以期合理配置灌溉计划和提高水资源的利用效率提供重要的参数,也为烤烟种植制定适应气候变化措施提供科学的依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 数据来源

气象数据来源于贵州省气象信息中心。选取数据较完整的 81 个地面气象观测站 1961—2015 年逐日气象资料,包括平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速和日照时数等,气象站点分布如图 1 所示。

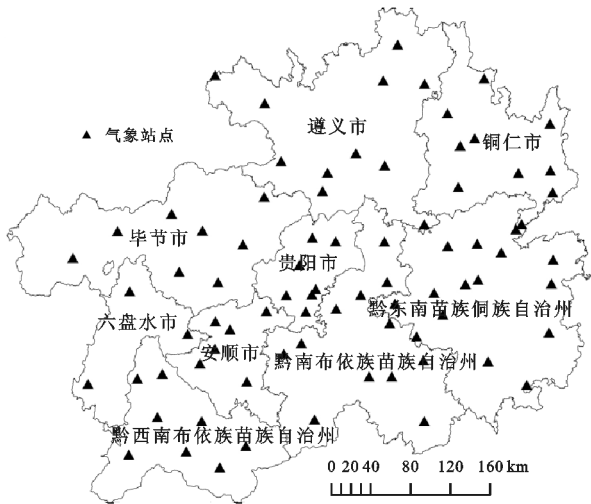


图 1 研究区域及气象站点分布

## 1.2 烤烟生育期

根据烤烟实际生产情况,并结合前人的研究结果<sup>[14]</sup>,确定贵州烤烟移栽期,见表 1,烤烟的移栽期确定后,各生育期的时间长短基本稳定,将烤烟大田生育期(移栽至成熟采收)120 d,划分为:伸根期(还苗到团棵)30 d、旺长期(团棵到现蕾)30 d、成熟期(现蕾到采收)60 d,以此计算各生育期的有效降水量、需水量和灌溉需求指数。

表 1 贵州烤烟移栽期

区域	移栽期
铜仁市、黔东南州、黔西南州、黔東南州	4 月上旬
遵义市、贵阳市、安顺市	4 月中旬
毕节市、六盘水市	4 月下旬

## 1.3 有效降水量

有效降水量是指烤烟不同生育期内的降水量满足其蒸发散、蒸腾需要的净水量,是烤烟生育期内总降水量的有效部分,本研究有效降水量是采用美国农业部土壤保持局推荐的方法,该方法是目前众多的

有效降水计算方法中得到公认和普遍推广的方法之一<sup>[15-16]</sup>, 公式如下所示

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

式中:  $P_e$  为有效降水量 (mm/d);  $P$  为日降水量 (mm/d)。

## 1.4 作物需水量

烤烟生育期需水量计算模型如公式(2) 所示。

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (2)$$

式中:  $ET_c$  为烤烟需水量 (mm/d);  $K_c$  为作物系数;  $ET_0$  为参考作物蒸散量, 由 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型计算, 如公式(3)所示。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

式中:  $ET_0$  为潜在蒸散量 (mm/d);  $\Delta$  为饱和水汽压—温度曲线斜率 (kPa/°C);  $R_n$  为作物表面的净辐射 [MJ/(m<sup>2</sup> · d)];  $G$  为土壤热通量 [MJ/(m<sup>2</sup> · d)];  $T$  为 2 m 处的日平均气温 (°C);  $r$  为干湿表常数 (kPa/°C);  $e_s$  为饱和水汽压 (kPa);  $e_a$  为实际水汽压 (kPa);  $u_2$  为 2 m 处的风速 (m/s)。

烤烟作物系数参考高晓丽等<sup>[9]</sup> 研究结果, 并根据贵州当地气候条件, 对烤烟生育期作物系数进行修正, 即:

$$K_c = K_{c(Tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3} \quad (4)$$

式中:  $K_c$  为烤烟不同生育阶段订正后的作物系数;  $K_{c(Tab)}$  为烤烟不同生育阶段标准条件时的作物系数;  $U_2$  为 2 m 高度处的日平均风速 (m/s);  $RH_{min}$  为日最低相对湿度的平均值;  $h$  为作物的平均高度 (m)。

## 1.5 灌溉需求指数

为表征烤烟不同生育阶段的水分盈亏程度, 将灌溉需水量与需水量的比值定义为灌溉需求指数, 见公式(5)。

$$I = \frac{\sum_{n=1}^N ET_c - \sum_{n=1}^N P_e}{\sum_{n=1}^N ET_c} \quad (5)$$

式中:  $I$  为灌溉需求指数, 表征农田湿润程度和作物旱涝状况, 若  $I$  为正值, 则表示作物需水量大于有效降雨量, 说明有效降雨量不能满足作物需水需求, 若  $I$  为 0 或负值, 则说明有效降雨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

气候倾向率表征气象要素的变化趋势, 烤烟不同生育期的有效降水量、需水量和灌溉需求指数的气候倾向率由最小二乘法计算得出, 计算公式:

$$Y_i = aX_i + b \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中:  $Y_i$  为要素拟合值;  $X_i$  为时间序列;  $a$  为回归系数;  $b$  为回归常数。

## 1.7 空间插值

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

# 2 结果与分析

## 2.1 时间变化特征

1961—2015 年贵州烤烟不同生育阶段有效降水量、需水量和灌溉需求指数多年平均值变化特征见图 2。由图 2A 可知, 贵州烤烟伸根期有效降水量为 26.9~75.4 mm, 多年平均值为 48.8 mm, 最小值发生在 2011 年, 最大值发生在 1964 年, 有效降水量呈显著递减趋势, 通过  $\alpha = 0.01$  极显著性检验, 递减速率为 2.4 mm/10 a; 需水量在 51.9~78.8 mm, 多年平均值为 64.4 mm, 最小值发生在 1996 年, 最大值发生在 1969 年, 烤烟伸根期需水量整体呈递减趋势, 但递减趋势不显著; 灌溉需求指数变化范围为 -0.16~0.58, 多年平均值为 0.20, 伸根期灌溉需求指数随时间变化呈显著递增趋势, 递增速率为 0.035/10 a。

由图 2B 可知, 烤烟旺长期有效降水量变化范围为 45.2~88.9 mm, 多年平均值为 67.1 mm, 最小值发生在 2011 年, 最大值发生在 1978 年, 随时间变化呈递减趋势, 递减速率为 0.4 mm/10 a; 需水量变化范围为 85.2~122.8 mm, 多年平均值为 102.2 mm, 最小值发生在 2012 年, 最大值发生在 1963 年, 整体呈弱递减趋势, 气候倾向率为 0.51 mm/10 a; 灌溉需求指数变化范围为 0.03~0.61, 多年平均值 0.32, 其中 1964 年、1991 年、2011 年灌溉需求指数在 0.5 以上, 表明旺长期有效降水量不能满足烤烟的需水量, 旺长期灌溉需求指数随时间变化呈递增趋势, 递增趋势不显著。

由图 2C 可知, 烤烟成熟期有效降水量变化范围为 66.4~167.6 mm, 多年平均值为 126.7 mm, 最小值发生在 2013 年, 最大值发生在 1979 年, 成熟期有效降水量随时间变化呈递减趋势, 递减速率为 0.7 mm/10 a; 需水量变化范围为 148.8~202.2 mm, 多年平均值为 173.3 mm, 最小值发生在 1998 年, 最大

值发生在 2013 年,整体呈弱递减趋势,气候倾向率为  $2 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ;灌溉需求指数变化范围为  $-0.06 \sim 0.67$ ,多年平均值 0.26,其中仅 1998 年灌溉需求指数为负值,表明成熟期有效降水量可以满足烤烟的需水量,

1971 年、1975 年、1981 年、2011 年、2013 年灌溉需求指数在 0.5 以上,从整体情况可以看出,成熟期有效降水量不能满足烤烟的需水量,成熟期灌溉需求指数随时间变化呈弱递减趋势。

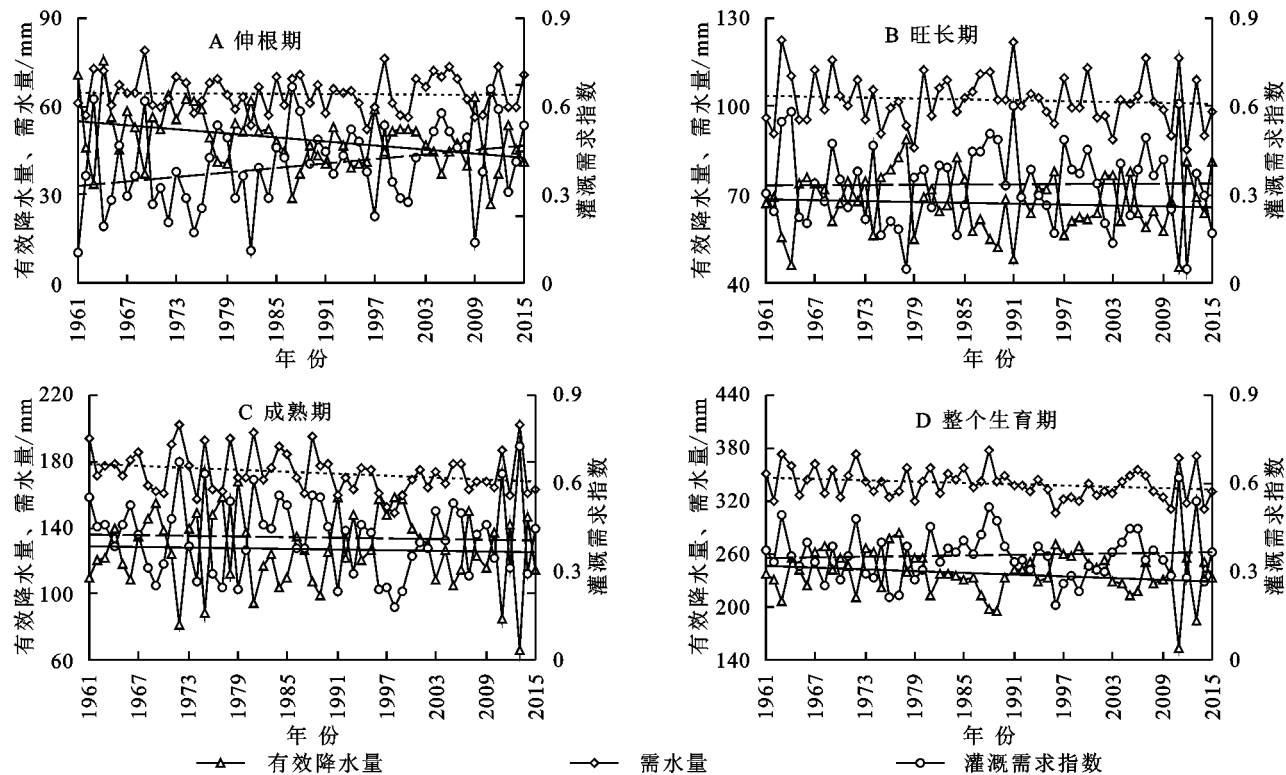


图 2 烤烟不同生育阶段有效降水量、需水量和灌溉需求指数多年平均值变化特征

由图 2D 可知,烤烟整个大田生育期有效降水量变化范围在  $152.8 \sim 284.8 \text{ mm}$ ,多年平均值为  $238.2 \text{ mm}$ ,最小值发生在 2011 年,最大值发生在 1977 年,大田生育期有效降水量随时间变化呈递减趋势,递减趋势不显著,递减速率为  $3.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ;需水量变化范围在  $332.5 \sim 412.6 \text{ mm}$  之间,多年平均值为  $371.1 \text{ mm}$ ,最小值发生在 1996 年,最大值发生在 1988 年,整体呈递减趋势,气候倾向率为  $2.6 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ;大田生育期灌溉需求指数变化范围在  $0.18 \sim 0.62$ ,多年平均值 0.35,表明贵州烤烟大田生育期内有效降水量无法满足烤烟需水量,且大田生育期灌溉需求指数随时间变长呈递增趋势。比较烤烟各个生育期的有效降水量、需水量和灌溉需求指数可以发现,成熟期需水总量最大,旺长期平均日需水量最高,为  $3.4 \text{ mm}/\text{d}$ 。

## 2.2 有效降水量空间变化特征

1961—2015 年贵州烤烟不同生育阶段有效降水量多年平均值空间变化特征如图 3 所示。从图 3A 中可以看出,烤烟伸根期有效降水量空间变化范围为  $30.4 \sim 60.1 \text{ mm}$ ,多年平均值为  $48.8 \text{ mm}$ ,空间分布特征显著,自东向西呈递减趋势,中东部大部分地区有效降水量显著高于西部地区;进入旺长期,图 3B 所

示,烤烟有效降水量空间变化范围为  $57.4 \sim 86.7 \text{ mm}$ ,多年平均值为  $67.1 \text{ mm}$ ,空间分布较伸根期发生偏移,高值区域分布在毕节市南部及六盘水和安顺市局地等区域,低值区域分布在黔西南州大部 and 遵义市局地等地;成熟有效降水量,图 3C 所示,空间变化范围为  $104 \sim 175.5 \text{ mm}$ ,多年平均值为  $126.7 \text{ mm}$ ,空间分布特征显著,自东向西呈递增变化趋势,六盘水市、安顺市西部和黔西南州西部有效降水量为  $146.9 \sim 175.5 \text{ mm}$ ,东部大部有效降水量为  $104. \sim 118.3 \text{ mm}$ ;图 3D 所示,整个大田生育期有效降水量空间变化范围为  $209 \sim 296.8 \text{ mm}$ ,多年平均值  $238.1 \text{ mm}$ ,空间分布上,高值区域分布六盘水、安顺市和黔西南州交汇处,变化范围为  $261.7 \sim 296.8 \text{ mm}$ ,全省低值区域分布在遵义市大部和铜仁市东部有效降水量。

## 2.3 需水量空间变化特征

1961—2015 年贵州烤烟不同生育阶段需水量多年平均值空间变化特征如图 4 所示。从图 4A 中可以看出,烤烟伸根期需水量为  $52.5 \sim 88.1 \text{ mm}$ ,多年平均值为  $64.3 \text{ mm}$ ,空间分布特征显著,自东向西呈递增趋势,东部大部分地区需水量为  $52.5 \sim 66.7 \text{ mm}$ ,西部需水量为  $73.8 \sim 88.1 \text{ mm}$  左右;图 4B 表明,旺长期需水量



93.1~126.8 mm, 多年平均值为 102.1 mm, 空间上呈现西南高、东北部低的空间特征, 黔西南州大部分地区需水量在 113.3~126.8 mm, 遵义市和铜仁市大部、黔南州东部等地需水量在 93.1~99.8 mm 左右; 图 4C 表明, 成熟期需水量变化范围为 152.8~198.9 mm, 多年平均值为 173.3 mm, 空间分布较旺长期呈相反趋势, 高值分布在遵义市北部及铜仁市西部等地, 变化

范围在 180.5~198.9 mm, 低值分布在毕节市西部及六盘水和黔西南州局地等区域, 变化范围为 152.8~162.1 mm; 图 4D 表明, 烤烟大田生育期需水量为 336.2~425.3 mm, 多年平均值为 370.9 mm, 空间分布上, 高值分布在黔西南州大部等地, 变化范围为 389.7~425.3 mm, 低值区域分布在东部大部等地, 变化范围为 336.2~371.9 mm。

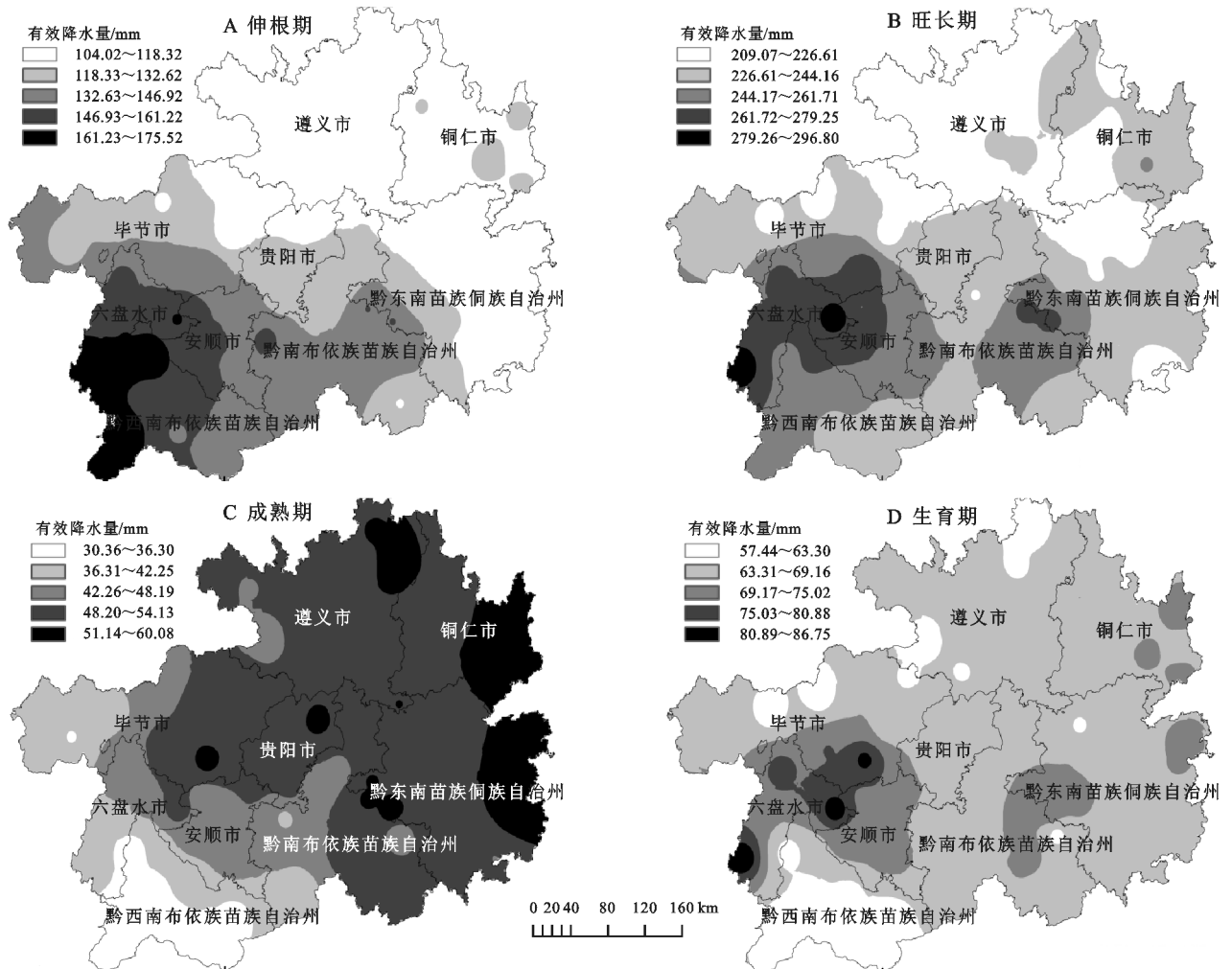


图 3 烤烟生育期有效降水量多年平均值空间分布特征

## 2.4 灌溉需求指数空间变化特征

1961—2015 年贵州烤烟不同生育阶段灌溉需求指数多年平均值空间变化特征如图 5 所示。伸根期灌溉需求指数(图 5A), 变化范围为 -0.14~0.68, 多年平均值为 0.20, 空间上自东向西呈递增趋势, 低值区域主要分布在东部边缘等地, 西部大部分区域灌溉需求指数在 0.34~0.68 之间, 有效降水不能满足伸根期需水量, 对灌溉有一定的依赖性; 图 5B 可以看出, 旺长期灌溉需求指数为 0.12~0.53, 多年平均值为 0.32, 空间分布上, 灌溉需求指数高值分布在黔西南州大部, 在 0.46~0.53 之间, 六盘水北部和毕节市南部以及东部边缘等地的灌溉需求指数较小, 在 0.12~0.28 之间;

图 5C 可以看出, 成熟期灌溉需求指数为 -0.07~0.47, 多年平均值为 0.26, 空间分布特征显著, 自西南向东北呈递增的变化趋势, 遵义市大部、铜仁市东部和黔东南州东部的灌溉需求指数最高, 为 0.37~0.47, 表明该区域的有效降水量无法满足烤烟生育期的需水量; 图 5D 可以看出, 烤烟大田生育灌溉需求指数为 0.19~0.49, 多年平均值为 0.35, 空间分布上, 对灌溉依赖性较高的区域分布在遵义市大部、铜仁市西部、黔西南州南部等地, 变化范围为 0.38~0.49, 低值区域分布自六盘水市和安顺市大部以及黔南州中部, 变化范围为 0.19~0.31。

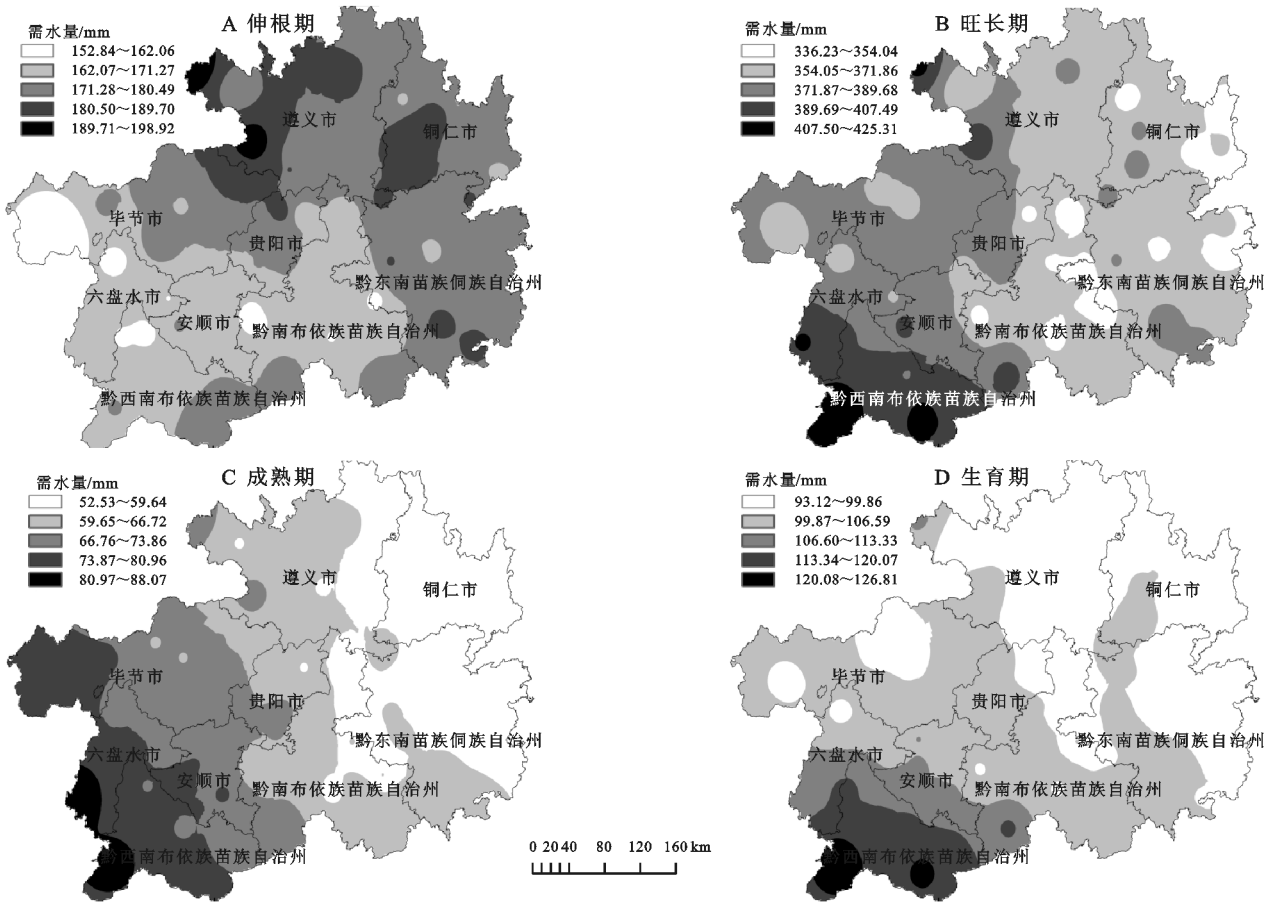


图 4 烤烟不同生育阶段需水量多年平均值空间分布特征

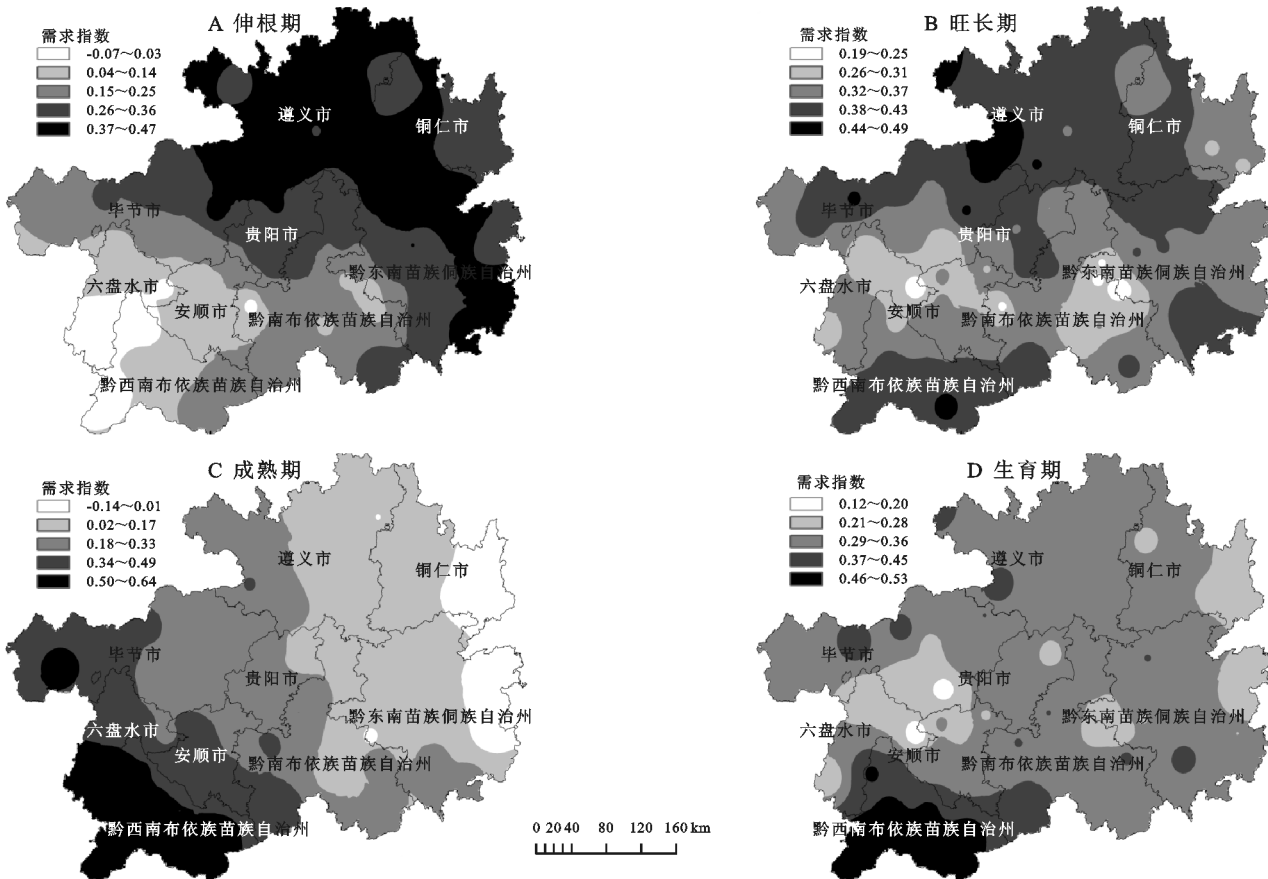


图 5 烤烟不同生育阶段灌溉需求指数多年平均值空间分布特征

### 3 结 论

本研究基于贵州省 1961—2015 年 81 个气象观测站逐日气象资料,采用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量和 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式,分析了贵州烤烟不同生育阶段的有效降水量、需水量和灌溉需求指数变化特征,结果表明:近 55 a,贵州省烤烟伸根期、旺长期、成熟期和大田生育期有效降水量分别为 26.9~75.4 mm,45.2~88.9 mm,66.4~167.6 mm,152.8~284.8 mm;需水量分别为 51.9~78.8 mm,148.8~202.2 mm,85.2~122.8 mm 和 332.5~412.6 mm,以旺长期日均需水量最大;平均灌溉需求指数分别为 0.20,0.32,0.26,0.35,有效降雨量无法满足烤烟需求;烤烟不同生育阶段有效降水量和需水量随时间变化均呈递减趋势,伸根期灌溉需求指数呈递增变化趋势,其他生育期呈递减趋势;空间分布上,伸根期、旺长期灌溉需求指数自西南向东北递减的变化趋势,而成熟期和大田期呈相反趋势。

#### 参考文献:

[1] 郑东方,许嘉阳,卢秀萍,等.云南省烤烟需水量及灌溉需求指数的时空特征[J].应用生态学报,2015,26(7): 2091-2098.

[2] 曹永强,李维佳,赵博雅.气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究[J].资源科学,2018,40(1):150-160.

[3] 邱美娟,郭春明,王冬妮,等.1960—2015 年吉林省玉米生长季有效降水和水分亏缺指数的变化特征[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):237-243.

[13] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2013,487(9):24-38.

[14] 段春锋,缪启龙,曹雯,等.西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物蒸散[J].农业工程学报,2012,28(4):94-99.

[15] 何宝忠,丁建丽,张喆,等.新疆植被覆盖度趋势演变试验性分析[J].地理学报,2016,71(11):1948-1966.

[16] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000,21(2):235-260.

[17] Jiapaer G, Liang S, Yi Q, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015,58:64-76.

[18] 申双和,张方敏,盛琼.1975—2004 年中国湿润指数时

[4] 郭晓丽,陈素华.内蒙古中部地区春玉米水分亏缺时空特征[J].干旱气象,2018,36(2):295-300.

[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(S):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] 段淑辉,杨亿军,刘建利,等.烟草需水规律研究进展[J].中国烟草科学,2012(4):99-105.

[9] 高晓丽,徐俊增,杨士红,等.贵州地区主要作物需水规律与作物系数的研究[J].中国农村水利水电,2015(1):11-14.

[10] 冷璐,陆引罡.贵州开阳烟区烤烟需水特征与烟田土壤水分变化研究[J].湖南农业科学,2014(14):7-11.

[11] 陈佳勃.喀斯特山区优质烟生产的水分需求特征研究[D].贵阳:贵州大学,2006.

[12] 朱大运,熊康宁,董晓超.贵州 1960—2016 年气温时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(4):168-173,180.

[13] 严小冬,孙翔,杨春艳,等.贵州近 50 a 来夏季不同等级强降水事件特征研究[J].贵州气象,2018,42(2):1-6.

[14] 莫建国,唐远驹,汪圣洪,等.贵州烤烟大田期可用日数与利用分析[J].中国烟草科学,2012,33(1):37-42.

[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.

空变化特征[J].农业工程学报,2009,25(1):11-15.

[19] 王菱,谢贤群,李运生,等.中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J].地理研究,2004,23(1):45-54.

[20] 刘波,马柱国.过去 45 年中国干湿气候区域变化特征[J].干旱区地理,2007,30(1):7-15.

[21] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等.基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J].地理研究,2017(7):47-58.

[22] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,等.中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J].生态学报,2017,37(9):2994-3008.

[23] 郭锐,朱燕君,王介民,等.近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J].植物生态学报, 2008,32(2):319-327.

[24] 张山清,普宗朝,韩勇,等.近 47 年哈密地区气候变化[J].气象科技,2009,37(5):560-566.

[25] 张喆,丁建丽,王瑾杰,等.新疆干旱区气溶胶间接效应区域性分析[J].中国环境科学,2016,36(12):3521-3530.