

贵州省淡季种植番茄灌溉量时空分布特征

龙星玥¹ 袁淑杰¹ 白爱娟¹ 邹双泽¹ 于飞² 彭映杰³ 谷晓平⁴

(1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225; 2 贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550002;

3 成都信息工程大学通信工程学院, 成都 610225; 4 贵州省生态气象和卫星遥感中心, 贵阳 550002)

摘要: 根据2011—2015年贵州省51个常规地面气象观测站逐日资料及自动土壤水分观测站资料, 利用农田土壤水分平衡方程, 计算了贵州省淡季番茄生育期灌溉量。简要分析了贵州省淡季番茄灌溉量的空间分布特征, 以及不同播种日期番茄灌溉量的时空变化特征; 同时利用Python语言对最小灌溉量播种日期进行EOF分析, 找到灌溉量最小播种日期及地区, 对增加贵州省淡季番茄产量及降低成本有指导性作用。

关键词: 贵州, 淡季, 番茄, 灌溉量, EOF

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.04.022

Temporal and Spatial Distribution of the Irrigation Volume of Tomatoes in Guizhou Province

Long Xingyue¹, Yuan Shujie¹, Bai Aijuan¹, Zou Shuangze¹, Yu Fei², Peng Yingjie³, Gu Xiaoping⁴

(1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Guizhou Institute of Mountainous Environment and Climate, Guiyang 550002

3 College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

4 Guizhou Center for Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing, Guiyang 550002)

Abstract: Based on the data of daily of meteorological stations (2011—2015) in Guizhou Province and automatic soil water observation station data, the irrigation volume of tomato in the off-season in Guizhou Province was calculated by using the farmland soil moisture balance equation. The spatial distribution characteristics of tomato irrigation volume in the off-season in Guizhou Province and the temporal and spatial variation characteristics of tomato irrigation volume in different planting dates were analyzed. Meanwhile, the Python language was used to carry out EOF analysis on the sowing date with minimum irrigation volume, so as to find out the sowing date and region with minimum irrigation volume, which has a guiding effect on increasing the output of tomatoes in the off-season of Guizhou Province and reducing the cost.

Keywords: Guizhou, off-season, tomato, irrigation, EOF

0 引言

灌溉量是植株生长发育过程中人为浇灌用水量, 是作物生长发育水分的主要来源之一。日照时数、风速、温度等通过蒸散作用决定作物蒸散量, 土壤种类影响土壤水分贮存量, 每个时期的降水量、作物蒸散量、土壤水分贮存量直接决定灌溉量大小。灌溉量时空分布研究在区划作物种植区的同时对作物灌水具有指示意义。贵州省位于云贵高原东部, 是亚热带湿润季风气候, 多持续性连阴雨、日照短、气温低, 其气候特点非常适合种植番茄^[1]。贵州属于典型的喀斯特地区, 生态环境极为脆弱且不稳定, 保水性能极差,

尽管降水量相对较多, 但常常造成土壤干旱, 影响作物生长发育^[2]。

番茄淡季产量较少, 在淡季种植番茄可以保障市场对番茄的需求量, 贵州特有的气候环境造就了番茄淡季种植条件。由于贵州喀斯特土壤特质决定了土壤持水量不高的特点, 水分是作物正常生长的主要制约因子, 所以要保障番茄在贵州淡季种植的正常生长发育, 就需要对贵州地区的灌溉量进行研究。

目前关于灌溉量的研究主要从以下两方面进行:

1) 对不同灌溉量影响植株生长发育速度及产量进行研究, 找出该植株最佳灌溉量。张坤等^[3-4]在新疆设置不同灌溉量的番茄种植试验田, 对番茄生长发育进行记录, 制定了适合干旱地区番茄生长最优灌溉指标; 马俊峰^[5]就不同灌溉量对番茄单果质量及单株产量影响进行试验记录, 得到番茄全生育期灌溉量变化特征; 王启龙等^[6]在陕西进行了不同灌溉方式对温室番

收稿日期: 2020年8月30日; 修回日期: 2021年4月14日

第一作者: 龙星玥(1995—), Email: 1139855483@qq.com

通讯作者: 谷晓平(1968—), Email: 16114331@qq.com

资助信息: 贵州省高层次创新人才培养[黔科合人才(2016)]4026号

茄生长及产量影响实验,得到采用滴灌和渗灌栽培的番茄产量高、灌溉量少、水分生产率高的结论。2)从植株作物需水量出发利用农田水分平衡公式计算灌溉量,建立农田灌溉量预测模型。沈岳等^[7]利用逐月降水量、作物田间需水量、实际灌溉量等资料建立农田灌溉量的BP神经网络预测模型,为当下灌溉量预测提供了精准预测模型;刘钰等^[8]利用1970—2000年逐日降雨量、日平均气温、日最高气温、日最低气温、风速、相对湿度、日照时数等资料计算得到中国不同地区灌溉需求指数,分析了不同作物灌溉量依赖程度。

从以上研究中可以发现,对不同等级灌溉量影响作物生长发育试验已经有了大量的分析研究。但是目前还没有对贵州省番茄淡季灌溉量的时空分布特征研究,因此,本文在对已有灌溉量的研究基础上,应用贵州省51个气象站2011—2015年逐日最低气温、最高气温、平均相对湿度、平均风速、平均日照时数资料和10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm深度的土壤容重、田间持水量、逐日土壤相对湿度资料及番茄生长发育资料,利用农田土壤水分平衡方程,对贵州省番茄淡季全生育期灌溉量的空间分布特征进行研究和探讨。

1 资料与方法

本文采用2011—2015年贵州省51个地面常规气象观测站逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数资料;贵州省51个自动土壤水分观测站10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm深度的土壤容重和田间持水量、逐日土壤相对湿度等资料均来自贵州省气象局。番茄标准作物系数采用联合国粮农组织推荐的标准,采用贵州区域蔬菜季节安排的番茄生育期。

1.1 番茄灌溉量

本文采用农田土壤水分平衡方程,计算番茄淡季灌溉量,农田土壤水分平衡方程如下:

$$(R+S_g+I)-(E_s+E_p+q_1+q_2)+W_h-W_k=0, \quad (1)$$

整理得到:

$$I=W_k-W_h+(E_s+E_p+q_1+q_2)-(R+S_g), \quad (2)$$

式中: I 为某时段内灌溉量, W_k 、 W_h 分别为该时段终止和开始时土壤水分贮存量, E_s 为土壤蒸发量, E_p 为作物蒸腾量, (E_s+E_p) 为作物蒸散量, q_1 为地表径流量, q_2 为地下径流量, R 为该时段内的降水量, S_g 为毛管水上升量。

本研究中 q_1 、 q_2 、 S_g 忽略不计, R 由逐日观测资料得到。

$$(E_s+E_p)=K_c \times ET_0, \quad (3)$$

式中: ET_0 为参考作物需水量, K_c 为作物系数(见表1)。

$$I=W_k+K_c \times ET_0-W_h-R. \quad (4)$$

1.2 土壤水分贮存量

土壤水分贮存量是指一定厚度(或深度)土壤总的含水量,计算公式如下:

$$W_k=\rho \times h \times w \times 10, \quad (5)$$

式中: W_k 为土壤水分贮存量(mm), ρ 为地段实测土壤容重(g/cm^3), h 为土层厚度(cm),三者皆由贵州自动土壤水分观测站观测得到。 w 为土壤重量含水率(%),即

$$w=RH \times f_{mc}, \quad (6)$$

式中: RH 为土壤相对湿度, f_{mc} 为田间持水量,二者都由贵州自动土壤水分观测站观测得到。

1.3 作物系数

根据联合国粮农组织推荐的标准作物系数,并结合贵州省番茄种植记录确定番茄各发育期天数,以及各发育期所对应的作物系数。番茄全发育期分为四个阶段,分别为:初始生长期、快速发育期、生育中期和成熟期。番茄全发育期各阶段天数及对应作物系数如表1所示。

表1 贵州番茄主要发育期作物系数

Table 1 Main crop coefficients of tomato at growth stage in Guizhou

	初始生长期	快速发育期	生育中期	成熟期
生长天数/d	30	40	40	25
作物系数	0.6	0.6	1.15	0.8

1.4 参考作物需水量

本文选取联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式进行计算作物需水量,公式如下:

$$ET_0=\frac{0.048\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T_{mean}+278}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}, \quad (7)$$

式中: ET_0 代表参考作物需水量, R_n 代表作物表面的净辐射量, G 代表土壤热通量, T_{mean} 代表日平均气温, u_2 代表2 m高处风速, e_s 代表饱和水汽压, e_a 代表实际水汽压, Δ 代表饱和水汽压曲线斜率, γ 代表干湿表常数。

1.5 淡季番茄播种日期

番茄是喜温类蔬菜,一般在6—7月采收,但是果菜类的育苗只要采取适当的防寒增温措施,即可提前育苗、栽培,在春淡季采收上市。夏秋季高温地区喜温的果菜类蔬菜缺口较大,市场供应紧张,从而形成了这些地区夏秋季节蔬菜供应的淡季。从贵州总体气候分析,蔬菜生产基本不存在冬淡季,但实际上由于

气候反常现象的出现,也会引起冬淡季出现。根据贵州地区蔬菜季节安排,番茄各淡季的播种期和供应期安排如表2。

表2 贵州番茄淡季播种日期及供应日期

Table 2 Planting date and supply date of tomatoes in off-season in Guizhou

季节	播种期	播种方式	供应期
春淡季	11-18—12-27	育苗	04-01—05-10
夏秋淡季	03-29—06-29	育苗	08-10—11-10
冬淡季	08-20—08-31	育苗	01-01—01-12

1.6 EOF 方法

经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, 简称EOF) 分析方法,最早在20世纪初由Pearson^[9]提出。EOF分析方法主要用于研究某物理量时空分布特征,其原理是将气象要素场的矩阵形式分解为空间函数和时间函数两部分^[10-11],进而提取少数的典型空间模态反映物理量的空间分布和时间序列特征。EOF分析方法能在有限区域对不规则的站点进行分解,而且展开收敛速度快,很容易将物理量场的信息集中在前几个模态上,更直观地反映物理量场的空间和时间分布特征。因此,本文引入EOF方法分析贵州省2011—2015年五年平均逐日灌溉量的时空分布特征。

2 淡季番茄灌溉量分布特征

本文根据贵州地区种植番茄季节安排,确定贵州省番茄种植有春、夏秋、冬淡季,及播种期和供应期;利用贵州2011—2015年51个自动观测站逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数,根据联合国粮农组织推荐的标准作物系数确定番茄各发育期的天数及所对应作物系数;利用51个贵州自动土壤水分观测站10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm深度的土壤容重和田间持水量、逐日土壤相对湿度,由公式(1)计算3个淡季番茄逐日灌溉量;将5年不同播种日期生育期灌溉量进行平均,采用反距离权重插值方法,利用python软件绘图分析。

2.1 番茄灌溉量空间分布特征

由贵州省2011—2015年淡季番茄生育期灌溉量5年平均空间分布(图1)可见:

1) 贵州省春淡季番茄生育期5年平均灌溉量为98~300 mm,大部分地区为140~300 mm,在三个淡季中灌溉量居中。由威宁向南部地区到达兴仁、安龙、册亨一带是灌溉量大值区,最大值280 mm出现在威宁。绝大部分地区都是灌溉量小值区,最小值98 mm出现在开阳地区。

2) 夏秋淡季全发育期5年平均灌溉量为180~400 mm,是三个淡季中灌溉量最大的淡季,最大

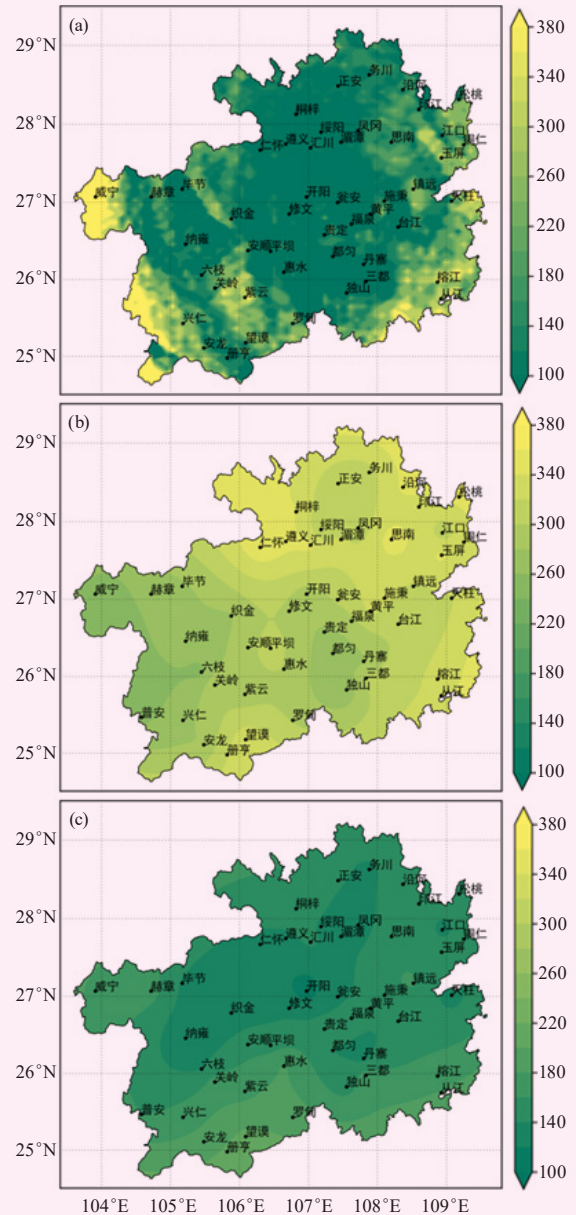


图1 贵州五年淡季番茄生育期平均灌溉量(单位: mm)
(a) 春淡季; (b) 夏秋淡季; (c) 冬淡季

Fig. 1 Average irrigation volume of tomato in five-year off-season in Guizhou (unit: mm)
(a) spring, (b) summer and autumn, (c) winter

值出现在偏北部仁怀、汇川、思南一带,达380 mm以上。春淡季的最大值区域在夏秋淡季是小值区,最小值186 mm出现在独山地区,其余大部分地区灌溉量都在220~300 mm左右。

3) 冬淡季全发育期5年平均灌溉量为103~220 mm,是三个淡季中灌溉量最小的淡季。整个省四周灌溉量相对高,大部分地区灌溉量介于180~200 mm,最大在望谟站,可达220 mm,中部及东部边缘灌溉量低,最小值103 mm出现在开阳站。

2.2 不同播种日期番茄灌溉量变化特征

2.2.1 灌溉量随播种日期的变化

为对比不同淡季番茄灌溉量的地区差异，对不同淡季灌溉量最大、最小以及中位数站点进行分析（图2）。春淡季选取是威宁、惠水和开阳站，这三个站点灌溉量随播种日期的推迟呈现增长趋势。灌溉量最大的威宁站的灌溉量变化幅度最大，达到66 mm，灌溉量最小的开阳站仅有42 mm。夏秋淡季选择仁怀、正安和独山站，三个站的灌溉量随播种日期的变化都呈现单峰型变化趋势，灌溉量最大的仁怀站的灌溉量变化幅度最大，高达82 mm，灌溉量最小的独山站，前后变化仅有27 mm。冬淡季选取是望谟、印江和开阳站，三个站点灌溉量随播种日期的推迟而递减，依旧是灌溉量最大的望谟站其灌溉量变化幅度最大，灌溉量最小的开阳站灌溉量变化幅度最小，冬淡季整体变化幅度都不大。

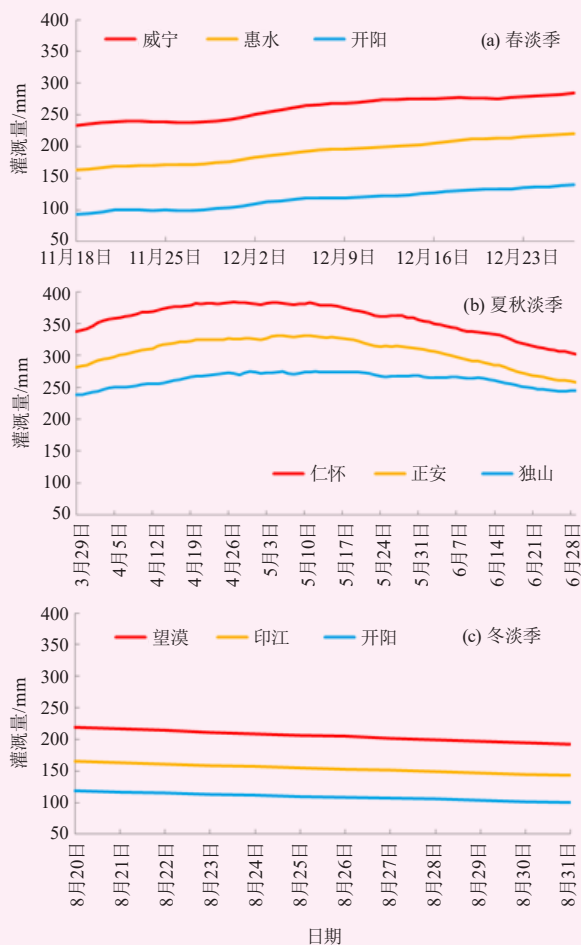


图2 三个站点淡季番茄全发育期平均灌溉量随播种日期变化 (单位: mm)

Fig. 2 Change of average irrigation volume during full growth period of tomato in off-season at three stations with sowing date (unit: mm)

2.2.2 灌溉量生育期的日变化

番茄的整个生育期（135 d）可以分为四个阶段：初始生长期（30 d），快速发育期（40 d），生育中期（40 d）和成熟期（25 d）。根据图2可以看到相同淡季下所选站点的番茄灌溉量随播种日期变化的趋势相同，故针对2.2.1中的站点，选取不同播种日期下番茄生育期灌溉量最小值、中位数和最大值的日期，将其左右连续的5日播种日期作为低、中、高值三个等级，分别计算各站点连续5日播种日期下逐日灌溉量平均值，分析番茄生育期内灌溉量的日变化。冬淡季适宜播种日期只有12 d，每个等级选取4 d（表3）。

表3 淡季灌溉量低、中、高值区的播种日期选取
Table 3 The sowing date of low, medium and high irrigation amount in off-season were selected

	低值区	中值区	高值区
春淡季/月.日	11.18—11.22	12.05—12.10	12.18—12.27
夏秋淡季/月.日	04.28—05.02	05.25—05.29	06.25—06.29
冬淡季/月.日	08.28—08.31	08.24—08.27	08.20—08.23

(1) 春淡季

分别计算选取站点对应播种日期的灌溉量，番茄全生育期内逐日灌溉量（图3）。春淡季灌溉量高值区和低值区，逐日灌溉量变化趋势基本相同，初始生长期和快速发育期变化不大，生育中期（70 d）急剧增涨，生育中期前期（10 d）增长幅度较大，中、后期呈现波动降低趋势，成熟期开始时灌溉量达到第二个高峰后逐渐降低。灌溉量大的威宁站其逐日灌溉

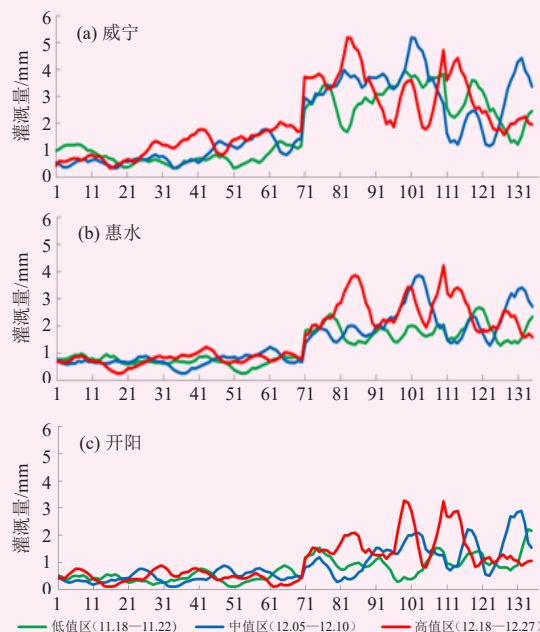


图3 贵州春淡季番茄全发育期灌溉量逐日变化 (单位: mm)
Fig. 3 Daily change of irrigation volume in full growth stage of tomato in Guizhou in spring off-season (unit: mm)

量差值较大，灌溉量小的开阳站其逐日灌溉量差值较小，且初始生长期和快速发育期逐日灌溉量变化较小，三个等级的逐日灌溉量趋于水平重合。

综上所述，可以看出：1) 春淡季番茄逐日灌溉量初始生长期和快速发育期相差不大，三个等级灌溉量逐日变化趋于水平重合；2) 逐日灌溉量生育中期开始有一个急剧增涨变化，生育中期灌溉量波动幅度较大，两次增涨三次降低；3) 逐日灌溉量成熟期开始再次增加达到第二个峰值后开始降低，成熟期中后期趋于水平；4) 三个等级逐日灌溉量变化相差不大，同期变化幅度在3 mm以下；5) 所有站点逐日灌溉量成熟期中后期中值区大于高值区，且有一个急剧增涨过程。

(2) 夏秋淡季

夏秋淡季番茄灌溉量的逐日变化(图4)与春淡季较为相似，都是在初始生长期和快速发育期逐日变化幅度较小，不同之处在于初始生长期和快速发育期中、低值区播种日期灌溉量高于高值区播种日期。与春淡季类似，夏秋淡季灌溉量在生育中期开始有一个大幅度增涨过程，从生育中期的中、后期开始降低，在成熟期期间灌溉量逐日变化较小。

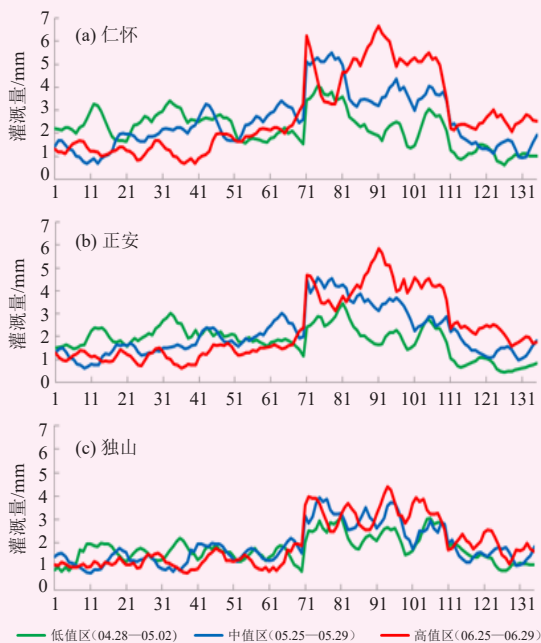


图4 贵州夏秋淡季番茄全发育期灌溉量逐日变化(单位: mm)
Fig. 4 Daily change of irrigation volume in full growth stage of tomato in Guizhou in summer and autumn off-season (unit: mm)

综上，得到以下结论：1) 番茄夏秋淡季灌溉量逐日变化呈现初始生长期和快速发育期变化幅度小，三个等级灌溉量逐日变化低值区高于高值区，相差较

大；2) 生育中期开始灌溉量急剧增涨，生育中期灌溉量波动幅度大，两次增涨两次降低；3) 成熟期开始灌溉量持续降低，在成熟后期趋于水平；4) 三个等级播种日下的灌溉量逐日变化相差较大，同期变化幅度在5 mm左右。

(3) 冬淡季

番茄冬淡季灌溉量的逐日变化(图5)与春淡季、夏秋淡季截然不同，从变化曲线上可以看出整体有两个峰值，分别位于初始生长期前期和生育中期前期，且高值区播种日期下的灌溉量峰值比中、低值区播种日期下滞后。整体趋势有两个递减过程，一个是从初始生长期开始到快速发育期结束，另一个是从生育中期开始到成熟期结束。整个生育期的逐日变化数值较小，同期变化幅度仅1.2 mm左右，是三个淡季中最小的。

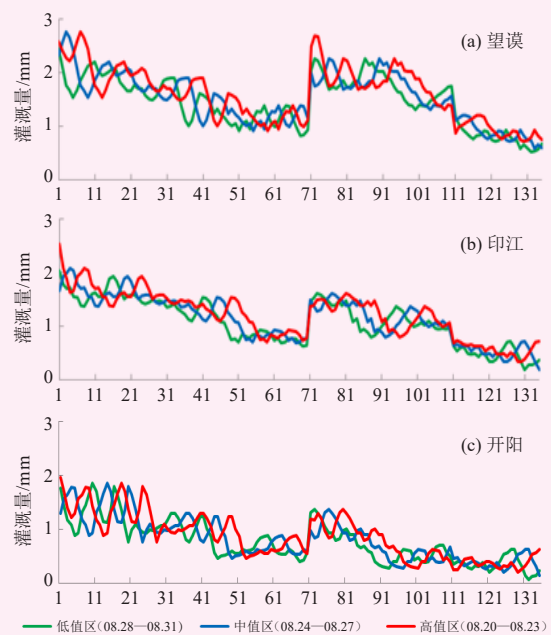


图5 贵州冬淡季番茄全发育期灌溉量逐日变化(单位: mm)
Fig. 5 Daily change of irrigation volume in full growth stage of tomato in Guizhou in winter off-season (unit: mm)

综上，可以得到以下结论：1) 冬淡季番茄灌溉量逐日变化有两个峰值，分别位于初始生长期(第10天)和快速发育期(第72~第81天左右)；2) 整个生育期内有分两个阶段的降低变化，一个是从初始生长期(第10天)开始到快速发育期(第70天)结束，另一个是从生育中期(第71天)开始到成熟期(第135天)结束；3) 整个生育期内三个等级的灌溉量逐日变化相差较小，整体形势趋于一致，同期变化幅度仅1.2 mm左右，是三个淡季中最小的。

2.2.3 灌溉量各发育期的变化

由2.2.2中分析可以看到，淡季番茄全发育期逐日

灌溉量呈现不同的变化趋势，对上文选取的站点分别统计低、中、高值三个等级播种日期下各发育期灌溉量，分析淡季番茄各发育期灌溉量变化。

(1) 春淡季

分别计算选取站点对应播种日期的灌溉量，番茄各发育期灌溉量（图6）。春淡季各发育期灌溉量在低、中、高值三个等级播种日期下变化相同，灌溉量在生育中期最大，成熟期次之，初始生长期最少。灌溉量最大的威宁站生育中期灌溉量平均占整个生育期的52%，成熟期灌溉量占24%，初始生长期灌溉量仅占8%左右；灌溉量最小的开阳站生育中期灌溉量平均占整个生育期的43%，成熟期灌溉量占30%，初始生长期灌溉量仅占10%左右。

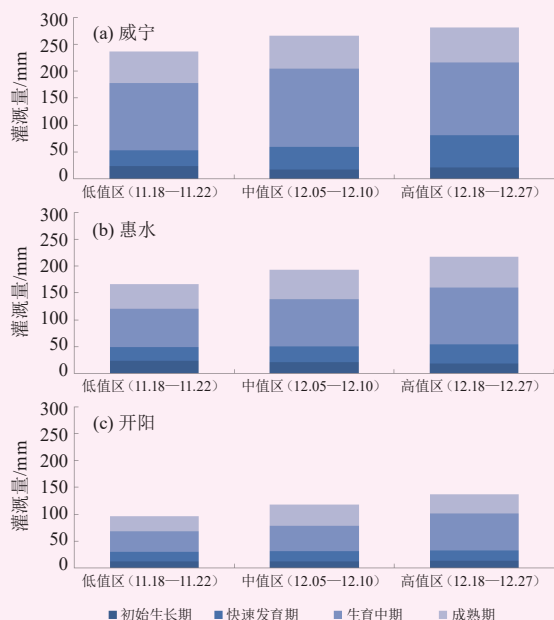


图6 贵州春淡季番茄各发育期灌溉量 (单位: mm)
Fig. 6 Irrigation volume of tomato growth stage in Guizhou spring off-season (unit: mm)

(2) 夏秋淡季

夏秋淡季番茄灌溉量各发育期变化（图7）与春淡季不同，夏秋淡季番茄灌溉量在生育中期最大，快速发育期次之，成熟期最少。灌溉量最大的仁怀站生育中期灌溉量平均占整个生育期的46%，快速发育期灌溉量占26%，成熟期灌溉量仅占12%左右；灌溉量最小的独山站生育中期灌溉量平均占整个生育期的46%，快速发育期灌溉量占23%，成熟期灌溉量仅占14%左右。

(3) 冬淡季

番茄冬淡季各发育期灌溉量（图略）在前三个发育期变化幅度不大，冬淡季番茄灌溉量在初始生长期最大，发育中期次之，成熟期最少。灌溉量最大的望

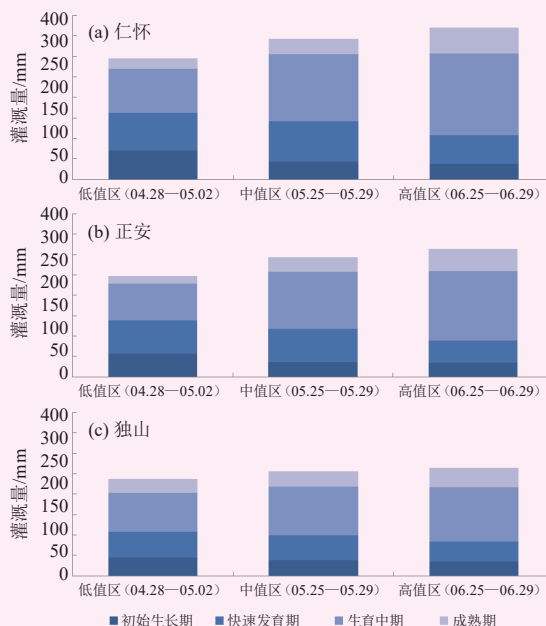


图7 贵州夏秋淡季番茄各发育期灌溉量 (单位: mm)
Fig. 7 Irrigation volume of tomato growth stage in Guizhou summer and autumn off-season (unit: mm)

漠站初始生长期灌溉量平均占整个生育期的32%，发育中期灌溉量占31%，成熟期灌溉量仅占8%左右；灌溉量最小的开阳站初始生长期灌溉量平均占整个生育期的36%，发育中期灌溉量占29%，成熟期灌溉量仅占8%左右。

3 番茄灌溉量EOF基本特征

为了进一步了解贵州淡季番茄灌溉量时空分布特征，引入EOF分析方法，将贵州2011—2015年5年平均逐日灌溉量的原始场进行经验正交分解，得到特征向量及对应的时间系数，对于每个特征向量场来说方差贡献率越大越能反映贵州这5年淡季番茄灌溉量的空间分布状况。第一特征向量反映了灌溉量的多年平均状态，其余特征向量可表征灌溉量可能出现的异常空间分布状态，对应的时间系数能够反映不同生育期对这种空间分布的贡献大小。

每一特征向量所对应的时间系数表征该特征向量所代表的空间分布的时间变化，时间系数的绝对值越大，对这种空间分布的贡献越大，这种空间分布也就越典型。从节约水资源的角度出发，本文针对每个淡季不同播种日期灌溉量进行分析，选取淡季番茄全生育期灌溉量最小的播种日期，对其进行逐日灌溉量EOF分析。

3.1 春淡季番茄灌溉量 EOF 分析

将春淡季番茄灌溉量低值区利用Python进行EOF分析（图8），低值区日期选择与2.2.2中的表3一致，

采用原始场直接分解。有以下结论：

(1) 由表4可以看出第一模态的方差贡献率高达88%，因此可以代表贵州省春淡季番茄灌溉量的主要分布特征。第一模态在贵州省范围内同符号（正值），由于第一模态反映空间分布的平均状态，说明贵州省春淡季番茄生育期灌溉量变化在空间分布上具

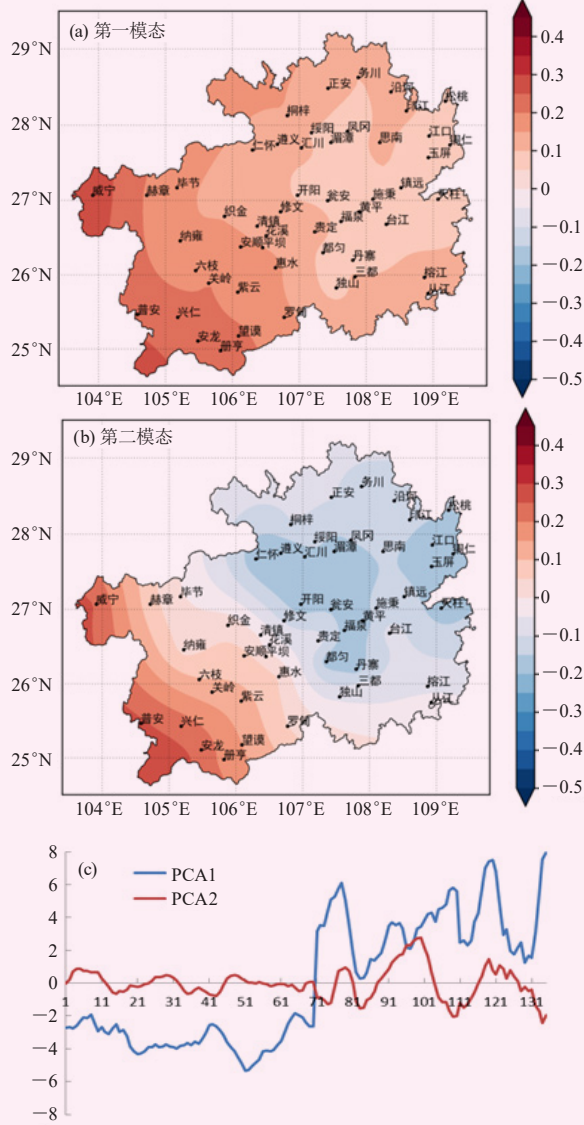


图8 贵州番茄春淡季全发育期灌溉量前两个模态(a, b)及对应时间系数序列(c)

Fig. 8 The first two modes (a, b) and corresponding time coefficient series (c) of irrigation volume the full growth stage of Guizhou tomato in spring off-season

表4 春淡季灌溉量前两个模态方法贡献率、累计方差贡献率
Table 4 Contribution rate and cumulative variance contribution rate of the first two modes of irrigation volume in spring off-season

	第一模态	第二模态
方差贡献率	88%	6%
累计方差贡献率	88%	94%

有高度一致性。灌溉量第一模态最大值在自威宁向东南移动到安龙、册亨一带，即同时期内这一带地区灌溉量最大。整体呈现西南高东北低的分布型式。由于第一模态在全区域均为正值，因此其对应时间系数为正值时，二者乘积为正表示灌溉量大值区，正值越大灌溉量越大，其对应时间系数为负值时，灌溉量小。在番茄全生育期的135 d中，有65 d的时间系数为正值，说明48%的时间里灌溉量的需求小，有70 d的时间系数为负值，说明52%的时间里灌溉量的需求大，需要着重关注。

(2) 春淡季番茄灌溉量第二模态的方差贡献率6%，零线经过毕节、清镇、惠水一带，零线以西为正值区，且越往西部数值越大，零线以东为负值区，随着东移数值增加。说明贵州省春淡季番茄灌溉量呈现东西部反相变化。第二模态最大值依旧在威宁、兴仁、安龙一带。番茄全生育期内时间系数最大值在生育中期（第96天），说明该时期零线以东地区灌溉量少，以西地区灌溉量大。时间系数为负值时零线以东地区灌溉量大，以西地区灌溉量少。

3.2 夏秋淡季番茄灌溉量 EOF 分析

夏秋淡季（图9）时间选取方式、计算方法与春淡季相同，且也表现为第一模态整个省为正值，但第一、二模态分布型与春淡季相反。可以看出：

(1) 夏秋淡季番茄灌溉量的第一模态的方差贡献率为85.6%（表5），可以代表贵州省夏秋淡季番茄灌溉量的主要分布特征。第一模态在贵州省范围内都为正值，由于第一模态反映空间分布的平均状态，说明贵州省夏秋淡季番茄全生育期灌溉量变化在空间分布上具有高度一致性。灌溉量第一模态最大值在东北部地区，即同时期内该地区灌溉量最大，整体呈现西南低东北高的分布型式。正值越大灌溉量越大，其对应时间系数为负值时灌溉量小。夏秋淡季在番茄全生育期的135 d中，初始生长期和快速发育期时间系数负值比例多，故贵州省内灌溉量需求小，在生育中期时间系数正值大，故东北部地区所需灌溉量达到最大值，西南部地区相对较小。

(2) 夏秋淡季番茄灌溉量第二模态的方差贡献率6.1%，零线经过毕节、清镇、惠水一带。零线以东为正值区，随着东移数值增加，零线以西为负值区，且越往西部数值越大，说明贵州省夏秋淡季番茄灌溉量呈现东西部反相变化。第二模态最大值在东北部的务川、沿河一带。番茄全生育期内时间系数最大值在初始生长期（第33天），说明该时期零线以东地区灌溉量大，以西地区灌溉量小。时间系数为负值时零线

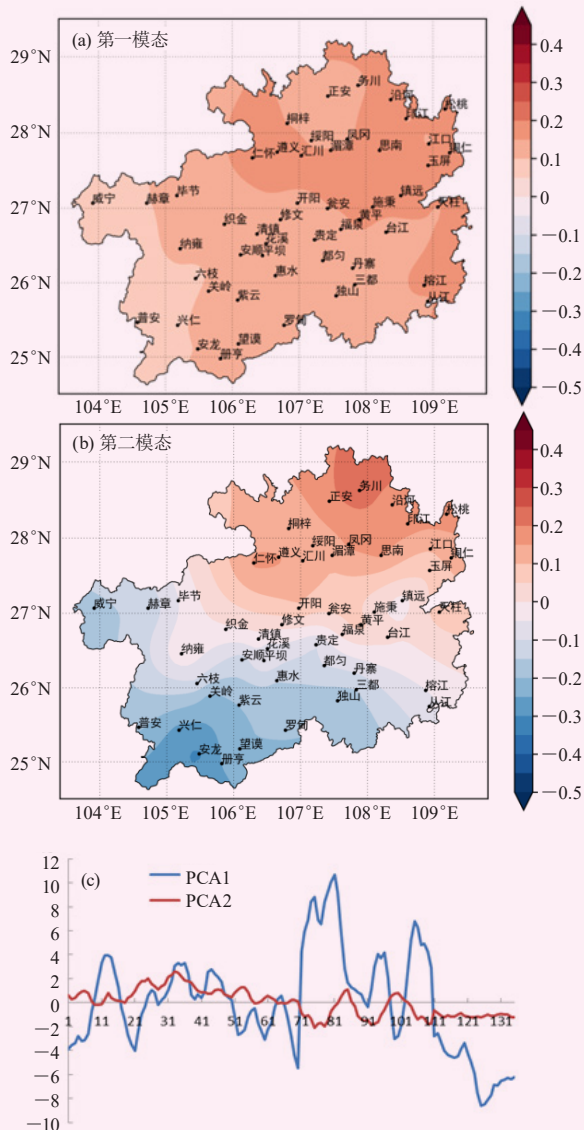


图9 贵州番茄夏秋淡季全发育期灌溉量前两个模态 (a, b) 及对应时间系数序列 (c)

Fig.9 The first two modes (a, b) and corresponding time coefficient series (c) of irrigation volume in the full growth stage of Guizhou tomato in summer and autumn off-season

表5 夏秋淡季灌溉量前两个模态方差贡献率、累计方差贡献率
Table 5 Contribution rate and cumulative variance contribution rate of the first two modes of irrigation volume in summer and autumn off-season

	第一模态	第二模态
方差贡献率	86%	6%
累计方差贡献率	86%	92%

以东地区灌溉量大，以西地区灌溉量少。

3.3 冬淡季番茄灌溉量 EOF 分析

冬淡季 (图10) 时间选取方式、计算方法与前面两个淡季相同，第一模态与春淡季、夏秋淡季相

似，整个区域为正值，相对数值最小；第二模态为东高西低形式，与夏秋淡季相似，与春淡季相反。可以看出：

(1) 冬淡季番茄灌溉量的第一模态的方差贡献率为84.9% (表6)，代表贵州省冬淡季番茄灌溉量的主要分布特征。第一模态在贵州省范围内都为正值，表示空间分布的平均状态，说明贵州省冬淡季番茄全生育期灌溉量变化在空间分布上具有高度一致性。最大值出现在遵义、清镇、惠水、望谟、册亨站点，正值越大灌溉量越大，其对应时间系数为负值时灌溉量小。冬淡季在番茄全生育期的135 d中，其时间系数随

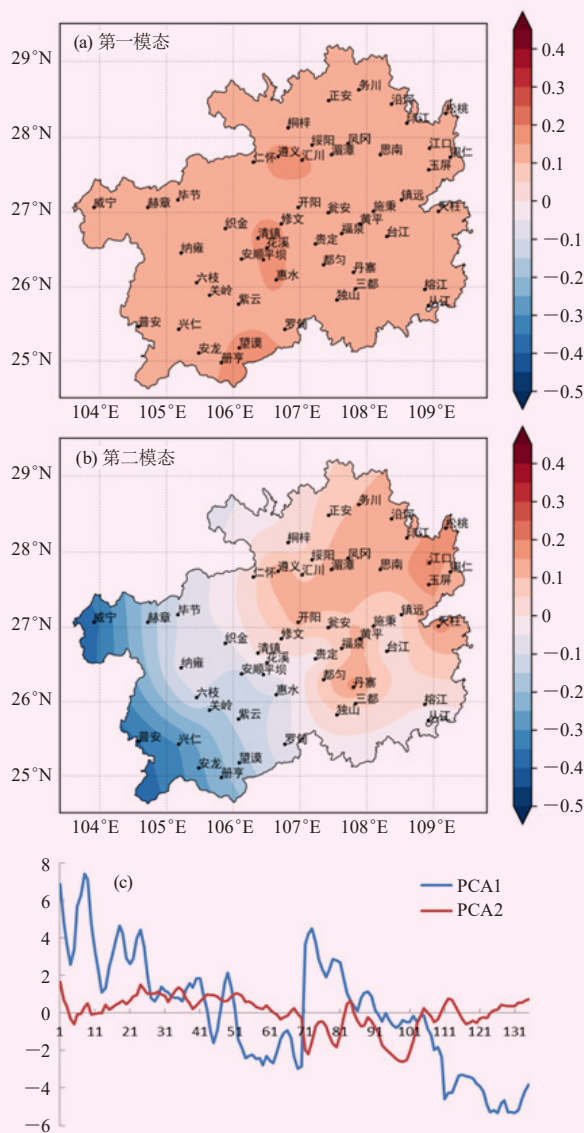


图10 贵州番茄冬淡季全发育期灌溉量前两个模态 (a, b) 及对应时间系数序列 (c)

Fig.10 The first two modes (a, b) and corresponding time coefficient series (c) of irrigation volume in the full growth stage of Guizhou tomato in winter off-season

表6 冬淡季灌溉量前两个模态方差贡献率、累计方差贡献率
Table 6 Contribution rate and cumulative variance contribution rate of the first two modes of irrigation volume in winter off-season

	第一模态	第二模态
方差贡献率	85%	8%
累计方差贡献率	85%	93%

时间的变化与冬淡季番茄全生育期内灌溉量逐日变化相似，都是在初始生长期（第10天）和生育中期（第71天）达到峰值后减小。

（2）冬淡季番茄灌溉量第二模态的方差贡献率为8.0%，零线经过清镇、贵定、都匀、独山一带。零线以东为正值区，随着东移数值增加，零线以西为负值区，且越往西部数值越大，说明贵州省冬淡季番茄灌溉量呈现东西部反相变化。第二模态最大值在东北部的江口、玉屏一带。番茄全生育期内时间系数最大值在初始生长期（第25天），说明该时期零线以东地区灌溉量大，以西地区灌溉量小。时间系数为负值时零线以东地区灌溉量大，以西地区灌溉量少。

4 结论与讨论

在贵州省冬淡季种植番茄灌溉量最小，仅为103~220 mm，春淡季次之为90~300 mm，夏秋淡季灌溉量最大，达到180~400 mm。所以在春淡季和冬淡季种植番茄降低种植成本的同时节约水资源，相应的在夏秋淡季种植番茄需要加强对番茄灌溉量的把控。赵晨曦等^[12]对贵州省淡季番茄需水量的时空分布研究也表明夏秋季番茄需水量较大，春冬季番茄需水量较小。

贵州省番茄灌溉量最低的播种日期是每年11月18—22日，4月28日—5月2日，8月28—31日，这些时期播种番茄可以在节约成本的同时确保春淡季、夏

秋淡季、冬淡季收获果实顺利上市。由淡季番茄全生育期灌溉量逐日变化可知，春淡季、夏秋淡季生育中期（01.26—01.30到03.05—03.10，07.06—07.10到08.14—08.19）灌溉量增大，冬淡季在初始生长期（08.28—08.31到09.26—09.29）和快速发育期（09.27—09.30到11.05—11.08）灌溉量最大，需要提前关注并做好应对措施。

运用EOF方法对贵州省番茄灌溉量的研究表明，春淡季呈西南高东北低分布型，最大值在自威宁向东南移动到安龙、册亨一带；夏秋淡季与春淡季相反，呈西南低东北高分布型，最大值在仁怀、施秉、从江以东北一带；冬淡季整体分布一致，只在望谟、清镇、惠水、遵义地区出现大值区。

参考文献:

- [1] 张波, 胡家敏, 谷晓平, 等. 基于气候适宜度的贵州番茄精细化农业气候区划. 北方园艺, 2018, (2): 193-198.
- [2] 袁淑杰, 何兴潼, 谷晓平, 等. 贵州喀斯特区域土壤湿度持续下降时期气象要素对土壤湿度影响研究. 土壤通报, 2018, 49(2): 320-328.
- [3] 张坤. 不同灌溉量和滴灌频率对加工番茄生长、产量和品质的调控效应. 石河子大学, 2018.
- [4] 张坤, 刁明, 张筱茜, 等. 不同灌溉量对不同加工番茄品种的产量和品质的影响. 园艺与种苗, 2018, 38(2): 1-6.
- [5] 马俊峰. 不同灌溉量对番茄产量和品质的影响. 西北园艺(综合), 2017, (2): 62-64.
- [6] 王启龙, 卢楠, 庞喆. 不同灌水方式对温室番茄土壤理化性状与产量的影响. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 36-39.
- [7] 沈岳, 曾文辉, 欧明文, 等. 基于BP神经网络的农田灌溉量预测. 农机化研究, 2015, 37(4): 36-39.
- [8] 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. 农业工程学报, 2009, (2): 6-12.
- [9] Pearson K. On lines and plans of closest fit to system of points in space. Philosophical Magazine, 1902, 6(2): 559-572
- [10] Bjornsson H, Venegas S A. A manual for EOF and SVD analyses of climatic data. In: CCGCR Rep. 97-1. Montreal: Center for Climate and Global Change Research, McGill University, 1997.
- [11] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 2004.