

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.021

基于灌溉需求指数的滇中地区烤烟需水量时空变化分析

符娜 李闯 刘艳伟 杨启良 刘小刚

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 基于云南省滇中地区4个国家气象站点逐日气象资料和烤烟不同生育期作物系数,根据FAO 56推荐的Penman-Monteith公式和单作物系数法,计算了滇中地区近58 a(1956—2013年)参考作物蒸发蒸腾量、烤烟净灌溉需水量及净灌溉需求指数,分析了滇中地区烤烟生育期净灌溉需水变异特征;利用GIS普通克里金法,对滇中地区烤烟需水量、净灌溉需水量和净灌溉需求指数进行空间分布分析;采用通径分析法研究灌溉需求指数变化成因。研究结果表明,滇中地区烤烟净灌溉需求指数随生育期变化逐渐减少,即伸根期、旺长期、成熟期;其中,净灌溉需求指数大于零的年数占54%,表明烤烟区在平水年条件下需人工灌溉补给;影响净灌溉需水量最主要的气象因子为降水量。

关键词: 烤烟; 滇中; 净灌溉需水量; 气候变化; 时空分布

中图分类号: S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0155-07

Temporal and Spatial Variation Analysis of Water Requirement of Tobacco in Middle of Yunnan Province Based on Irrigation Requirement Index

Fu Na Li Chuang Liu Yanwei Yang Qiliang Liu Xiaogang

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Spatio-temporal variation of crop water requirement and net irrigation requirement can provide theoretical basis for irrigation scheduling in different areas. The research was based on ground meteorological data from four national meteorological sites and crop coefficient at different growth stages of tobacco in the middle of Yunnan Province. The reference crop evapotranspiration, net irrigation requirement and net irrigation requirement index in the middle of Yunnan Province within 58 years (1956—2013) were calculated using the Penman-Monteith equation recommended by Food and Agriculture Organization in 1998. The water demand variation characteristics of tobacco during the growing season were analyzed. The spatial analysis of water demand, net irrigation requirement and net irrigation requirement index of tobacco was done by using the ordinary Kriging method of GIS. The results showed that as the change of tobacco's growing season, its net irrigation requirement index was gradually decreased. And the years with net irrigation requirement index which was larger than zero could be accounted for about 54% in the middle of Yunnan Province. It was indicated that tobacco needed artificial irrigation in normal years. The most positive and negative correlation factors for net irrigation requirement of tobacco was precipitation. Besides, the reference crop evapotranspiration, net irrigation requirement and net irrigation requirement index increased with latitude in the middle of Yunnan Province.

Key words: tobacco; middle of Yunnan Province; net irrigation requirement; climate change; temporal and spatial distribution

收稿日期: 2015-10-04 修回日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109102, 51379004, 51469010)

作者简介: 符娜(1990—), 女, 博士生, 主要从事水资源高效利用研究, E-mail: fnsnow@163.com

通信作者: 刘艳伟(1980—), 女, 副教授, 主要从事生态水文学及水土保持研究, E-mail: liu-xiaocao@sohu.com

引言

由于降水的时空分布不均,灌溉对我国大部分地区农业生产影响很大^[1]。中国水资源短缺的现状对农业生产用水提出了一个更高水平的要求,即在农作物用水总量不增加的前提条件下提高农业综合生产能力,以高效、节水为目标建设现代农业^[2]。目前针对不同区域作物需水量变化特征以及成因分析已有较多成果^[3-5]。顾世祥等^[6]采用 Mann-Kendall 趋势检验法和 R/S 分析法,根据作物种植、农业耕作、逐月气象数据等资料研究金沙江干热河谷地区近 40 a 的农业灌溉需水量转折变化趋势。王卫光等^[7]基于 1961—2010 年气象数据和 AadCM3 大气环流模式 A2 和 B3 两种情景下的统计降尺度模拟结果,模拟灌溉模式在淹水和间歇的两种情况下,气候变化对水稻需水量的影响。符娜等^[8]利用西南地区 38 个国家气象站点 1951—2012 年的逐日观测气象资料,基于 Penman 公式推算西南地区水稻需水量,分析了水稻在各个生育期需水量变异特征和灌溉需求指数变化。NKOMOZEPI 等^[9]采用 CROPWAT 模型对津巴布韦玉米的需水量和净灌溉需水量进行了分析预测。

云南是我国第一烟草大省,烟草总种植面积稳定在 33.33 万 hm^2 左右。在云南产烟区中,以玉溪、楚雄、昆明及元谋为主的滇中地区是云南省优质烟草的主产区。本世纪以来,云南大面积干旱对烤烟生长造成严重影响,烤烟产量出现下降趋势。烤烟的需水量在不同生育期呈现较大差异,在平水年沟

灌条件下,滇中地区烤烟灌溉用水定额为 1 500 ~ 1 650 m^3/hm^2 ^[10]。与 1970—1989 年相比,云南省烤烟种植区 2000—2010 年期间 4—9 月份平均气温增加 0.32 $^{\circ}\text{C}$ ^[11],全球气候变暖条件下的水资源危机在我国 21 世纪将更加严重。因此,掌握科学的烤烟灌溉需水规律有助于滇中地区水资源优化调度,为烤烟产业发展提供理论依据。

本文以烤烟为研究对象,基于 1956—2013 年滇中地区昆明、玉溪、元谋、楚雄 4 个气象站点逐日地面气象资料,结合 FAO Penman-Monteith (P-M) 方法、单作物系数法,计算并分析滇中地区烤烟需水量和灌溉需求指数的时空分布特征,同时根据通径分析方法研究灌溉需求指数变化成因,以期为滇中地区烤烟种植合理用水和制定科学水资源管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇中烤烟区位于云南省中部地区,包括昆明、玉溪、楚雄、元谋等地区,是云南省烤烟主产区。该区海拔高度为 2 300 ~ 2 600 m,面积为 670 万 km^2 。土壤类型主要为红壤、水稻土、紫色土。地区气候属低纬度高原山地季风气候,常年降雨分为雨旱两季,降水量分布极不均匀,夏季寡照低温,雨热同季,冬季温暖干燥。年平均气温为 5 ~ 25 $^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 1 020 mm,无霜期在 300 d 以上。表 1 为研究区土壤类型以及主要气象因子,其中,气象因子的数值为日均值。

表 1 滇中地区土壤类型及主要气象因子概况

Tab. 1 General situation of soil types and main climate factors in middle of Yunnan Province

地区	土壤类型	降水量/mm	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	气温/ $^{\circ}\text{C}$	日最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	日最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	日照时数/h
昆明	红壤	2.77	2.15	15.11	10.49	21.07	71.68	6.29
玉溪	赤红壤	2.55	1.71	16.11	11.33	22.86	73.86	5.85
楚雄	黄棕壤	2.31	1.69	16.03	10.85	22.42	69.51	6.09
元谋	燥红土	1.72	2.15	21.65	16.08	28.78	56.02	7.15

1.2 数据来源

所用气象数据为云南省烤烟区昆明、玉溪、楚雄、元谋 4 个地面气象站点 1956—2013 年逐日气象资料,数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>),包括日平均气温、日最低气温、日最高气温、日降水量、日平均相对湿度、日照时数、日平均水汽压和日平均风速等。

1.3 烤烟净灌溉需水量和灌溉需求指数

烤烟净灌溉需水量是烤烟农业生产中灌溉用水量的重要参考依据^[12]。某种作物的净灌溉需水量

是生育期内该作物需水量与有效降水量的差值。灌溉需求指数是净灌溉需水量与该作物需水量的比值,该指标反映了作物生长对灌溉的依赖程度,也在一定程度上反映了作物生长的旱涝情况^[13]。计算公式分别为

$$I_R = ET_c - P_e \quad (1)$$

$$I_{DI} = I_R / ET_c \quad (2)$$

式中 I_R ——作物日净灌溉需水量, mm/d

ET_c ——作物日需水量, mm/d

P_e ——日有效降水量, mm/d

I_{DI} ——作物灌溉需求指数

作物需水量是指满足自身正常生长发育并发挥作物全部生产潜力而蒸发蒸腾的全部水分^[14], 不仅包括烤烟本身生长的需水量, 还包括生长环境农田水气热状况对水分的需求量^[15]。烤烟需水量可以由实测土壤含水率经过水量平衡法计算得到, 也可由综合性的气候学方法推算得出。本文采用作物系数法计算烤烟日需水量^[16], 其计算公式为

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (3)$$

式中 ET_0 ——参考作物需水量, mm/d

K_c ——作物系数

参考作物需水量 ET_0 的计算方法采用 FAO 56 推荐的 Penman - Monteith (P - M) 公式^[17]。P - M 公式以能量平衡法和水汽扩散理论为基础, 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^[18]。计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

式中 Δ ——饱和水汽压与温度关系曲线在 T 处的切线斜率, kPa/°C

R_n ——冠层表面净辐射, MJ/(m²·d)

G ——土壤热通量, MJ/(m²·d)

γ ——干湿计常数, kPa/°C

T ——2 m 高度处平均温度, °C

U_2 ——2 m 高度处平均风速, m/s

e_a ——实际水汽压, kPa

e_d ——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 参照相关研究成果^[19], 并结合滇中地区烤烟生育期, 确定研究区烤烟生育期为 4—8 月份, 生育期分为伸根期、旺长期、成熟期, 作物系数多年平均值分别为 0.7、1.0、0.9。本研究结合式(3)和式(4), 根据逐日气象资料计算滇中地区烤烟各生育期逐日需水量, 并统计全生育期需水量。

烤烟有效降水量是指用于满足作物蒸发蒸腾量的那部分水量, 它不包括地表径流和渗漏至作物根部的水量^[20], 有效降水量在农业生产中是制定作物灌溉排水规划、灌溉制度、灌溉用水定额等指标的有效依据。而在实际作物生长过程中, 影响有效降水量的因素多而复杂, 本文采用美国农业部土壤保持局推荐使用的有效降水量计算方法^[21], 该方法是目前众多有效降水量计算方法中得到公认和普遍推广

的方法之一, 已有许多学者对其有效性进行研究证明^[22]。其计算公式为

$$P_e = \begin{cases} (4.17 - 0.2P_1)/4.17 & (P_1 < 8.3 \text{ mm/d}) \\ 4.17 + 0.1P_1 & (P_1 \geq 8.3 \text{ mm/d}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_1 ——日降水量, mm/d

1.4 通径分析

通径分析方法实质上是一种标准化的数据多元线性回归分析^[23], 当涉及到多个自变量与因变量之间的关系时, 找出自变量对因变量的直接影响效应和间接影响效应^[24], 此方法能够弥补简单相关分析与回归分析的单一化不足, 比较全面地反映自变量对因变量的影响程度^[25]。本文主要采用通径分析研究各气象因子对作物净灌溉需水量的影响程度。

1.5 数据处理

根据云南省滇中地区昆明、玉溪、楚雄、元谋站点 1956—2013 年逐日地面气象资料, 采用 Excel 对数据进行预处理, 根据 FAO 56 的 Penman - Monteith 公式和作物系数法计算烤烟的逐日参考作物需水量以及烤烟日需水量, 从而得出烤烟净灌溉需水量和净灌溉需求指数; 分析烤烟参考作物需水量和生育期内净灌溉需求指数时空变化特征; 同时借助 Matlab 7.0 软件对烤烟净灌溉需水量和部分气象因子的年际变化进行偏相关分析, 分析滇中地区烤烟净灌溉需求量与气象因子间的相关性。

2 结果与分析

2.1 滇中地区灌溉需求指数时间变化特征

滇中地区烤烟生育期为 4 月 27 日—8 月 24 日共 120 d, 其中, 伸根期为 4 月 27 日—5 月 26 日, 共 30 d; 旺长期为 5 月 27 日—6 月 25 日, 共 30 d; 成熟期为 6 月 26 日—8 月 24 日, 共 60 d。

伸根期正值滇中地区旱季, 降水量偏少, 可以从图 1a 中看出, 在烤烟伸根期的灌溉需求指数中 4 个地区的变化趋势较为一致, 且在研究期中指数大于零的年数较多, 说明在烤烟伸根期中烤烟生长比较缺水, 天然降水量不能满足其生长期所需水量, 需要人工灌水以满足生育期需水量。从图 1 中也可以看出, 昆明地区烤烟灌溉需求指数小于 -0.5 的年数较其他站点明显偏多, 说明昆明地区烤烟伸根期中旱季降水频率高, 烤烟缺水年数较少。图 1b 中给出了滇中地区烤烟旺长期灌溉需求指数年际变化。此生育期灌溉需求指数变化出现了差异。4 个地区的变化一致性变弱, 说明此生育期烤烟净灌溉需水量因地区不同而出现差异, 图中曲线可以看出指数在 0.5 以下的年数较为密集, 伸根期总体指数偏小, 这

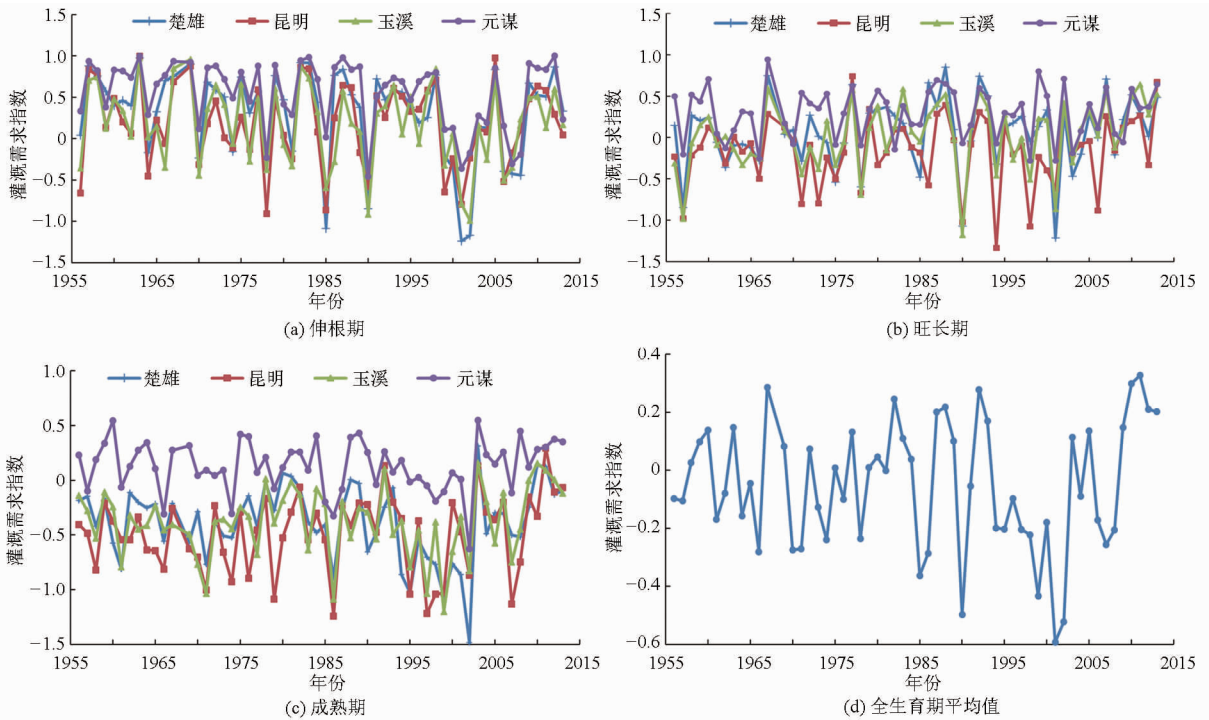


图1 滇中地区烤烟生育期灌溉需求指数年际变化趋势

Fig. 1 Variations of irrigation requirement index during tobacco growth period in middle of Yunnan Province

说明在烤烟旺长期的灌溉需水量需求变少,但昆明地区的极不缺水年数较其他地区多。图1c表示滇中地区烤烟在成熟期净灌溉需求指数的变化特征。楚雄、昆明、玉溪地区在此时期净灌溉需求指数均小于零,玉溪地区在1978、1992、2003、2010、2011、2012年指数大于零,并且数值均未超过0.16,可认为玉溪地区烤烟在成熟期天然降水基本能满足发育要求;但元谋地区的净灌溉需求指数则与其他3个站点表现出较大差异,该地区指数在多数年份大于零,且数值较大,这表明在烤烟成熟期,元谋地区烤烟处于缺水状态,天然降水量远不够生长发育需水量,需要人工灌溉;同时可以看出,成熟期中在2011年4个地区净灌溉需求指数出现了突变现象,往年不缺水的地区,在2011年时均出现了净灌溉需求指数由负值转正值,说明滇中地区2011年出现了大范围干旱情况。

图1d给出了滇中地区烤烟全生育期净灌溉需求指数年际变化。在1956—2013年之间,净灌溉需求指数波动较大,指数大于零的年数比例为54%,这表明滇中地区在平水年降水条件下,烤烟生长需要人工灌溉,否则会出现干旱缺水现象。

2.2 滇中地区烤烟需水量的空间分布特征

滇中地区烤烟需水量(ET_c)、净灌溉需水量(I_R)、灌溉需求指数(I_{DI})的空间分布特征见图2。滇中地区烤烟生育期需水量为288~429 mm,均值为326.44 mm,其中,滇中地区自南向北需水量逐渐增多,元谋地区烤烟需水量最大,为428.63 mm,玉

溪需水量最小,为288.57 mm。从图2a看出,滇中地区自南向北需水量增多趋势较为平缓,递增均匀;滇中地区因海拔高度、气候等因素不同,且烤烟生育期横跨干湿两季,因此整个地区的净灌溉需水量差异较大,但总体趋势和需水量变化相同,也是自南向北依次增加,但是需水量和净灌溉需水量在数值上差异明显,在59~267 mm之间,其中,元谋地区净灌溉需水量最大为268.17 mm,昆明地区净灌溉需水量最小为59.69 mm,平均值为123.83 mm。从图2b看出,滇中北部地区元谋净灌溉需水量变化较为明显,变化梯度也变密集,但昆明地区和玉溪地区因需水量几乎相等,烤烟净灌溉需求指数在-0.24~0.28之间,均值为-0.05,这说明在1956—2013年计算时期中,滇中地区烤烟生育期天然降水不能够满足作物生长需求,需要人工灌溉,其中,元谋地区净灌溉需求指数最大,为0.28,昆明地区值最小,为-0.23,尽管分布区间与净灌溉需水量有相同之处,但是昆明地区的灌溉需求指数比玉溪地区小。

2.3 气象因子对烤烟净灌溉需水量的通径分析

在通径分析中,首先计算9个气象因子(降水量、气压、风速、气温、水汽压、相对湿度、日照时数、日最低气温、日最高气温)对净灌溉需水量(I_R)的通径系数 P ,再根据通径分析方法,求解各个气象因子对 I_R 关于通径系数的矩阵方程组,计算各气象因子对 I_R 的直接作用(直接通径系数)和间接作用(间接通径系数),如表2、3所示。

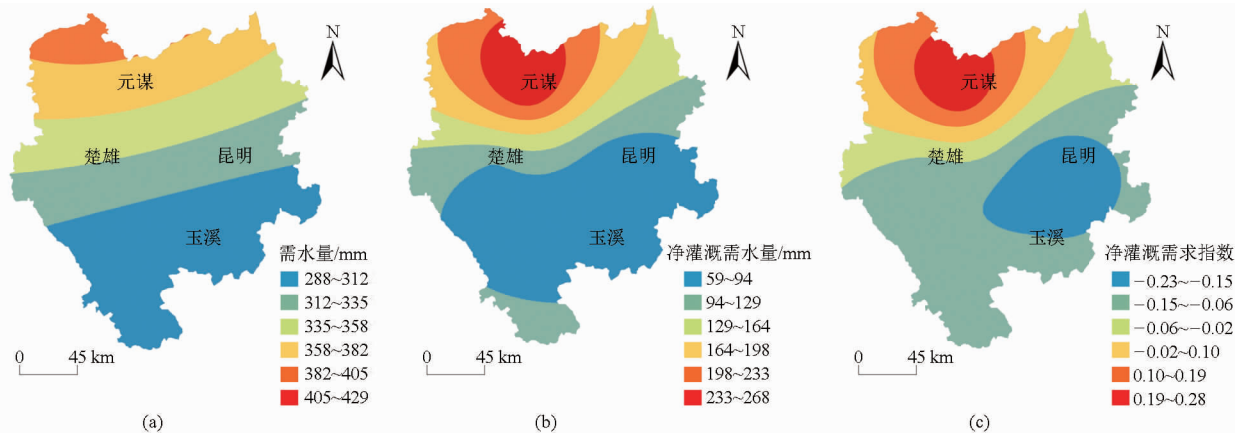


图2 滇中地区烤烟需水量、净灌溉需水量和灌溉需求指数的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of yearly water requirement, net irrigation requirement and irrigation requirement index of tobacco in middle of Yunnan Province

表2 气象因子对烤烟净灌溉需水量的直接途径系数

Tab. 2 Direct path coefficients of meteorological factors and net irrigation requirement of tobacco in middle of Yunnan Province

项目	降水量	气压	风速	气温	水汽压	相对湿度	日照时数	日最低气温	日最高气温	净灌溉需水量
<i>P</i>	-0.30	0.11	0.29	-0.30	0.26	-0.79	0.20	-0.04	0.15	1.00

表3 气象因子对烤烟净灌溉需水量的通径分析结果

Tab. 3 Path analysis result between meteorological factors and net irrigation requirement of tobacco in middle of Yunnan Province

项目	降水量	气压	风速	气温	水汽压	相对湿度	日照时数	日最低气温	日最高气温	净灌溉需水量
降水量	-0.30	0.03	-0.18	0.17	0.17	-0.56	-0.10	0.01	-0.10	-0.88
气压	-0.07	0.11	-0.14	0.08	0.07	-0.27	0.01	0.01	-0.05	-0.26
风速	0.19	-0.05	0.29	-0.13	-0.15	0.43	0.12	-0.01	0.08	0.77
气温	0.17	-0.03	0.13	-0.30	-0.10	0.68	0.06	-0.03	0.14	0.72
水汽压	-0.19	0.03	-0.16	0.11	0.26	-0.61	-0.10	0.01	-0.07	-0.74
相对湿度	-0.21	0.04	-0.16	0.26	0.20	-0.79	-0.08	0.02	-0.13	-0.86
日照时数	0.16	0.01	0.17	-0.10	-0.13	0.33	0.20	0.01	0.07	0.70
日最低气温	0.06	-0.03	0.05	-0.24	0.02	0.41	-0.02	-0.04	0.09	0.31
日最高气温	0.20	-0.04	0.15	-0.29	-0.13	0.71	0.09	-0.02	0.15	0.83

表2为气象因子对净灌溉需水量的直接途径分析,可知风速对IR的途径系数为0.29,在各项指标中最大,相对湿度的途径系数最小,为-0.79,直接途径系数由大到小排列为:风速、水汽压、日照时数、日最高气温、气压、日最低气温、降水量、相对湿度。表3为气象因子对净灌溉需水量的通径分析结果,可得出日最高气温通径系数为0.83,在各气象因子中最高,同时也是对IR影响最大的指标;风速对IR的途径系数为0.77,在各项指标中为次大,说明风速也是影响IR的重要因子,气温对IR途径系数为0.72,说明气温也对IR具有重要影响作用,当途径系数大于零时表明该气象因子与净灌溉需求指数正相关,说明此气象因子是引起净灌溉需水量变大的因素之一。降水量对IR途径系数为-0.88,在各气象因子中最小,相对湿度对IR途径系数为-0.86,

在各气象因子中对IR途径系数为次小,当气象因子对IR途径系数小于零时,表明该气象因子与净灌溉需求指数负相关,表示该气象因子是影响净灌溉需水量变小的因素之一,综上所述,滇中地区气象因子与烤烟净灌溉需水量负相关影响从大到小依次为:降水量、相对湿度、水汽压、气压;正相关影响从大到小依次为:日最高气温、风速、气温、日照时数、日最低气温。由各气象因子之间的相互影响、相互制约得知,IR变化不只受单一气象因子影响,而是受各气象因子共同作用。

3 讨论

影响净灌溉需求指数的因素较为复杂,马林等^[26]和顾世祥等^[27]从作物播种面积、种植制度、海拔高度、种植区域等影响要素研究净灌溉需求指数、

净灌溉需水量,发现研究区域太行山山前平原一带灌溉需水量比其他地区高,沿海区域及东部地区灌溉需水量相比于平原地区低,降水量是影响灌溉需水量的主要驱动因子。而本文从气象角度出发,明确滇中地区烤烟不同生育期净灌溉需求指数影响因素,得出灌溉需求指数随着纬度的增加,烤烟需水量、净灌溉需求水量和净灌溉需求指数逐渐增加,原因是随着海拔高度的增加,烤烟蒸发蒸腾量较大,且滇中地区降水量随着纬度增加减少,并且元谋地区处于干热河谷地区,植物的蒸发蒸腾量普遍相对于其他区域较高,这与郑东方等^[16]对云南烤烟需水量和净灌溉需求指数时空特征研究的结果相同。

现阶段针对滇中,甚至云南烤烟需水规律研究都非常少,主要研究多分布在河南烤烟种植区。本文仅从净灌溉需求指数出发,研究滇中地区烤烟在不同生育期内,在气候变化条件下的需水变化规律,若是能将烤烟干旱指数和烤烟净灌溉需求指数、烤烟净灌溉需水量结合在一起,则可以将滇中地区烤烟种植划分干旱等级,这样可以为滇中地区烤烟在不同生育期灌溉用水、科学用水提供理论支持。

4 结论

(1)1956—2013年滇中地区,随着烤烟的生长,其各生育期净灌溉需求指数总体减小,这是因为随着烤烟的生长逐渐进入滇中雨季,降水量逐渐增多,日照时数减少,所以在烤烟的成熟期,净灌溉需求指数最低,除元谋地区外其他3个站点的天然降水基

本满足烤烟生长需水要求。

(2)在烤烟生长的根伸期、旺长期、成熟期,烤烟净灌溉需求指数随生育期变化逐渐减小,即伸根期 > 旺长期 > 成熟期。此外,4个地区烤烟净灌溉需求指数变化趋势较为一致,这表明滇中地区烤烟生长受气象因素变化较为明显,在58 a计算期中,滇中地区烤烟全生育期净灌溉需求指数大于零的年数占54%,表明烤烟区在平水年条件下需人工灌溉补给。

(3)在滇中地区烤烟需水量、净灌溉需水量、净灌溉需求指数空间分析中,需水量最大的元谋地区为428.63 mm,最小的玉溪地区为288.57 mm;净灌溉需水量最大的元谋地区为268.17 mm,最小的昆明地区为59.69 mm;净灌溉需求指数最大的元谋地区为0.28,最小的昆明地区为-0.20。表明随着纬度增加,烤烟需水量、净灌溉需水量、净灌溉需求指数均增大。

(4)在各气象因子对烤烟净灌溉需水量的通径分析中,与烤烟净灌溉需水量最大正相关的气象因子为日最高气温,通径系数为0.83,最大负相关的气象因子是降水量,通径系数为-0.88;最高气温和降水量是引起滇中地区烤烟净灌溉需求指数变化最主要的气象因子,其他正相关因子依次是风速、气温、日照时数、日最低气温;负相关影响因素依次为相对湿度、水汽压、气压。综上得出影响滇中地区烤烟净灌溉需水量最主要的气象因子为降水量。

参 考 文 献

- 1 中国农业百科全书农业气象卷编辑委员会. 中国农业百科全书农业气象卷[M]. 北京:农业出版社,1986.
- 2 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[J]. 农业工程学报,2009,25(12):6-12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6-12. (in Chinese)
- 3 杨艳昭,张伟科,封志明,等. 干旱条件下南方红壤丘陵地区水分平衡[J]. 农业工程学报,2013,29(12):110-119.
YANG Yanzhao, ZHANG Weike, FENG Zhiming, et al. Water balance in red soil hilly regions of Southern China under drought climate situations[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 110-119. (in Chinese)
- 4 周玉良,周平,金菊良,等. 基于供水水源的干旱指数及在昆明干旱频率分析中应用[J]. 水利学报,2014,45(9):1038-1047.
ZHOU Yuliang, ZHOU Ping, JIN Juliang, et al. Establishment of hydrological drought index based on sources of regional water supply and its application to drought frequency analysis for Kunming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9): 1038-1047. (in Chinese)
- 5 黄会平. 1949-2007年全国干旱灾害特征、成因及减灾对策[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(11):94-98.
HUANG Huiping. Characteristics and causes of drought in China from 1949 to 2007[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(11): 94-98. (in Chinese)
- 6 顾世祥,何大明,李远华,等. 金沙江河谷灌溉需水转折趋势分析[J]. 水科学进展,2008,19(3):352-360.
GU Shixiang, HE Daming, LI Yuanhua, et al. Agriculture irrigation water requirements change and R/S analysis of Jinshajiang dry-arid valley in recent 40 years[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 352-360. (in Chinese)
- 7 王卫光,孙凤朝,彭世彰,等. 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(14):90-98.
WANG Weiguang, SUN Fengchao, PENG Shizhang, et al. Simulation of response of water requirement for rice irrigation to climate change[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 90-98. (in Chinese)

- 8 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.
FU Na, LIU Xiaogang, ZHANG Yan, et al. Variation pattern of rice irrigation water requirement in southwest of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(7):1895-1901. (in Chinese)
- 9 NKOMOZEPI Temba, CHUNG Sang-Ok. Assessing the trends and uncertainty of maize net irrigation water requirement estimated from climate change projections for Zimbabwe[J]. Agricultural Water Management, 2012, 111:60-67.
- 10 李宝贵,彭世祺. 1998-2007年中国农业用水报告[M]. 北京:中国农业出版社, 2009.
- 11 黄中艳,张明达. 云南烤烟种植气候变化及其影响研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2013,38(7):107-112.
HUANG Zhongyan, ZHANG Mingda. Influences of climate change on planting flue-cured tobacco and tobacco quality in Yunnan [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science, 2013, 38(7):107-112. (in Chinese)
- 12 刘小刚,符娜,李闯,等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J]. 农业机械学报,2015,46(9):188-197.
LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):188-197. (in Chinese)
- 13 刘玉春,姜红安,李存东,等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. 农业工程学报,2013,29(19):98-104.
LIU Yuchun, JIANG Hong'an, LI Cundong, et al. Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei Province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19):98-104. (in Chinese)
- 14 刘宏谊,马鹏里,杨兴国,等. 甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(1):39-44.
LIU Yihong, MA Pengli, YANG Xingguo, et al. Temporal and spatial analysis of the water requirements of major crops in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1):39-44. (in Chinese)
- 15 山仑,黄占斌,张岁岐. 节水农业[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- 16 郑东方,许嘉阳,卢秀萍,等. 云南省烤烟需水量及灌溉需水量指数的时空特征[J]. 应用生态学报,2015,26(7):2091-2098.
ZHENG Dongfang, XU Jiayang, LU Xiuping, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of flue-cured tobacco water requirement and irrigation requirement index in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7):2091-2098. (in Chinese)
- 17 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. 农业工程学报,2009,25(8):28-34.
HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, QU Huihui, et al. Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8):28-34. (in Chinese)
- 18 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
- 19 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京:中国水利电力出版社,1995.
- 20 刘战东,段爱旺,肖俊夫,等. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报,2007,26(3):27-34.
LIU Zhandong, DUAN Aiwang, XIAO Junfu, et al. Research progress on calculation methods of effective rainfall in growing period on dry crop[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(3):27-34. (in Chinese)
- 21 SMITH M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management[R]. Rome: FAO, 1992.
- 22 孙懿慧,贺立源. 基于GIS多源数据融合的湖北省中稻增产潜力研究[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊):133-141.
SUN Yihui, HE Liyuan. Yield-increasing potential of middle-season rice in Hubei Province based on GIS and multi-source data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.):133-141. (in Chinese)
- 23 魏清顺,孙西欢,刘在伦. 导流器几何参数对潜水泵性能影响的通径分析[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(3):202-207.
WEI Qingshun, SUN Xihuan, LIU Zailun. Path analysis of effects of diffuser geometric parameters on performance of submersible pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(3):202-207. (in Chinese)
- 24 冯禹,崔宁博,魏新平,等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14):78-86.
FENG Yu, CUI Ningbo, WEI Xinping, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14):78-86. (in Chinese)
- 25 蔡甲冰,刘钰,许迪,等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. 水利学报,2008,39(1):83-90.
CAI Jiabing, LIU Yu, XU Di, et al. Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1):83-90. (in Chinese)
- 26 马林,杨艳敏,杨永辉,等. 华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素[J]. 遥感学报,2011,15(12):6-12.
MA Lin, YANG Yanmin, YANG Yonghui, et al. The distribution and driving factors of irrigation water requirements in the North China Plain[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(12):6-12. (in Chinese)
- 27 顾世祥,何大明,崔远来,等. 近50多年来澜沧江流域农业灌溉需水的时空变化[J]. 地理学报,2010,65(11):1355-1362.
GU Shixiang, HE Daming, CUI Yuanlai, et al. Variations of agricultural water requirements in Lancang River Basin in last 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(11):1355-1362. (in Chinese)