

豫西烤烟大田期需水量和灌溉需水量的时空变化及其原因分析

蔡涛^{1,2} 王国安^{1,3}

(1 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003; 2 河南省三门峡市气象局, 三门峡 472000; 3 河南省气象探测数据中心, 郑州 450003)

摘要: 基于河南省西部9个烤烟种植县1970—2019年烤烟大田生育期逐日气象资料, 使用Penman-Monteith公式计算得到研究区需水量, 使用有效降水系数法得到有效降水量, 继而得到灌溉需水量, 并利用气候倾向率法、趋势系数法、Morlet小波分析和偏相关系数法对需水量和灌溉需水量进行时空变化特征分析及气象影响因子分析。结果表明:1970—2019年豫西烤烟大田期降水量和有效降水量多年平均值分别为425.1 mm、309.3 mm, 并以1.15 mm/10 a和1.752 mm/10 a的速率呈上升趋势。需水量和灌溉需水量多年平均值分别为473.7 mm、167.5 mm, 并以-8.436 mm/10 a和-10.188 mm/10 a的速率呈显著性下降趋势; 小波分析显示需水量和灌溉需水量存在25 a和17 a的变化主周期。空间分布上需水量和灌溉需水量整体呈由南部向北部递增的特征, 高值区主要分布在三门峡和渑池, 低值区主要分布在栾川、卢氏和嵩县。气候要素变化偏相关分析表明日照时数下降是导致研究区烤烟需水量和灌溉需水量下降的主要气象因子。

关键词: 烤烟, 需水量, 灌溉需水量, 时空变化, 影响因子

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.023

Spatiotemporal Variation of Water Supply and Demand During the Field Period of Flue-Cured Tobacco in Western Henan Province and Its Causal Analysis

Cai Tao^{1,2}, Wang Guoan^{1,3}

(1 CMA Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Application Technique, Zhengzhou 450003
2 Sanmenxia Meteorological Office, Sanmenxia 472000 3 Henan Meteorological Observation Data Center, Zhengzhou 450003)

Abstract: Based on the daily meteorological data of 9 flue-cured tobacco growing counties in western Henan Province from 1970 to 2019, the water requirement was calculated by Penman-Monteith formula. In addition, the effective precipitation of flue-cured tobacco fields in the study area was calculated by effective precipitation coefficient method and then the irrigation water demand was obtained. The temporal and spatial variation characteristics of water requirement and irrigation water demand as well as meteorological influencing factors were analyzed by the use of climate trend rate method, trend coefficient method, Morlet wavelet analysis and partial correlation analysis. The results showed that from 1970 to 2019, the annual average precipitation and effective precipitation during the field period of flue-cured tobacco in western Henan Province were 425.1 mm and 309.3 mm, respectively, and both of the two maintained an upward trend at a rate of 1.15 mm/10 a and 1.752 mm/10 a, respectively. The annual average water requirement and irrigation water demand were 473.7 mm and 167.5 mm and showed a very significant downward trend at a rate of -8.436 mm/10 a and -10.188 mm/10 a respectively. The wavelet analysis showed that the water requirement for flue-cured tobacco and irrigation water demand had a main change period of 25 years and 17 years, and they increased progressively from the south to the north from the perspective of spatial distribution, with the high value areas mainly distributed in Sanmenxia and Mianchi and the low value areas in Luanchuan, Lushi and Songxian. Partial correlation analysis of climate factor change showed that the decrease of sunshine hours was the main meteorological factor leading to the decrease of flue-cured tobacco water requirement and irrigation water demand in the study area.

Keywords: flue-cured tobacco, water requirement, irrigation water demand, spatiotemporal variation, influencing factor

收稿日期: 2021年6月31日; 修回日期: 2021年10月8日

第一作者: 蔡涛(1981—), Email: 122074659@qq.com.

资助信息: 三门峡市气象局气象科学技术研究项目 (SQ202102)

0 引言

近百年以来, 气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化^[1]。IPCC指出, 近百年以来全球平均气温升高0.74 °C, 且近50年升温率是过去100年的2倍^[2],

迄今为止,地球的温室效应比历史上任何一个时点都更加严重^[3]。研究表明,气候变化已经使得作物参考蒸散量和需水量都发生了明显变化,但不同区域、不同作物变化存在差异^[4],21世纪全球气候变暖条件下的水资源危机在我国将更加严重,水资源不足已经成为制约我国农业生产和发展的主要因素。

近年来有不少专家学者对气象变化条件下作物需水量变化规律进行了相关研究^[5-7]。刘小刚等^[8]分析了河南省主粮作物需水量和灌溉需求指数时空分布特征和变化趋势,并使用通径分析法分析了需水量的变化成因;黎世民等^[9]用作物系数法计算了河南省葡萄需水量,分析了其年际变化趋势和主要影响因子;针对烤烟需水量的研究,冷璐等^[10]通过田间试验研究了烤烟不同生阶段的需水特征,表明烤烟生长季内需水量具有明显的阶段性;郑东方等^[11]利用Penman-Monteith公式对云南省烤烟需水量时空变化及灌溉指数进行了系统研究,结果表明,云南省烤烟大田期多年平均需水量为528.18~764.08 mm,且呈逐年减少趋势;张波等^[12]分析了1961—2015年贵州省烤烟的水分供需变化特征,得出其大田期多年平均有效降水量和需水量分别为152.8~284.8 mm、332.5~412.6 mm,烤烟在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。目前,针对河南省区域内烤烟水分供需特征的研究却不多见。在需水量计算方法方面,联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式法,考虑了影响蒸散的大气物理特性和植物生理机制,具有很好的物理基础,被广泛应用^[13]。

河南省西部(以下简称豫西)地处秦岭山脉东延与伏牛山、熊耳山、崤山交汇地带,海拔高度300~1600 m,属山地丘陵地貌,山地、丘陵面积占总面积的90%以上^[14],跨长江、黄河两大流域,土壤富含有机质和磷、钾等微量元素,适宜优质烤烟的种植,是河南省烤烟主产区。2019年豫西地区烤烟种植面积为3.44万hm²,占河南省烤烟总种植面积的40%;总产量为8.56万t,占河南省烤烟总产量的38%^[15]。本研究基于豫西地区烤烟种植县9个气象站1970—2019年的逐日气象数据和2017—2019年土壤水分自动站水分贮存量数据,结合Penman-Monteith公式和作物系数法计算烤烟大田期需水量和灌溉需水量,以此分析豫西地区烤烟大田期的水分供需时空特征,为烤烟种植布局以及水资源合理利用提供科学参考,也为气候变化背景下的节水灌溉和农田水利工程规划提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源

使用了豫西烟区卢氏、灵宝、三门峡、渑池、洛宁、栾川、嵩县、宜阳、新安共9个气象站点(空间分布见图1)1970—2019年逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、平均风速、日照时数数据、2017—2019年土壤水分自动站水分贮存量数据、以及各站点的经纬度和海拔高度等信息,上述数据均来自于河南省气象档案馆。豫西烤烟大田期起止时间依据吴璐等^[16]的研究结果定为5月10日—9月20日。

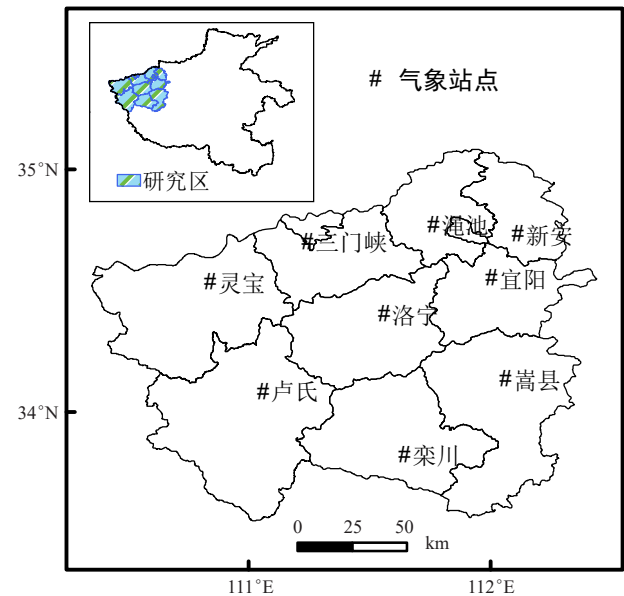


图1 豫西烤烟种植区气象站点分布

Fig. 1 The distribution of weather stations in flue-cured tobacco growing area in western Henan Province

1.2 计算方法

1) 烤烟需水量

烤烟需水量是指满足烤烟生长并发挥全部生产潜力而蒸发蒸散的水分总量,其生育期内需水量由生育阶段内逐日需水量累加得到。需水量使用FAO推荐的作物系数法计算求得,计算公式如下:

$$ET_c = K_c \times ET_0, \quad (1)$$

式中, ET_c 为作物需水量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); K_c 为作物系数,受作物生长期、种类、生育期、叶面积指数、地域差异等各方面的影响,不同环境下作物系数有所差别,作物系数反映的是作物本身的生物学特性对作物需水量的影响^[17]。采用FAO推荐的分段单值平均作物系数法^[18],确定烤烟作物系数伸根期为0.7,旺长期为1.0,成熟期为0.8; ET_0 为参考作物蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),采用FAO修订的Penman-Monteith模型计算,公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (2)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), Δ 为饱和水汽压—温度曲线斜率 ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$), R_n 为太阳净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 由日照时数计算得到, G 是土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), γ 为湿度计常数 ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$), T 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa), u_2 为2 m高处的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。其中 Δ 、 R_n 、 G 、 u_2 均可通过本文所用气象数据计算求得, 具体计算方法参考文献^[19]。大田期需水量即为大田期内每日作物需水量之和。

2) 有效降水量

有效降水量是指总降水量保存在作物根系层中满足作物蒸发—蒸腾所需的那部分水量, 即代表总降水量中的有效部分。影响有效降雨的主要因子有降雨强度、土壤质地及结构、地形及平整度、降水前的土壤含水率、作物种类及生育阶段等^[20]。本研究使用有效降水系数法^[21]求得有效降水量, 公式为:

$$P_e = a \times P, \quad (3)$$

式中, P_e 为有效降水量 (mm), a 为有效降水系数, P 为日降水量 (mm)。本研究使用各气象站点土壤水分贮存量实测数据 (即降水量渗入到土壤中的那部分降水) 代表有效降水, 进而分析降水量和土壤水分贮存量的变化关系, 确立了有效降水系数与降水量的指数方程 (图2), 得出有效降水系数 $a = 0.979e^{-0.011P}$ 。图2中 a 为有效降水系数, P 为日降水量, n 为样本个数。

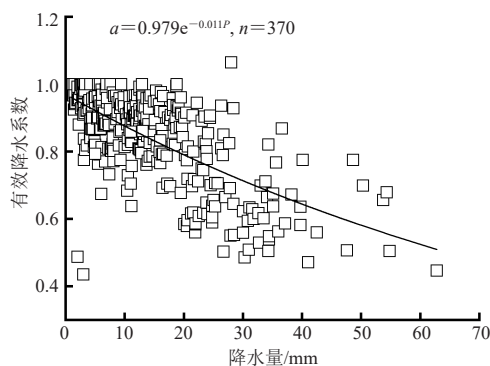


图2 降水量与有效降水系数的相关关系

Fig. 2 The correlation between precipitation and effective precipitation

3) 灌溉需水量

灌溉需水量即作物生育期内需水量与有效降水量之差, 公式为: $W_c = ET_c - P_e$ 。 W_c 即为灌溉需水量 (mm/d)。灌溉需水量考虑了作物需水量和降水量两项因子, 可以较好地表征作物灌溉需求状况。大田期

作物灌溉需水量即为大田期内每日作物灌溉需水量之和。

1.3 数据处理和研究方法

根据上述公式计算各气象站点逐日有效降水量、作物参考蒸散量、作物需水量、灌溉需水量等指标, 统计生育期时段内单站多年平均值、研究区多站点逐年平均值、多站点多年平均值等。采用气候倾向率法计算变化速率^[22], 用趋势系数法进行各指标变化趋势分析^[23], 使用MATLAB 2016a软件进行Morlet小波分析^[23], SPSS 21.0软件进行偏相关分析, 使用ArcGIS 10.2软件的克里金法进行插值绘制各指标空间分布图。

2 结果与分析

2.1 降水量和有效降水量的时空变化特征

1970—2019年, 豫西烤烟历年大田期降水量在232.2~653.3 mm, 平均值为425.1 mm, 最大值出现在2003年, 为653.3 mm; 最小值出现在2001年, 为232.2 mm; 历年大田期有效降水量在174.2~463.3 mm, 平均值为309.3 mm, 最大值出现在2003年, 为463.3 mm; 最小值出现在1997年, 为174.2 mm (图3)。降水量和有效降水量多年来整体上均呈缓慢上升趋势, 气候倾向率分别为1.15 mm/10 a、1.752 mm/10 a, 但均未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 变化趋势不显著。

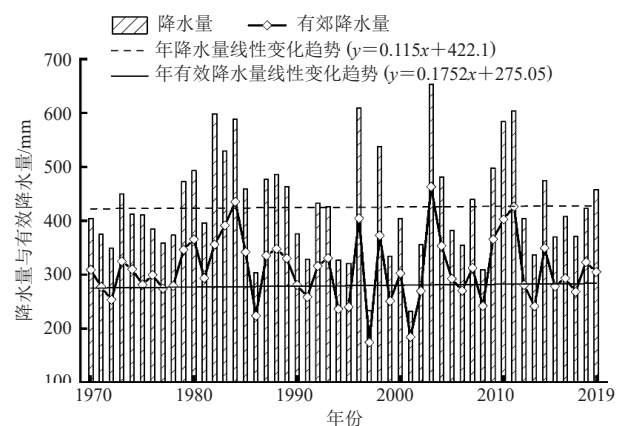


图3 1970—2019年豫西烤烟大田期降水量、有效降水量年际变化
Fig. 3 Interannual variation of precipitation and effective precipitation during the field period of flue-cured tobacco in western Henan Province during 1970–2019

1970—2019年, 豫西烤烟大田期平均降水量和有效降水量的空间分布如图4所示。大田期内年均降水量为372.75~548.81 mm, 呈现出从北部向南部呈逐渐递增的趋势。其中北部的三门峡站年均降水量最少, 为372.75 mm, 比豫西年均降水量偏少12%; 次少站点为洛宁站379.20 mm, 比豫西年均降水量偏少11%; 南

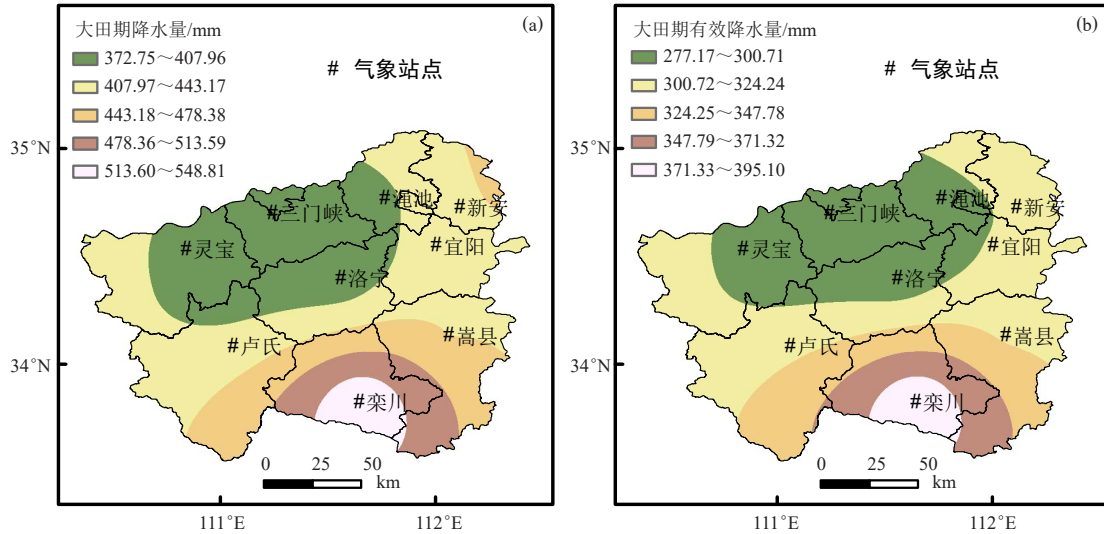


图4 1970—2019年豫西烤烟大田期降水量(a)和有效降水量(b)的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of precipitation and effective precipitation during the field period of flue-cured tobacco in western Henan Province during 1970-2019

部栾川站大田期年均降水量最多，为548.81 mm，高于豫西地区年平均降水量29%；次多站点为嵩县，年均降水量为442.95 mm，比豫西地区年平均值偏多4%，其他站点年均降水量在388.39~431.21 mm。豫西地区烤烟大田期年均有效降水量为277.17~395.10 mm，空间分布和降水量的空间分布几乎一致，以三门峡站点最少，为277.17 mm，占该站年均降水量的74%，比豫西地区有效降水量年平均值偏少10%；栾川站有效降水量最多，为395.10 mm，占该站年均降水量的72%，比豫西地区有效降水量年平均值偏多28%。有效降水量的空间分布与降水量的空间分布高度相似，充分表明了两者具有较强的相关性。

2.2 需水量和灌溉需水量的时空变化及其周期特征

1970—2019年，豫西烤烟大田期需水量在422.6~544.9 mm，历年平均值为473.7 mm，最大值出现在1997年，最小值出现在2010年，气候倾向率为-8.436 mm/10 a，通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验，呈极显著性下降趋势。灌溉需水量在-30.1~370.6 mm，平均值为167.5 mm，其中最大值出现在1997年，为370.6mm，最小值出现在2003年，为-30.1 mm，气候倾向率为-10.188 mm/10 a，通过了 $\alpha=0.05$ 水平显著性检验(图5)。近50年内只有1984年和2003年有效降水量大于作物需水量，说明豫西地区烤烟大田期内有效降水量不能满足烤烟的生育需求，需要以人工灌溉等方式补充水分弥补自然降水的不足。

1970—2019年，豫西地区烤烟大田期需水量和灌溉需水量多年平均值空间分布特征见图6，大田期

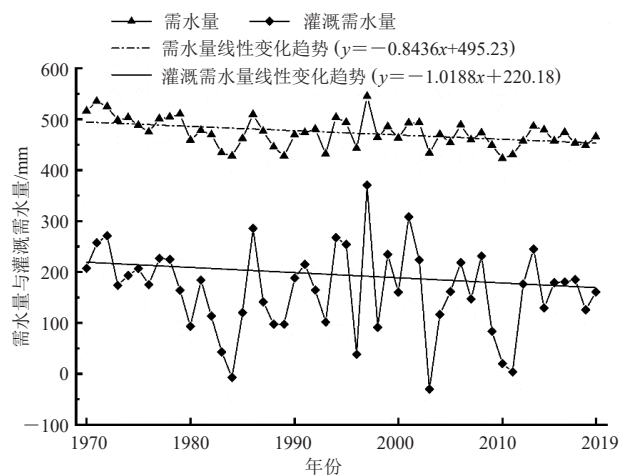


图5 1970—2019年豫西烤烟大田期需水量和灌溉需水量年际变化

Fig. 5 Interannual variation of water requirement and irrigation water demand during the field period of flue-cured tobacco in western Henan Province during 1970-2019

需水量高值区在506~522 mm，主要分布在三门峡和渑池区域；低值区在442~458 mm，主要分布在栾川、卢氏和嵩县区域，区域间差值较小，整体平均值为473.7 mm(图6a)。由图6b可知，大田期50年平均灌溉需水量高值区在206~245 mm，低值区在50~89 mm，整体平均值为167.5 mm，高值区是低值区的3~4倍，不同区域之间差值较大。需水量和灌溉需水量均呈现出由北部向南部逐渐递减的变化特征，在栾川境内的小部分区域自然降水基本可以满足烤烟需水量的需求，其他区域均需要人工灌补充水分，尤其是三门

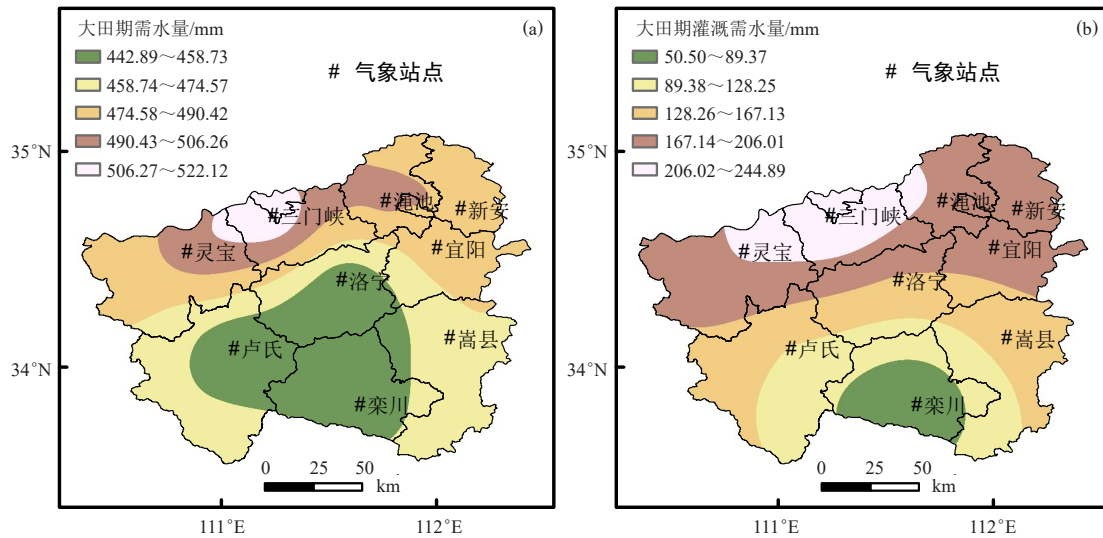


图6 1970—2019年豫西烤烟大田期需水量(a)和灌溉需水量(b)的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of water requirement and irrigation water demand during the field period of flue-cured tobacco in western Henan Province during 1970–2019

峡、渑池以及灵宝西部等偏北区域，烤烟需水量大，但是有效降水量却明显偏少，在两个因素的共同作用下灌溉需求程度更为明显。

对豫西烟区需水量和灌溉需水量进行Morlet小波分析，得到了小波变换实部等值线图和方差图(图7)，近50年需水量和灌溉需水量在不同时间尺度上的振荡周期与变化特征，通过灰度表示信号振荡

的强弱。灰度越大，需水量和灌溉需水量比常年值越偏少；灰度越小，需水量和灌溉需水量比常年值越偏多。从图7a可知需水量在15~33 a尺度上周期振荡很明显，高一低交替震荡变化稳定，50 a间呈现出“多—少—多”的变化特征，结合小波方差图(图7b)可知在25 a小波方差为第一峰值，说明需水量存在一个25 a的变化主周期，即在25 a左右会经历一个由大到

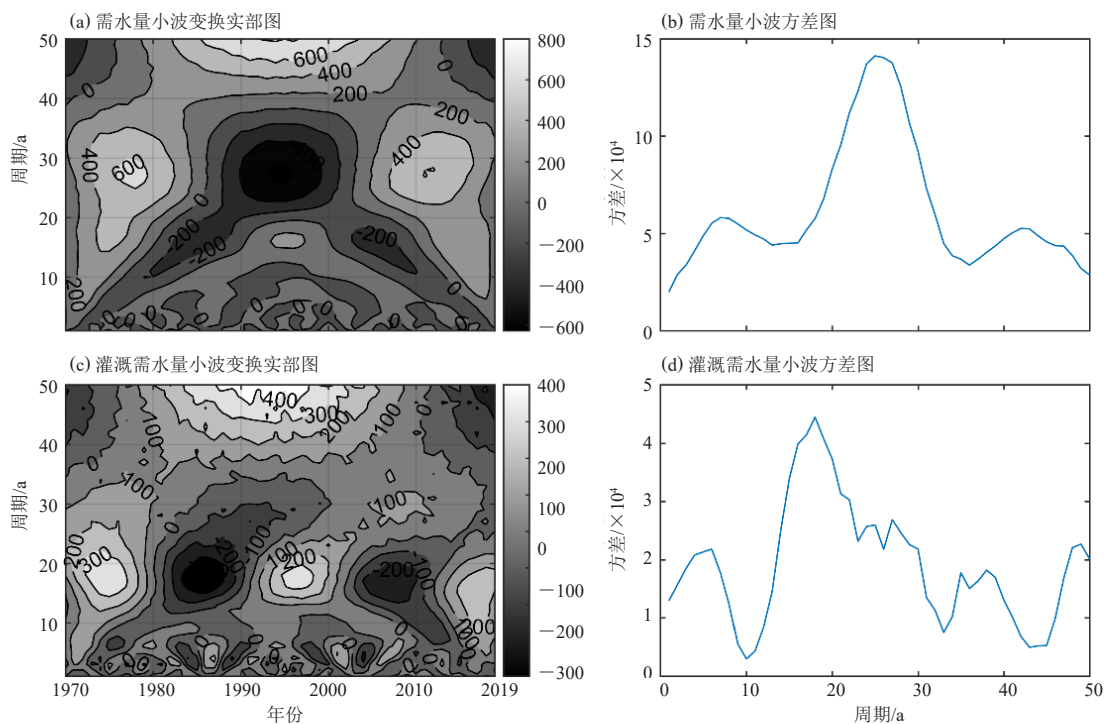


图7 1970—2019年豫西烤烟大田期需水量和灌溉需水量小波变换实部等值线图和方差图

Fig. 7 Morlet wavelet transform real-contour maps and wavelet variance maps of flue-cured tobacco field water requirement and irrigation water demand in western Henan during 1970–2019

小的过程, 另外还有7 a和43 a的次周期。从图7c中可以看到灌溉需水量则在13~24 a周期振荡明显, 且具有全域性。由图7d可知, 17 a尺度下的小波方差值为第一峰值, 所以灌溉需水量变化主周期为17 a, 此外还存在非常明显的第二峰值和第三峰值, 分别为7 a和38 a的次周期。

2.3 需水量和灌溉需水量相关气象因子的变化及其主要气象影响因子

气象因子影响着烤烟需水量和灌溉需水量的变化, 不同气象因子之间又相互作用, 如果直接计算各气象因子与统计量之间的相关系数难以真实反映变量之间的本质联系, 因此, 采用偏相关分析法, 在控制其它气象因子不变的前提下计算不同气象因子与统计量的偏相关系数(表1), 偏相关分析更能真实地反映气象因子与统计量之间的关系。从表1可知, 需水量与日照时数、风速呈显著性正相关, 与相对湿度呈显著性负相关, 与降水量、平均气温相关性不显著。灌溉需水量与日照时数和平均气温呈显著性正相关, 与降水量和相对湿度呈显著性负相关, 与风速相关性不显著。由图8可知, 近50 a日照时数和相对湿度呈显著性下降趋势, 平均气温和降水量均呈不显著上升趋势, 风速呈不显著下降趋势。由日照时数、风速导致需水量下降的负增量大于由相对湿度以及平均气温引起需水量上升的增量值, 从而使需水量呈现出逐年下降的趋势。灌溉需水量在需水量下降和降水量增多的双重作用下呈现出比需水量更加明显的下降趋势。日照时数与需水量相关系数最大, 而降水量与灌溉需水量关系最密切, 日照时数次之, 但这一时段内降水量的变化趋势并不显著, 充分说明日照时数下降是引起需水量和灌溉需水量下降的最主要原因。

表1 豫西烤烟大田期需水量、灌溉需水量与主要气象因子的偏相关系数

Table 1 Partial correlation coefficients between water requirement, irrigation water demand and main meteorological factors during the field period of flue-cured tobacco in western Henan Province

统计指标	平均气温	日照时数	降水量	风速	相对湿度
需水量	0.142	0.865**	-0.017	0.237*	-0.569**
灌溉需水量	0.173*	0.792**	-0.905**	0.053	-0.514**

注: *表示在0.05水平上显著相关, **表示在0.01水平上显著相关。

3 结论

1) 1970—2019年豫西烤烟大田期作物需水量平均值为473.7 mm, 灌溉需水量平均值为167.5 mm, 均呈显著性下降趋势的变化趋势。小波分析表明, 需水量和灌溉需水量在大田期内存在不同的振荡周期, 其中需水量存在15~33 a的振荡周期, 25 a为主周期; 灌

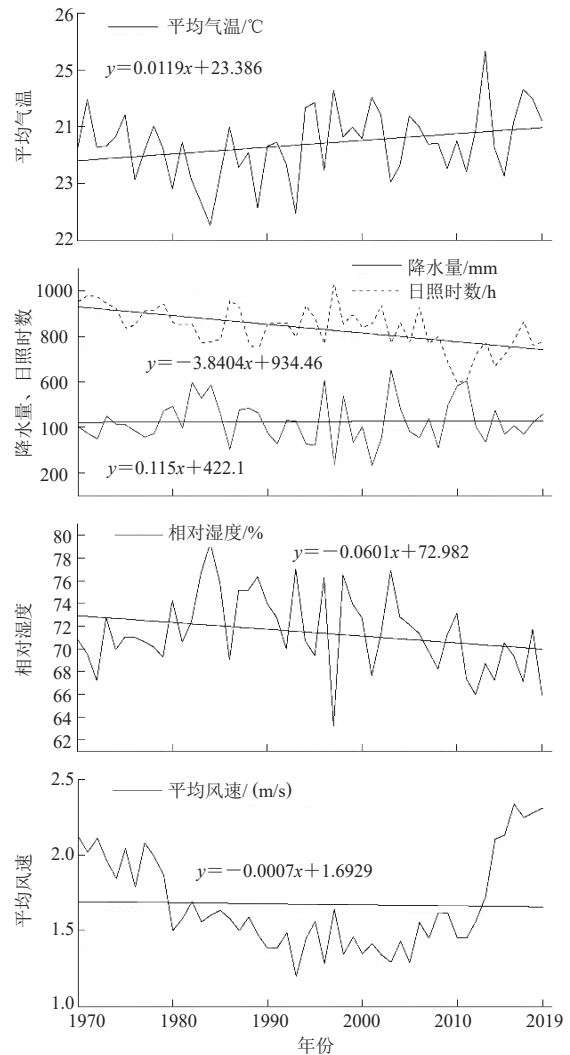


图8 影响豫西烤烟大田期需水量、灌溉需水量主要气象因子50年气候变化

Fig. 8 Climate change of the main meteorological factor 50a affecting field water requirement and irrigation water demand of flue-cured tobacco in western Henan Province

溉需水量在13~24 a周期振荡明显, 17 a为主周期。

2) 在空间变化上, 豫西地区烤烟大田期作物需水量和灌溉需水量从南向北呈逐渐增加趋势, 以栾川最小, 向北逐渐增加, 三门峡站最大。

3) 研究区烤烟大田期需水量与日照时数相关性最强, 灌溉需水量与降水量关系最密切, 日照时数次之。

4) 日照时数的显著性下降是影响豫西烤烟需水量和灌溉需水量显著性下降的主导因子。

4 讨论

由于目前对河南省区域内烤烟水分供需变化的研究较少, 而在河南省内烤烟与夏玉米、夏花生的大田生育期相接近, 因此夏玉米和夏花生的水分供需变

化规律可为烤烟提供参考。本研究结果表明, 1970—2019年豫西烤烟大田期作物需水量和灌溉需水量呈显著性下降趋势, 这与张杰等^[24]、黄仲冬等^[25]对河南省夏玉米和张建涛等^[26]对河南省夏花生的研究结果相一致。姬兴杰等^[27]也发现河南省1971—2010年参考作物蒸发蒸腾量总体呈下降趋势。从总体上看由于日照时数减少使得到达地面的辐射减少、能量下降, 风速下降削弱了陆地与大气的水分和能量交换强度^[28], 日照时数和风速的下降引起烤烟需水量的下降抵消了相对湿度下降和气温升高引起需水量升高的增量。另一方面, 需水量下降和降水量的上升使得灌溉需水量呈现出更加明显的下降趋势, 这与黄仲冬等^[25]的研究结果一致。

从豫西烤烟大田期近50年灌溉需水量年际变化来看仅有1984年和2003年小于0, 说明豫西烤烟大田期内自然降雨量大多数年份不能满足需水量的要求, 特别是在北部低值区有效降水严重不足, 需要依赖人工灌溉等方式以弥补充自然降水的不足, 以保证烤烟正常的生长发育。杨森等^[29]也表明除豫南外河南省其它产区均有不同程度的农田水分亏缺, 尤其豫西地区自然降雨量少且农田耗水量大, 水分亏缺最为严重。

本文在计算有效降水量时利用研究区实测数据确立了贴合本地实际情况的有效降水系数, 进而提高了有效降水量和灌溉需水量的计算精确性, 为豫西烟区合理灌溉提供了理论依据。本文仅从气象因素方面分析了需水量的时空分布, 没有考虑地形地势、土壤质地、下垫面状态等其他因子的影响, 还需在今后做进一步的分析研究。

参考文献

- [1] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73.
- [2] 朱明, 廖小华, 夏金. 十堰市气温变化对水稻生长期及产量的影响. 气象科技进展, 2015, 5(4): 62-65.
- [3] 郑天天. 气候变化的经济影响研究综述. 气象科技进展, 2019, 9(4): 18-21.
- [4] 张家智, 张茂松. 气候变暖对云南烤烟生产影响的初步分析. 气象与环境科学, 2007, 30(4): 17-19.
- [5] 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. 资源科学, 2012, 34(3): 409-417.
- [6] 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. 农业工程学报, 2013, 29(14): 90-98.
- [7] 王宏, 谭国明, 孙庆川, 等. 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, 2012, 28(4): 69-72.
- [8] 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. 农业机械学报, 2015, 46(9): 188-197.
- [9] 黎世民, 罗诗峰, 臧贺藏, 等. 河南省葡萄需水量的时空变化趋势及影响因素分析. 河南农业科学, 2019, 48(3): 108-114.
- [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. 湖南农业科学, 2014(14): 7-11.
- [11] 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. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2091-2098.
- [12] 张波, 裴兴云, 曹华, 等. 贵州烤烟需水量及灌溉需求指数特征. 水土保持研究, 2019, 26(5): 215-221.
- [13] 张华, 王浩, 徐存刚. 1967—2017年甘肃省玉米需水量与缺水时空分布特征. 生态学报, 2020, 40(5): 1718-1730.
- [14] 汪孝国, 王小东, 范建立, 等. 豫西烟区气候因子与烤烟化学品质关系研究. 西南农业学报, 2008, 21(4): 989-992.
- [15] 河南省统计局. 河南统计年鉴-2020. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [16] 吴璐, 刘晚迎. 河南烟区烤烟生育期地表温度日较差变化对烤烟化学品质指标的影响. 气象与环境科学, 2020, 43(1): 18-25.
- [17] 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. 资源科学, 2012, 34(3): 409-417.
- [18] 刘钰, Pereira L S. 对FAO推荐的作物系数计算方法的验证. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.
- [19] 姬兴杰, 成林, 朱业玉, 等. 河南省冬小麦需水量和缺水量的时空格局. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3268-3277.
- [20] 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [21] 高超, 李学文, 许莹, 等. 淮河流域蚌埠闸以上地区夏玉米生育阶段水分供需时空变化特征研究. 地理研究, 2019, 38(7): 1833-1846.
- [22] 符传博, 丹利, 冯锦明, 等. 1960—2012年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系. 大气科学, 2019, 43(1): 87-98.
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2003.
- [24] 张杰, 张慧, 陈丹丹, 等. 河南省夏玉米生育期有效降雨量和需水量时空分布特征. 河南农业科学, 2020, 49(9): 173-180.
- [25] 黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳, 等. 气候变化对河南省冬小麦和夏玉米灌溉需水量的影响. 灌溉排水学报, 2015, 34(4): 10-13.
- [26] 张建涛, 李国强, 臧贺藏, 等. 河南省夏花生水分供需变化及时空分布特征. 西南农业学报, 2020, 33(10): 2384-2392.
- [27] 姬兴杰, 朱业玉, 顾万龙. 河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析. 中国农业气象, 2013, 34(1): 14-22.
- [28] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 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, 2005, (10): 155-159.
- [29] 杨森, 李会云, 寇艳玲, 等. 1982—2012年河南省夏玉米生育期降水量时空变化格局分析. 河南农业大学学报, 2019, 53(1): 28-33.