

DOI: 10.5846/stxb201710251910

王芳,汪左,黄静,杨淑杰,贺广均,张运.安徽省农田水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系.生态学报,2018,38(17): - .

Wang F, Wang Z, Huang J, Yang S J, He G J, Zhang Y. Spatio-temporal distribution characteristics of cropland water use efficiency and its relationship with climate in Anhui Province. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

安徽省农田水分利用效率时空特征及其与气候因子的关系

王芳^{1,2}, 汪左^{1,2,*}, 黄静^{1,2}, 杨淑杰³, 贺广均⁴, 张运^{1,2}

1 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241003

2 资源环境与地理信息工程安徽省工程技术研究中心, 芜湖 241003

3 昆士兰大学, 布里斯班, 昆士兰 4072

4 天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京卫星信息工程研究所, 北京 100029

摘要: 生态系统水分利用效率 (Water Use Efficiency, WUE) 是衡量碳水循环耦合程度的重要指标, 估算安徽省农田生态系统的 WUE 并分析其时空变异规律, 探究其影响因素, 对该区域农田水资源的科学配置和合理利用有着重要的意义。基于 MODIS 遥感数据和气象数据, 分析安徽省近 15 年农田 WUE 的年际、年内时空变化特征以及与气候因子的关系, 研究表明: (1) 2000—2014 年间安徽省农田 WUE 的变化范围为 $1.38\text{--}1.66\text{ gC mm}^{-1}\text{ m}^{-2}$, 多年均值为 $1.54\text{ gC mm}^{-1}\text{ m}^{-2}$, 整体上农田 WUE 年际呈现增长变化趋势, 变化率为 $0.011\text{ gC mm}^{-1}\text{ m}^{-2}$; 具有较强的空间分异性规律, 整体上呈现北高南低趋势, 淮河以北各市的农田 WUE 较高, 高于全省多年均值, 淮河以南地区的农田 WUE 则低于全省水平。(2) 安徽省农田 WUE 的年内变化呈现双峰型变化格局, 具有明显的季节性差异, 表现为春季>秋季>夏季>冬季; 以淮河为界, 南北各市变化趋势略有不同, 淮河以南地区的最大值在 4 月份, 淮河以北则以 3 月份为最高。(3) 安徽省农田 WUE 动态变化受到气候因子降雨影响的区域占比 17.14%; 气温影响的区域占比 0.73%; 降雨和气温综合影响所占 0.71%, 而农田 WUE 与气温和降雨影响均不显著的区域占比为 81.42%; 因此, 气候因素中降雨在安徽省农田 WUE 的变化中起主导作用, 由于人为因素的干预, 非气候因素对农田 WUE 变化的影响更大。

关键词: 水分利用效率; 农田; 时空分布; 气候变化; 安徽省

Spatio-temporal distribution characteristics of cropland water use efficiency and its relationship with climate in Anhui Province

WANG Fang^{1,2}, WANG Zuo^{1,2,*}, HUANG Jing^{1,2}, YANG Shujie³, HE Guangjun⁴, ZHANG Yun^{1,2}

1 College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

2 Engineering Technology Research Center of Resources Environment and GIS, Anhui Province, Wuhu 241003, China

3 the University of Queensland, Brisbane, Queensland 4072, Australia

4 the State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology, Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 100029, China

Abstract: Water use efficiency (WUE) of an ecosystem is an important index to measure the degree of coupling of the carbon and water cycles. The WUE of a cropland ecosystem in Anhui Province was estimated and the spatio-temporal distribution of cropland WUE was analyzed to explore its influencing factors, which will be of great significance for scientific allocation and rational utilization of water resources in the cropland region. This study focused on the application of data from moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and meteorological data, estimated the cropland WUE, analyzed the spatio-temporal characteristics of cropland WUE in Anhui Province over the last 15 years, and evaluated the

基金项目: 国家自然科学基金 (41501379); 天地一体化信息技术国家重点实验室开放基金 (2016_SGII_TKFJJ_YG_01)

收稿日期: 2017-10-25; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzgis2004@163.com

relationship of WUE with climatic factors. The results showed that 1) Between 2000 and 2014, the average annual cropland WUE for Anhui Province was $1.54 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, ranging from 1.38 to $1.66 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$. As a whole, the annual growth trend of cropland WUE was $0.011 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, and cropland WUE had a strong spatial variability in Anhui Province, where it was higher in the north and lower in the southern part of the province. The cropland WUE north of the Huaihe River was higher than that of the province as a whole, while that of the Huaihe River was lower than the province average. 2) The variation of cropland WUE in Anhui Province showed a bimodal change pattern with obvious seasonal variation, in the order of spring > autumn > summer > winter. Taking Huaihe as the boundary, the changing trends of the cities in the north and the south were slightly different. The maximum value south of Huaihe was in April, while that north of Huaihe was the highest in March. 3) The dynamic change of cropland WUE in Anhui Province was closely related to temperature and rainfall. The regions with cropland WUE changes resulting from non-climate factors made up 81.42% of the total area of cropland in the province, followed by that mainly affected by precipitation (17.14%) and temperature (0.73%), while the combination of precipitation and temperature had the smallest impact on water use efficiency (0.71%). Overall, rainfall played the most important role of all climatic factors in the changes in cropland WUE, but due to the influence of human factors, non-climate factors had a greater impact on cropland WUE changes.

Key Words: water use efficiency; cropland; temporal and spatial distribution; climate change; Anhui Province

水分利用效率(water use efficiency, WUE)是指植物消耗单位质量的水分所固定 CO_2 或生产干物质的量^[1], WUE 是表征生态系统碳水耦合程度的重要指标之一^[2], 反映了生态系统碳水循环规律及其相互作用关系, 也是评估生态系统响应气候变化的一个综合特征^[3-4], 因此, 研究 WUE 的动态变化及其对气候因子的响应, 对于评估区域碳水耦合关系及全球气候变化对生态系统的影响具有重要意义^[5]。

由于学者们对生态系统 WUE 的内涵理解不同以及数据获取手段的差异, 计算 WUE 的方法有所不同; 在生态系统或区域尺度, 采用总初级生产力 GPP (Gross Primary Production, GPP) 或净初级生产力 NPP (Net Primary Production, NPP) 或净生态系统碳交换 (Net Ecosystem Exchange, NEE) 与蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 的比值计算 WUE^[6-10], 经典的生态系统 WUE 的计算是采用总初级生产力 (GPP) 与地表蒸散 (ET) 的比值^[5, 11-12], 该定义通常用在月、年等长时间尺度上分析生态系统的碳水耦合特征及其对环境变化的响应^[13], 因此, 本文采用总初级生产力 (GPP) 与蒸散量 (ET) 之比计算水分利用效率 WUE。在全球气候变化背景下^[14-15], 生态系统 WUE 的时空变化及其对气候变化响应研究受到国内外诸多学者的广泛关注^[16-19]; Tian 等^[6] 利用集成生态过程模型估算了 1895—2007 年美国南部植被覆盖类型的 WUE, 研究结果表明 WUE 受土地覆盖和气候变化影响较大; Sur 等^[20] 利用 MOD16 ET 和 MOD17 GPP 产品估算了韩国 2007—2008 年生长季和休眠季的 WUE, 并通过了通量塔数据的验证; 仇宽彪等^[21] 利用 MODIS 产品数据估算了 2003—2012 年中国中东部地区农田生态系统水分利用效率, 并分析其影响因子, 研究结果表明气候因素是影响中国中东部南北方农田 WUE 的主要因子; 李明旭等^[22] 利用模型分析了未来气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用效率的变化规律及其对气候变化的响应, 研究结果表明 GPP 的增加是未来秦岭地区 WUE 增长的直接因素, 气温的增加与大气 CO_2 浓度的升高是 WUE 变化的主要环境因素; 李肖娟等^[23] 利用 MODIS 产品总初级生产力 (GPP)、蒸散发 (ET) 及气象数据估算了黑河流域植被水分利用效率, 并分析与气候因子的相关性, 研究结果表明由于各区域植被分布有明显差异, WUE 与降水量、气温表现出不同的相关性, 在不同区域, 其起主导因素是不同的。由于农田水分利用效率 WUE 受到农作物自身生理特征差异以及地域差异的影响, 在不同的区域尺度上, 对气候和不同农作物类型的响应特征表现出较大的时空异质性, 而且不同农作物类型对气候变化也表现出不同的敏感性和响应特征, 所以在全国尺度上研究农田 WUE 与气候之间的响应关系, 很难反映区域尺度上气候变化对农田 WUE 的影响程度。

安徽省是我国重要的农业生产基地之一, 主要农产品有水稻、小麦、玉米等, 2014 年全省粮食总产量

3415.8 万 t,居全国第六位^[24];本文基于 MOD16 ET 和 MOD17 GPP 数据及气象数据估算了安徽省农田 WUE,分析农田 WUE 的时空变化特征及其与气候因子的关系,为安徽省农田水资源的科学配置以及科学管理农业自然资源提供决策依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

安徽省位于中国东部,地理范围介于 114°54'E—119°27'E 与 29°41'N—34°38'N 之间(图 1),全省地势西南高、东北低,长江和淮河自西向东横贯全境,将全省划分为淮北平原、江淮丘陵、皖西大别山区、沿江平原和皖南山区五大自然区域。安徽省处于东亚季风区、亚热带与暖温带的过渡带,四季分明,气候分布差异明显,天气多变,降水年际变化大,其独特的地理位置和气候特征造就了农业区域性特点,淮南北作物类型和复种指数明显不同,安徽省是我国重要的农业生产基地之一,主要农产品水稻、小麦、玉米等在全国占有重要地位。

1.2 数据

本文使用的是安徽省 2000—2014 年 GeoTiff 格式的月合成(MOD16A2)和年合成(MOD16A3)的蒸散量(ET)数据^[25-27],以及安徽省 2000—2014 年 GeoTiff 格式的月合成(MOD17A2)和年合成(MOD17A3)的总初级生产力(GPP)数据,其月合成和年合成产品的空间分辨率分别为 0.05°和 30arcsec(0.0083),该产品由美国蒙大拿大学数字地球动态模拟研究发布^[28-30](<http://www.ntsug.umt.edu/project/>),并证明其数据的有效性^[31]。土地利用数据为 2005 年安徽省 1:10 万的土地覆盖数据(图 1),来源于地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>)。气象数据为 2000—2010 年中国 1km 栅格逐年平均降雨数据集和平均气温数据集,来源于地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>)。2011—2014 年气象数据是通过安徽省 24 个气象站点观测数据(图 1)进行插值获得,来源于中国地面气象要素月值数据集(<http://data.cma.cn/data/>)。

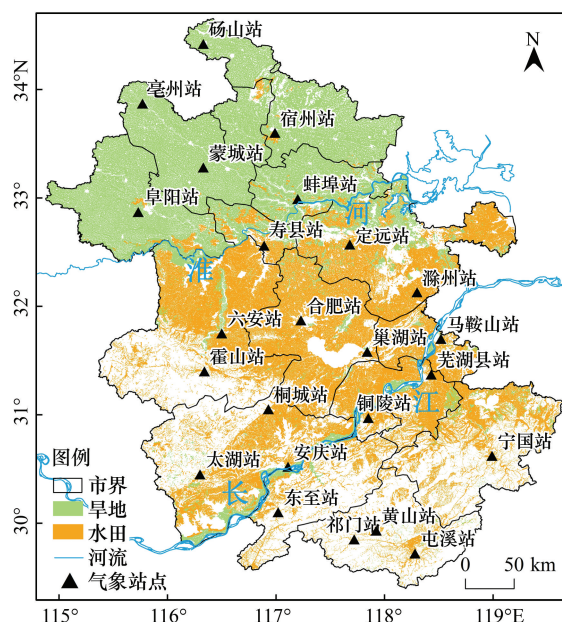


图 1 安徽省土地利用类型图和气象站点分布

Fig.1 Land use type and distribution of meteorological stations in Anhui Province

2 研究方法

2.1 水分利用效率(WUE)

本文的水分利用效率采用总初级生产力(GPP)与蒸散发(ET)之比表示:

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (1)$$

式中,WUE 为水分利用效率($\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$);GPP 为生态系统总初级生产力(gC/m^2);ET 为生态系统蒸散发(mm)。

2.2 分析方法

采用偏差分析、线性趋势法及相关系数法反映安徽省各栅格单元 2000—2014 年农田 WUE 的波动水平、变化率以及与气象因子的相关关系,计算公式如下:

$$D_{ij} = WUE_{ij}^t - \overline{WUE_{ij}} \quad (2)$$

式中, D_{ij} 表示 i 行 j 列的农田 WUE 偏差值, WUE_{ij}^t 表示某一年 i 行 j 列的农田 WUE 值, $\overline{WUE_{ij}}$ 表示 i 行 j 列的平均农田 WUE 值, t 为年份。

$$B_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n (t_i \times WUE_i) - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n WUE_i}{n \times \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (3)$$

$$WUE_c = \frac{B_{\text{slope}}}{\overline{WUE}} \times n \times 100\% \quad (4)$$

式中, WUE_i 表示第 i 年的农田 WUE 值, $\overline{WUE}$ 是农田 WUE 平均值, $n=15$ 。 B_{slope} 为线性倾向值, t 为年份, 当 $B_{\text{slope}} > 0$ 时, 随着时间 t 增加, 农田 WUE 呈上升趋势, 反之, 则呈下降趋势, WUE_c 表示农田 WUE 的变化率(%)。

相关分析是为了揭示要素间相互关系的密切程度, 利用基于像元的相关性分析法分别计算年农田 WUE 与年降雨、年气温的偏相关系数, 其计算公式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)} \sqrt{(1 - R_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中, R_{xy} , R_{xz} , R_{yz} 分别为两变量的相关系数, $R_{xy,z}$ 表示固定自变量 z 之后因变量 x 与自变量 y 的偏相关系数, 其显著性检验采用 t 检验法。

为了反映各要素的综合影响, 采用复相关分析法, 其计算公式如下:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - R_{xy}^2)(1 - R_{xz,y}^2)} \quad (6)$$

式中, $R_{x,yz}$ 表示因变量 x 和自变量 y, z 的复相关系数, R_{xy} 为 x, y 的相关系数, $R_{xz,y}$ 为偏相关系数, 其显著性检验采用 F 检验法。

3 结果与分析

3.1 安徽省农田 WUE 年际时空分布特征

根据安徽省 2000—2014 年蒸散量 ET、总初级生产力 GPP 及农田水分利用效率 WUE 年际变化(图 2)可知, ET 年均值的波动范围为 647.5—730.5 mm, 多年蒸散量均值为 694.9 mm, 整体呈下降趋势, 变化率为 -0.83 mm/a ; GPP 为 935.5—1140.8 gC m^{-2} , 平均值为 1068.2 gC m^{-2} , 整体呈现出明显的增长趋势, 变化率为 $5.94 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 农田 WUE 的变化范围为 1.38—1.66 $\text{gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 多年均值为 1.54 $\text{gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 整体上农田 WUE 年际呈现增长变化趋势, 变化率为 $0.011 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 说明 GPP 的显著增加是农田 WUE 增长的直接因素。采用偏差法分析 2000—2014 年各年农田 WUE 偏离多年平均水平的程度(图 3), 农田 WUE 的偏差值呈现先减少后增加的趋势, 其中 2000 年、2003 年和 2014 年的偏差值较大, 说明偏离平均水平的程度较严重, 从 2002 年开始, 除 2003 年、2005 和 2009 年以外均高于平均水平, 其中 2014 年的农田 WUE 值较高, 为 $1.66 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 高于多年平均的 7.81%; 2000 年和 2003 年的农田 WUE 值较低, 分别为 $1.38 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 和 $1.40 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 低于多年平均的 9.89% 和 8.72%, 其他年份的农田 WUE 值位于平均值上下 3% 范围内。此外, 通过对安徽省各市农田 WUE 值统计结果表明, 安徽省 2000—2014 年间各市的农田 WUE 整体上呈现波动上升趋势, 各市农田 WUE 年均值差异显著, 其中淮河以北各市的农田 WUE 较高, 高于全省的多年均值, 均值在 $1.5 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 以上, 淮河以南地区的农田 WUE 则低于全省水平, 主要原因是淮河以北主要为平原地区, 其种植作物主要以冬小麦和夏玉米为主; 而淮河以南地区种植作物主要是油菜和水稻, 在各主要粮食作物中, 玉米的 WUE 最高, 小麦其次, 而水稻最小^[7]; 而且安徽南部的水田区由于地表水分充足, 其土壤表面蒸发较强, 从而引起 WUE 值的降低; 安徽北部的旱田区播种较大比例的玉米, 而玉米的光合能力较强, 所以 WUE 值较高。

安徽省 2000—2014 年近 15 年农田年均 WUE 具有较强的空间分异性规律(图 4), 整体上呈现北高南低

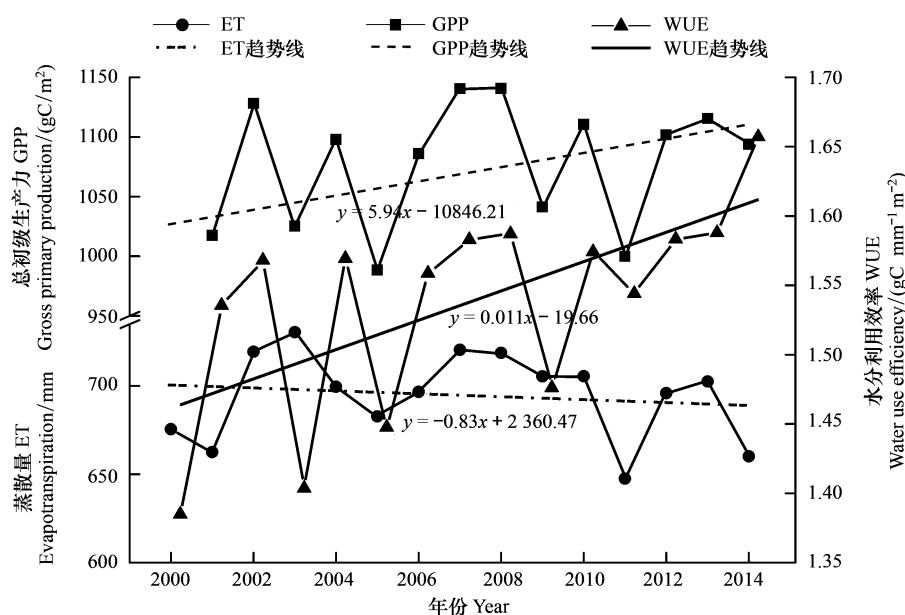


图2 安徽省 ET、GPP 和农田 WUE 年际变化

Fig.2 Annual variation of ET, GPP and cropland WUE in Anhui Province during 2000—2014

趋势,变化范围在 $0.2—2.4 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 之间,从农田 WUE 的空间分布特征来看,淮北平原的农田 WUE 普遍较高,该区域耕种面积较大,多为季节性较强的农作物种植区,作物主要是冬小麦和夏玉米, WUE 值在 $1.5 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 以上;农田 WUE 的中低值区处于江淮丘陵和沿江平原地区,该地区以季节性强的农作物(油菜、水稻)为主,其值在 $0.2—1.5 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 之间。安徽省大部分地区农田 WUE 的变化百分率大于 0(图 5),而农田 WUE 的变化百分率小于 -10% 的地区,主要分布在沿江地区以及水体周围。根据空间分布图 5 可知, WUE 变化百分率增加 10% 以上的面积占安徽省农田面积的 61.8%,其中 WUE 变化百分率在 30% 以上主要分布在淮河周围如淮南市、滁州市、蚌埠市以及亳州市和阜阳市的北部; WUE 变化百分率处于 -10%—10% 之间的面积占 36.1%; WUE 变化百分率降低 10% 以下仅占农田面积的 2.1%,说明安徽省农田 WUE 整体上主要以增加为主,而且淮北平原地区农田 WUE 增加趋势较强。

3.2 安徽省农田 WUE 的年内时空分布特征

根据 MOD16A2 月蒸散量 ET 数据和 MOD17A2 月总初级生产力 GPP 数据,分析安徽省 2000—2014 年农田 WUE 的年内时空变化特征(图 6),安徽省蒸散量 ET 年内变化呈先增加后减少的单峰型趋势,最大值在 8 月份为 114.8 mm ;总初级生产力 GPP 年内呈现双峰型变化趋势,最大值在 8 月份为 173.9 gC m^{-2} ;由于安徽省农作物种植方式多为双季,农田 WUE 的年内变化呈现双峰型变化格局,其中 4 月份为 WUE 的第一个峰值期,其值为 $2.1 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$,7 月份农作物收获后 WUE 降低,到 10 月份 WUE 达到第二个峰值期, WUE 为 $1.9 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。安徽省各市月 WUE 有明显的波动变化(图 7),淮河以南地区与安徽省变化趋势一致,在 4 月份达到第一个峰值;但淮河以北地区与淮河以南各市的变化趋势略有不同,第一个峰值在 3 月份;究其原因,

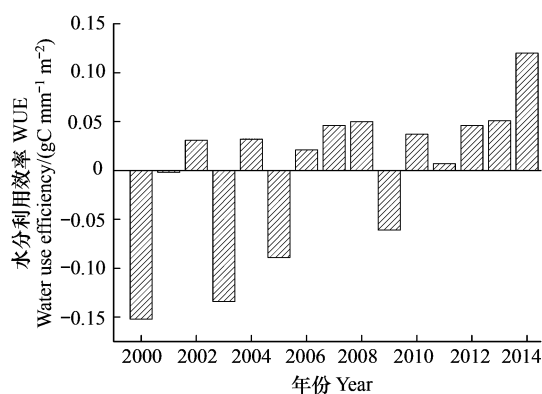


图3 安徽省 2000—2014 年农田 WUE 偏离分析

Fig.3 Annual deviation analysis of cropland WUE in Anhui Province during 2000—2014

淮河以北为平原地区,作物种植方式多为双季,其种植作物主要是以冬小麦和夏玉米为主,3 月份气温回升,冬小麦开始返青生长,农作物的光合作用强度大,需水量增加,WUE 值增加;7 月份,小麦收割之后开始播种夏玉米,7 月份是玉米的开花期,植被生长茂盛,其蒸腾作用逐渐增强,从而导致 WUE 下降,10 月份植被的数量减少,蒸腾作用较弱,则 WUE 值较大。此外,淮河以南地区种植作物主要是油菜和水稻,与冬小麦和夏玉米的生长周期不同,因此,两者在趋势上表现出较大的差异。

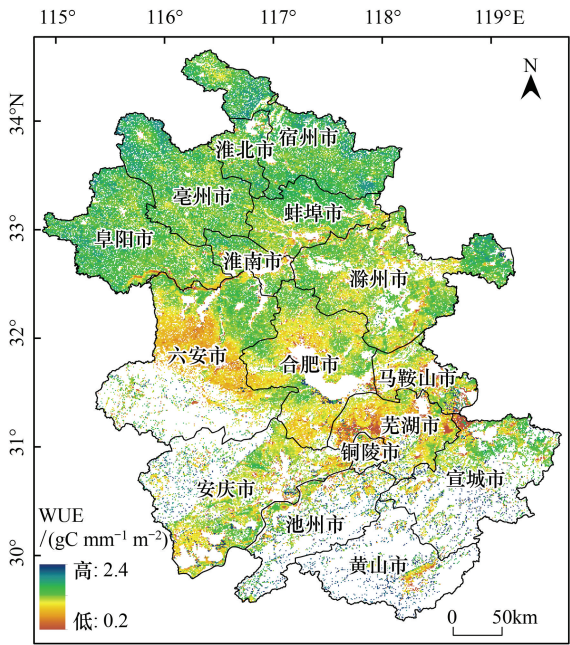


图 4 安徽省多年平均农田 WUE 空间分布
Fig.4 Spatial distributions of average cropland WUE in Anhui Province during 2000–2014

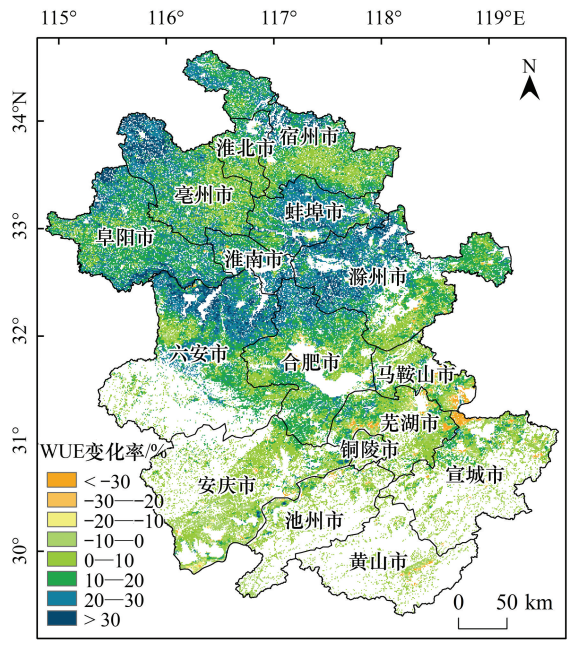


图 5 安徽 2000—2014 年农田 WUE 变化百分率
Fig. 5 Changing percentages of cropland WUE in Anhui Province during 2000—2014

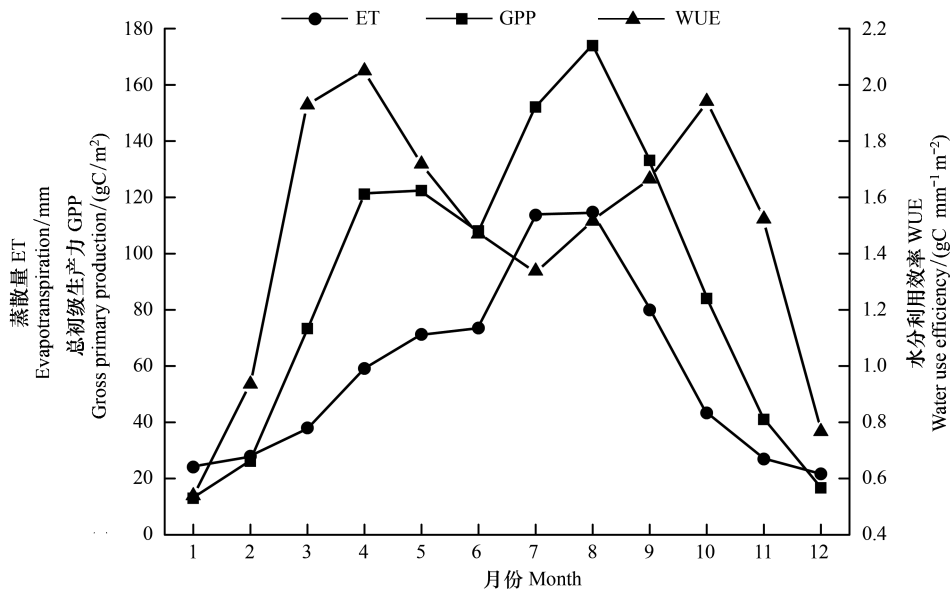


图 6 安徽省 ET、GPP 和农田 WUE 年内变化
Fig.6 Monthly variation of ET、GPP and cropland WUE in Anhui Province

由于受季节性降雨、气温、太阳辐射以及农作物类型等多种因素影响,安徽省不同季节农田 WUE 的空间

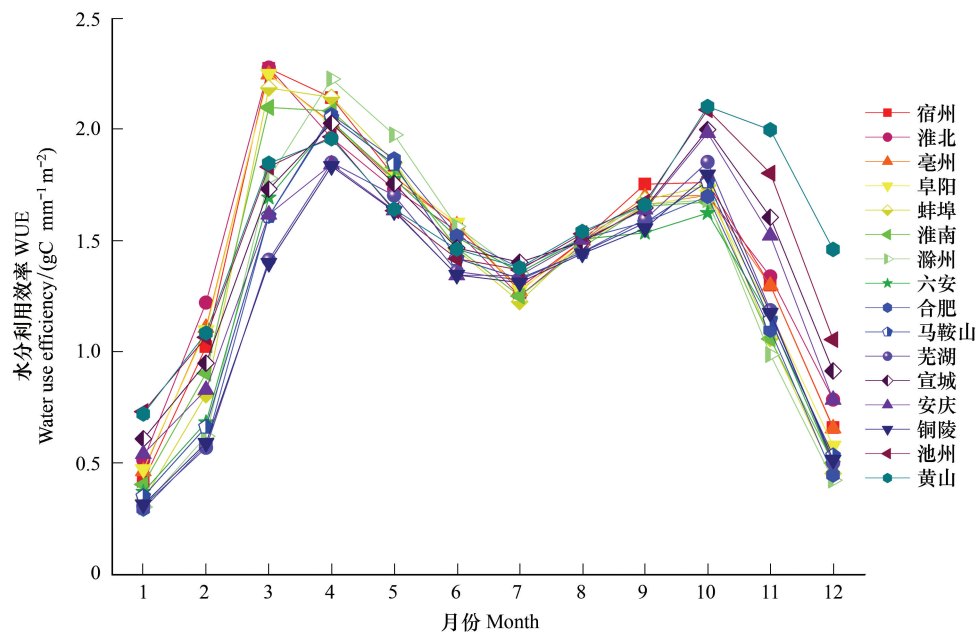


图 7 安徽省各市农田 WUE 的年内变化

Fig.7 Monthly variations of cropland WUE of cities in Anhui Province

分布差异显著(图 8)。春季气温回升阶段(3—5 月),此阶段为 WUE 快速升高期;农田 WUE 的范围为 1.19—2.34 $\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$,均值为 1.89 $\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$,春季随气温回升,小麦进入拔节灌浆期,所需水分增加,农田 WUE 整体上呈现北高南低趋势,农田 WUE 的高值区集中在淮北平原地区,该区域在人工春灌影响下水分供给充足。

夏季土壤供水充分阶段(6—8 月),此阶段安徽省气温较高,光照充足,太阳辐射较大,降雨量大,有利于地表蒸散,农田 WUE 的范围在 0.94—1.93 $\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$ 之间,均值为 1.42 $\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$,从空间分布上看,整体上呈现南高北低趋势,低值区位于淮北平原和沿江平原地区,究其原因,一方面该阶段蒸腾作用最强,另一方面可能是由于农作物收割导致 WUE 值下降。秋季气温降低阶段(9—11 月),农田 WUE 值处于 1.19—2.34 $\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$ 之间,均值为 1.59 $\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$,秋季气温下降,植被衰落,蒸腾作用下降,空间上呈现南高北低趋势。冬季干冷阶段(12—次年 2 月),农田 WUE 值在 0.19—1.86 $\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$ 之间,均值为 0.62 $\text{gC mm}^{-1} \text{m}^{-2}$,该季节气温最低,降雨量最少,光合作用和蒸腾作用最弱;部分区域土壤甚至冻结,植被吸收水分能力较低, WUE 维持在较低水平。不同季节农田 WUE 的空间分布情况与该地区的太阳辐射、海拔高度、气温、降雨以及农作物类型等因素的季节性变化密切相关,受气候条件和农作物类型的影响,安徽省农田 WUE 整体上呈现春季>秋季>夏季>冬季的特征。

3.3 农田 WUE 变化的影响因素分析

有研究表明,虽然气候在过去几十年的长时间尺度上呈现明显的暖化趋势,气温升高^[32-33],但是在本研究所属时段内 2000—2014 年,安徽省气温呈下降趋势,降雨呈增加趋势。安徽省 2000—2014 年均降雨量在 1019.7—1539.9 mm 之间,多年均值为 1291.5 mm,2000—2014 年降雨量逐渐增加,变化率为 4.2 mm/a(图 9);降雨量从安徽省南部到北部呈现减小趋势,分布不均,皖南山区和大别山区以及江淮之间地区的降雨较多,尤其是黄山市和安庆市,降雨量最多,皖北平原地区的降雨较少。安徽省近 15 年的平均气温在 15.03—17.03℃ 之间,多年均值为 15.8℃,气温呈现波动下降趋势,变化率为 -0.022℃/a(图 9),气温多年平均的空间分布情况则呈现分布不均的趋势,气温较低的地区分布在皖南山区和大别山区,皖北平原地区的气温则处于中间,沿江地区的气温较高。

为了定量分析气象因子对农田 WUE 的影响,因此,逐像元计算 2000—2014 年的农田 WUE 与年降雨、年

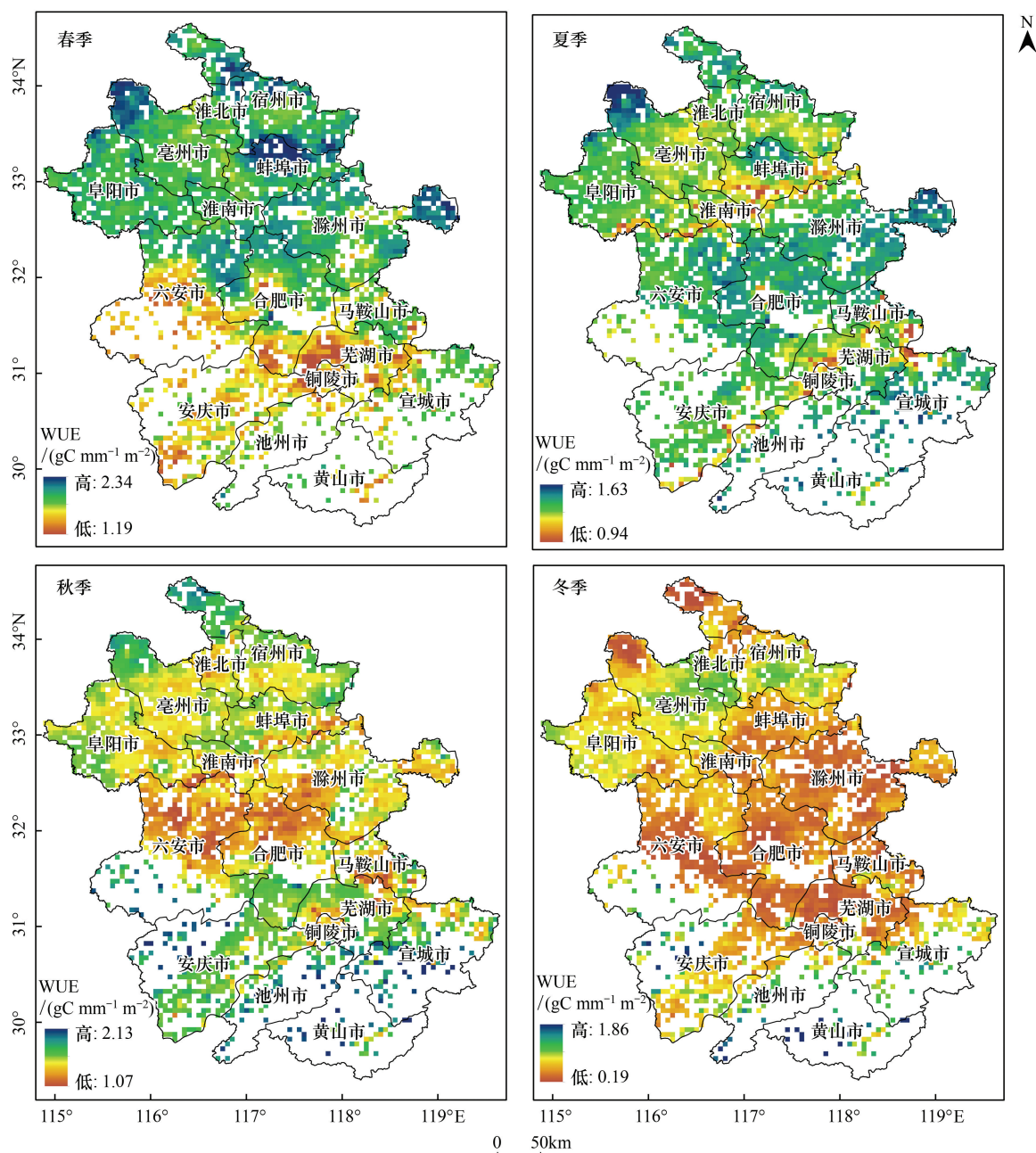


图8 安徽省各季节的农田 WUE 空间分布图

Fig.8 Spatial distributions of cropland WUE in Anhui Province during 2000—2014

气温之间的偏相关系数(图 10),农田 WUE 对气候因子的响应表现出显著的空间差异性。农田 WUE 与年降雨的偏相关系数介于 -0.90 — 0.86 之间(图 10),统计结果表明,农田 WUE 与降雨呈负相关的面积占农田总面积的 83.2%,主要分布在淮北平原和江淮丘陵地区;呈正相关的区域主要分布沿江平原地区;对偏相关系数进行显著性检验,研究区有 2.92%的区域通过了 $P < 0.01$ 水平的 t 显著性检验,主要分布在淮河流域周围以及亳州市中部和阜阳市的北部。

由农田 WUE 与年气温之间的偏相关空间特征(图 10)可知,农田 WUE 与年气温的偏相关系数在 -0.83 — 0.71 之间,正负相关区域分别占研究区面积的 31.4%、68.6%,呈正相关的区域主要集中分布在淮北平原的宿州市、淮北市、亳州市,以及沿江地区,而负相关区域分布在全省农田区域,对偏相关系数进行显著性检验,有 1.57%的区域通过 $P < 0.01$ 的显著性检验,主要分布在淮南市周围以及沿江平原地区。农田 WUE 与气温—降

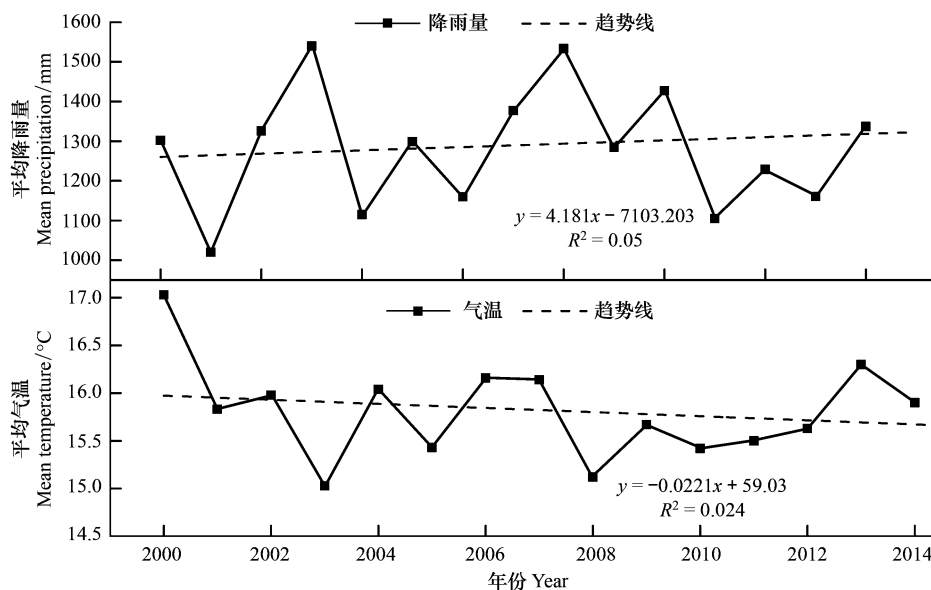


图9 2000—2014 年安徽省年降雨量、气温变化趋势

Fig.9 Annual variation tendency of precipitation and temperature in Anhui Province during 2000—2014

雨的复相关空间分布情况如图 10 所示,农田 WUE 与气候因子的复相关系数在 0.001–0.905 之间;农田 WUE 与气候因子复相关性较强的区域主要集中在淮南市周围以及淮北平原各市,复相关较弱地区主要分布在沿江平原地区以及大别山周围地区;对复相关系数的显著性采用 F 显著性检验法进行检验,有 6.06% 的区域通过 $P<0.05$ 的显著性检验,主要分布在淮北平原以及江淮丘陵地区,农田 WUE 与气候因子之间复相关性存在地区差异,主要受到农作物类型及气候等因素的影响。

表 1 农田 WUE 变化影响因子分区准则

Table 1 The regional rules of the effective factors for cropland WUE changes

农田 WUE 变化影响因子 Cropland WUE changes driving factors		分区准则 Rules	
		R1	R2
气温降雨影响显著型 Change driven by temperature and precipitation significantly	$[T+P]^+$	$ t > t_{0.01}$	$ t > t_{0.01}$
降雨影响显著型 Change driven by precipitation significantly	P	$ t > t_{0.01}$	$ t \leq t_{0.01}$
气温影响显著型 Change driven by temperature significantly	T	$ t \leq t_{0.01}$	$ t > t_{0.01}$
气温降雨影响不显著型 Non-change driven by temperature and precipitation significantly	$[T+P]^-$	$ t \leq t_{0.01}$	$ t \leq t_{0.01}$

R1:农田 WUE 与降雨偏相关的 t 显著性检验 T-Test significance of the partial correlations between cropland WUE and precipitation;R2:农田 WUE 与气温偏相关的 t 显著性检验 T-Test significance of the partial correlations between cropland WUE and temperature; $[T+P]^+$:气温降雨影响显著型 Change driven by temperature and precipitation significantly;T:气温影响显著型 Change driven by temperature significantly;P:降雨影响显著型 Change driven by precipitation significantly; $[T+P]^-$:气温降雨影响不显著型 Non-change driven by temperature and precipitation significantly

为了进一步比较不同区域的气候因子对农田 WUE 的影响,分析各气象因子的影响以及气象因子的综合影响,对农田 WUE 与气温和降雨的偏相关数据进行叠加处理,并根据农田 WUE 变化影响因子分区准则(表 1),将影响类型分为气温降雨影响显著型、降雨影响显著型、气温影响显著型、气温降雨影响不显著型,并对叠加结果进行分类显示,生成气候因子影响显著性分布图(图 10),2000—2014 年农田 WUE 变化只与降雨显著相关的区域占农田区面积的 17.14%,主要分布在淮北平原以及江淮丘陵地区;0.73% 的农田区 WUE 只与气温显著相关,主要集中在宿州市和六安市的北部以及淮南市;WUE 与气温和降雨均为显著相关的农田区域占全省农田面积的 0.71%,以宿州市的北部及淮南市周围最为明显,WUE 与气温和降雨均不显著相关的区域

占全省农田面积的 81.42%, 因此, 在气候因素中, 安徽省农田 WUE 受降雨的影响较大, 受气温的影响相对较小, 而且降雨增加使土壤湿度变大, 改善土壤水分的供给, 增加光合速率, 而且较低的气温减少蒸散作用, 从而减少水分的散失, 有利于农作物的生长; 进一步说明降雨是安徽省农田 WUE 变化的重要气候影响因素。此外, 农作物除了受到自身的生物学特性、土壤特性外, 还受到不同农作物类型对水分的要求、农作物类型地带性差异的影响以及人类活动等非气候因素对其影响, 从而导致农田 WUE 空间差异性。

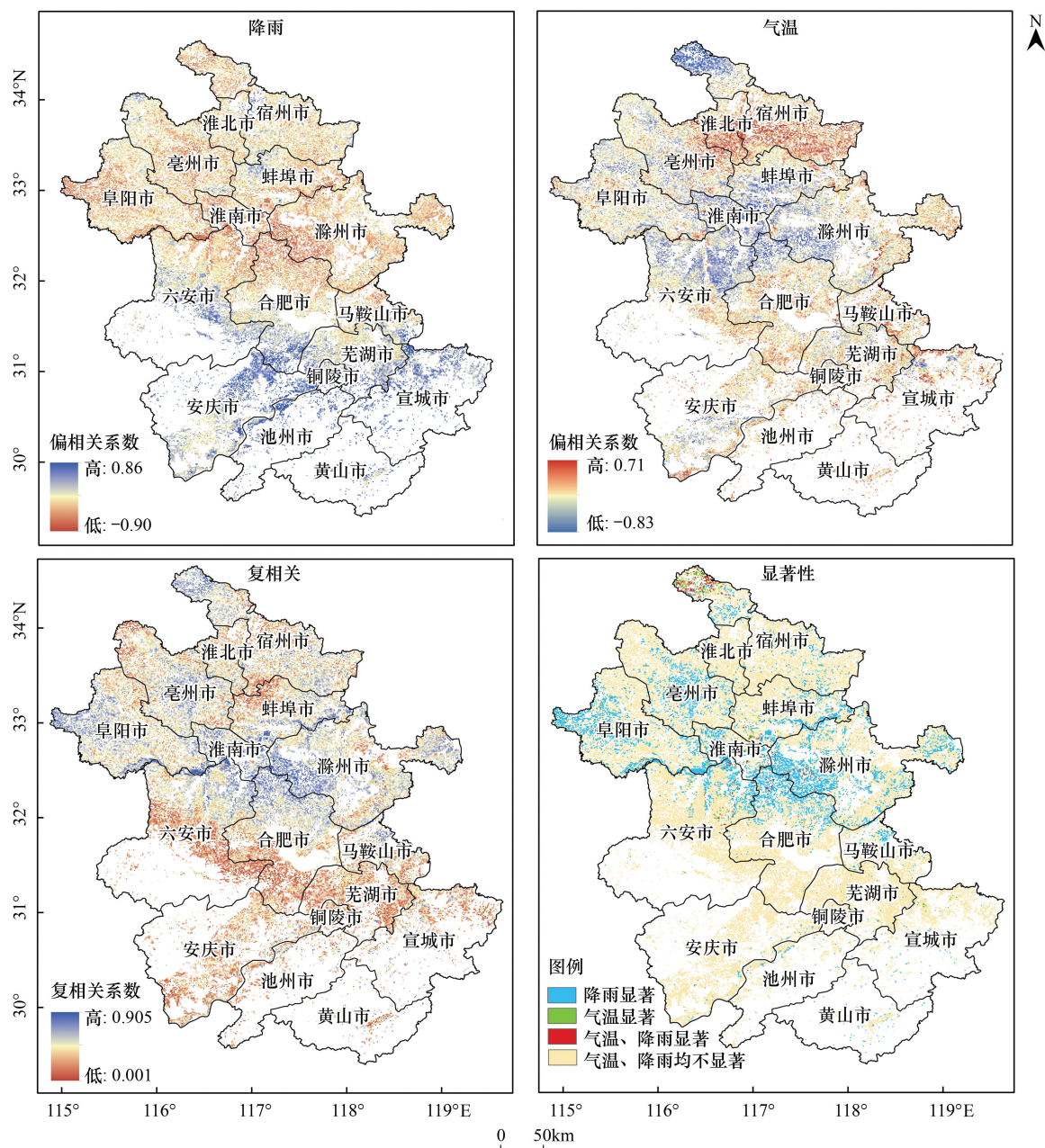


图 10 2000—2014 年气候变化对农田 WUE 的影响

Fig.10 Effects of climate change on cropland WUE in Anhui Province during 2000—2014

4 结论与讨论

利用 MODIS 遥感数据和气象数据定量估算了 2000—2014 年安徽省农田水分利用效率 WUE, 分析了该区域农田生态系统 WUE 的时空动态变化特征以及气候因子对其影响, 主要结论如下:

1)在 2000—2014 年 15 年间,安徽省 ET 呈下降趋势,GPP 呈现出明显的增长趋势,农田 WUE 年际呈现增长变化趋势,表明 GPP 的显著增加是农田 WUE 增长的直接因素。安徽省近 15 年农田年均 WUE 具有较强的空间分异性规律,整体上呈现北高南低趋势,由于在各主要粮食作物中,玉米的 WUE 最高,小麦其次,而水稻最小,淮北平原地区种植作物主要以冬小麦和夏玉米为主;而淮河以南种植作物为油菜和水稻,所以淮河以北各市的农田 WUE 较高,高于全省的多年均值,均值在 $1.5 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 以上,淮河以南地区的农田 WUE 则低于全省水平。

2)2000—2014 年安徽省农田 WUE 的年内变化呈现双峰型变化格局,最大值在 4 月份为 $2.1 \text{ gC mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$;淮河以南各市地区与安徽省变化趋势一致,以 4 月份为最高,但淮河以北各市地区与其变化趋势略有不同,以 3 月份为最高;由于受季节性降雨、气温及农作物类型等多种因素影响,安徽省不同季节农田 WUE 的空间分布差异显著,安徽省不同季节的农田 WUE 大小关系为:春季>秋季>夏季>冬季。

3)安徽省农田 WUE 动态变化受到降雨影响的区域占比 17.14%;气温影响的区域占比 0.73%;降雨和气温综合影响所占面积最小,为 0.71%;而 WUE 与气温和降雨影响均不显著占比为 81.42%,因此,在气候因素中,降雨在安徽省农田 WUE 变化中起主导作用,由于人为因素的干扰,非气候因素对农田 WUE 变化的影响更大。

安徽省是我国的农业大省,作为农业生产的命脉,水资源的科学配置和合理利用直接影响到农业的可持续发展。由于农田耕地种植区多为人工植被,其种植结构、灌溉等因素对农田 WUE 仍具有较大影响,而本研究仅用气温和降雨作为影响农田 WUE 变化的气候因子进行气候因素影响分析,并未考虑人类活动的影响,除气候因素外,影响农田 WUE 的人为因素还包括间作、套作等在内的耕作方式,以及灌溉方式、种植结构等因素的影响,因此,在未来的研究中,应当开展针对不同土地利用模式及变化与 WUE 之间关系的相关研究。

参考文献(References):

- [1] 胡中民,于贵瑞,王秋风,赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [2] Yang Y H, Fang J Y, Fay P A, Bell J E, Ji C J. Rain use efficiency across a precipitation gradient on the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(15): L15702.
- [3] Hu Z M, Yu G R, Fu Y L, Sun X M, Li Y N, Shi P L, Wang Y F, Zhang Z M. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1609-1619.
- [4] Beer C, Ciais P, Reichstein M, Baldocchi D, Law B E, Papale D, Soussana J F, Ammann C, Buchmann N, Frank D, Gianelle D, Janssens I A, Knohl A, Kostner B, Moors E, Rouspard O, Verbeeck H, Vesala T, Williams C A, Wohlfahrt G. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2018.
- [5] 张远东,庞瑞,顾峰雪,刘世荣. 西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应. 生态学报, 2016, 36(6): 1515-1525.
- [6] Tian H Q, Chen G S, Liu M L, Zhang C, Sun G, Lu C Q, Xu X F, Ren W, Pan S F, Chappelka A. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [7] Tian H Q, Lu C Q, Chen G S, Xu X F, Liu M L, Ren W, Tao B, Sun G, Pan S F, Liu J Y. Climate and land use controls over terrestrial water use efficiency in monsoon Asia. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 322-340.
- [8] Lu X L, Zhuang Q L. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 1924-1939.
- [9] 张春敏,梁川,龙训建,卫仁娟. 江河源区植被水分利用效率遥感估算及动态变化. 农业工程学报, 2013, 29(18): 146-155.
- [10] 张良侠,胡中民,樊江文,邵全琴,唐风沛. 区域尺度生态系统水分利用效率的时空变异特征研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(6): 691-699.
- [11] Jassal R S, Black T A, Spittlehouse D L, Brummer C, Nesic Z. Evapotranspiration and water use efficiency in different-aged Pacific Northwest Douglas-fir stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6/7): 1168-1178.
- [12] 仇宽彪,成军锋. 陕西省植被水分利用效率与气候因素的关系. 水土保持研究, 2015, 22(6): 256-260.
- [13] 刘晓,戚超,闫艺兰,袁国富. 不同生态系统水分利用效率指标在黄土高原半干旱草地应用的适宜性评价. 植物生态学报, 2017, 41(5): 497-505.

- [14] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Evolution of hydrological and carbon cycles under a changing climate. *Hydrological Processes*, 2011, 25(26): 4093-4102.
- [15] Ito A, Inatomi M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the Global Carbon and Water Cycles. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(2): 681-694.
- [16] Klein T, Shpringer I, Fikler B, Elbaz G, Cohen S, Yakir D. Relationships between stomatal regulation, water-use, and water-use efficiency of two coexisting key Mediterranean tree species. *Forest Ecology and Management*, 2016, 302: 34-42.
- [17] 卢玲, 李新, 黄春林, Frank V. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 777-784.
- [18] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 王安志, 金昌杰, 吴家兵, 李峥, 井艳丽. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素. *生态学报*, 2015, 35(2): 478-488.
- [19] 位贺杰, 张艳芳, 董孝斌, 鲁纳川, 王雪超. 渭河流域植被 *WUE* 遥感估算及其时空特征. *自然资源学报*, 2016, 31(8): 1275-1288.
- [20] Sur C Y, Choi M H. Evaluating ecohydrological impacts of vegetation activities on climatological perspectives using MODIS gross primary productivity and evapotranspiration products at Korean Regional Flux Network Sit. *Remote Sensing*, 2013, 5(5): 2534-2553.
- [21] 仇宽彪, 成军锋, 贾宝全. 中国中东部农田作物水分利用效率时空分布及影响因子分析. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 103-109.
- [22] 李明旭, 杨延征, 朱求安, 陈槐, 彭长辉. 气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率变化趋势. *生态学报*, 2016, 36(4): 936-945.
- [23] 李肖娟, 张福平, 王虎威, 雷声剑, 高张. 黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其与气候因子的关系. *中国沙漠*, 2017, 37(4): 733-741.
- [24] 中国农业年鉴编辑委员会. *中国农业年鉴 2015*. 北京: 中国农业出版社, 2016: 45-50.
- [25] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, Running S W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.
- [26] Mu Q Z, Zhao M S, Heinsch F A, Liu M L, Tian H Q, Running S W. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(G1): G01012.
- [27] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [28] Zhao M S, Running S W, Nemani R R. Sensitivity of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(G1): G01002.
- [29] Heinsch F A, Reeves M, Votava P, Kang S, Milesi C, Zhao M S, Glassy J, Jolly W M, Loehman R, Bowker C F, Kimball J S, Nemani R R, Running S W. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm, Version 2.0. Missoula: The University of Montana, 2003: 31-33.
- [30] Running S W, Zhao M S. User's Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm, Version 3.0. South Dakota: Land Processes Distributed Active Archive Center, 2015: 9-14.
- [31] Heinsch F A, Zhao M S, Running S W, Kimball J S, Nemani R R, Davis K J, Bolstad P V, Cook B D, Desai A R, Ricciuto D M, Law B E, Oechel W C, Kwon H, Luo H Y, Wofsy S C, Dunn A L, Munger J W, Baldocchi D D, Xu L K, Hollinger D Y, Richardson A D, Stoy P C, Siqueira M B S, Monson R K, Burns S P, Flanagan L B. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1908-1925.
- [32] 叶圆圆. 1949-2016 年 ENSO 现象对安徽省气候的主要影响. *湖北第二师范学院学报*, 2017, 34(8): 65-70.
- [33] 曾婷, 杨东, 郭佩佩, 宋苗, 马露, 薛双奕. 1960—2012 年安徽省降水和气温变化特征及其与 ENSO 的相关性分析. *热带地理*, 2014, 34(6): 783-793.