

文章编号:1672-3031(2019)04-0305-07

黑龙江西部农田水分利用效率时空特征及气候影响分析

付俊娥^{1,3}, 王明月^{1,2}, 庞治国^{1,3}, 李芳花⁴, 曲伟^{1,3}, 刘潇⁴

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 山西大学, 山西 太原 030006;

3. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038; 4. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 100050)

摘要: 生态水分利用效率是衡量植物生长状况尤其是农作物灌溉效果的重要指标。在全球变化背景下分析水分利用生产效率(WUE)时空分布及变化趋势, 探讨其对气候变化的响应, 对于更好地理解气候变化对农田生态系统的影响和优化配置水资源具有重要的意义。本文基于2000—2016年的气象数据和MODIS总初级生产力和蒸散发产品, 采用趋势分析和偏相关分析等方法, 研究黑龙江西部17年内农田WUE的时空变化特征, 并对WUE与降水、平均温度、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温和有效积温等气候因子的相关性和空间分布进行分析, 揭示影响黑龙江西部农田WUE变化的主导因素。研究结果可为提高该地区的农田灌溉效率以及合理配置水资源提供重要参考。

关键词: 水分利用效率; 时空特征; 气候变化; 农田; 遥感

中图分类号: S274.4

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.04.009

1 研究背景

水分利用效率(Water use efficiency, WUE)是指单位水量通过植物叶片蒸腾耗散时所能同化的光合产物量, 或指植被光合作用生产的干物质(Gross Primary Productivity, GPP)或净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)与蒸散发(Evapotranspiration, ET)所消耗的水分之比^[1], 是植被生态系统碳、水循环的重要指示因子以及衡量植被生长状况的监测指标, 也是评价气候变化的重要特征^[2]。因此, 研究WUE的动态变化及其对气候因子的响应, 对于揭示植被生态系统碳-水循环对气候变化的响应机理, 优化地区水资源管理及生态环境的健康发展具有重要的意义^[3]。

由于数据获取手段差异, 计算WUE的方法也不同。遥感具有在大范围、长时间数据获取方面的优势, 随着近年来区域乃至全球尺度的地表生态过程反演算法的不断成熟, 被作为进行区域WUE动态变化监测的有效工具。在全球气候变化背景下, 许多学者对生态系统WUE的时空演变和影响因素进行了大量的研究, 且关注热点逐渐由林草生态系统扩展至农田生态系统。仇宽彪等^[4]利用MODIS GPP和ET产品分析了2003—2012年中国中东部地区农田生态系统水分利用效率的时空分布特征及其影响因子, 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; 王芳等^[5]利用MOD16 ET和MOD17 GPP数据及气象数据, 分析了安徽省2000—2014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, 认为降雨在安徽省农田WUE变化中起主导作用。赵安周等^[1]基于遥感、气象数据, 利用趋势分析、相关分析等方法分析了海河流域2000—2014年总初级生产力GPP、蒸散发ET及WUE的时空分布特征, 并识别WUE对降水、气温及干旱的响应, 认为降水对WUE的影响最大。总体来看, 在不同的区域尺度上, WUE的时空分布表现出较大的时空差异性, 且对气候和不同植被类型的响应程度也具有较大差异。

黑龙江西部地区是我国重要的粮食主产区之一, 为典型半干旱季风气候, 属于全球气候变化敏感区, 农作物一年一熟, 主要作物包括玉米、水稻和大豆, 农田面积占总土地面积的50%以上, 占

收稿日期: 2019-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0605003); 国家科技支撑计划课题(2014BAD12B01)

作者简介: 付俊娥(1976-), 教授级高级工程师, 主要从事水利遥感技术应用研究。E-mail: fuje@iwhr.com

通信作者: 庞治国(1975-), 教授级高级工程师, 主要从事水利遥感技术应用研究。E-mail: pangzg@iwhr.com

全国农田总面积的5.8%，属于典型的农田生态系统生产力区域，研究黑龙江西部农田WUE变化对于保障国家粮食安全具有举足轻重的地位。MODIS总初级生产力(GPP)和蒸散发(ET)产品是目前研究生态系统WUE普遍采用的数据，因此本文采用MODIS产品分析黑龙江西部农田WUE的时空分布变化特征，及其与气候因子的关系，为该地区农田水资源管理以及生态环境可持续发展提供决策依据。

2 研究区与数据来源

2.1 研究区概况 研究区位于黑龙江省西部(122°23'—130°14'E、44°04'—48°55'N)，包括哈尔滨、绥化、大庆和齐齐哈尔，总面积15.08万km²。该地区属半干旱半湿润气候，是气候变化敏感区，年平均气温为0~5℃；全年降水量400~600mm，主要集中在6—8月，自东向西逐渐减少；年均日照时数2600~2900h，年总辐射量4500~5300MJ/m²；无霜期日数115~160d，≥10℃活动积温2300℃~3100℃，自南向北递减。该地区幅员辽阔，地势平坦，土地肥沃，土地利用类型以耕地、林地、未利用地和水域为主，占全区面积的96%，其中耕地面积最大，分布最广且成片分布，占全区总面积的55%(见图1)，是黑龙江省主要商品粮生产基地，也是比较典型的旱作农业区，农事活动期为4—10月。

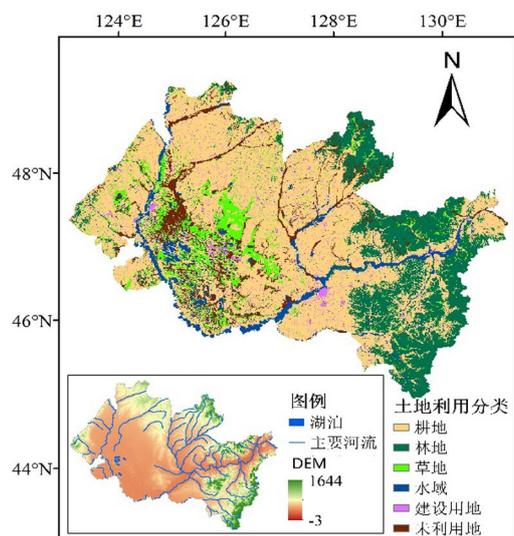


图1 黑龙江西部DEM和土地利用类型

2.2 数据来源 本文采用从美国国家航空航天局网站下载的研究区2000—2016年MOD16A2 ET和MOD17A2H GPP产品来计算作物水分利用效率，该数据由美国蒙大拿大学密苏拉分校地球动态数值模拟研究组研究发布并验证其有效性，空间分辨率为500m×500m，时间分辨率为8d，数据时段为作物生长季即每年的5月上旬至10月上旬。姜艳阳等^[6]采用水量平衡方法从月尺度对MODIS MOD16蒸散发产品在中国流域的质量进行了评估，结果表明该产品在松花江流域的季节和空间分布特征与验证数据最为接近，相关系数 R^2 达到了0.722，平均偏差(MBE)为-1.67。由此可见，MOD16地表蒸散产品在研究区范围内的精度总体上符合要求。采用ArcGIS对GPP与ET进行重投影、镶嵌和裁切等预处理，然后根据MODIS产品的质量标识层剔除云和无效值，并用同期产品的多年均值填充无值区，之后将作物生长季的遥感数据进行累加得到年值，最后用土地利用中的耕地(旱地)进行掩膜处理。气候数据^[7-9]由国家气候中心提供，空间分辨率为0.25°×0.25°，包括2000—2016年黑龙江西部地区日降水量与日气温数据，采用五日滑动平均法求算界限温度的起止日期，在此基础上计算得到≥0℃和≥10℃活动积温以及≥10℃有效积温。经过统计计算得到年值，利用CUBIC法插值为500m×500m，使之与遥感数据分辨率保持一致。气候因子主要选取Pre(年平均降水量)、Tm(年平均气

温)、 $AT0$ ($\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温)、 $AT10$ ($\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温)和 $EAT10$ ($\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温)。

3 研究方法

3.1 水分利用效率 本文的 WUE 采用 GPP 与 ET 的比值表示^[10]:

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

式中: WUE 为作物水分利用效率 ($\text{gC}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); GPP 为作物全生育期总初级生产力 ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$); ET 为作物全生育期实际蒸散发 (mm)。

3.2 分析方法 本文采用标准差分析、线性趋势法及偏相关空间分析三种方法, 来分析黑龙江西部农田 GPP 、 ET 和 WUE 的波动变化以及 WUE 与气候因素的关系。标准差可以反映 WUE 等数据集的离散程度, 值越大, 表明该要素距离平均值越远, 年际变化越大^[11], 计算公式如式(2)^[12]。线性趋势法是指通过编制和分析时间序列, 根据时间序列所反映出来的线性趋势进行延伸, 借以预测下一时期或以后若干时期可能达到的水平。采用一元线性方程 $Y=ax+b$ 表示各要素的趋势变化, 其中 a 为斜率。采用偏相关空间关系分析气候因子与 WUE 之间的关系, 即利用式(3)—(5)分析气候因子与 WUE 之间的简单相关系数、一阶偏相关系数和二阶偏相关系数。

$$S = \sqrt{\frac{\sum(I_i - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{Cov}(i, j)}{\sqrt{\text{Var}[i] \text{Var}[j]}} \quad (3)$$

$$r_{ijh} = \frac{r_{ij} - r_{ih}r_{jh}}{\sqrt{(1 - r_{ih}^2)(1 - r_{jh}^2)}} \quad (4)$$

$$r_{ijhm} = \frac{r_{ijh} - r_{imh}r_{jmh}}{\sqrt{(1 - r_{imh}^2)(1 - r_{jmh}^2)}} \quad (5)$$

式中: $\text{Cov}(i, j)$ 为 i 和 j 的协方差; $\text{Var}(i)$ 和 $\text{Var}(j)$ 分别为 i 和 j 的方差; r_{ij} 为变量 i 与 j 的简单相关系数, r_{ijh} 为控制 h 变量后 i 与 j 的一阶偏相关系数, r_{ijhm} 为控制 h 和 m 变量后 i 与 j 的二阶偏相关系数。Hurst 指数可作为判断要素时间序列是否具有长程依赖性的参考依据^[13], 本文利用 Hurst 指数分析各要素的持续性, H 的取值范围在 $0 < H < 1$; 若 $H=0.5$, 则该要素为相互独立、方差有限的随机序列; 若 $0.5 < H < 1$, 则该要素具有持续性, 未来与过去趋势一致; 若 $0 < H < 0.5$, 则该要素具有反持续性。

4 结果与分析

4.1 农田 WUE 时空分布特征 对黑龙江省西部 2000—2016 年作物生长季(5月初—10月上旬)农田 WUE 年际时间变化特征分析(图 2)可知, ET 年均值的波动范围在 286 ~ 425 mm 之间, 多年蒸散发均值为 363.08 mm, 整体呈显著增加趋势, 变化率为 $8.32 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$; GPP 波动范围在 493—693 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 均值为 583.80 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$, 同样呈现显著增加趋势, 变化率为 $9.93 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 农田年均 WUE 的变化范围在 1.44 ~ 1.75 $\text{gC}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 多年均值为 1.63 $\text{gC}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, 整体呈微弱下降趋势, 变化率

表 1 农田 GPP 、 ET 与 WUE 变化统计特征值

| 类别 | 均值 | 斜率 | 标准偏差 | Hurst 指数 | 变化率/% | 增长区域/% | 减少区域/% |
|--|--------|-------|-------|----------|--------|--------|--------|
| $GPP/(\text{gC}\cdot\text{m}^{-2})$ | 583.80 | 9.93 | 55.95 | 0.52 | 25.21 | 99.18 | 0.82 |
| ET/mm | 363.08 | 8.32 | 42.96 | 0.53 | 48.35 | 99.77 | 0.23 |
| $WUE/(\text{gC}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$ | 1.63 | -0.01 | 0.08 | 0.48 | -16.87 | 4.73 | 95.27 |

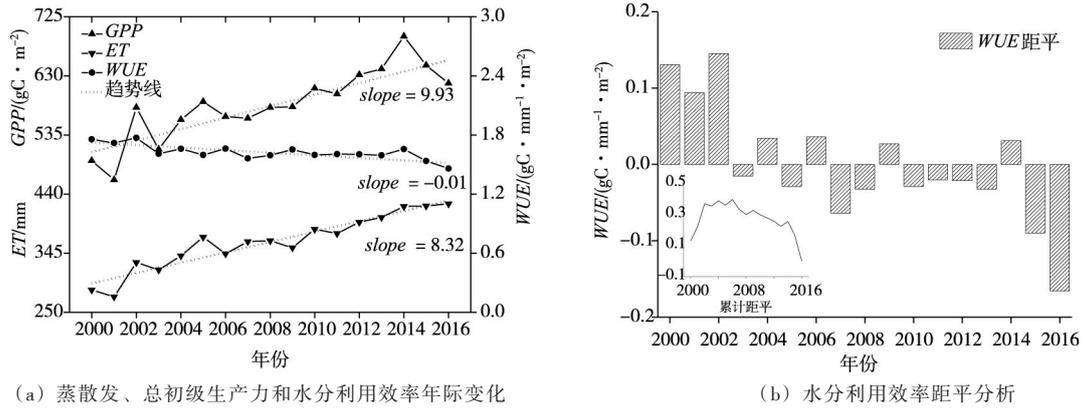


图2 2000—2016年黑龙江西部农田蒸散发、总初级生产力和水分利用效率年际变化及WUE距平分析

为 $0.01 \text{ gC}\cdot\text{mm}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$ 。采用偏差法分析 2000—2016 年各年农田 WUE 偏离多年平均水平的程度，WUE 呈现先增加后减少的趋势，其中 2000、2002 和 2016 年偏差值较大，说明偏离平均水平的程度较严重，2000 和 2002 年的农田 WUE 值较高，都在 $1.7 \text{ gC}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上；2016 年 WUE 较低，低于多年平均水平的 10% 以上，通过查阅相关文献资料^[14]可知 2016 年 7 月上旬至 8 月 28 日期间黑龙江省西部出现了中等程度以上旱情，其中齐齐哈尔地区出现了重旱，干旱导致 2016 年农作物 GPP 下降，使 WUE 出现较大的偏离。对研究区 2000—2016 年 GPP、ET 与 WUE 进行 Hurst 指数分析表明，GPP 与 ET 在未来可能会持续增加，而 WUE 则可能会与过去的趋势相反，出现缓慢回升情况。

2000—2016 年黑龙江西部农田 GPP、ET 与 WUE 的年内变化特征如图 3 所示，GPP 和 ET 均呈先增加后减少的单峰型变化趋势，从 5 月份开始缓慢增加，在 7、8 月份达到峰值，9 月后下降；WUE 年内呈现明显的“上升-下降-上升-下降”的 M 型趋势，2 次峰值之间的转折点出现在 7 月份，最大值出现在 9 月份，分析结果与王芳、范田亿等人研究相一致^[6,15]。

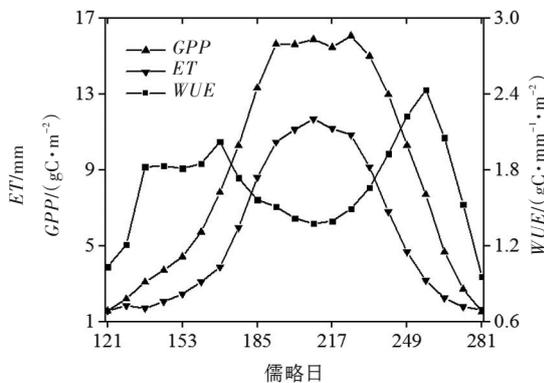


图3 2000—2016年黑龙江西部农田蒸散发、总初级生产力和水分利用效率年内变化

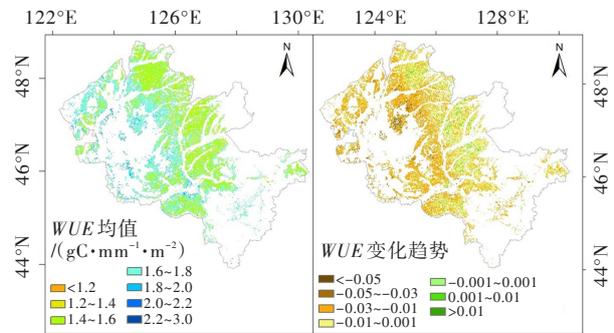


图4 2000—2016年黑龙江西部农田水分利用效率年均值空间分布和变化趋势

2000—2016 年黑龙江西部农田 WUE 的空间分布存在较大差异 (图 4)，呈现由东向西递增的趋势，变化范围在 $0.8 \sim 3.05 \text{ gC}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间，WUE >1.7 的高值区集中于大庆与齐齐哈尔东部，主要分布在水域周围，低值区集中于哈尔滨市北部、绥化市和齐齐哈尔市北部等山前地区；WUE 空间变化整体呈减少趋势，斜率为 $-0.05 \sim 0.01$ ，减少区域占 95.27%，变化趋势由西向东递增。WUE 快速减少趋势集中于大庆、齐齐哈尔地区，缓慢减少趋势集中于绥化与哈尔滨市。WUE 减少区域 GPP 呈增加趋势，且增势小于 ET。由此可知，GPP 增势小于 ET 增势是 WUE 值减少的原因。

4.2 气候因素影响分析 近 100 年，我国气温呈现上升趋势，全球气候变化已对我国农业生态系统特别是我国北方旱区农业造成重大影响^[16]。大量的研究表明，WUE 对气候变化有着明显的响应。在本研究区所属 2000—2016 年时段内，气温呈下降趋势，降雨呈增加趋势 (表 2 和图 5)，年均降雨量在

表2 黑龙江西部农田区气候要素统计特征值

| 类别 | 均值 | 斜率 | 标准偏差 | Hurst指数 |
|------------------|---------|-------|-------|---------|
| <i>Pre</i> /mm | 520.89 | 10.18 | 89.27 | 0.45 |
| <i>Tm</i> /°C | 3.60 | -0.02 | 0.64 | 0.52 |
| <i>AT0</i> /°C | 3294.17 | -2.57 | 60.99 | 0.48 |
| <i>AT10</i> /°C | 2947.52 | -4.68 | 70.17 | 0.46 |
| <i>EAT10</i> /°C | 1402.03 | -2.50 | 65.72 | 0.42 |

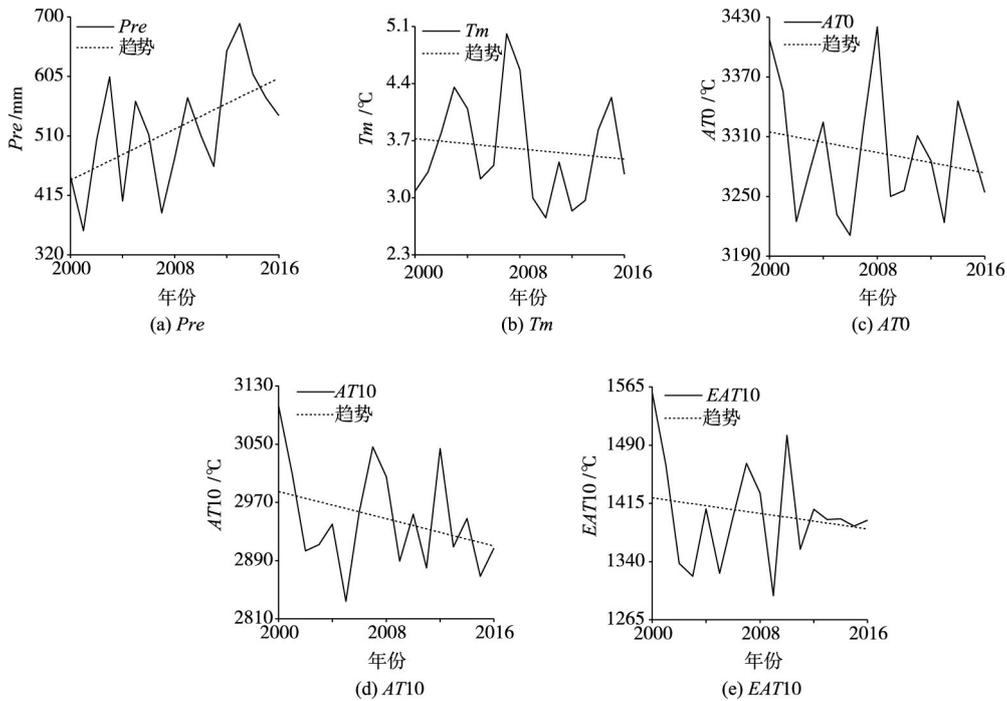


图5 2000—2016年黑龙江西部农田区气候要素变化

360 ~ 680 mm之间，多年均值为522 mm，年降雨量逐渐增加，变化率为10.18 mm·a⁻¹；研究区近17年平均温度*Tm*、年积温*AT0*、*AT10*和*EAT10*都呈波动下降趋势，多年均值分别为3.60 °C、3294.17 °C、2947.52 °C和1402.03 °C。

为了定量分析气候变化对农田*WUE*的影响，采用SPSS统计分析2000—2016年*WUE*与各气候要素的相关关系(表3)，可以看出平均温度*Tm*、降雨量*Pre*、≥10 °C活动积温*AT10*与*WUE*的偏相关性较高。其中，*Pre*、*Tm*与*WUE*呈负相关，*AT10*与*WUE*呈正相关。选取相关系数较高的气候因子与*WUE*逐像元做偏相关分析(图6)，可以看出由于受农作物类型、土壤、气候等复杂因素的影响，气候因子与农田*WUE*的相关性存在明显地区差异。其中，*Pre*、*Tm*与*WUE*在哈尔滨市西部与绥化市的南部相关性最高，在大庆、齐齐哈尔地区的相关性较低，且负相关区域占比大，分别为68.09%、77.81%。*AT10*与*WUE*相关性最高的集中在绥化市与哈尔滨市西部，整体呈正相关趋势，占比77.81%。总体而言，在气候因素中，黑龙江西部农田*WUE*受平均温度和降雨的影响较大，≥10 °C积

表3 *WUE*与气候要素相关性统计

| 类别 | 与 <i>WUE</i> 相关系数 | 与 <i>WUE</i> 偏相关系数 | 偏相关正相关面积占比/% | 偏相关负相关面积占比/% |
|--------------|-------------------|--------------------|--------------|--------------|
| <i>Pre</i> | -0.311 | -0.309 | 31.91 | 68.09 |
| <i>Tm</i> | -0.203 | -0.377 | 22.19 | 77.81 |
| <i>AT0</i> | 0.160 | | | |
| <i>AT10</i> | 0.351 | 0.251 | 77.81 | 22.19 |
| <i>EAT10</i> | 0.158 | | | |

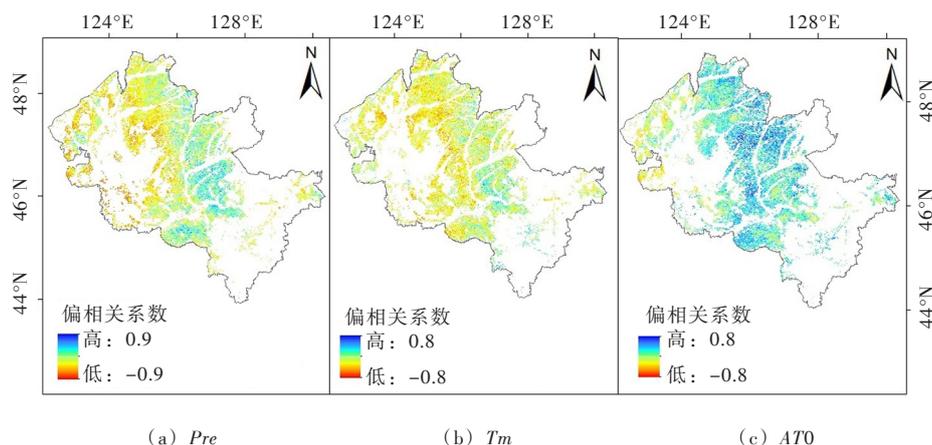


图6 *Pre*、*T_m*、*ATO*与*WUE*偏相关空间分布

温的影响次之。

5 结论

本文基于MODIS数据和气象数据，对2000—2016年黑龙江西部农田*WUE*的时空分布进行了分析，主要结论如下：

(1)时间尺度上，黑龙江西部农田*GPP*与*ET*在2000—2016年间均呈显著上升趋势，增速分别为 $9.93 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 与 $8.32 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ；*WUE*呈略微下降趋势，均值为 $1.63 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ，降速为 $-0.01 \text{ gC} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。*GPP*与*ET*在未来可能会持续增加，而*WUE*则可能会与过去的趋势相反，出现缓慢回升情况。

(2)空间尺度上，2000—2016年黑龙江西部农田*WUE*空间分布呈现由东低向西高的趋势，各地市多年平均年*WUE*大小差异显著，高值区集中于大庆与齐齐哈尔东部，主要分布在水域周围，即水源充足的地区*GPP*较高，*WUE*较大；*WUE*空间变化整体呈减少趋势，斜率为 $-0.05 \sim 0.01$ ，且西部地区减少趋势明显。

(3)气候影响方面，气候因素是影响黑龙江西部农田*WUE*的主要因子，年平均气温呈下降趋势，年降雨量呈增加趋势，降水、平均温度与农田*WUE*呈负相关关系， $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 活动积温与*WUE*呈正相关；影响2000—2016年农田*WUE*的主要气候因子是降水和平均温度，其次为 $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温。

参 考 文 献：

- [1] ROSENBERG N J. Microclimate: The Biological Environment[M]. New York: John Wiley & Sons Press, 1974.
- [2] HU Z M, YU G R, FU Y L, et al. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China[J]. Global Change Biology, 2008, 14(7): 1609-1619.
- [3] 赵安周, 张安兵, 冯莉莉, 等. 海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1452-1462.
- [4] 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[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 103-109.
- [5] 王芳, 汪左, 黄静, 等. 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[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6268-6279.
- [6] 姜艳阳, 王文, 周正昊. MODIS MOD16蒸散发产品在中国流域的质量评估[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 517-528.
- [7] XU Y, GAO X J, SHEN Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM

- simulation[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 763–772.
- [8] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102–1111.
- [9] WU J, GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1102–1111.
- [10] 杜晓铮, 赵祥, 王昊宇, 等. 陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(23): 8296–8305.
- [11] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2000—2014年黄土高原植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(5): 1568–1578.
- [12] 袁章能. 线性趋势法在经济预测中的运用[J]. *武钢技术*, 1987(3): 48–55.
- [13] 江田汉, 邓莲堂. Hurst指数估计中存在的若干问题—以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 177–182.
- [14] 王春丽. 2016年黑龙江省主要气象灾害概述[J]. *现代化农业*, 2017(8): 12.
- [15] 范田亿, 张翔. 2000—2014年中国粮食主产区植被水分利用效率时空演变特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(3): 99–107.
- [16] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 18(8): 1877–1885.

Spatio-temporal characteristics of water use efficiency and its attribution analysis with climatic factors in western region of Heilongjiang province

FU Jun'e^{1, 3}, WANG Mingyue^{1, 2}, PANG Zhiguo^{1, 3}, LI Fanghua⁴, QU Wei^{1, 3}, LIU Xiao⁴

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;*

2. *Shanxi University, Taiyuan 030006, China;*

3. *Research Center in Flood and Drought Disaster Reduction of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;*

4. *Heilongjiang Province Hydraulic Research institute, Harbin 100050, China)*

Abstract: Water Use Efficiency(WUE) is a most important indicator to measure vegetation status. Against the background of climate change, the analysis on the variation of farmland WUE is for better understanding of the impact of climate change and is of great significance to optimize the management of regional water resources in farmland region. Using 2000–2016 MODIS products and meteorology data, the spatial and temporal variation characteristics of gross primary productivity (GPP), evapotranspiration(ET), and farmland WUE in the western region of Heilongjiang Province were analyzed in recent 17 years by the linear trend analysis and correlation analysis. Moreover, the correlation coefficients between farmland WUE and climate variables were calculated to analyze the relative effects of precipitation, average temperature, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature and effective accumulated temperature on variations of WUE. The result can provide reference for improving the farmland irrigation efficiency and rational allocation of water resources in this area.

Keywords: water use efficiency; temporal and spatial variation characteristics; climate change; farmland; remote sensing

(责任编辑: 王学风)