

DOI: 10.5846/stxb201909151916

刘福红,叶许春,郭强,李相虎,刘佳.鄱阳湖流域不同土地覆被碳水利用效率时空变化及其与气候因子的相关性.生态学报,2021,41(2): 694-706.

Liu F H, Ye X C, Guo Q, Li X H, Liu J. Spatio-temporal variation of carbon and water use efficiency of different land cover in the Poyang Lake Basin and their correlations with climate factors. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 694-706.

鄱阳湖流域不同土地覆被碳水利用效率时空变化及其与气候因子的相关性

刘福红¹, 叶许春^{1,*}, 郭 强¹, 李相虎², 刘 佳³

1 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

2 中国科学院南京地理与湖泊研究院/中科院流域地理学重点实验室, 南京 210008

3 中国水利水电科学研究院/流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038

摘要:鄱阳湖流域作为较突出的碳汇功能区, 深入掌握不同土地覆被碳素利用率(CUE)和水分利用效率(WUE)的时空分异规律及其对气候因子的响应, 对明确气候变化背景下该流域生态功能和碳水循环有重要意义。利用 MODIS 数据产品, 结合流域土地利用和气象监测数据, 辅以趋势分析和相关分析等方法研究了 2000—2014 年鄱阳湖流域不同土地利用类型 CUE 和 WUE 的时空变化特征, 并探讨了其与降水、气温和日照时数的相关性。结果表明: 1) 鄱阳湖流域 CUE 和 WUE 多年平均值分别为 0.458 和 0.682 gC/kgH₂O, 不同土地利用类型的 CUE 大小依次为草地>水田>其他林地>旱地>疏林地>灌木林>有林地, WUE 大小依次为有林地>灌木林>旱地>疏林地>水田>其他林地>草地; 2) 鄱阳湖流域 CUE、WUE 在研究时段内均呈微弱下降趋势, 各土地利用类型 CUE 和 WUE 则表现出较大的年际波动, 且年际变化趋势率具有高度的相似性, 其中林地各类型下降趋势最大, 其次是旱地和水田, 草地最小; 3) 降水是影响鄱阳湖流域土地覆被碳水利用效率变化的关键因素, 其他因子与 CUE 和 WUE 的相关性均不显著, 不同覆被 CUE 和 WUE 对气温、降水和日照时数的响应程度存在较大差异。

关键词:碳素利用率; 水分利用效率; 气候变化; 土地覆被; 鄱阳湖流域

Spatio-temporal variation of carbon and water use efficiency of different land cover in the Poyang Lake Basin and their correlations with climate factors

LIU Fuhong¹, YE Xuchun^{1,*}, GUO Qiang¹, LI Xianghu², LIU Jia³

1 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 State Key Laboratory of Lake Science and Environment/Nanjing Institute of Geography and Limnology, Nanjing 210008, China

3 State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin/China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: The Poyang Lake Basin is a prominent carbon sink functional area in China. Understanding the spatio-temporal differentiation of different land covers ecosystem carbon use efficiency (CUE) and water use efficiency (WUE) in the Poyang Lake Basin and their responses to meteorological factors is of great significance to clarify regional ecological functions and carbon-water cycle under the context of climate change. Based on the latest MODIS products, land cover data and meteorological observations during 2000—2014, the spatio-temporal variations of CUE and WUE of different land covers in the Poyang Lake Basin and their correlations with precipitation, temperature and sunshine duration were investigated by using the methods of trend analysis and correlation analysis. Results of this research show that: 1) the average annual CUE

基金项目: 中央高校基本科研业务费(XDKJ2019B074); 国家自然科学基金项目(51822906, 42071028)

收稿日期: 2019-09-15; 网络出版日期: 2020-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxch2000@swu.edu.cn

and WUE in the Poyang Lake Basin were 0.458 and 0.682 gC/kgH₂O, respectively. For different land cover types, the values of CUE descended in the order of grassland > paddy field > other woodland > dry land > sparse forest > shrub forest > forest land; whereas the values of WUE descended in the order of forest land > shrub forest > dry land > sparse forest > paddy field > other woodland > grassland. 2) During the study period, both CUE and WUE showed a slight decreasing trend. Both the CUE and WUE of different land covers in the Poyang Lake Basin showed large inter-annual fluctuations, while their linear change rate was highly consistent. The different types of forest showed the largest decreasing rate, followed by dry land, paddy field and grassland. 3) Generally, precipitation is the key meteorological factor affecting the change of CUE and WUE in the Poyang Lake Basin, while the other meteorological factors are not significantly correlated with CUE and WUE. Moreover, the responses of CUE and WUE to temperature, precipitation and sunshine duration varied significantly among different land covers.

Key Words: carbon use efficiency; water use efficiency; climate change; land cover; the Poyang Lake Basin

陆地生态系统是全球碳循环中的一个主要碳汇^[1],其与气候变化之间的响应关系不仅是国际地圈生物圈计划的核心研究内容,也是全球变化的研究热点^[2]。随着全球气候的变暖、社会经济的发展和人类活动的加剧,如何平衡碳水循环问题在科学界得到高度关注^[3-4]。由于估算碳水循环影响因子的不确定性,以及在全球变化的相关研究中,对碳水循环与气候之间相互作用的研究成果较缺乏,在一定程度上增加了广大学者对陆地生态系统碳水循环研究的兴趣^[5]。

植被碳素利用率(Carbon Use Efficiency, CUE)反映了生态系统植被将生产力转化为植被生物量储存在生态系统中的效率,是碳循环研究中的重要生态学参数^[4],通常用植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)与总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)的比值来表示。植被水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)是指植被生态系统每单位面积碳吸收所损失的水分比率,通常被定义为生态系统生产的干物质量(GPP 或 NPP)与蒸散量(Evapotranspiration, ET)的比值^[5]。该指标实质上反映了植被的光合生产过程与植物损耗水分之间的关系,也可反映生态系统利用水分将营养物质转化为生物量的能力^[6]。CUE 和 WUE 作为植被生态系统碳、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,其计算结果不仅直观,而且适用于比较各种生态系统的碳、水循环差异^[7]。不同植被类型因其光合作用的能力不同,碳、水循环过程及其对气候变化的响应存在差异。因此,深入研究植被碳、水利用效率的时空演变差异及其与气候因子的关系,对于明晰生态系统碳水循环对全球气候变化的响应机制、准确评估和预测区域碳收支、优化地区水资源管理以及促进生态环境的健康发展具有重要意义^[8]。

近年来,国内外学者采用不同的方法对陆地植被碳、水利用效率的时空演变模式和影响因素进行了分析。相关研究中,除了采用常规的观测法如涡度相关法等对站点尺度的植被碳、水利用效率开展研究外,更多的是基于生态过程模型和遥感数据开展大尺度和连续时间序列的研究。如袁旻舒等^[9]利用 CMIP5 模型预测了在未来气候变化背景下,中国陆地生态系统 CUE 与气温呈负相关、与降水呈正相关关系。张远东等^[10]用 CEVSA 模型研究了西南高山区域的植被 WUE 变化规律,发现 1954—2010 年间 WUE 呈显著下降趋势。Marjanovic 等^[11]用 MODIS 影像数据统计了森林生态系统的 CUE 基本特征;李肖娟等^[12]、仇宽彪等^[13]、Xia 等^[14]利用 MODIS 系列的数据产品,结合气象数据对不同地区的植被 WUE 进行了分析;刘宪锋等^[15]结合 CASA 模型和卫星遥感数据对黄土高原植被 WUE 进行研究,结果表明 WUE 呈显著上升的趋势。需指出的是,通量塔的观测数据精度较高但会受到其数量和分布特征的限制^[16],生态模型模拟的尺度较大但分辨率较粗,基于这两种方法很难获得对区域的整体认识。遥感数据因具有良好的时空连续性,为生态系统碳水循环提供长期变异的关键信息^[17],近年来在研究区域和全球大尺度上植被—气候交互作用中得到了广泛应用。然而,当前研究主要集中于区域尺度 CUE 或 WUE 单一指标的时空变化以及气候因子影响,对于综合分析和比较同一区域不同植被生态系统 CUE 和 WUE 的时空变化及其差异的相关研究较为少见。

鄱阳湖流域地处亚热带地区,除北部较为平坦外,中部丘陵起伏,东南西三面环山,呈不规则环状分布。独特的地形条件导致该区域生态环境复杂,物种资源丰富多样^[18]。近些年来,随着气候变化和人类活动的加剧,流域内土地利用结构、水资源系统以及工农业生产方式等发生了较大变化,生态环境问题日益突出^[19-20]。当前,对鄱阳湖流域气候要素、水文过程、植被覆盖度及其生产力变化等方面的研究较为全面^[21-23]。然而,有关鄱阳湖流域不同土地利用类型的碳、水利用效率的研究较少。本文利用 MODIS 遥感数据产品及气象观测数据,对该流域不同土地利用类型的 CUE 和 WUE 时空变化特征进行分析,探讨主要气候因子对不同土地覆被 CUE 和 WUE 的影响,目的在于明晰鄱阳湖流域陆地生态系统碳水循环基本格局及其对气候变化的响应,提高全球气候变化背景下亚热带湿润地区陆地生态系统碳水循环的动态变化的理解,同时也可作为鄱阳湖流域水土资源优化管理、生态系统健康发展提供科学的参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖流域(24°27'N—29°52'N, 113°23'E—118°32'E)位于长江中下游南岸,由修水、饶河、信江、抚河、赣江五个子流域所组成,面积约 16.22 万 km²,占长江流域面积的 9%。流域地势南高北低,由东南西向湖区倾斜,形成一个开口向北的巨大盆地。该区域中的鄱阳湖系我国第一大淡水湖泊,为长江流域重要的过水型、吞吐型湖泊,在调节长江水位、涵养水源、改善当地气候和维护区域生态平衡等方面都起着巨大的作用^[19]。以鄱阳湖为中心的鄱阳湖平原地势平缓,河网稠密,是我国重要的粮食、棉花和油料生产基地^[20]。鄱阳湖流域地处亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季温和湿润,雨热同期,无霜期较长。流域内生物多样性较为丰富,拥有包括湖泊湿地、农田、森林和草地在内的多种生态系统,主要土地利用类型以林地、耕地和草地为主(图 1)。

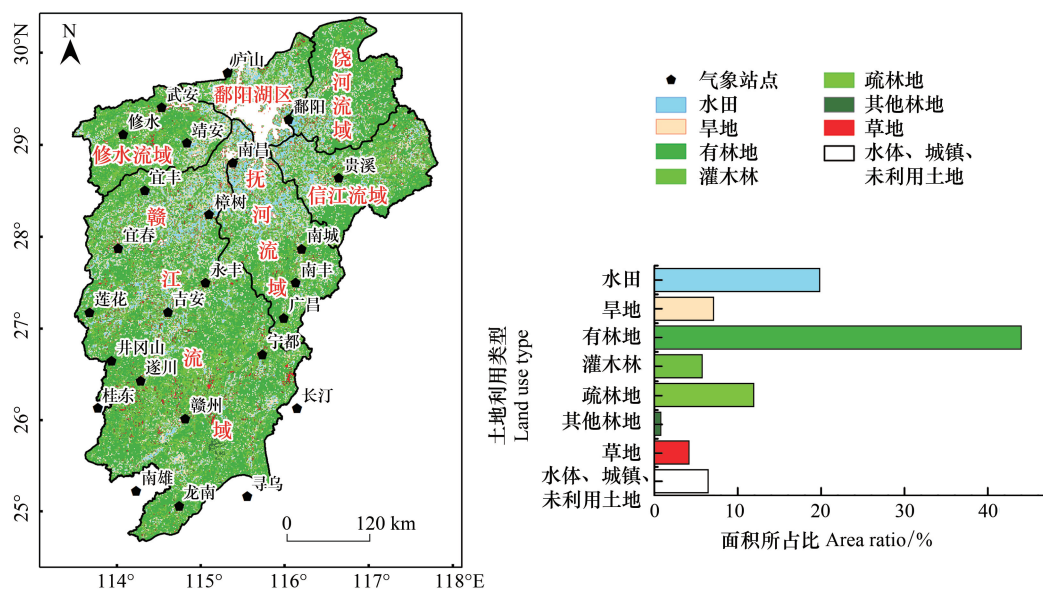


图 1 2010 年鄱阳湖流域不同土地利用类型分布及面积占比示意图

Fig.1 Distribution and area ratio of different land use types in the Poyang Lake Basin in 2010

1.2 数据来源及处理

1.2.1 GPP、NPP 和 ET 数据

本研究中的 GPP、NPP、ET 三组数据均来自于加拿大蒙大拿大学数值地形模拟研究组发布的集成 MODIS 数据产品^[1](<http://www.ntsug.umt.edu/>)。数据时间跨度为 2000—2014 年,空间分辨率为 1 km × 1 km,时间

分辨率为 8 d,数据格式为 TIFF 数据。其中,年 GPP 和年 NPP 产品数据是源于 MOD17A3 系列,主要基于光合有效辐射利用效率模型计算;年 ET 数据产品是通过改进的 MOD16 算法计算得到。所有数据使用前利用 ArcGIS 10.2 和 ENVI 5.3 软件对其进行投影转换(Albers)、重采样以及裁剪、波段运算等预处理,从而获得鄱阳湖流域 CUE 和 WUE 数据。目前,MODIS 系列数据已被验证能够捕获各种生态系统及气候状态下生产力、蒸散发的时空变化,其数据精度与基于地面通量塔和实地测量的数据具有较好的一致性,在研究全球和区域陆地生态系统的碳水循环中被广泛应用^[24]。

1.2.2 土地利用类型数据

土地利用类型数据来源于中国科学院西部生态环境数据中心提供的 2010 年中国土地利用栅格数据^[18],数据空间分辨率为 1 km × 1 km。根据 LUCC 二级类型分类标准,将研究区内土地利用分为水田、旱地、有林地(指郁闭度>30%的天然林和人工林,包括用材林、经济林、防护林等成片林地)、灌木林(指郁闭度>40%、高度在 2 米以下的矮林地和灌丛林地)、疏林地(郁闭度为 10%—30%的林地)、其他林地(未成林造林地、迹地、苗圃及各类果园)、草地以及水体、城镇和未利用土地等共八类(图 1)。其中,草地包括高覆盖度草地(覆盖度>50%)、中覆盖度草地(覆盖度在 20%—50%之间)和低覆盖度草地(覆盖度在 5%—20%之间)。由于各类草地在鄱阳湖流域占比很小,研究中未对其进行进一步分类。

1.2.3 气象数据

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的鄱阳湖流域 25 个气象台站(图 1)2000—2014 年逐年气温、降水和日照时数的数据集^[21]。对该数据集中极少数空缺值进行简单插补后,协同克里金插值法对各气象指标进行面域化处理,得到鄱阳湖流域 2000—2014 年逐年降水量、年平均气温和年平均日照时数的栅格数据。为了确保所有计算数据能够在空间上匹配,气象栅格数据分辨率须同 CUE 和 WUE 影像保持一致,进而从像元尺度计算气温、降水和日照时数与研究区不同土地覆被 CUE、WUE 之间的相关性。

1.3 研究方法

本文 CUE 采用净初级生产力(NPP)和总初级生产力(GPP)的比值来表示;WUE 采用净初级生产力(NPP)与蒸散量(ET)的比值表示,公式分别如下:

$$CUE = \frac{NPP}{GPP} \quad (1)$$

$$WUE = \frac{NPP}{ET} \quad (2)$$

式中,CUE 为碳素利用率(无量纲),WUE 为生态水分利用效率(gC/kgH₂O)。NPP(gC/m²)、GPP(gC/m²)和 ET(mm)均来源于 MODIS 数据产品。

研究中,基于 2000—2014 年 MODIS NPP、GPP、ET 数据,在 ENVI 中用波段运算得到 CUE 和 WUE 栅格数据。结合流域土地利用数据,借助 R 语言分别提取各土地利用类型 CUE 和 WUE 的逐年数据。采用最小二乘线性回归模型分析鄱阳湖流域各土地利用类型 CUE 和 WUE 的变化趋势,结合 Mann-Kendall 统计检验法对其变化的显著性进行检验。通过标准偏差来分析各变量在空间上的离散程度和时间上的变异程度。最后采用逐像元分析法和 Pearson 相关系数分析全流域以及各土地利用类型 CUE 和 WUE 与降水量、气温和日照的相关性。

2 结果及讨论

2.1 鄱阳湖流域不同土地利用类型 CUE 和 WUE 的空间分布特征

鄱阳湖流域 CUE 和 WUE 在 2000—2014 年间的平均值空间分布如图 2 所示。由图 2 可知,鄱阳湖流域植被 CUE 空间分布格局整体上呈现出以湖区为中心向四周放射状递减的特征。CUE 大于 0.5 的区域主要分

布在流域的中部以及赣江子流域的东南部, 占总流域面积的 41%。明显的低值区 ($CUE < 0.3$) 主要分布在饶河子流域和赣江子流域的西南侧, 面积占比为 12%。统计表明, 鄱阳湖流域植被的 CUE 平均值为 0.458, 空间异质性相对较小。与 CUE 相比, WUE 的空间分布差异较明显。如图 2 所示, WUE 的高值区主要集中在赣江子流域的东南部和饶河子流域的西北侧, 多年平均值在 $1 \text{ gC/kgH}_2\text{O}$ 以上。 WUE 的低值区同 CUE 的空间分布较为类似, 主要分布在饶河子流域和赣江子流域的西南侧, WUE 普遍在 $0.480 \text{ gC/kgH}_2\text{O}$ 以下。研究时段内鄱阳湖流域 WUE 的平均值为 $0.682 \text{ gC/kgH}_2\text{O}$, 最高值和最低值的差值可达 $1 \text{ gC/kgH}_2\text{O}$ 。

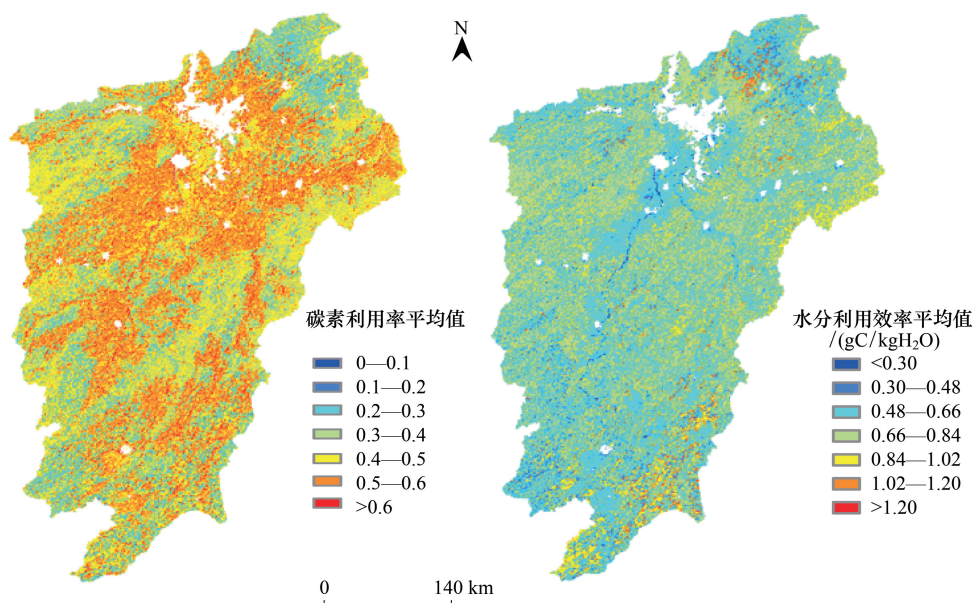


图2 2000—2014年鄱阳湖流域 CUE 和 WUE 的年均值分布图

Fig.2 Distribution of average annual CUE and WUE in the Poyang Lake Basin during 2000—2014

CUE : 碳素利用率, carbon use efficiency; WUE : 水分利用效率, water use efficiency

不同土地利用类型的 CUE 以草地和水田最高, 分别为 0.514 和 0.509; 有林地最低, 为 0.427; 其他的依次为其他林地 (0.494)、旱地 (0.489)、疏林地 (0.480) 和灌木林 (0.454) (图 3)。计算各土地利用类型 CUE 的标准差, 结果显示有林地 CUE 的标准偏差最大, 表明其空间变异程度最为显著。耕地中的水田、旱地 CUE 标准差最小, 说明这两种土地利用类型 CUE 空间变异最小。图 3 进一步显示了流域内不同土地利用类型的多年平均 WUE 介于 $0.634—0.692 \text{ gC/kgH}_2\text{O}$ 之间, 差异较小。各土地利用类型 WUE 大小依次为有林地 (0.693) > 灌木林 (0.687) > 旱地 (0.686) > 疏林地 (0.679) > 水田 (0.666) > 其他林地 (0.660) > 草地 (0.634) ($\text{gC/kgH}_2\text{O}$)。不同土地利用类型 WUE 的空间变异与 CUE 的分布相似, 有林地的标准差也是最大, 空间离散程度较大。此外, 灌木林和疏林地的 WUE 空间变异程度次之, 水田和旱地大体相当, 草地和其他林地最小。

不同土地覆被的碳、水利用效率存在较大差异。鄱阳湖流域年 CUE 均值为 0.458, 较 Zhang 等^[24] 在研究 2000—2003 年间全球尺度的陆地生态系统碳素利用率平均值 (0.52) 偏低。鄱阳湖流域不同土地利用类型 CUE 的变化范围介于 0.42—0.52 之间, 并且草地和水田 CUE 相对较高, 林地整体偏低。这一结论与前人的相关研究结果高度一致, 如 Delucia 等^[8] 发现各陆地生态系统 CUE 比值介于 0.23 至 0.83 之间, 且森林 CUE 较灌丛和草地低。李波等^[17] 分析松嫩平原各植被类型 CUE 的结果也表明, 不同生态系统 CUE 按照草地 > 湿地 > 落叶针叶林 > 耕地 > 混合林 > 落叶阔叶林的降序排列。造成研究区不同土地覆被 CUE 局部差别的原因, 主要与生态系统结构组成的差异有关。研究表明, 由于森林生态系统的组分复杂, 林下耐阴植物、非光合植物、动物和微生物较多, 在生长过程中要付出较大的呼吸消耗为代价来维持较高的生物产量, 从而导致 CUE 较低; 而草地、水田物种较单一, 净光合作用更强, 致使 CUE 偏高^[25]。

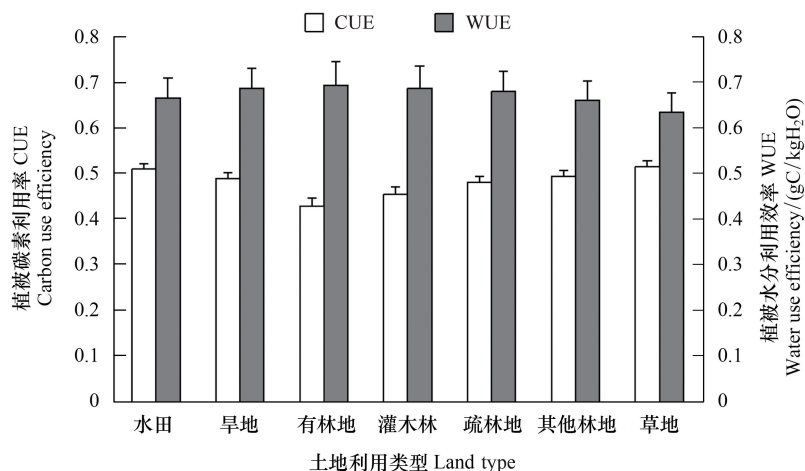


图3 鄱阳湖流域不同土地利用类型的 CUE、WUE 均值及标准差

Fig.3 The average and standard deviation of CUE and WUE of different land use types in the Poyang Lake Basin

WUE 单位为 $\text{gC}/\text{kgH}_2\text{O}$; 图中误差条为标准差, 柱状图为均值

研究区年 WUE 均值为 $0.682 \text{ gC}/\text{kgH}_2\text{O}$, 这与 Tian 等^[6]对美国南部 WUE 研究得出的平均值为 $0.71 \text{ gC}/\text{kgH}_2\text{O}$ 相当。不同植被类型间 WUE 的差异较为明显, 具体表现为森林>农田>草地。其主要原因在于相同供水条件下, 林地比农田和草地能产出更多的生物量, 储存更多的有机物质^[14]。前人研究中, 渠春梅等^[26]的研究也表明, 常绿植物的水分利用效率显著低于落叶植物; 乔木、灌木、草本和藤本植物的水分利用效率也有所不同, 藤本最高, 乔木和灌木差别不大, 但都高于草本植物。

2.2 鄱阳湖流域不同土地利用类型 CUE 和 WUE 的时间变化特征

研究时段内, 鄱阳湖流域生态系统在 CUE 和 WUE 年际变化趋势率呈现出一定的空间差异, 整体上表现为北部上升南部下降, 并且 WUE 呈增加趋势的区域范围明显大于 CUE (图 4)。CUE 年际变化在修水和饶河子流域上升趋势最为突出, 其中趋势率大于 $0.005/\text{a}$ 的面积占 6.9%。研究区中南部以及湖区周边以下降趋

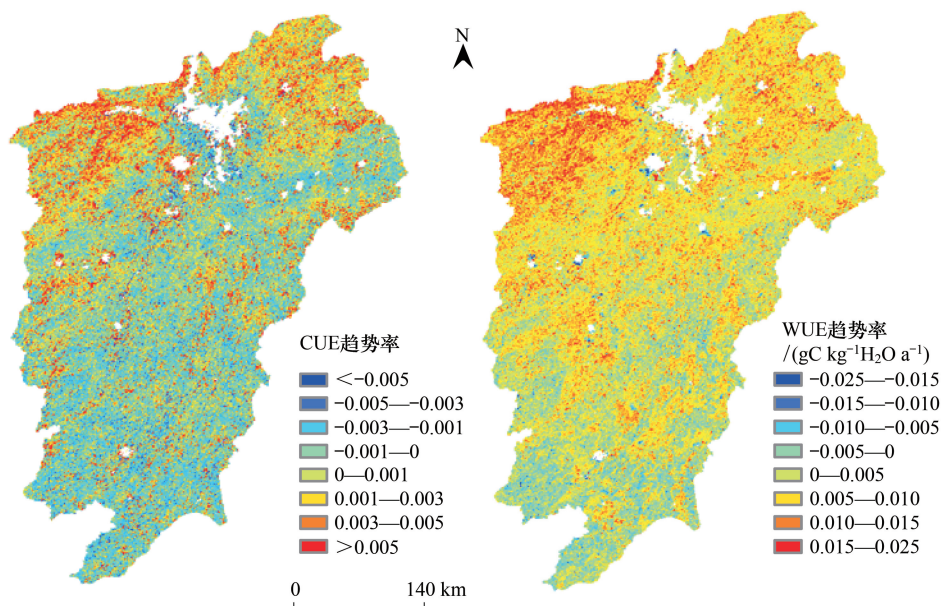


图4 2000—2014 年鄱阳湖流域 CUE、WUE 年际变化趋势率空间分布图

Fig.4 Distribution of linear trend of annual CUE and WUE in the Poyang Lake Basin during 2000—2014

势为主,趋势率在 $(-0.005-0)/a$ 之间的区域面积较广,约占全流域总面积的 47.6%。整体上,CUE 年际变化趋势率波动较小,相对较为稳定。相比较而言,WUE 比 CUE 的年际趋势变化更为明显。由图 4 可知,修水子流域为 WUE 上升的高值区,但仅占全流域面积的 3.6%。WUE 下降区集中分布在赣江子流域南部,下降趋势在 $-0.005 \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ 左右,面积所占比为 18.3%。整体上,WUE 变化趋势率介于 $(-0.025-0.025) \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ 之间,年际变化趋势相对较大。

各土地利用类型 CUE 平均值的年际变化特征具有较好的一致性,呈锯齿状增减交替变化,且在研究时段中均呈下降趋势(图 5)。统计各土地利用类型的变化趋势率,结果表明林地各类型 CUE 变化趋势率最大,下降最为明显,其中有林地>灌木林>疏林地>其他林地,耕地 CUE 下降趋势小于林地,其中旱地 CUE 下降趋势略大于水田。所有土地利用类型中,草地 CUE 的下降趋势最小。值得注意的是,每一种土地利用类型中,CUE 上升和下降区域并存,且所占的像元数量相当,原因可能是由于不同植被生态系统受气候环境的影响不同而造成的^[27]。对各土地利用类型的变化趋势进行显著性检验,其结果均未通过显著性检验。这也表明鄱阳湖流域不同土地利用生态系统的 CUE 虽呈微弱下降趋势,但并不会对区域植被生产力的转化效率造成显著的变化。

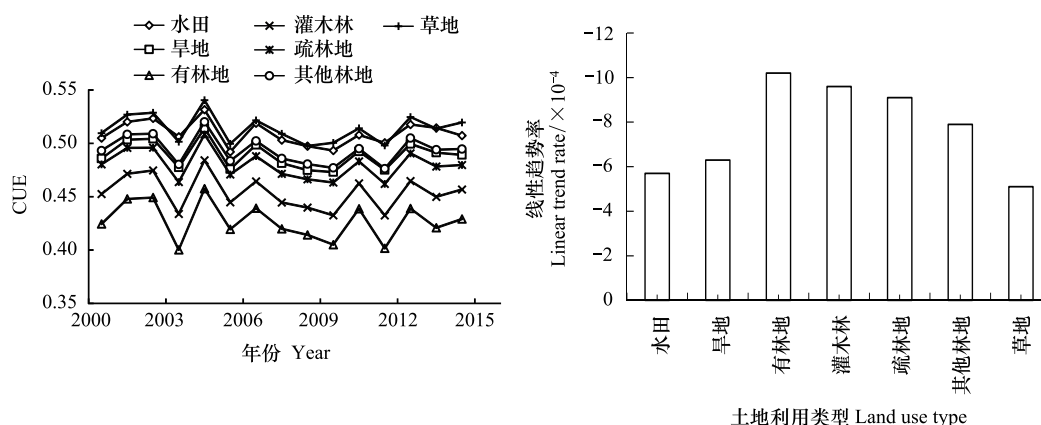


图 5 鄱阳湖流域不同土地利用类型 CUE 的年际变化特征

Fig.5 Inter-annual variation characteristics of CUE of different land use types in the Poyang Lake Basin

不同土地利用类型 WUE 的年际变化特征有所差异(图 6)。在 2000—2009 年期间,其年际变化波动较大,各土地利用类型 WUE 动态过程具有较好的一致性;2009 年之后,各土地利用类型 WUE 的变化模式差异较明显,且波动幅度明显减小。图 6 显示各土地利用类型 WUE 在研究时段内均呈下降趋势,其年际变化趋势率整体情况与 CUE 有较高的相似性,均表现为林地中的有林地下降趋势最大,耕地中的旱地次之,草地最小。研究区林地 WUE 波动大可能是与社会经济的发展和城镇化的扩张导致其面积有所减少有关^[19];草地表现较为稳定,在一定程度上可能与鄱阳湖流域退耕还草等相关政策起到了积极作用有关^[20]。其他土地利用类型趋势率波动差异也较为明显。已有研究指出林改田、建筑用地会导致 WUE 下降幅度最大,而农田改为自然植被则会增加区域 WUE^[28]。用 Mann-Kendall 统计检验法对各土地利用类型 WUE 年际变化趋势进行显著性检验,结果均不显著。

鄱阳湖流域 CUE、WUE 在研究时段内分别以 $-8 \times 10^{-4}/a$ 和 $-2 \times 10^{-3} \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ 的速度呈微弱下降趋势。由于研究区地处湿润地区,土地覆被对水分的利用效率未必高于干旱区,加上区域内春季和初夏洪涝易发,降水更多的以径流、冠层截留以及土壤蒸发等形式耗散,从而产生较多的无效水,对生产力的促进作用较弱,却极大的增加了可供蒸发的水量,这使得区域 CUE、WUE 呈下降趋势^[29]。在全球尺度上,Zhang 等^[24]研究表明全球陆地生态系统 CUE 在 2000—2009 年间呈微弱下降趋势。Xia 等^[14]研究表明全球陆地生态系统 WUE 在 2000—2012 年间也呈不显著的下降趋势。然而,也有学者得出所研究区域 CUE、WUE 在研究时段内

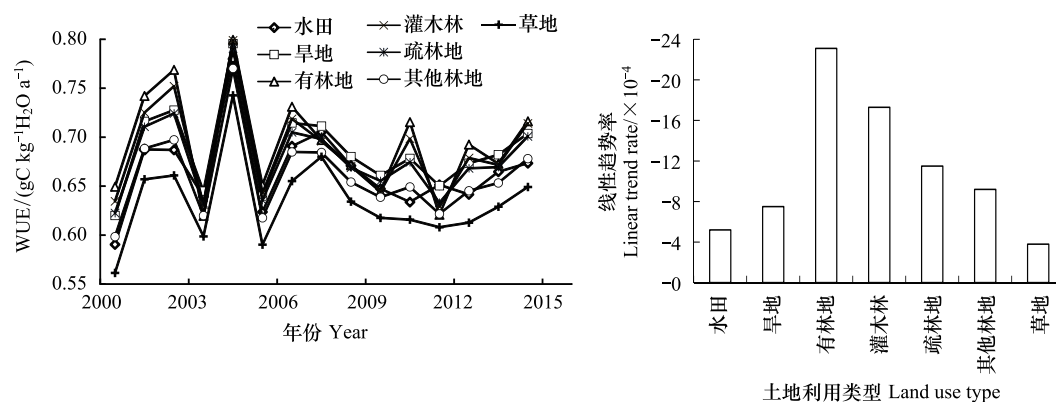


图 6 鄱阳湖流域不同土地利用类型 WUE 的年际变化特征

Fig.6 Inter-annual variation characteristics of WUE of different land use types in the Poyang Lake Basin

呈上升趋势的结论,如陈智^[4]则得出东北森林 CUE 在 2000—2015 年间表现为明显上升趋势,裴婷婷等^[30]研究表明黄土高原植被 WUE 在 2000—2014 年间呈上升趋势。由此可见,受研究区域和研究时段不同的影响,陆地生态系统 CUE 和 WUE 变化趋势具有一定的地域差异性。

关于不同植被类型 CUE、WUE 的变化有各种看法。尤其针对于 CUE 有两种截然相反的观点:恒定 CUE 和变量 CUE。目前众多研究逐渐发现,当生态系统类型、演替阶段和林分年龄、地理位置、养分供应和环境条件不同时,不同植被类型 CUE 具有很强的变异性^[31]。比如,森林 CUE 较灌丛和草地低,落叶林比混交林和常绿林具有较高的 CUE,热带森林 CUE 通常低于温带森林^[24]。鄱阳湖流域不同土地利用生态系统 CUE 呈现较大的年际波动特征和长期的下降趋势,这与第一种恒定 CUE 的观点相悖。对于各植被类型 WUE 变化趋势,Tian 等^[28]发现在东亚季风区各植被类型 WUE 变化趋势中,草地下降率最大,耕地次之,有林地下降率最小。本研究表明 WUE 趋势变化率最大的为有林地,耕地的下降率稍大于草地。这可能与人类活动干预的强弱有关,集约化土地管理可以缓解气候变化和土地转换引起的植被水分利用效率下降^[19,28]。

2.3 不同土地利用类型 CUE、WUE 年际变化与气候因子的关系

大量研究表明,气候条件是影响陆地生态系统碳、水利用效率的重要环境因素^[8,14,24]。本文选用气温、降水、日照时数作为影响鄱阳湖流域碳水循环的主要气候因子进行相关分析。研究期间,鄱阳湖流域多年平均气温、降水量和日照总时数的平均值分别为 18.18℃、1615.49 mm 和 1622.48 h,各气候要素的年际变化过程如图 7 所示。由图可知,2000—2014 年间研究区的年均气温和年日照总时数呈上升趋势,其线性增长率分别为 0.02℃/a 和 2.76 h/a,而年降水量呈微弱的下降趋势(线性趋势率为-3.03 mm/a)。气温和日照时数的峰值分别出现在 2013 年和 2003 年,谷值均出现在 2012 年。降水量的峰值和谷值分别出现在 2012 年和 2011 年。以气温、降水和日照时数的年际变化为背景,基于逐像元分析法和 Pearson 相关系数分析法研究整个流域以及各土地利用类型的 CUE 和 WUE 与其相关性。

图 8 显示了 2000—2014 年鄱阳湖流域年均 CUE 和 WUE 与气温、降水、年均日照总时数的相关系数的空间分布。表明鄱阳湖流域年均 CUE 和 WUE 与气温、降水、日照时数的相关系数具有很强的空间异质性。鄱阳湖流域年均 CUE 与气温和日照时数相关系数的空间分布具有较好的一致性,正相关区域分散分布于流域的中部,负相关区域连片分布于流域四周山地。然而,CUE 与降水相关性系数的空间分布整体上与 CUE 和气温、日照时数的相关性大体相反,正相关区域主要分布于流域的四周山地,特别是饶河子流域和赣江子流域的西侧,负相关区域分散分布于流域的中部。流域年均 WUE 与气温、降水和日照时数相关系数的空间分布整体上类似于前者。研究期间,鄱阳湖流域的 CUE 与气温、日照时数呈负相关,其相关系数分别为-0.099 和 -0.213;与降水呈显著正相关,相关系数为 0.575($P<0.05$)。鄱阳湖流域年 WUE 与气温、降水、日照时数均呈

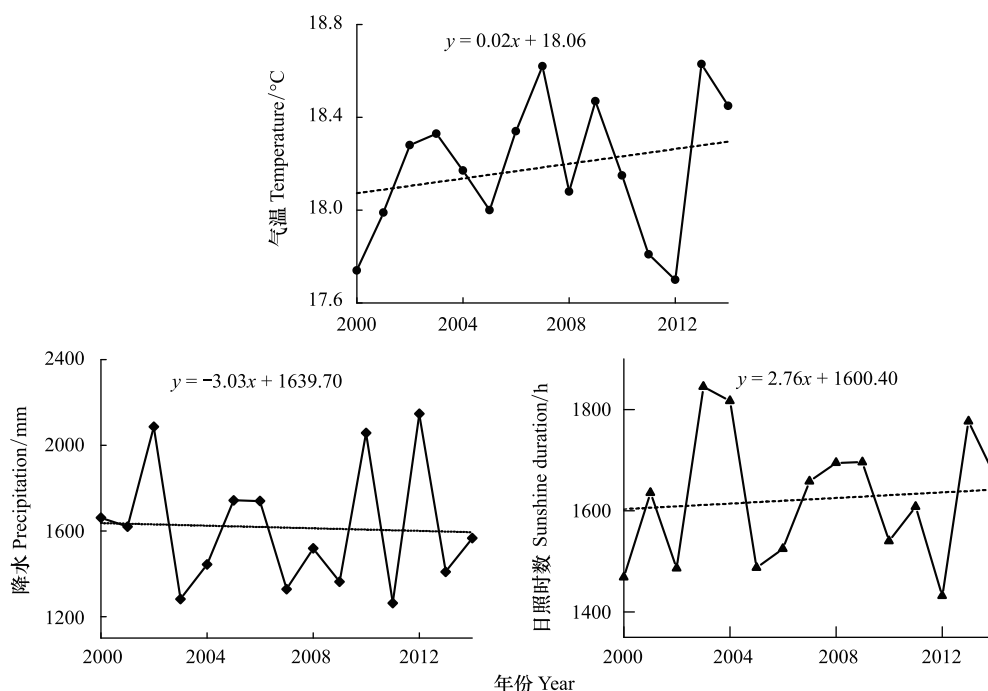


图7 鄱阳湖流域 2000—2014 年年均温、年均降水量、年均日照总时数的年际变化图

Fig.7 Inter-annual variation of annual average temperature, average annual precipitation and total annual sunshine duration in the Poyang Lake Basin during 2000—2014

正相关,相关系数分别为 0.233、0.253 和 0.114,通过 95%置信度检验的面积分别为 14.7%、25.8%和 23%。

图 9 统计了鄱阳湖流域不同土地利用类型的 CUE 和 WUE 与气温、降水、日照时数的相关系数。由图 9 可知,研究区内除草地外,其他植被类型 CUE 与气温呈负相关,通过显著性检验的只有旱地,相关系数为 -0.6 ($P < 0.05$),其他土地利用类型均未通过显著性检验。各土地利用类型 CUE 与降水相关性均呈正相关,通过 95%置信度检验的为有林地、灌木林和疏林地,相关系数依次为 0.618、0.583、0.522;通过 90%置信度检验的有其他林地和旱地,相关系数分别为 0.504 和 0.479。图 5 所示不同土地类型 CUE 的年际波动特征与流域降水年际过程(图 7)具有较好的一致性,进一步说明了两者的潜在响应关系。除水田外,其他植被类型 CUE 与日照时数均呈负相关关系,但都未通过显著性检验。图 9 所示的各土地利用类型 WUE 与气候因子的相关系数中,可发现其相关性不如 CUE 与气候因子的相关性显著,仅水田与日照时数的相关性通过了 90%的置信度检验,其他植被类型与气温、降水、日照时数的相关性均未通过显著性检验。不同于 CUE 与气温之间的负相关关系,各土地利用类型 WUE 与气温之间均表现为正相关关系。此外,大多数植被类型 WUE 与日照时数之间也以正相关关系为主。

综上所述,鄱阳湖流域 CUE 主要受降水影响,其相关性明显强于温度和日照时数;WUE 与气温、降水、日照时数均呈正相关,但相关性不强;不同植被生态系统对气温、降水和日照时数变化的响应也不相同。就区域碳水利用效率变化的气候驱动因子来看,许多生态系统生产力模型研究表明,随着温度的上升,降水的减少,CUE 呈下降趋势^[17,3-2]。卢玲等^[33]的研究认为水分条件是植物水分利用效率的主要决定因素。Syvertsen 等^[34]则认为光照和水分是植物水分利用效率的主要影响因子。本文的研究结果显示,就鄱阳湖流域这样一个湿润亚热带流域而言,降水条件是影响植物碳水利用效率变化的关键因素。影响机理方面,Metcalf 等^[35]对亚马逊东部热带雨林碳循环的研究发现,降水量减少导致生态系统总呼吸和植物总初级生产力增加,叶片和根系呼吸增加,异养呼吸没有显著差异,而净初级生产力降低,从而引起生态系统 CUE 的降低。Xue 等^[36]研究表明,植被 WUE 的变化受区域干湿状况的制约。在相对潮湿的地区 WUE 随着降水的增加而增加,而在

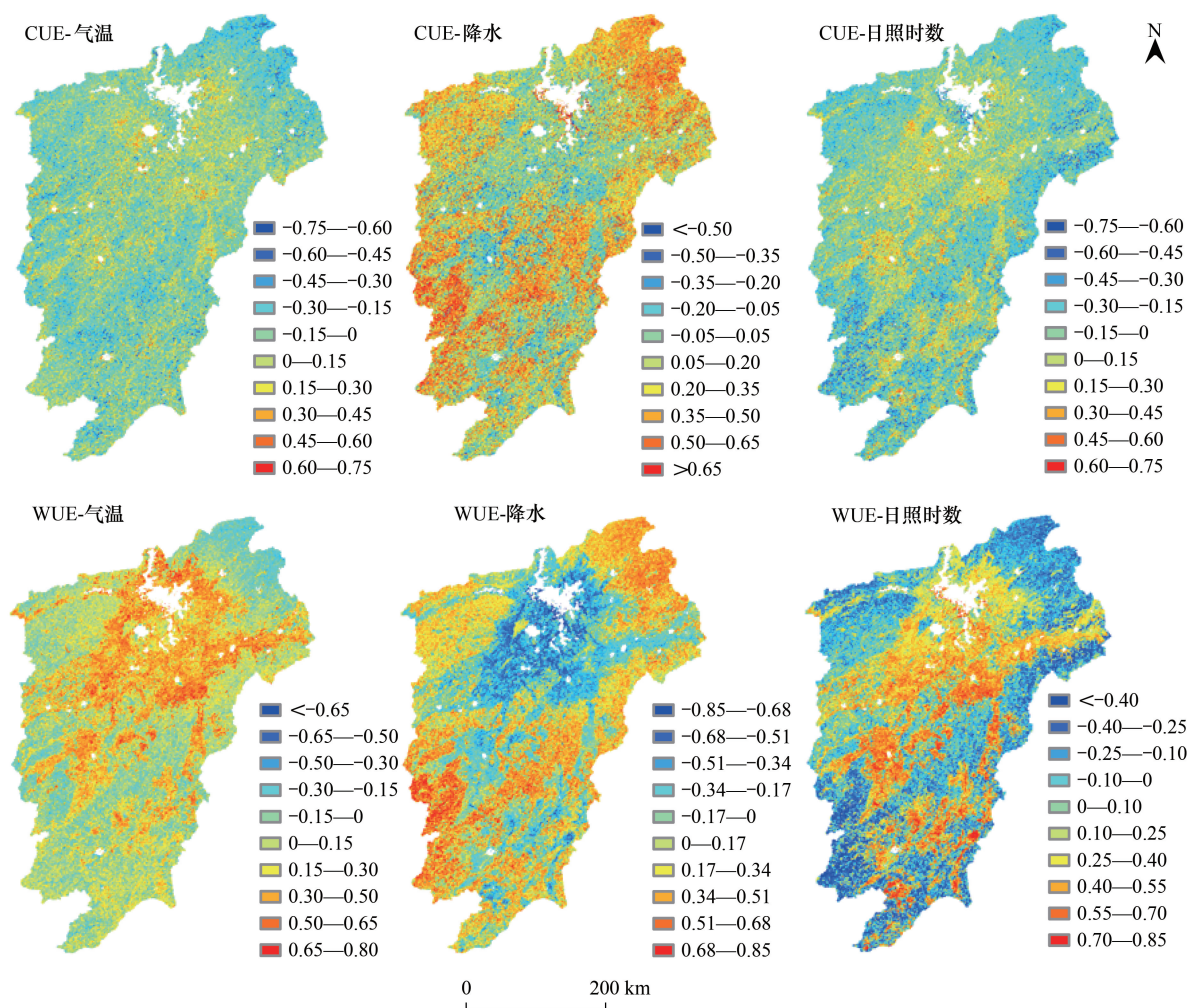


图8 鄱阳湖流域 2000—2014 年 CUE 和 WUE 与气温、降水、日照时数相关系数空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of correlation coefficients between CUE, WUE and temperature, precipitation and sunshine duration during 2000—2014 over the Poyang Lake Basin

相对干燥的地区 WUE 随着降水的减少而增加。对于北方高纬度和青藏高原等寒冷地区, WUE 与温度之间存在正相关关系,但随着温度和太阳辐射的增加, WUE 在达到最大值后又出现减小的趋势。李波等^[7]研究表明,在松嫩平原降水量的减少会使草地利用有限的水分资源获取更高的生产效益,对草地 WUE 具有改善作用,但对林地 WUE 有抑制作用。由此可以看出,在区域性降水减少和全球性气候变暖的背景下,不同土地覆被的自养呼吸消耗增加,生产力下降^[28],是导致鄱阳湖流域陆地生态系统碳水利用效率降低、固碳能力变弱的主要原因。这也预示了未来该区域生态系统增加生产力和碳汇的能力需要以消耗更多的水分作为代价^[37]。

有学者指出极端气候事件如干旱对生态系统 WUE 的影响存在滞后效应^[38]。在年际尺度上,研究时段内流域 CUE 和 WUE 均呈微弱的下降趋势,与降水的趋势变化具有较好的对应。然而,鄱阳湖流域降水年内变化大,流域 CUE 和 WUE 的趋势变化是否与本地区春夏之交洪涝加重,无效降水增多的同时,夏秋高温干旱加重的气候变化趋势有关,本文受研究时间尺度的限制尚不能对这种极端气候事件的影响展开深入分析。在研究时段内,鄱阳湖流域既发生过气候变暖停滞以及如 2008 年的典型气候寒冷事件,也发生过 2003 年和 2013 年等严重高温伏旱事件^[39],这种极端气候事件如何对区域陆地生态系统的碳水利用效率产生影响值得进一步的研究。此外,碳水循环涉及的耦合因子很多(如气候条件、二氧化碳浓度、土壤状况以及人类活动等)^[5],

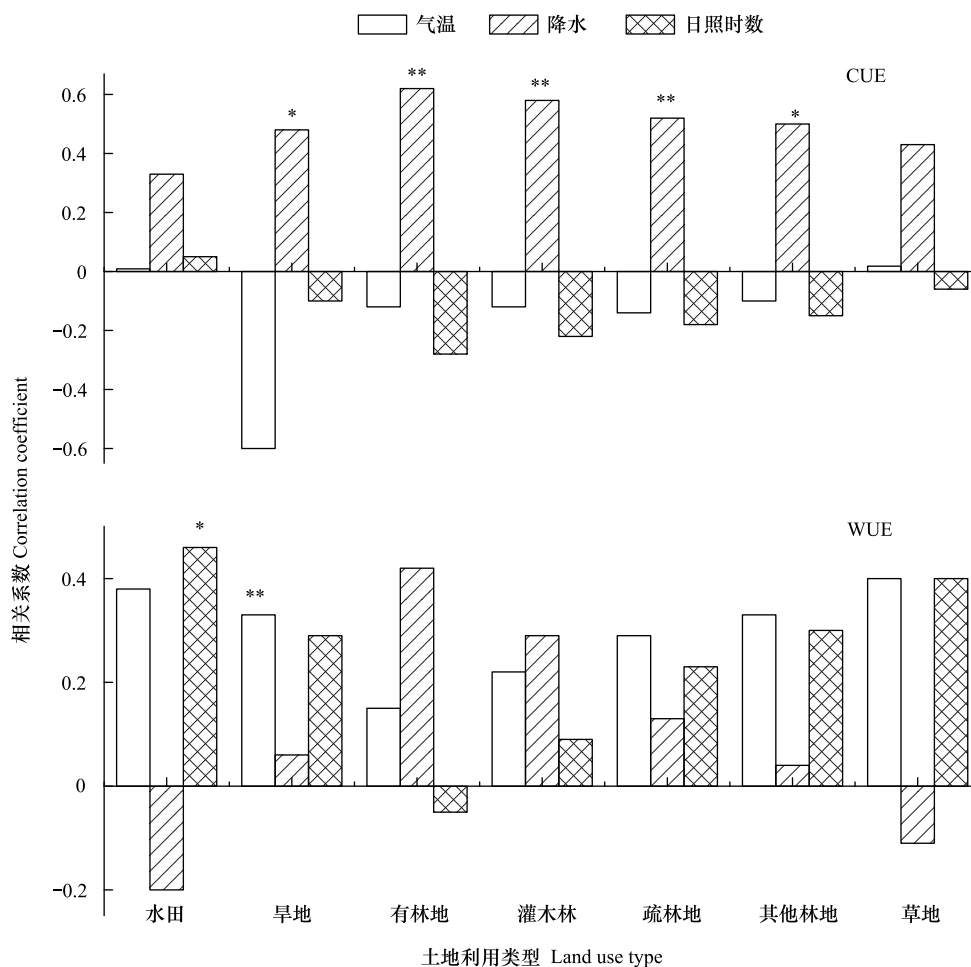


图9 鄱阳湖流域不同土地利用类型的 CUE 和 WUE 与气温、降水、日照时数的相关系数

Fig.9 Correlation coefficients between CUE, WUE and temperature, precipitation and sunshine duration for different land use types in the Poyang Lake Basin

* 表示通过 0.1 显著性检验; ** 表示通过 0.05 显著性检验

并受遥感监测精度以及生态过程复杂性等不确定性因素的影响,本研究所揭示部分气候因子与土地覆被碳水利用效率变化的相关性不够显著。今后应加强关键因子交互效应对不同尺度植被碳水利用效率的影响过程及机制研究,定量揭示气候变化和人类活动的影响分量,以期更好的理解和预测全球变化和人类干扰下生态系统的响应和功能变化。

3 结论

本研究利用长期连续时间尺度的 MODIS 系列的监测数据,结合土地利用/覆被数据和气候观测数据,对鄱阳湖流域不同土地利用生态系统的碳素利用率和水分利用效率的时空变化特征进行了分析,探讨了其与气候因子之间的响应关系。结论如下:

(1) 2000—2014 年间,鄱阳湖流域植被 CUE 的平均值为 0.458, WUE 平均值为 0.682 gC/kgH₂O。就各植被生态系统平均值而言, CUE 大小依次为草地>水田>其他林地>旱地>疏林地>灌木林>有林地, WUE 大小依次为有林地>灌木林>旱地>疏林地>水田>其他林地>草地。不同土地利用类型 CUE 和 WUE 空间变异程度最大的均为有林地; CUE 空间变异程度最小的为水田, WUE 空间变异程度最小的为其他林地。

(2) 研究时段内, 鄱阳湖流域植被 CUE 和 WUE 年际变化均呈微弱下降趋势, 线性变化趋势率分别为

$-8 \times 10^{-4}/a$ 和 $-2 \times 10^{-3} \text{ gC kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O a}^{-1}$ 。各土地利用类型 CUE 和 WUE 呈现较大的年际波动,年际变化趋势率具有高度的相似性,其中林地各类型下降趋势最大,耕地中的旱地和水田次之,草地最小。各土地利用类型 CUE 和 WUE 的年际变化趋势均不显著。

(3) 鄱阳湖流域的 CUE 与气温、日照时数呈负相关,与降水呈正相关且通过了 95% 的置信度检验。WUE 与气温、降水、日照时数均呈正相关,相关性不显著。由此可见,鄱阳湖流域降水条件是影响植物碳水利用效率变化的关键因素。不同植被生态系统的 CUE 和 WUE 对气温、降水和日照时数的变化响应程度存在较大差异。

参考文献 (References):

- [1] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329 (5994): 940-943.
- [2] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 296-300.
- [3] Zhang Z, Jiang H, Liu J X, Zhou G M, Liu S R, Zhang X Y. Assessment on water use efficiency under climate change and heterogeneous carbon dioxide in China terrestrial ecosystems. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 2031-2044.
- [4] 陈智. 2000—2015 年中国东北森林生产力和碳素利用率的时空变异. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1625-1632.
- [5] 杜晓铮, 赵祥, 王昊宇, 何斌. 陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展. *生态学报*, 2018, 38(23): 8296-8305.
- [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] Li B, Huang F, Chang S, Sun N. The variations of satellite-based ecosystem water use and carbon use efficiency and their linkages with climate and human drivers in the Songnen Plain, China. *Advances in Meteorology*, 2019, 2019: 8659138.
- [8] Delucia E H, Drake J E, Thomas R B, Gonzalez-Meler M. Forest carbon use efficiency: is respiration a constant fraction of gross primary production? *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1157-1167.
- [9] 袁旻舒, 李明旭, 程红岩, 丁菊花, 李函微, 彭长辉, 朱求安. 基于 CMIP5 模型结果的中国陆地生态系统未来碳利用效率变化趋势分析. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(4): 452-461.
- [10] 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.
- [11] Marjanovic H, Anic M, Zorana Ostrogovic Sever M, Kern A. Assessing forest productivity (NPP/GPP) estimates from remote sensing, flux measurement and field observations//Proceedings of EGU General Assembly Conference. Vienna, Austria: EGU, 2015.
- [12] 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.
- [13] 仇宽彪. 中国植被总初级生产力、蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [14] Xia L, Wang F, Mu X M, Jin K, Sun W Y, Gao P, Zhao G J. Water use efficiency of net primary production in global terrestrial ecosystems. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(5): 921-931.
- [15] 刘宪锋, 胡宝怡, 任志远. 黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素. *中国农业科学*, 2018, 51(2): 302-314.
- [16] 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.
- [17] Li B, Huang F, Qin L J, Qi H, Sun N. Spatio-temporal variations of carbon use efficiency in natural terrestrial ecosystems and the relationship with climatic factors in the Songnen Plain, China. *Remote Sensing*, 2019, 11(21): 2513.
- [18] 姚炳楠, 陈报章, 车明亮. 鄱阳湖流域植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子分析. *植物学报*, 2016, 51(5): 639-649.
- [19] 徐羽, 钟业喜, 冯兴华, 徐丽婷, 郑林. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局. *生态学报*, 2016, 36(23): 7850-7857.
- [20] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 1950—2008 年江西省森林火灾的碳损失估算. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2241-2248.
- [21] 李相虎, 张奇, 邵敏. 鄱阳湖流域叶面积指数时空变化特征及其与气候因子的关系. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(3): 296-301.
- [22] 田振兴, 咎梅, 汪进欣. 基于 MODIS 遥感数据的鄱阳湖流域生态系统生产力变化研究. *生态环境学报*, 2018, 27(10): 1933-1942.
- [23] 赵晓松, 刘元波, 吴桂平. 基于遥感的 2000—2009 年鄱阳湖流域蒸散特征及影响因子研究. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(3): 369-378.

- [24] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, Wimberly M C, Zhang X Z, Tao J, Jiang Y B, Zhu J T. Climate-driven global changes in carbon use efficiency. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(2): 144-155.
- [25] Tang X L, Carvalhais N, Moura C, Ahrens B, Koirala S, Fan S H, Guan F Y, Zhang W J, Gao S C, Magliulo V, Buysse P, Liu S B, Chen G, Yang W N, Yu Z, Liang J J, Shi L L, Pu S Y, Reichstein M. Global variability of carbon use efficiency in terrestrial ecosystems. *Biogeosciences Discussions*, 2019, doi: 10.5194/bg-2019-37.
- [26] 渠春梅. 西双版纳片段化热带雨林植物水分利用效率的边缘效应[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 1999.
- [27] 张春敏. 长江源区植被净初生产力及水分利用效率的估算研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [28] 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.
- [29] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 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.
- [30] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 吴秀臣, 陈英, 谢保鹏. 黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 119-125.
- [31] Letchov G. Carbon-use efficiency of terrestrial ecosystems under stress conditions in South East Europe (MODIS, NASA). *Proceedings*, 2018, 2(7): 363.
- [32] Zhang Y L, Song C H, Zhang K R, Cheng X L, Zhang Q F. Spatial-temporal variability of terrestrial vegetation productivity in the Yangtze River Basin during 2000-2009. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(1): 10-23.
- [33] 卢玲, 李新, 黄春林, Veroustraete F. 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.
- [34] Syvertsen J P, Smith M L, Lloyd J, Farquhar G D. Net carbon dioxide assimilation, carbon isotope discrimination, growth, and water-use efficiency of *Citrus* trees in response to nitrogen status. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1997, 122(2): 226-232.
- [35] Metcalfe D B, Meir P, Aragão L E O C, Lobo-Do-Vale R, Galbraith D, Fisher R A, Chaves M M, Maroco J P, Da Costa A C L, De Almeida S S, Braga A P, Gonçalves P H L, De Athaydes J, Da Costa M, Portela T T B, De Oliveira A A R, Malhi Y, Williams M. Shifts in plant respiration and carbon use efficiency at a large-scale drought experiment in the eastern Amazon. *New Phytologist*, 2010, 187(3): 608-621.
- [36] Xue B L, Guo Q H, Otto A, Xiao J F, Tao S L, Li L, 2015. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. *Ecosphere*, 2015, 6(10): 174.
- [37] 赵安周, 张安兵, 冯莉莉, 王冬利, 承达瑜. 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. *生态学报*, 2018, 39(4): 1452-1462.
- [38] 邹杰, 丁建丽, 秦艳, 王飞. 遥感分析中亚地区生态系统水分利用效率对干旱的响应. *农业工程学报*, 2018, 34(9): 145-152.
- [39] 尤琦. 我国东部夏季极端高温事件季节内尺度分析及诊断[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.