

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.042.

孙桂凯, 黄瑞, 王国帅, 等. 2001—2018年西江流域水分利用效率时空变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 327-335.

SUN Guikai, HUANG Rui, WANG Guoshuai, et al. Spatiotemporal Variation of Water Use Efficiency and Its Influencing Factors in Xijiang River Basin from 2001 to 2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 327-335.

## 2001—2018年西江流域水分利用效率 时空变化及影响因素

孙桂凯<sup>1,2,3,4</sup>, 黄瑞<sup>1,2,3,4</sup>, 王国帅<sup>1,2,3,4</sup>, 王熙财<sup>1,2,3,4</sup>,  
马龙<sup>1,2,3,4</sup>, 王蕾<sup>1,2,3,4</sup>, 莫崇勋<sup>1,2,3,4</sup>

(1.广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2.工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 3.广西大学, 广西壮族自治区岩溶区水安全与智慧调控工程研究中心, 南宁 530004; 4.广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

**摘要:** [目的]探究气候变化形势下流域的碳循环和水循环相互关系,对流域的水资源科学配置有重大意义。[方法]以西江流域为例,基于2001—2018年GLASS产品中的初级生产力(GPP)和蒸散发(ET)数据,定量计算区域生态系统植被水分利用效率(WUE),利用趋势分析和偏相关分析的方法研究植被WUE时空演变特征及其影响因素。[结果]2001—2018年西江流域植被的WUE总体呈增加趋势;林地的WUE增长速率最快,草地次之,耕地最慢。从空间分布来看,WUE值从广西中部的耕地向四周逐渐升高,WUE低值还零星分布在云南东部的台地和丘陵地区;西江流域15.23%,12.12%的区域WUE分别与气温、降水呈显著正相关;11.54%的区域WUE与太阳辐射呈显著负相关;NDVI与WUE具有显著正相关性;WUE随海拔的上升呈上升—平缓—上升的趋势,在2100m左右,WUE出现明显波动。[结论]气候因子、NDVI、海拔、人类活动均不同程度影响西江流域植被的水分利用效率,本研究可为西南喀斯特地区石漠化治理和流域生态防护林体系的建设提供参考。

**关键词:** GPP; 水分利用效率; 时空变化; 影响因素; 西江流域

**中图分类号:** TV11; P343

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)03-0327-09

## Spatiotemporal Variation of Water Use Efficiency and Its Influencing Factors in Xijiang River Basin from 2001 to 2018

SUN Guikai<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Rui<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Guoshuai<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Xicai<sup>1,2,3,4</sup>,  
MA Long<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Lei<sup>1,2,3,4</sup>, MO Chongxun<sup>1,2,3,4</sup>

(1.College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2.Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Ministry of Education,

Nanning 530004, China; 3.Engineering Research Center of Water Safety and Intelligent Regulation

in Karst Areas of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guangxi University, Nanning 530004, China;

4.Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention, Mitigation and Engineering Safety, Nanning 530004, China)

**Abstract:** [Objective] Exploring the interrelationship between the carbon and water cycles in watersheds in the context of global climate change has significant implications for the scientific allocation of water resources in watersheds. [Methods] Xijiang River Basin was taken as an example, the water use efficiency (WUE) of regional ecosystem vegetation was quantified based on gross primary productivity (GPP) and evapotranspiration (ET) data in GLASS products from 2001 to 2018, then the spatial and temporal evolution characteristics of WUE and its influencing factors were studied by using the methods of trend analysis and partial correlation

收稿日期: 2022-05-06

修回日期: 2022-05-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(51969004); 广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198361); 广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2019022)

第一作者: 孙桂凯(1974—), 女, 广西南宁人, 副教授, 研究方向为水文与水资源。E-mail: 1315684692@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

analysis. [Results] The WUE of vegetation in Xijiang River Basin generally showed an increasing trend from 2001 to 2018. The WUE of forest land grew at the fastest rate, followed by grassland and the slowest by cropland. In terms of spatial distribution, WUE values gradually increased from cultivated land in central Guangxi to the surrounding areas, and low WUE values also sporadically distributed in the tablelands and hilly areas in the eastern of Yunnan. WUE values in 15.23% and 12.12% of the area of Xijiang River Basin were significantly and positively correlated with temperature and precipitation, respectively. WUE in 11.54% of the area of Xijiang River Basin was significantly and negatively correlated with solar radiation. NDVI was significantly and positively correlated with WUE; WUE with the rise of the altitude showed a rising-flat-rising trend, and at altitude of around 2 100 m, there is a significant fluctuation of WUE. [Conclusion] The above results indicate that climate factors, NDVI, altitude and human activities all affect the water use efficiency of Xijiang River Basin to different degrees. This study can provide reference for the management of stone desertification in the southwest karst region of China and the construction of ecological protection forest system in the basin.

**Keywords:** GPP; water use efficiency; spatiotemporal changes; influencing factors; Xijiang River Basin

在气候变化和人类活动的多重影响下,全球许多流域水循环过程都发生了显著变化,这一系列变化显著影响植被生产力和陆地生态系统的用水模式<sup>[1]</sup>。水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)可将耦合的碳循环和水循环联系起来,被认为是理解生态系统生产力对水可用性响应的关键变量和评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标<sup>[2-3]</sup>。研究不同地区的水分利用效率时空变化特征、探求区域水分利用效率的驱动因素,有助于了解全球变化过程中的区域生态系统中碳循环和水循环的关系,进而为区域生态建设提供科学依据。从研究区来看,学者针对不同区域开展了水分利用效率的时空变化特征研究,如黄土高原<sup>[4]</sup>、西南岩溶区<sup>[5]</sup>、贵州高原<sup>[6]</sup>、伊犁河谷草地<sup>[7]</sup>等,不同地区的水分利用效率存在着较大的空间差异,这些差异是由于研究的时空尺度、生物群落和所处的位置的不同所导致的<sup>[8]</sup>。

石漠化导致的水土流失问题依然存在,这成为了多年来制约我国西南地区的生态安全和可持续发展难题,因此探求生态系统的 WUE 时空分布及驱动因素,是西南地区生态建设十分迫切的需求。彭大为<sup>[5]</sup>等基于 MODIS 数据分析了中国西南岩溶区 WUE 时空变化特征,并指出 NDVI 是该地区的主要驱动因素;张永永<sup>[9]</sup>等对 2000—2014 年云南省 WUE 的时空格局及影响因素进行研究,对比了降水、气温的驱动作用,得出云南省植被 WUE 受气温影响更大的结论;张继<sup>[6]</sup>等对贵州高原不同地貌区和植被类型的 WUE 时空分异特征进行了分析,发现了部分喀斯特地貌类型的 WUE 均值会高于非喀斯特地区;梁锦桃<sup>[10]</sup>对岩溶陷盆地不同海拔高度、环境要素与植物的 WUE 变化关系进行了分析,发现了海拔高度对

乔木、灌木的植被 WUE 影响大于草本植物。目前从流域尺度对喀斯特地区 WUE 的变化特征和驱动因素研究相对较少,国内利用 GLASS 数据估算总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP),进而定量计算 WUE 的研究也比较少。研究表明全球 GLASS GPP 的估算精度高于 MODIS GPP,且 GLASS GPP 在空间上更完整,在时间序列上更连续。西江流域是我国西南地区重要的水源涵养区,灾害频繁,是全球气候变化的敏感区域之一<sup>[11-12]</sup>。西江流域受到特殊地形地貌与地质结构综合作用,流域内喀斯特地貌分布较广,生态环境十分脆弱,这表现出水质恶化和水源紧缺等问题<sup>[6]</sup>。深入了解水分利用情况和固碳作用的相互关系,既可对先前推进的石漠化综合治理效果的进行评价,又能为今后生态防护林建设和水资源规划提供参考。

鉴于此,本研究以西江流域为例,基于遥感数据定量计算西江流域植被的水分利用效率,分析 2001—2018 年西江流域水分利用效率的时空变化特征,探寻各种因素对植被 WUE 的影响,以期为西南喀斯特流域的石漠化治理和流域生态防护林体系的建设提供科学依据。

## 1 研究区概况

西江是我国华南地区珠江的干流,西江流域位于东经 102°14′—114°50′,北纬 21°32′—26°49′<sup>[13]</sup>。西江发源于云南省曲靖市马雄山,流经我国云南(滇)、贵州(黔)、广西(桂)、广东(粤)四省,全长 2 075 km,流域面积达 35.5 万 km<sup>2</sup>。流域地势由西北向东南倾斜,其西北部为云贵高原,中部为丘陵盆地,见图 1A。地貌类型以山地为主,多为小、中起伏山地。西江流

域的多年平均气温为 14~22℃,多年平均降水为 1 000~2 200 mm<sup>[14]</sup>,降水主要发生在 4—10 月,占年降水量的 72%~86%,积雪通常出现在流域西部

和北部<sup>[15]</sup>。土壤以红壤、赤红壤及棕色石灰土为主,植被类型多为针叶林、阔叶林、竹林、灌丛等。研究区高程、土地利用类型见图 1。

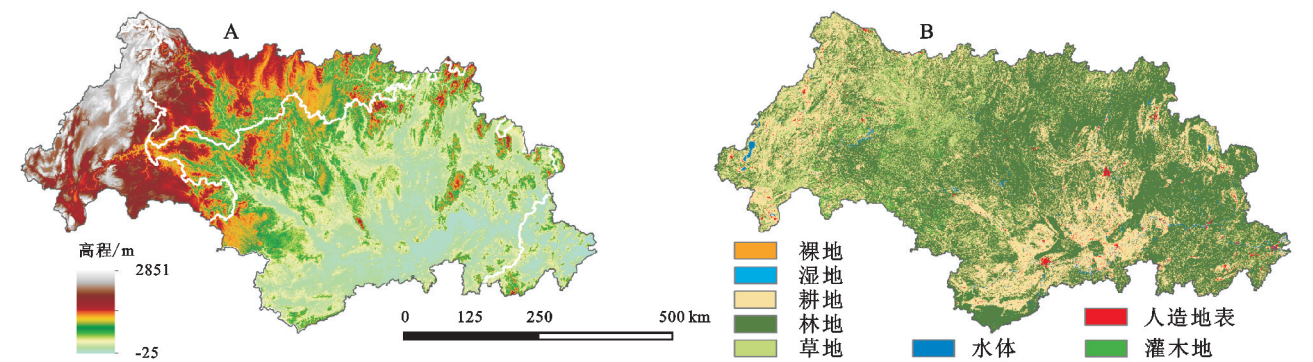


图 1 研究区高程、土地利用类型

2 研究数据与方法

2.1 数据来源与处理

初级生产力(GPP)和蒸散发(ET)数据来源于北京师范大学自主研发的全球陆表特征参量(GLASS)产品提供的遥感数据,其空间分辨率为 1 km, GLASS 产品能为全球生态环境演变规律提供很好的科学依据。本文选择西江流域矢量图作为掩膜,对 2001—2018 年的 GPP,ET 数据进行裁剪,从而生成研究区年尺度的 GPP 和 ET 图像。NDVI 数据来源于 MODIS 产品(MOD13A3),空间分辨率为 1 km, 本文采用年最大合成法将原本时间尺度为月尺度的数据转化为年尺度。DEM 数据来源于美国地质勘探局的 SRTM3 DEM 数据产品,空间分辨率为 90 m。

气象数据来源于中国科学院青藏高原研究所西藏多球体数据同化与模拟中心提供的数据集,数据集包含气温、降水和太阳辐射等数据,其空间分辨率为 0.1°,利用 ArcGIS 软件将数据经过投影变换将地理坐标系转换到对应的投影坐标系,将空间分辨率转化为 1 km。土地利用覆盖数据来源于全国地理信息资源目录服务系统的 GlobeLand30 的 2010 年数据,空间分辨率为 30 m,通过合并,得到林地、灌木地及其他 9 种土地利用类型,本文提取其中的耕地、林地、草地、灌木地 4 种植被类型进行研究。

2.2 研究方法

2.2.1 WUE 的计算 学术界对水分利用效率 WUE 存在不同定义,本文的植被水分利用效率(WUE)由总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)与蒸散发(Evapotranspiration, ET)的比值来表示<sup>[1]</sup>, 见公式:

WUE=GPP/ET (1)

式中:WUE 为水分利用效率[gC/(mm·m²)],GPP 为生态系统总初级生产力(gC/m²),ET 为生态系统蒸散发(mm)。时间尺度均为年。

2.2.2 趋势分析 本文采用 Theil-Sen Median 方法来计算西江流域 2001—2018 年 WUE 的变化趋势, Theil-Sen Median 方法是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法<sup>[16]</sup>。

β=Median((xj-xi)/(j-i)) (2)

式中:β 为 WUE 变化趋势值,β>0 表示植被的 WUE 呈现增加趋势,β<0 表示植被的 WUE 呈现减少趋势;Median 代表取中值;时间序数 i,j 取值为 2001≤i<j≤2018;xi,xj 分别为对应时间序数的 WUE 值。

利用 Mann-Kendall 统计检验法对 Theil-Sen Median 方法进行显著性检验<sup>[16]</sup>。按照置信度为 90%,95%,99%的显著性检验时,统计值|Z|相应为 1.65,1.96,2.58<sup>[6]</sup>。本文将 β,|Z|的取值定为阈值,WUE 的变化趋势分为以下 9 类,见表 1。

表 1 西江流域 WUE 变化趋势检验类别

变化趋势	M-K 检验(置信水平)	变化类型
β>0	2.58<Z	极显著增加
	1.96<Z≤2.58	显著增加
	1.65<Z≤1.96	微显著增加
	Z≤1.65	不显著增加
β=0	Z	基本不变
	Z≤1.65	不显著减少
β<0	1.65<Z≤1.96	微显著减少
	1.96<Z≤2.58	显著减少
	2.58<Z	极显著减少

2.2.3 偏相关分析 本文采用二阶偏相关分析方法,在消除其他变量干扰的情况下研究 3 个气候因子单独对 WUE 的相关性<sup>[17-18]</sup>。利用二阶偏相关分析方法可消除另外两个因子的干扰,对某一个自变量和



因变量进行相关性分析。利用降水、气温、太阳辐射和水分利用效率的 2001—2018 年的年均值,在像元尺度上,计算每个栅格的 WUE 与气温、降水、太阳辐射的二阶偏相关系数,并利用 t 检验法对相关系数进行显著性检验,选取  $p=0.05$  作为显著性水平。一阶偏相关计算,见公式:

$$r_{ab,c} = \frac{r_{ab} - r_{ac}r_{bc}}{\sqrt{(1-r_{ac}^2)(1-r_{bc}^2)}} \quad (3)$$

式中:  $r_{ab,c}$  是消除  $c$  影响的  $a$  和  $b$  的一阶偏相关系数;  $r_{ab}$ 、 $r_{ac}$ 、 $r_{bc}$  分别是  $a$  和  $b$ ,  $a$  和  $c$ ,  $b$  和  $c$  的相关系数。

二阶偏相关计算,见公式:

$$r_{ab,cd} = \frac{r_{ab,c} - r_{ad,c}r_{bd,c}}{\sqrt{(1-r_{ad,c}^2)(1-r_{bd,c}^2)}}$$

式中:  $r_{ab,cd}$  是去除  $c$ 、 $d$  变量影响下的  $a$  和  $b$  的二阶偏相关系数;变量  $a$  代表 WUE;变量  $b$ ,  $c$ ,  $d$  分别代表降水、气温、太阳辐射 3 个气候因子。

2.2.4 相关分析 研究区域内植被 WUE 与 NDVI 的空间相关性,把相关系数作为量化的指标,在像元尺度上对栅格点的 WUE 时间序列和 NDVI 时间序列做相关分析。计算 WUE 和 NDVI 的相关系数,选取  $p=0.05$  作为显著性水平进行显著性分析。

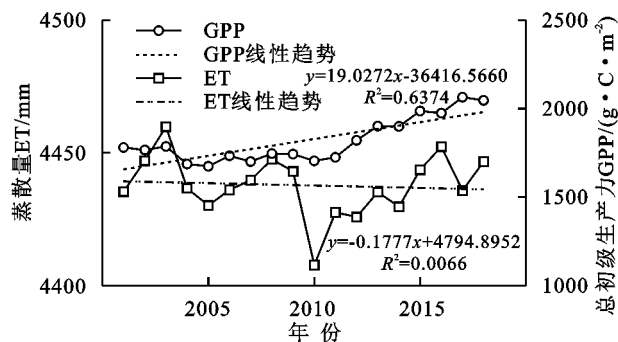


图2 2001—2018年西江流域 GPP、ET 和 WUE 年平均变化趋势

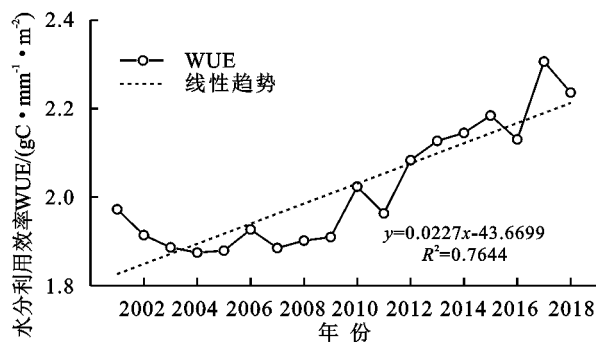
### 3.2 空间变化特征

西江流域 2001—2018 年植被平均 ET、GPP 和 WUE 具有明显的空间分布特征(图 3),ET 在空间上呈现西北高东南低的布局,受到海拔的影响较大,ET 高值集中在广西东南部和广东西部;低值集中在云南东北部和贵州南部,主要原因可能是云南北部和贵州南部海拔相对较高,在一定程度上限制了植被的生长,植被的 WUE 较低。GPP 和 WUE 的空间分布较为相似,由广西中部的耕地向四周辐射升高,云南东部地区 GPP 和 WUE 值相对较低。WUE 较低的原因可能是广西中部的地势较为平坦,人类活动频繁,土地利用类型以耕地为主,植被的 WUE 值较小;云南东部海拔相对较高,耕地和草地零星分布在台地和丘陵,因而植被的 WUE 也相对较小。2001—2018 年植被的 WUE 变化趋势见图 3D,按照 WUE 变化趋势值和置

## 3 结果与分析

### 3.1 时间变化特征

2001—2018 年西江流域的 GPP 总体呈增加趋势,年增长速率为  $19.0272 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  ( $R^2=0.64$ )。ET 波动较大,最高值为  $4459.85 \text{ mm}$ (2003 年),最低值为  $4407.70 \text{ mm}$ (2010 年)。在研究时段内,西江流域植被的 WUE 的多年均值为  $2.02 \text{ gC}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ ,WUE 整体呈显著增加趋势,WUE 年际变化速率为  $0.0227 \text{ gC}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$  ( $R^2=0.76$ ),从 2001 年的 1.972 4 增长到 2018 年的 2.236,年均值最高处现在 2017 年(2.306 2),最低值出现在 2004 年(1.874 7)。2011—2018 年植被的 WUE 增长趋势相对往年较快,增长速率为  $0.0366 \text{ gC}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$  ( $R^2=0.79$ )。WUE 由 GPP 和 ET 共同决定,当 GPP 增长程度大于 ET 增长程度时,即 GPP 斜率大于 ET 斜率时,WUE 呈逐年增加趋势。由图 2 可知,2010 年 ET 值为出现了明显低于往年的最低值,GPP 偏离了往年的变化趋势出现了低谷值,这与 2009 年秋季持续到 2010 年初春的西南干旱事件有关,此次事件在 2010 年 2 月达到峰值,同年 4 月逐渐结束<sup>[19]</sup>。



信水平分级,可分为 9 类,见表 1。总体呈增加趋势的面积占 93.40%,极显著增加的区域面积最大,为 55.74%;呈减少趋势的面积占 5.96%,分布在广西中部、北部,零星分布在云南东部的丘陵和台地。总体上,西江流域植被的 WUE 值呈增加趋势。

### 3.3 不同土地利用下 WUE 变化分析

由 2010 年西江流域土地利用情况可知,以林地主要的土地类型,占总面积的 57.60%,耕地次之,占比为 28.20%。不同土地利用类型下,林地的 ET 和 GPP 值均高于其他三者,灌木地的年均 WUE 最高,为  $2.17 \text{ gC}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ ,林地和草地的年均 WUE 基本持平,耕地的年均 WUE 最低。WUE 年均值排序为灌木地 > 草地 > 林地 > 耕地,见图 4。2001—2018 年西江流域不同土地利用类型下的植被 WUE 具有相同的变化趋势,总体均呈增加趋势,林地的增

长速率最快,为  $0.239\ 7\ \text{gC}/(\text{mm}\cdot\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,草地次之,耕地最慢,耕地的 WUE 增长速率较低,可能是受到人类活动的影响。不同土地利用类型的植被 ET,

GPP 均受到 2009—2010 年的干旱事件影响,2010 年均出现了低于往年的异常值,2010 年后逐步恢复到正常范围。

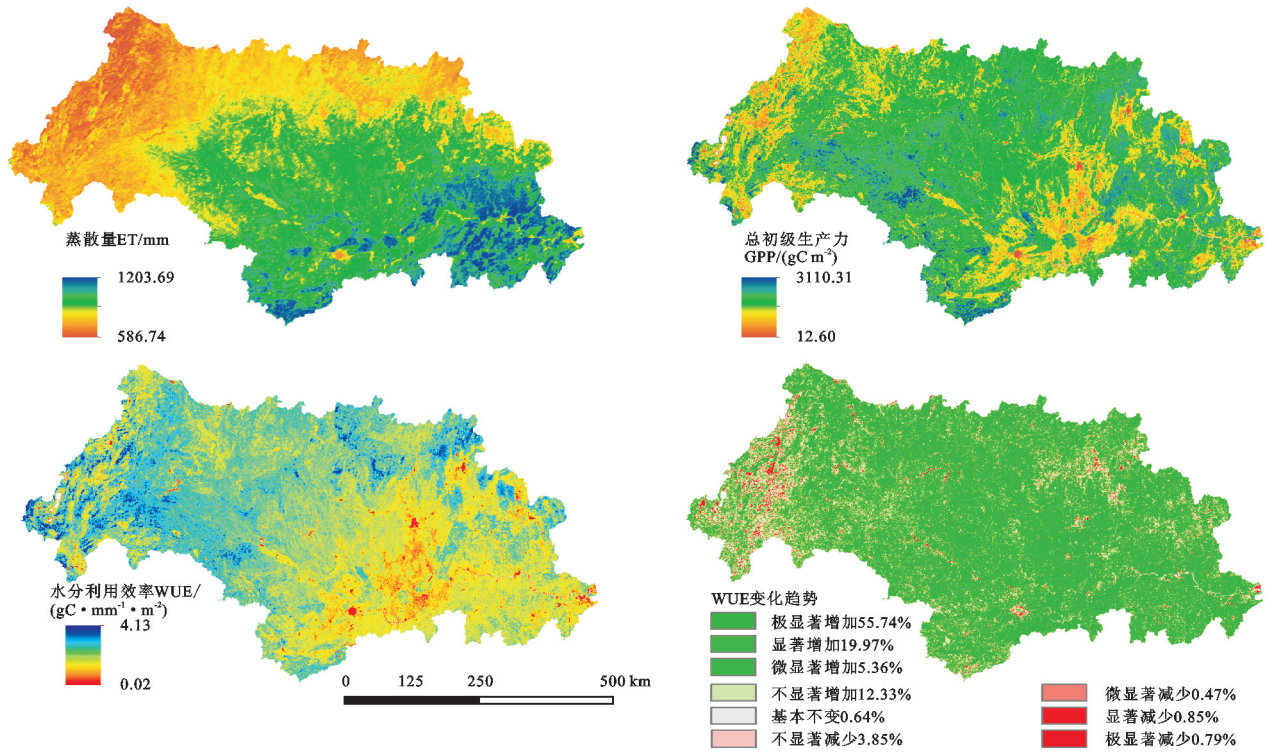


图 3 2001—2018 年西江流域 ET,GPP,WUE 空间变化分布及 WUE 变化趋势

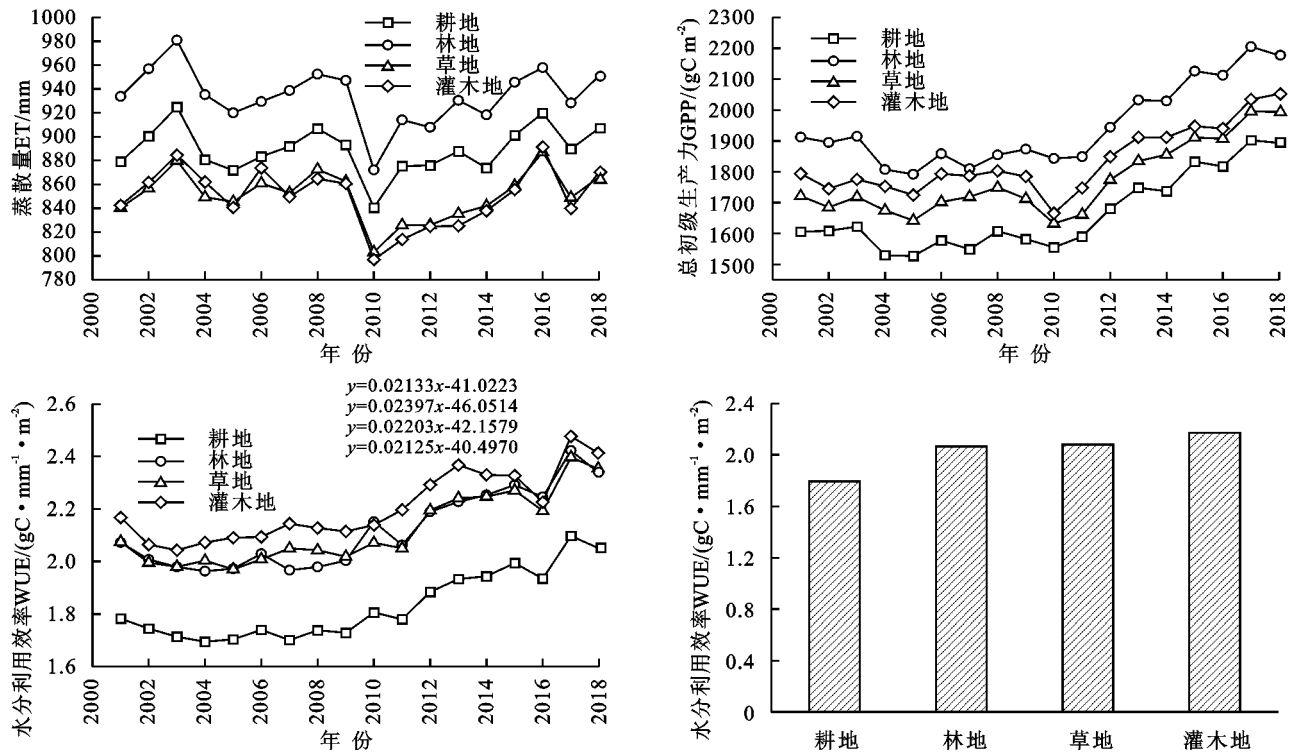


图 4 2001—2018 年西江流域不同植被 ET,GPP,WUE 的年际变化及不同植被的 WUE

3.4 WUE 与气候因子的关系

从图 5 可以看出,西江流域年降水量总体呈上升趋势,年降水量变化率为  $6.01\ \text{mm}/\text{a}$ ,变化幅度较大,达  $618.56\ \text{mm}$ ,年降水量最少的年份出现在 2011 年,为

$1\ 066.34\ \text{mm}$ ;2015 年的年降水量最多,为  $1\ 685.09\ \text{mm}$ 。年均气温总体呈波动上升的趋势,最高气温出现在 2009 年,为  $19.04^{\circ}\text{C}$ ,最低气温出现在 2011 年,为  $17.90^{\circ}\text{C}$ ,18 a 的年均气温为  $18.63^{\circ}\text{C}$ ,年变化率为  $0.008\ 5^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。

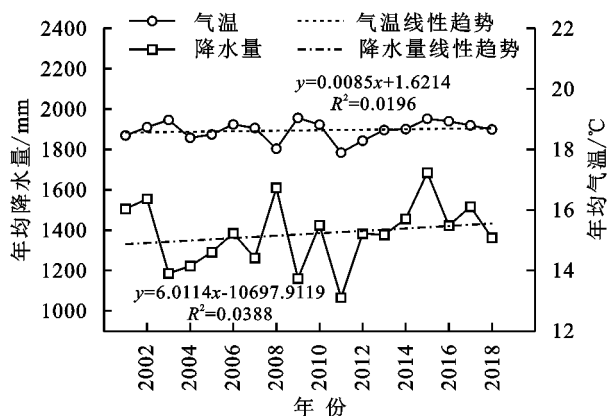


图5 2001—2018年西江流域年平均降水量和年均温度的年际变化

生态系统 WUE 不仅受系统内部植被的调控,同时也受外界环境条件的影响<sup>[20]</sup>。为了解 2001—2018 年的年降水量、年均气温和年太阳辐射对西江流域植被 WUE 驱动作用的空间分布特征,采用二阶偏相关的方法分析流域植被的 WUE 与降水量、气温和太阳辐射的偏相关关系,并进行显著性检验。由图 6 可知,在栅格尺度上,2001—2018 年西江流域植被的 WUE 与降水量的偏相关系数分布在  $-0.86 \sim 0.91$  的区间,正负相关的区域面积占比分别为 75.86%,14.14%,

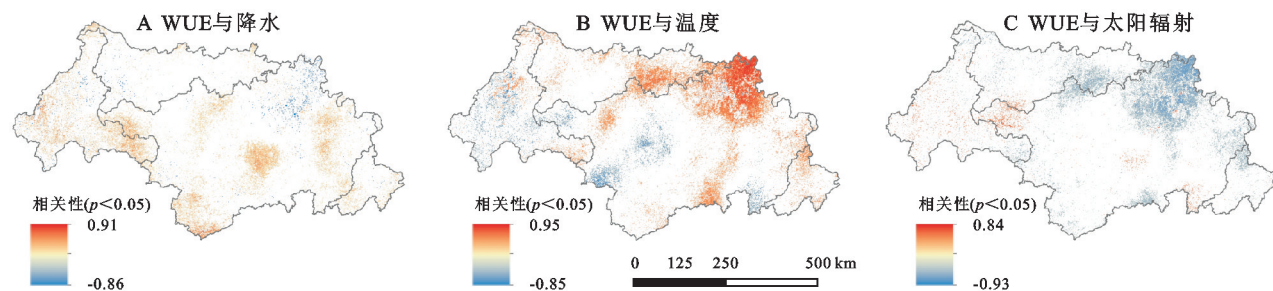


图6 西江流域植被 WUE 与气候因子的偏相关系数空间分布

### 3.5 WUE 与 NDVI 的变化关系

2001—2008 年西江流域多年平均 NDVI 值为  $0.2327 \sim 0.9193$  (图 7A), 低值零星分布在广西中部的耕地和云南东部。西江流域植被的 WUE 与 NDVI 的相关系数分布在  $-0.86 \sim 0.97$  (图 7B), NDVI 的相关系数呈正相关的面积占 91.18%, 呈负相关的面积占 8.80%, 其中, 通过显著性检验  $p < 0.05$  的正相关面积占 54.03%, 负相关面积占 1.17%。总体上, 西江流域水分利用效率与 NDVI 呈显著正相关。多年来国家高度重视西南地区的水土流失问题, 处于石漠化重灾区的广西、贵州、云南积极推进岩溶区石漠化治理和生态防护林建设的措施, 这在一定程度上增加了植被覆盖度, 植被 WUE 升高, 可能与研究区植被结构的变化有关<sup>[21]</sup>。

### 3.6 WUE 与海拔的变化关系

地形是影响西江流域 WUE 空间分布的重要原因, 西江流域高程为  $-25 \sim 2851$  m。在像元尺度上, 提取不

其中, 通过  $p < 0.05$  显著性水平检验的正相关面积占总面积的 12.12%, 分散在滇桂交接处及广西中部、南部的耕地及滇黔桂三省交界的南盘江区域内; 负相关区域占 0.75%。植被 WUE 与气温的偏相关系数为  $-0.85 \sim 0.95$ , 正负相关的区域面积占比分别为 66.93%, 33.07%。通过  $p < 0.05$  显著性水平检验的正相关区域占 15.23%, 主要分布在广西北部桂林柳州地区和贵州省西南部; 负相关区域仅占 3.54%, 分散在云南东部和广西百色市西部、南部和东部。WUE 与太阳辐射的偏相关系数为  $-0.93 \sim 0.84$ , 正、负相关的区域分别占总面积的 34.60%, 65.40%。通过  $p < 0.05$  显著性水平检验的正相关区域占 1.65%, 主要分布在滇黔桂三省交界的南盘江区域; 负相关区域占 11.54%, 主要分布在贵州黔南地区及广西桂林和柳州地区。

可见, 西江流域植被的 WUE 受气温变化的影响较大, 受降水变化的影响次之。总体上看, 西江流域植被的 WUE 和气温、降水呈正相关关系, 与太阳辐射呈负相关关系。由图 6 可以看出, 广西北部的桂林和柳州地区和贵州黔南地区植被的 WUE 受到气温和太阳辐射的主要影响。

同海拔对应的西江流域 18 年的 ET, GPP, WUE 的平均值, 并分别绘制出散点图。从图 8 可以看出, 植被 ET 随海拔的上升呈现先上升后下降的趋势, 转折点分别在 250 m 和 2300 m 左右; 在海拔 2300 m 以上 ET 值出现明显波动。植被 GPP 随海拔的升高呈现先上升再下降后上升的趋势, 转折点分别为 500 m 和 2100 m; 海拔 2100 m 以上的植被 GPP 波动明显。植被的 WUE 随海拔升高呈现升高—平缓—升高的变化趋势, 前一变化转折点位于 1100 m 左右, 后一变化转折点位于 2100 m 左右, 在 2100 m 后出现波动。总体上植被的 WUE 随海拔的升高而升高, 但这种增长趋势并不是无限制的, 这与前人的研究相一致<sup>[5]</sup>。从 WUE 与气候因子的相关性分析中可看出海拔  $> 2000$  m 区域的 WUE 与气温、降水有显著相关性, 2011 年气温和降水明显升高, 整体上该区域植被的 WUE 对降水表现出正面效应, 对气温表现的效应较为复杂。研究区海拔  $> 2300$  m 的区域主



在滇东区域,过高的温度会抑制植被的生长发育,也会导致植被蒸腾加剧,ET 的增长速率大于 GPP<sup>[5]</sup>。海拔导致的气温差异可能是影响 ET 波动的原因,也是导致 WUE 对气温的响应出现差异的原因,这可以解释为什么 WUE 在海拔较高的地区出现明显的波

动。在海拔 2 100 m 左右的云南东部的植被类型多为草地和耕地,林地零星分布,由图 4 可知,这两种植被类型的 GPP 相对较低,林地的 GPP 相对较高,因此在海拔 > 2 100 m 的区域 GPP 会出现较大的波动,也是造成 WUE 波动的重要原因。

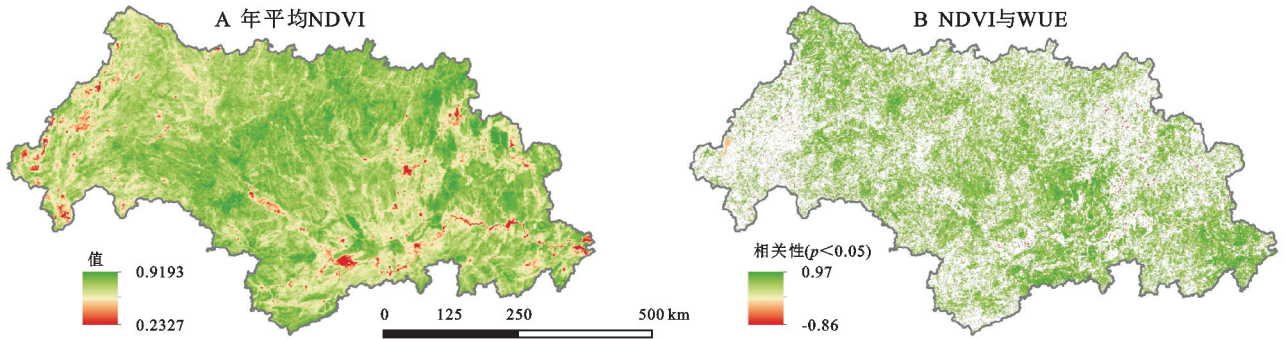


图 7 2001—2018 年西江流域年平均 NDVI 以及 NDVI 与 WUE 的相关系数

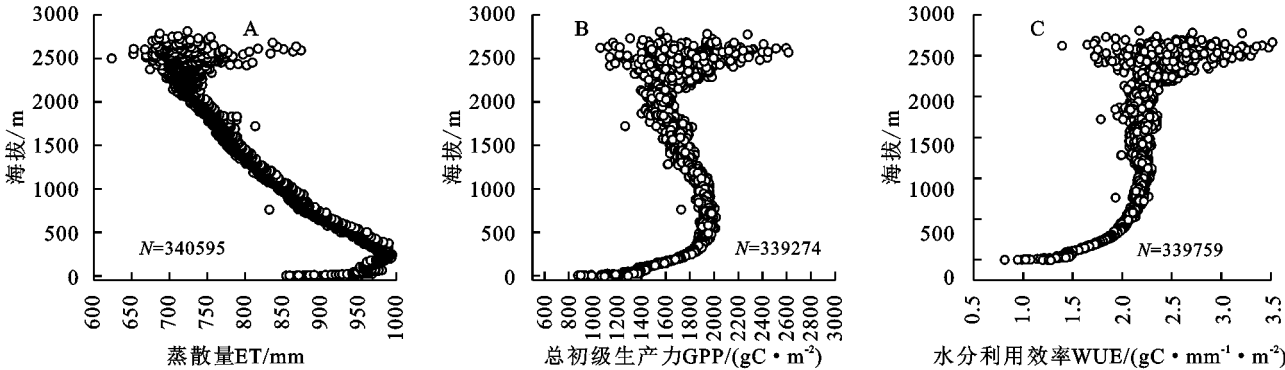


图 8 西江流域植被的 ET,GPP,WUE 与海拔的关系

由于西江流域地形的特殊性和地貌的多样性,各种植被类型在不同海拔高度上的分布格局大不相同,本文参照前人对研究区植被类型垂直分布与海拔高度的变化关系<sup>[22-23]</sup>,将西江流域的海拔变化划分为 5 类,即 <700 m,700~1 000 m,1 000~1 300 m,1 300~2 000 m,>2 000 m。其中<700 m 的区域占流域的 57.08%,700~1 000 m 的区域占 13.44%,1 000~1 300 m 的区域占 9.31%,1 300~2 000 m 和>2 000 m 的分别区域占 15.52%,4.65%。通过表 2 可以发现 WUE 的 18 a 变化程度与海拔的关系,总体上,WUE 增加的区域明显大于减少的区域,<700 m 和>2 000 m 区域植被的 WUE 变化程度较为明显。在海拔>2 000 m 的区域,WUE 减少的面积仅占 0.08%。近年来我国实行大面积的退耕还林、封山育林的等石漠化治理措施,一定程度上增加植被度,种植结构得到明显优化。高海拔地区原本的耕地草地逐步转化为林地,水分利用效率明显提升。全球气候变暖也是不容忽视的一大因素,高海拔地区的植被由于温度上升,植被生长得到了良好的水热条件,植被覆盖度显著增加,从而 WUE 较高。耕地由于人为控制,如灌溉方式的改变在一定程度上促使了 WUE 的升高。

4 讨论

2001—2018 年西江流域的不同植被类型的 ET 呈现下降趋势,GPP 增加的斜率大于 ET 的斜率,这是植被 WUE 增加的主要原因,这与该地区的其他研究成果相一致<sup>[5]</sup>。2010 年为 ET 的低谷期,这是由于 2009 年秋至 2010 年初春,我国西南部出现干旱,在 2009 年 11 月达到峰值,出现极端干旱<sup>[19]</sup>,2009 年降水显著降低,温度升高,GPP 在 2009 年并没有表现出明显下降,而在 2010 年春旱受到一定影响,2009—2010 年的干旱事件对 ET,GPP 均造成影响,但对 ET 的作用远高于 GPP;直到 2010 年,ET 到达低谷,WUE 显著升高,在 2011 年 WUE 才出现明显的下降趋势,这与前人的研究基本一致<sup>[9]</sup>。由图 2B 可明显看出 2011—2018 年植被的 WUE 增长速率明显大于 2001—2010 年的增长速率,这可能与多年来的生态修复项目有关。2011 年以后我国愈加重视和开展岩溶区石漠化治理和流域生态防护林体系建设,加大了对西南岩溶地区石漠化的治理力度<sup>[11]</sup>。

2012 年国家林业局组织开展的第二次石漠化监

测表示,与 2005 年相比,石漠化土地净减少 96 万  $\text{hm}^2$ ,岩溶地区植被覆盖度提高了 4.4%;监测结果显示,人工造林种草和植被保护对石漠化治理的贡献率高达 72%<sup>[21]</sup>。在不同土地利用类型下的植被类型中,西江流域灌木的多年平均 WUE 值相对较大,这与前人的研究成果<sup>[24]</sup>相一致。研究区的灌木主要分布在云桂黔三省交界的峰丛洼地,峰丛洼地是石漠化的重灾区,其基岩大面积裸露,治理难度大。在严重干旱胁迫

下,灌木的比叶面积较低,其内在水分利用效率和散热能力均较高,灌木这类物种对于干旱胁迫表现出很高的耐性,适合在严重干旱胁迫的严重退化栖息地生存(例如岩石较多的地区)<sup>[25]</sup>。研究区林地的蒸散量较大,这可能是导致林地的 WUE 相对较低的原因。灌木转化为森林可能会加剧水资源短缺,因此生态恢复项目一般倾向于将草地和农田作为植被恢复区域,而不建议将灌木地作为植被恢复区域<sup>[24]</sup>。

表 2 不同海拔高度下 WUE 变化程度所占的比例

%

WUE 变化程度	海拔高度				
	<700 m	700~1000 m	1000~1300 m	1300~2000 m	>2000 m
极显著增加	0.62	—	—	—	2.40
显著增加	98.78	1.00	93.85	37.78	24.91
微显著增加	0.33	—	6.15	45.04	67.20
不显著增加	0.18	—	—	16.25	5.26
基本不变	0.03	—	—	0.93	0.15
不显著减少	0.06	—	—	—	0.04
微显著减少	—	—	—	—	0.03
显著减少	—	—	—	—	—
极显著减少	—	—	—	—	0.01

2001—2018 年西江流域年均气温、年降水量与植被的 WUE 整体呈正相关,太阳辐射与植被的 WUE 呈负相关。由图 5 可知,2011 年以后,气温和降水对 GPP 的作用高于对 ET 的作用,即 GPP 增加的斜率明显大于 ET 的增长的斜率,这也是 2011 年后 WUE 明显增加的重要原因。根据《岩溶地区水土流失综合治理技术标准 SL461-2009》中划分的地质类可知,广西桂林和柳州地区为典型的峰林平原区,其地形特点是石峰与平原相间。由于石峰分布的面积不大,总体上峰林平原区水土流失面积不大,植被分布比较广泛。由于地势高低造成的差异,成为了制约水、热、光分布不均的原因影响到下垫面和气候要素的分布,从而导致 ET 分布差异明显<sup>[6]</sup>。峰林平原这一系列差异最终表现出气候因子对 WUE 的驱动性,广西柳州和桂林地区受到气温和太阳辐射的主要影响,受到降水的影响相对较小。

本文在研究不同土地利用类型的植被 WUE 变化特征时,仅采用 2010 年的土地利用数据进行分析,人类活动对土地利用的类型转变影响甚大,这存在一定的不确定性。石漠化地区的植被稳定性较差,外来因素极可能改变整个群落的生长结构,而林地作为西江流域的主要土地类型,面临着火灾多发、害虫严重等问题,这对森林植被的安全造成一定的威胁,在研究土地利用类型的不同植被的 WUE 时,人类活动

(如农作物施肥、灌溉措施、放牧等)对植被 WUE 值产生的影响也不容忽视。西江流域在地形和气候方面特征突出,其他因素如干旱<sup>[19]</sup>、二氧化碳<sup>[18]</sup>和氮沉降<sup>[26]</sup>等也会对 WUE 产生重要的影响,在今后的研究中,应适当考虑这些因素对 WUE 的影响。

## 5 结论

本研究基于 GLASS 产品的遥感数据,分析了西江流域植被的水分利用效率 WUE 的时空特征,研究了植被的 WUE 与气候因子、NDVI、海拔的变化关系,得出以下结论:

(1) 2001—2018 年,WUE 的空间分布格局和时间变化趋势由 GPP 和 ET 的比值决定,与 GPP 的空间分布格局极为相似,由广西中部的耕地向四周升高,部分低值分布在云南东部的丘陵和台地。在研究时段内,西江流域的 WUE 的多年均值为  $2.02 \text{ gC}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ ,以  $0.022 \text{ gC}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{a})$  ( $R^2=0.76$ ) 的速率增加,总体呈显著增加趋势,极显著增加的面积约占西江流域总面积的 55.74%。不同土地利用类型下,灌木地的年均 WUE 最高,林地的 WUE 年增长率最快。

(2) 总体上,2001—2018 年研究区植被的 WUE 与温度、降水的具有正相关关系,通过显著性检验的正相关面积分别为 15.23%,12.12%;植被的 WUE



与太阳辐射的具有负相关关系,通过显著性检验的负相关面积为 11.54%。

(3) WUE 与 NDVI 的相关系数为  $-0.86 \sim 0.97$ , 通过显著性检验的正相关面积占 54.03%, 表明 NDVI 与植被的 WUE 呈显著正相关; 西江流域 18 a 的 WUE 随海拔升高呈现出上升—平缓—上升的变化趋势, 在海拔 2 100 m 左右之后, 植被的 WUE 出现明显波动。

#### 参考文献:

- [1] Huang M, Piao S, Sun Y, et al. Change in terrestrial ecosystem water use efficiency over the last three decades[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(6): 2366-2378.
- [2] Gang C, Wang Z, Chen Y, et al. Drought-induced dynamics of carbon and water use efficiency of global grasslands from 2000 to 2011[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 788-797.
- [3] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 植物水分利用效率研究方法综述[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 853-858.
- [4] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 等. 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[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 119-125, 319.
- [5] 彭大为, 周秋文, 韦小茶, 等. 中国西南岩溶区水分利用效率变化及其对气象要素的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9470-9480.
- [6] 张继, 周旭, 蒋啸, 等. 贵州高原不同地貌区和植被类型水分利用效率的时空分异特征[J]. *山地学报*, 2019, 37(2): 173-185.
- [7] 付秀东, 闫俊杰, 沙吾丽·达吾提, 等. 伊犁河谷草地生态系统水分利用效率时空变化及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 124-131.
- [8] Xue B L, Guo Q, Otto A, et al. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(10): 1-18.
- [9] 张永永, 税伟, 孙晓瑞, 等. 云南省植被水分利用效率时空变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2405-2417.
- [10] 梁锦桃, 邓艳, 李旭尧, 等. 岩溶断陷盆地不同海拔植物水分利用效率分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(2): 180-188.
- [11] 苏俊磊, 罗为群, 王广哲, 等. 基于 MODIS-EVI 的广西西江流域植被时空变化特征及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 232-238.
- [12] Yu T, Sun R, Xiao Z, et al. Estimation of global vegetation productivity from global land surface satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 327.
- [13] 苏恒, 徐宗学, 李鹏, 等. 1970—2017 年西江流域降水特性分析[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(6): 51-61.
- [14] 苏恒, 徐宗学, 李鹏, 等. 基于多种水文学法的生态基流计算: 以西江大湟江口河段为例[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 58(2): 269-276.
- [15] Yuan F, Zhao C, Jiang Y, et al. Evaluation on uncertainty sources in projecting hydrological changes over the Xijiang River basin in South China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 554: 434-450.
- [16] 陈坤, 蒋卫国, 何福红, 等. 基于 GRACE 数据的中国水储量变化特征分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 275-286.
- [17] 马显莹, 李靖, 顾世祥, 等. 高原山区主要气候因子对 ET<sub>0</sub> 影响分析研究[J]. *中国农村水利水电*, 2010(10): 9-12.
- [18] 陈鑫涛, 邓超. 2000—2015 年中国草地生态系统水分利用效率时空特征及其对气候要素的响应[J]. *中国农村水利水电*, 2021(5): 55-60.
- [19] Wang M, Ding Z, Wu C, et al. Divergent responses of ecosystem water-use efficiency to extreme seasonal droughts in Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 760: 143427.
- [20] 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.
- [21] 白建华. 我国石漠化防治现状、问题及对策建议[C]. 国治沙暨沙业学会石漠化防治专业委员会首届中国石漠化防治学术研讨会论文集, 2013: 1-9.
- [22] 朱华. 云南植被多样性研究[J]. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2022, 42(1): 1-12.
- [23] 李先琨, 苏宗明, 吕仕洪, 等. 广西岩溶植被自然分布规律及对岩溶生态恢复重建的意义[J]. *山地学报*, 2003, 21(2): 129-139.
- [24] Ding Z, Liu Y, Wang L, et al. Effects and implications of ecological restoration projects on ecosystem water use efficiency in the karst region of Southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 170(2): 106356.
- [25] Liu C C, Liu Y G, Guo K, et al. Comparative eco-physiological responses to drought of two shrub and four tree species from karst habitats of southwestern China[J]. *Trees*, 2011, 25(3): 537-549.
- [26] Sun F, Kuang Y, Wen D, et al. Long-term tree growth rate, water use efficiency, and tree ring nitrogen isotope composition of *Pinus massoniana* L. in response to global climate change and local nitrogen deposition in Southern China[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2010, 10(8): 1453-1465.