

西南地区植被水分利用效率时空演变及驱动机制

靖娟利^{1,2}, 覃世萍¹, 王永锋¹, 蓝肖玉¹, 郭文焱¹

(1. 桂林理工大学测绘地理信息学院; 2. 广西生态时空大数据感知服务重点实验室)

摘要:基于 2000—2020 年西南地区植被总初级生产力和蒸散发数据,运用趋势分析、偏相关分析和残差趋势分析等方法,探究了西南地区植被水分利用效率的时空演变规律及驱动机制。结果表明:2000—2020 年西南地区植被水分利用效率在时间上呈不显著下降趋势,下降速率为 0. 002 4 g/(m² · mm · a)(以碳含量计);在空间上总体呈南高北低的空间分布格局,空间分布受植被总初级生产力主导;植被水分利用效率与相对湿度、日照时数、气温呈正相关关系,与降水量和风速呈负相关关系;对于植被水分利用效率的变化,气候变化的相对贡献为 52. 6%,人类活动的相对贡献为 47. 4%;在广西丘陵、云贵高原和四川盆地,气候变化和人类活动对植被水分利用效率以负向影响为主,而在横断山地和若尔盖高原,正向和负向影响占比相当。

关键词:植被水分利用效率;时空演变;气候变化;人类活动;西南地区

Spatiotemporal evolution and driving mechanism of vegetation water use efficiency in Southwest China//Jing Juanli^{1,2}, Qin Shiping¹, Wang Yongfeng¹, Lan Xiaoyu¹, Guo Wenyan¹(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology; 2. Guangxi Key Laboratory of Ecological Spatiotemporal Big Data Perception Services)

Abstract: Based on the total primary productivity and evapotranspiration data of vegetation in Southwest China from 2000 to 2020, this study used methods such as trend analysis, partial correlation analysis, and residual trend analysis to explore the spatiotemporal evolution laws and driving mechanisms of vegetation water use efficiency in Southwest China. The results showed that from 2000 to 2020, the vegetation water use efficiency in Southwest China showed a non-significant downward trend over time, with a decrease rate of 0. 002 4 g/(m² · mm · a) (in terms of carbon content). The overall spatial distribution pattern is high in the south and low in the north, and the spatial distribution is dominated by the total primary productivity of vegetation. The vegetation water use efficiency is positively correlated with relative humidity, sunshine hours, and temperature, and negatively correlated with precipitation and wind speed. The relative contribution of climate change to changes in vegetation water use efficiency is 52. 6%, while the relative contribution of human activities is 47. 4%. Climate change and human activities have a negative impact on vegetation water use efficiency in Guangxi hills, the Yunnan-Guizhou Plateau and Sichuan Basin, while the positive and negative impacts in Hengduan Mountains and Ruergai Plateau account for the same proportion.

Key words: vegetation water use efficiency; spatiotemporal evolution; climate change; human activities; Southwest China

植被水分利用效率 (vegetation water use efficiency, VWUE) 为植被总初级生产力 (vegetation gross primary productivity, VGPP) 与蒸散发 (ET) 之比^[1-2],其量化了植被在光合作用中产生的干物质占蒸散发消耗的水量的比例,是表征植被固碳与耗水平衡的关键变量^[3-4]。植被水分利用效率不仅能反映生态系统碳循环与水循环之间的相互作用^[5-6],也是反映生态系统对全球气候变化响应的关键指标^[7]。因此,在全球气候变暖和水资源短缺加剧的条件下,探究不同生态系统植被水分利用效率时空

动态及其驱动机制对于揭示区域碳-水耦合过程及生态系统可持续性具有重要科学意义。

近年来,随着卫星和对地观测技术的发展,遥感数据因其能够提供连续的地表关键信息,为开展区域和全球尺度植被水分利用效率时空分异研究提供了技术手段^[8-9]。以往研究表明,约占全球 14% 的地区植被水分利用效率呈显著上升趋势,干旱生态系统植被水分利用效率对于干旱表现为负响应,而湿润生态系统则表现为正响应或负响应^[10];亚洲半干旱区植被水分利用效率呈不显著增长趋势,降水量

基金项目:国家自然科学基金项目(42161028)
作者简介:靖娟利(1977—),女,教授,硕士,主要从事植被覆盖变化研究。E-mail:2003080@glut.edu.cn
通信作者:王永锋(1977—),男,高级实验师,硕士,主要从事植被覆盖变化研究。E-mail:6605004@glut.edu.cn

对其变化起主导作用,而气温对其以正向促进作用为主^[11];20 世纪 90 年代以来,中国植被水分利用效率呈上升趋势,其与降水量和气温呈负相关关系,而与叶面积指数呈正相关关系,气温和 CO₂ 浓度是驱动植被水分利用效率变化的主要因子^[12-13];中国喀斯特地区植被水分利用效率下降的主导气候因子是降水量,而气温和太阳辐射对其上升起到促进作用^[14];黄河源地区气温和叶面积指数对植被水分利用效率有明显的促进作用,降水量则起到抑制作用^[15];西南地区植被水分利用效率呈下降趋势,与气温以正相关关系为主,而与降水量以负相关关系为主^[16],气温、降水量和增强型植被指数都是驱动植被水分利用效率变化的重要因素^[17-18]。随着研究的深入,人类活动对植被水分利用效率的动态影响也受到关注,目前,常采用残差分析法来量化人类活动和气候变化对植被水分利用效率的影响。以往研究常选择气温和降水因子与植被水分利用效率建立线性关系,分离气候变化和人类活动对植被水分利用效率的影响,结果表明气候变化和人类活动对中国植被水分利用效率变化的贡献分别为 33.25% 和 66.75%^[19],对西南喀斯特地区的贡献分别为 15.0% 和 85.0%^[16],而对黑龙江省的贡献分别为 42.3% 和 57.7%^[20]。可见,气候变化和人类活动对植被水分利用效率均有一定影响。

综上可知,目前针对西南地区植被水分利用效率的研究中,大部分将研究区作为整体,考虑的气候因子主要为气温和降水量,对其他气候因子的影响考虑不足,忽略不同地貌单元植被水分利用效率对气候因子响应的差异性。另外,以往研究未能单独分离出受人类活动影响的区域,这可能导致人类活动对植被水分利用效率变化贡献的高估^[21-22]。鉴于此,本文基于西南地区 2000—2020 年植被总初级生产力、蒸散发数据,探究不同地貌分区植被水分利用效率的时空动态及其对气候因子(气温、降水量、日照时数、相对湿度和风速)响应的差异,并基于

2000—2020 年 3 期土地利用数据分离出人类活动影响的区域,利用残差趋势分析法评估气候变化和人类活动对植被水分利用效率的影响,以期西南地区生态环境保护及水资源合理利用提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西南地区(20°N~35°N、96°E~113°E)包括广西、云南、四川、贵州、重庆 5 省(区、市)。西南地区地势起伏大,整体上呈现西高东低、北高南低的空间格局;地貌分区包括广西丘陵(I)、云贵高原(II)、四川盆地(III)、横断山地(IV)和若尔盖高原(V)(图 1(a))。受亚热带季风影响,研究区内降水充沛,尤其是夏季和秋季,年降水量为 1000~1300 mm,大部分地区年均气温为 14~24℃。植被类型主要包括林地、灌木林、草地等(图 1(b)),高山地区植被垂直地带性差异明显。西南地区喀斯特地貌发育,土壤层薄而石质含量高,石漠化加剧了该地区的水资源短缺,生态环境脆弱^[23]。

1.2 数据来源

MODIS 的总初级生产力和蒸散发数据来源于美国航空航天局(<https://www.earthdata.nasa.gov/>),时间和空间分辨率分别为 8 d 和 500 m,数据格式为 HDF,数据时段为 2000—2020 年。采用 MRT 工具和 ArcGIS10.8 对 MODIS 数据进行拼接、投影和格式转换,得到空间分辨率为 500 m 的西南地区植被总初级生产力和蒸散发数据。

气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),包括 2000—2020 年 751 个气象站点的逐日相对湿度、气温、日照时数、降水量和风速数据,将逐日气象数据合成年际数据,并基于 ANUSPLIN 气象插值模型,以高程作为协变量,生成 2000—2020 年各气象因子的栅格序列,空间分辨率为 500 m。

2000 年、2010 年和 2020 年 3 期土地利用数据

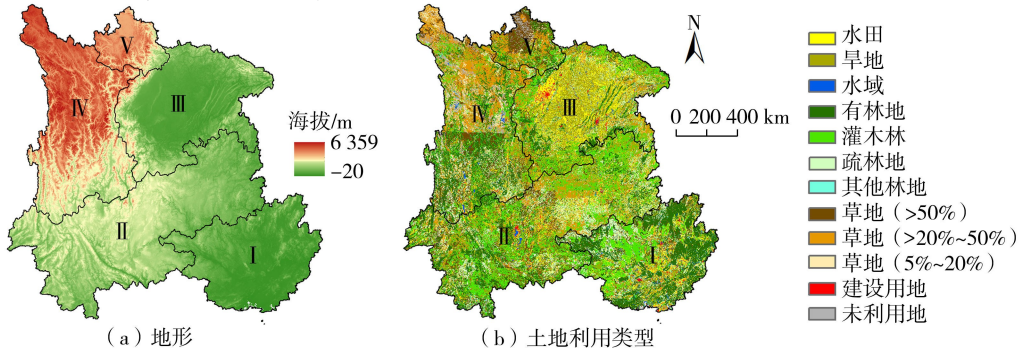


图 1 西南地区概况

Fig. 1 Overview of Southwest China

和 DEM 数据从资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 获取,其中 DEM 数据分辨率为 500 m,土地利用数据时空分辨率分别为 5 a 和 1 km,数据具体分为 6 个一级分类和 25 个二级分类。

2 研究方法

Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall (M-K) 检验常被应用于长时间序列分析,属于稳健的非参数统计方法^[24]。利用 Theil-Sen Median 趋势分析 2000—2020 年西南地区植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率的变化趋势,并结合 M-K 检验对变化趋势进行显著性检验。利用 M-K 检验统计量 Z 值来判断要素变化是否显著^[25],在给置信水平 $\alpha=0.05$ 时, $|Z| \geq 1.96$ 表示植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率时间序列变化趋势显著, $|Z| < 1.96$ 表示变化趋势不显著。

利用偏相关分析法^[26]分析 2000—2020 年西南地区不同气候因子(相对湿度、气温、日照时数、降水量和风速)对植被水分利用效率的影响。气候变化和人类活动对植被水分利用效率的影响采用修订的残差趋势分析法^[21]进行量化,研究过程中将受气候变化和人类活动影响(如城市化、农业开发)的区域进行分离。首先,基于西南地区 2000、2010 和 2020 年 3 期土地利用数据分离出 2000—2020 年土地利用类型发生变化的区域;其次,将变化区分为受气候变化与人类活动综合影响的区域(土地利用类型发生变化的区域、农田和建筑用地,占比 60.3%)和受气候变化单独影响的区域(其他地区,占比 39.7%),结果如图 2 所示;最后,构建植被水分利用效率与气候因子(相对湿度、温度、日照时数、降水量和风速)之间的回归方程,定量解析气候变化和人类活动对植被水分利用效率的影响。计算公式为:

$$\xi_{\text{res}} = \xi_{\text{act}} - \xi_{\text{pre}} \tag{1}$$

水田 旱地 水域 有林地 灌木林 疏林地 其他林地 草地 (>50%) 草地 (>20%~50%) 草地 (5%~20%) 建设用地 未利用地

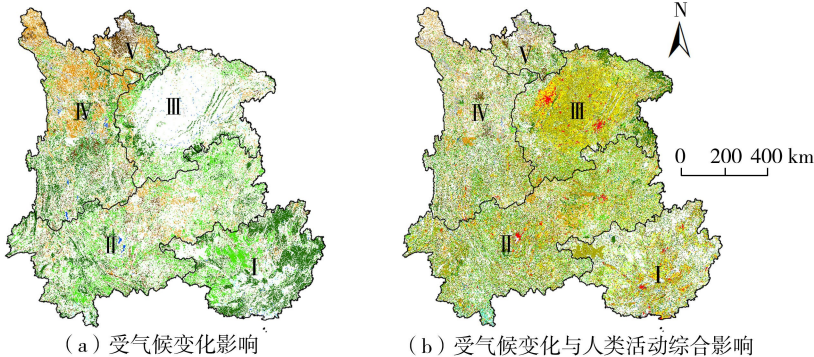


图 2 西南地区不同条件下土地利用类型

Fig. 2 Land use types in Southwest China under different conditions

其中 $\xi_{\text{pre}} = aH + bT + cS + dP + ew + f$ 式中: ξ_{pre} 为植被水分利用效率预测值; ξ_{act} 为植被水分利用效率实际值; ξ_{res} 为回归方程残差,可以表征人类活动对植被水分利用效率的影响; H 为相对湿度; T 为气温; S 为日照时数; P 为降水量; w 为风速; a, b, c, d, e, f 为系数。分别对 ξ_{pre} 和 ξ_{res} 进行趋势分析,得到气候变化或人类活动对植被水分利用效率变化的相对贡献, ξ_{pre} 或 ξ_{res} 大于 0 表示对植被水分利用效率为正向影响, ξ_{pre} 或 ξ_{res} 小于 0 表示对植被水分利用效率为负向影响,详细计算过程见文献^[21]。

3 结果与分析

3.1 植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率的时间变化特征

图 3 为 2000—2020 年西南地区及不同地貌分区的植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率。由图 3 可见,2000—2020 年西南地区植被总初级生产力和蒸散发分别以 $5.54 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以碳含量计) 和 5.79 mm/a 的增长速率呈显著上升趋势 ($p < 0.05$), 而植被水分利用效率在 $1.22 \sim 1.50 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 范围波动,呈不显著下降趋势 ($p > 0.05$),下降速率为 $0.0024 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$ 。就不同地貌分区而言,植被总初级生产力均呈上升趋势,云贵高原植被总初级生产力最高,年际均值为 $1342.40 \text{ g}/\text{m}^2$;而若尔盖高原植被总初级生产力最低,仅为 $645.98 \text{ g}/\text{m}^2$ 。蒸散发变化趋势类似,均呈显著上升趋势 ($p < 0.05$),其中广西丘陵蒸散发均高于其他地貌分区,均值为 1046.34 mm ;而横断山地蒸散发最低,仅为 615.26 mm 。植被水分利用效率均呈不显著下降趋势 ($p > 0.05$),但波动变化表现出一定差异。其中,云贵高原植被水分利用效率明显高于其他地貌分区,年际均值为 $1.55 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$;而若尔盖高原最低,仅为 $1.03 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 。

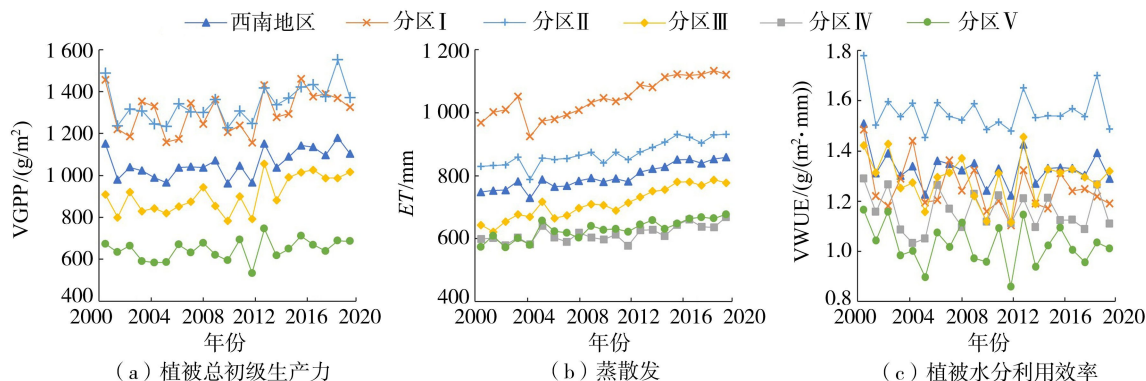


图3 2000—2020年西南地区及不同地貌分区的植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率

Fig.3 VGPP, ET, and VWUE in Southwest China and different geomorphic regions from 2000 to 2020

3.2 植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率的空间变化特征

图4为2000—2020年西南地区植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率的空间变化特征。由图4(a)可见,植被总初级生产力均值为 $6.14 \sim 2963.72 \text{ g/m}^2$,呈南高北低的空间分布格局,变化速率在 $-99.51 \sim 72.4 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 范围波动,总体以不显著变化为主(87.04%区域),显著上升区域集中于云贵高原中部,显著下降区域零星分布于广西丘陵西北部 and 云贵高原东部。图5为不同地貌分区植物总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率显著性检验结果。由图5(a)可见,不同地貌分区植被总初级生产力总体以不显著上升趋势占主导,面积占比为71.21%~87.15%。由图4(b)可见,蒸散发均值为 $232.11 \sim 1737.78 \text{ mm}$,其中东南和西南地区较高,占比70.12%的地区呈显著上升趋势,广泛分布于除横断山地南部以外的其他区域。由图5(b)可见,各地貌分区蒸散发均以显著上升为主,其中若尔盖高原最高(占比91.28%)。由图4(c)可见,植被水分利用效率均值为 $0.008 \sim 4.38 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{mm)}$,变化速率在 $-0.15 \sim 0.08 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a)}$ 范围波动,总体以不显著变化为主(86.21%区域),显著上升区域(4.78%区域)集中分布于四川盆地及高原交界地带,显著下降区域(9.01%区域)零星分布于若尔盖高原北部等地。由图5(c)可见,各地貌分区植被水分利用效率变化趋势均以不显著下降趋势为主,其中广西丘陵面积占比最高(59.77%),而云贵高原占比最低(47.62%)。

3.3 气候变化对植被水分利用效率的影响

图6为西南地区植被水分利用效率与气候因子偏相关系数的空间分布,可见植被水分利用效率与相对湿度、温度和日照时数的偏相关系数介于 $-0.92 \sim 0.95$,均值分别为0.06、0.01和0.28,与降水量和风速的偏相关系数介于 $-0.96 \sim 0.93$,均值为

-0.1 和 -0.08 。显著性检验结果见图7和图8,植被水分利用效率与相对湿度以正相关为主(60.02%区域),其中显著正相关分散于四川盆地中部(4.74%区域);显著负相关分布于横断山地、云贵高原等地(38.65%区域)。与温度呈正相关关系的区域(占比52.41%)稍高于负相关的区域(占比47.59%),但显著负相关区域分布广泛(46.21%区域)。与日照时数以正相关为主导(86.73%区域),其中广西丘陵和四川盆地等地呈显著正相关关系,植被水分利用效率与降水量和风速均以负相关为主,占比分别为62.44%和59.6%,在不同地貌分区均有一定分布。从地貌分区方面来看,植被水分利用效率与日照时数均呈正相关关系,而与相对湿度、温度、降水和风速则呈现出明显的地域分异特征。

3.4 气候变化与人类活动对植被水分利用效率的综合影响

图9为气候变化和人类活动对西南地区植被水分利用效率影响的空间分布。由图9可见,气候变化、人类活动对植被水分利用效率变化的影响均值分别为 -0.0020 、 -0.0018 a^{-1} ,相对贡献分别为52.6%和47.4%。植被水分利用效率受气候变化促进的区域(占比29.9%)主要分布在横断山地、若尔盖高原和云贵高原,尤以云贵高原中北部地区促进作用最明显;受气候变化抑制的区域(占比70.1%)在各地貌分区均有不同程度分布,尤以四川盆地中部和广西丘陵西北部等地区受抑制作用较显著。人类活动对植被水分利用效率变化起促进作用的区域(占比38.5%)主要分布在云贵高原中部地区,呈抑制作用的区域(占比61.5%)集中在四川盆地、云贵高原和广西丘陵。从不同地貌分区来看,气候变化和人类活动对植被水分利用效率变化的影响表现出一定差异(图10)。其中,气候变化和人类活动对广西丘陵、云贵高原和四川盆地均以负影响为主,相比之下,气候变化和人类活动对横断山地和若尔盖高

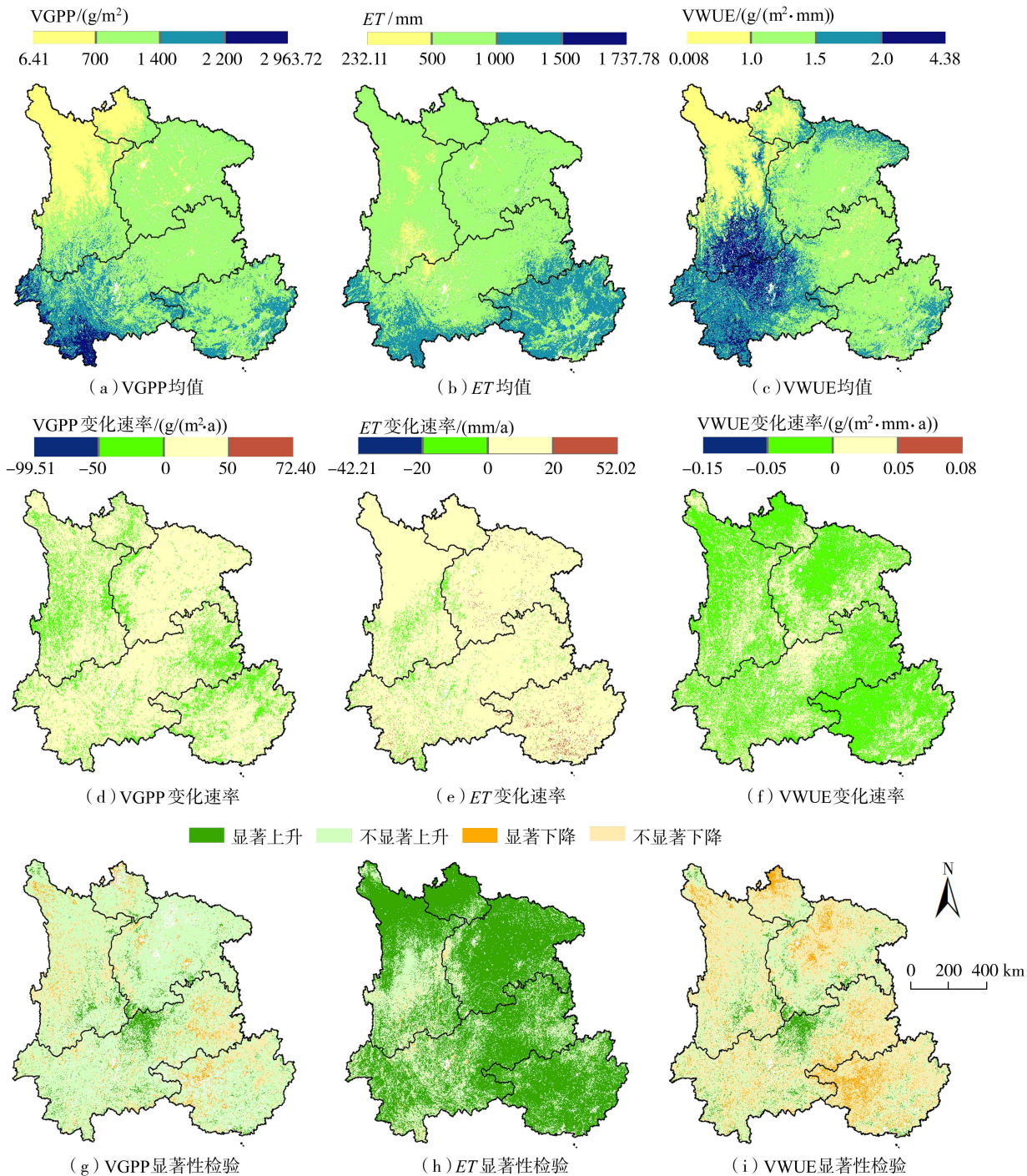


图 4 2000—2020 年西南地区植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率的空间变化特征

Fig. 4 Spatial variation characteristics of VGPP, ET, and VWUE in Southwest China from 2000 to 2020

原植被水分利用效率的正向和负向影响面积占比相对均衡。

4 讨论

4.1 植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率的时空分布

2000—2020 年西南地区植被总初级生产力和蒸散发均呈显著上升趋势,而植被水分利用效率呈下降趋势。其中,植被总初级生产力和蒸散发的上

升得益于 2000 年以来国家对西南地区实施的一系列生态修护工程,石漠化得以缓减,加快了区域植被恢复^[27-28];植被水分利用效率的下降与蒸散发增长幅度大于植被总初级生产力有关,与 Shi 等^[16]的研究结果一致。此外,2009—2010 年西南地区发生了极端干旱事件,植被受到干旱胁迫使得叶面气孔导度降低,植被总初级生产力和蒸散发均受到负面影响,植被总初级生产力明显下降^[29],植被水分利用效率受到影响也随之下降。已有研究也证实了严重

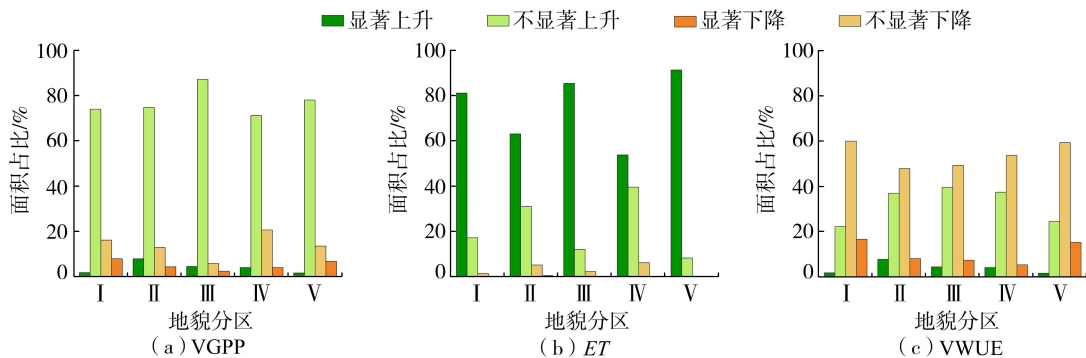


图 5 不同地貌分区植物总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率显著性检验结果
Fig. 5 Significance test results of VGPP, ET, and VWUE in different geomorphic regions

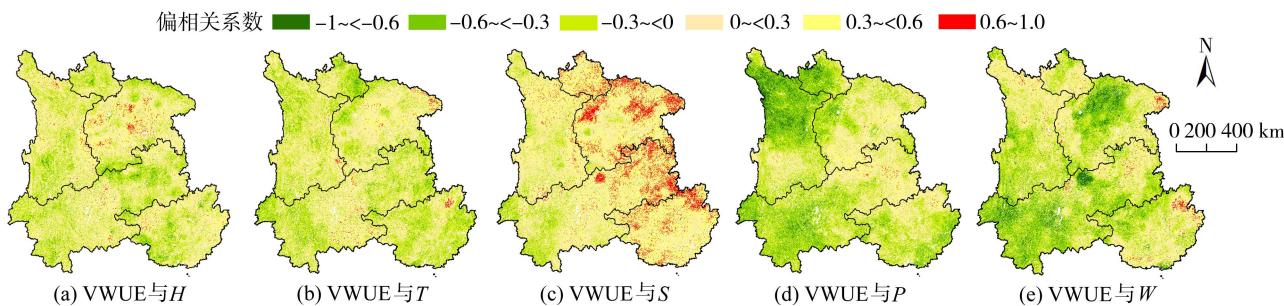


图 6 西南地区植被水分利用效率与气候因子偏相关系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of partial correlation coefficients between VWUE and climatic factors in Southwest China

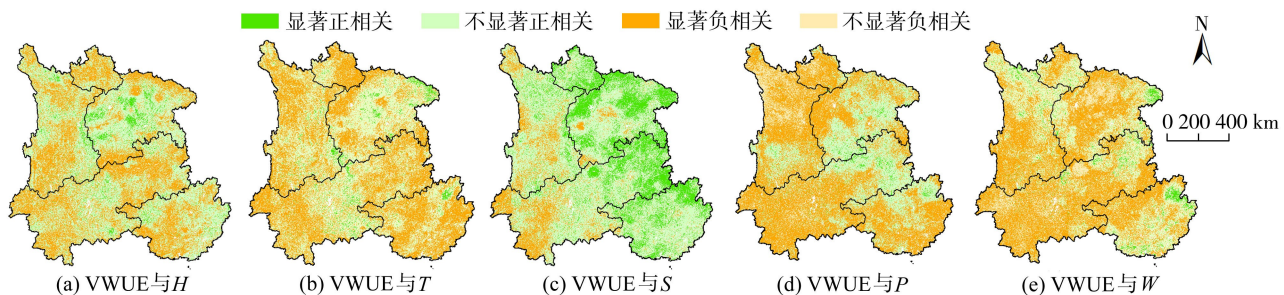


图 7 西南地区植被水分利用效率与气候因子相关性显著性检验的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of correlation significance test between VWUE and climate factors in Southwest China

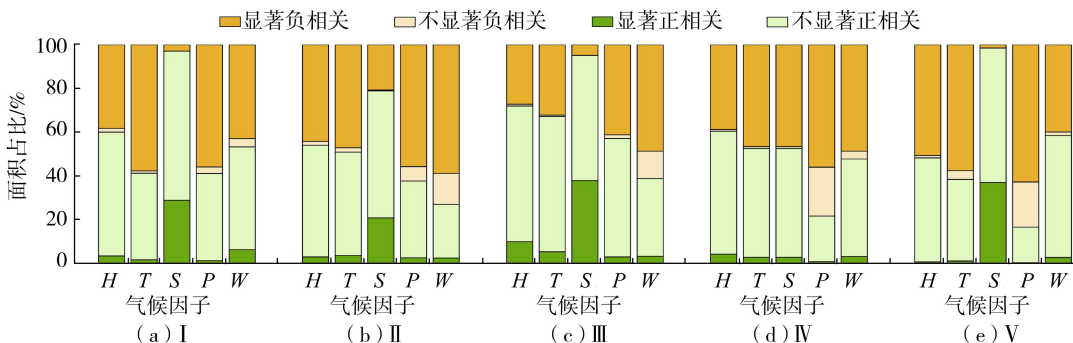


图 8 不同地貌分区植物水分利用效率与气候因子相关性显著性检验的面积占比

Fig. 8 Area proportion of correlation significance test between VWUE and climate factors in different geomorphic regions

干旱会导致生态系统植被水分利用效率显著降低^[30]。

从空间上看,西南地区植被总初级生产力和蒸散发均呈南高北低的分布格局,均以上升趋势为主导,植被水分利用效率在空间分布上与植被总初级

生产力相似,表明植被水分利用效率的变化受植被总初级生产力主导,这与 Zhang 等^[17]的研究结果一致。不同地貌分区植被水分利用效率空间分布及变化趋势存在显著差异,云贵高原植被水分利用效率最高,而若尔盖高原最低。这是因为云贵高原位于

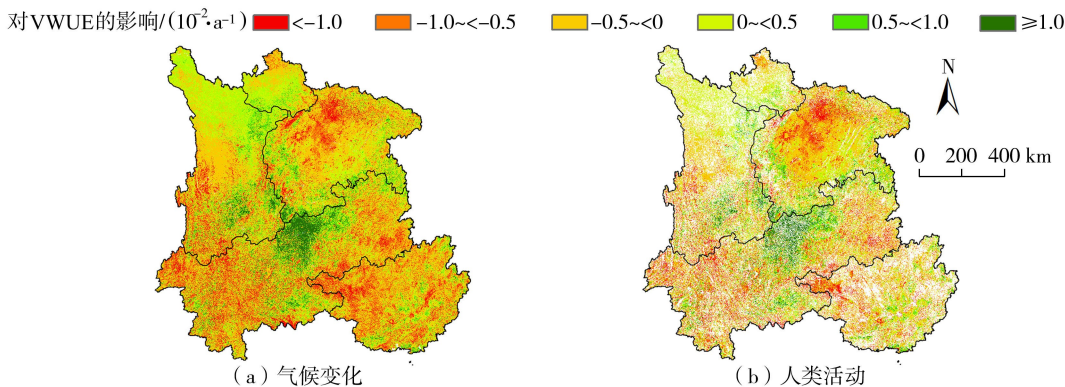


图9 气候变化和人类活动对西南地区植被水分利用效率影响的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of effects of climate change and human activities on VWUE in Southwest China

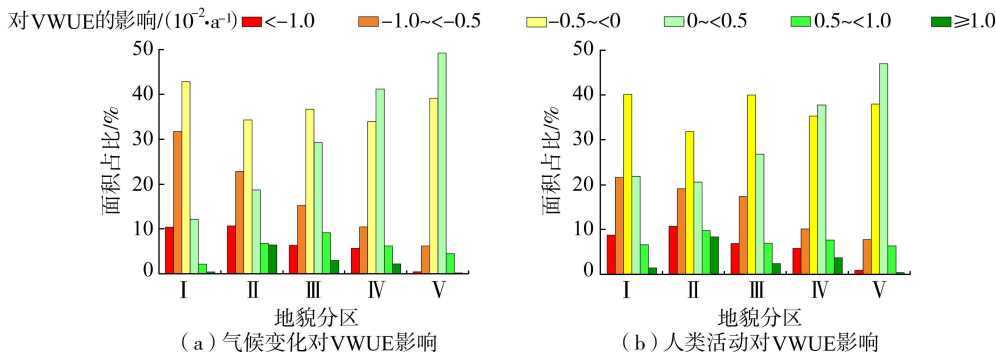


图10 气候变化和人类活动对不同地貌分区植被水分利用效率影响的面积占比

Fig. 10 Area proportion of effects of climate change and human activities on VWUE in different geomorphic regions

低纬度地区,气候温和湿润,植被类型以乔木为主,林地覆盖率高,植被拥有丰富的气孔和发达的根系结构,有助于提高植物光合速率和吸收土壤水分,可积累更多植被总初级生产力,这为植被生长和固碳提供了良好条件^[30]。若尔盖高原植被类型多为高寒草原和针叶林,植被覆盖率较低且生长季较短,加上高寒草原植被根系不发达无法有效吸收水分,植被固碳能力有限,导致该地区植被水分利用效率最低^[31]。

4.2 植被水分利用效率对气候因子的响应

植被水分利用效率变化受多个气候因子驱动^[17,32-33]。前文结果表明,西南地区植被水分利用效率与相对湿度、气温和日照时数主要呈正相关关系,而与降水量和风速呈负相关关系。杜晓铮等^[4]的研究指出,植物蒸腾速率受大气相对湿度的制约,较高的湿度会抑制植物体内水分蒸腾,降低蒸腾速率,从而提高植被水分利用效率。当温度适宜(15~25℃)时,气温上升可以提高植物光合酶活性,加快碳同化速率,从而对植被水分利用效率具有正向促进作用^[34-35];日照时数长短直接影响植被光合作用强度,充足的日照可以促进植物充分进行光合作用,增加植物生长和固碳^[36-37],进而对提高植被水分利用效率有积极作用。当降水量低于500mm时,蒸散发对降水量呈正向响应^[38];而西南地区多年降水量

均值(1096.03mm)远大于相关阈值,降水量增加会加剧植被和土壤水分蒸发,从而使植被蒸散发的变化大于植被总初级生产力。过多的降水和云量会降低温度与日照时数^[39],从而影响植被光合速率,导致植被总初级生产力下降。另外,由于西南喀斯特地区石漠化现象较严重,降水量增加可能会诱发土壤侵蚀,降低生态系统稳定性^[40],从而对植被水分利用效率产生负面影响^[16,41]。风速上升会降低空气中的水汽含量,加快土壤水分蒸发,导致植被的蒸腾速率增加,从而降低植被水分利用效率^[42-43]。

不同地貌分区植被水分利用效率对气候因子的响应具有一定差异。广西丘陵和若尔盖高原植被水分利用效率与气温以负相关关系为主,其余地貌分区以正相关关系为主。这与气温可以同时影响植被光合速率和呼吸速率有关^[4],在相对湿热的广西丘陵,气温升高对植被蒸腾的促进作用大于光合作用^[41],从而对植被水分利用效率具有抑制作用。若尔盖高原属于高寒草甸/湿地生态系统,高寒植被光合作用的最适温度通常较低,当气温超出阈值后酶活性下降,光合速率增长减缓甚至降低,从而对植被水分利用效率具有负面影响。降水量与四川盆地植被水分利用效率以正相关关系为主,而在其他地貌分区则以负相关关系为主。其中,四川盆地中部地

区气候较干旱^[44],降水量增加可以在一定程度上减轻水分对植被生长的制约作用^[45],从而对植被水分利用效率具有正向影响;若尔盖高原和横断山地植被类型多以高寒草原草甸为主,受低温胁迫,植被生长发育受限且不需过多降水,降水量增加会导致土壤水分过于饱和,根系无法获得足够的氧气进行呼吸作用,从而不利于高山高原地区植被生长^[24,46],进而对植被总初级生产力与蒸散发均产生负向影响;而云贵高原和广西丘陵水热条件充沛,过多降水不利于植被积累植被总初级生产力^[47],从而对植被水分利用效率产生抑制作用。

4.3 植被水分利用效率对人类活动的响应

气候变化和人类活动对西南地区植被水分利用效率变化的相对贡献率分别为 52.6%和 47.4%,说明植被水分利用效率变化受到气候和人为因素的双重影响。人类活动对西南地区植被水分利用效率的负向影响区域占比为 61.5%,尤以四川盆地中部地区受影响最为显著,这主要与成渝城市圈人口密集、人类活动频繁,城市扩张对周边植被造成负面影响有关。同时,城市“热岛效应”导致气温上升、湿度下降,从而限制了植被生长^[44],导致植被总初级生产力下降,进而引起植被水分利用效率下降。植被水分利用效率变化受人类活动正向影响的区域占比为 38.5%,集中在云贵高原中部地区,这与我国实施的“西南岩溶石漠化综合治理工程”“退耕还林还草工程”“天然林保护工程”等生态工程密切相关^[48],2000 年以来,西南地区的石漠化治理成效显著,据监测数据,2015 年该地区石漠化总面积已降至 92 037.33 km²,较 2000 年减少 2.15 万 km²(降幅 18.94%)^[49],说明生态工程的实施使得植被得到恢复,促进植被总初级生产力积累。这一成效与我国生态文明建设的战略部署高度契合,通过系统性植被修复与生态系统管理,不但能提升西南地区碳汇能力,也为实现“双碳”目标提供了重要支撑。虽然西南地区在生态修复工程方面取得一定进展,但不合理的人类开发活动仍然是威胁区域植被恢复的重要因素,需要受到重视。

5 结 论

a. 西南地区植被动态呈显著的时空分异特征。时间上,2000—2020 年植被总初级生产力和蒸散发均呈显著上升趋势,而植被水分利用效率以 0.0024 g/(m²·mm·a)的速率呈不显著下降趋势。空间上,植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率均呈南高北低的空间格局,植被水分利用效率年际均值介于 0.008~4.380 g/(m²·mm)。变化

趋势上,植被总初级生产力、蒸散发和植被水分利用效率分别以不显著上升、显著上升和不显著下降趋势为主,不同地貌分区植被水分利用效率均以不显著下降趋势为主,其中广西丘陵面积占比最高,云贵高原最低。

b. 西南地区植被水分利用效率受气候因子显著影响且空间异质性明显。整体上植被水分利用效率与日照时数、相对湿度和温度以正相关关系为主,而与降水量和风速以负相关关系为主。植被水分利用效率变化的主导气候因子面积占比由大到小依次为:日照时数(40.97%)、风速(20.18%)、降水量(19.88%)、相对湿度(9.90%)、温度(9.07%)。不同地貌分区植被水分利用效率均与日照时数呈正相关关系,其中横断山地以降水量为主导因子,其他地貌分区则主要受日照时数调控。

c. 气候变化和人类活动对西南地区植被水分利用效率变化的贡献存在明显的异质性,总体以抑制作用为主,影响均值分别为 -0.0020 a⁻¹ 和 -0.0018 a⁻¹,相对贡献率分别为 52.6%和 47.4%。气候变化和人类活动对不同地貌分区植被水分利用效率变化的影响表现出一定差异性。

参考文献:

[1] Li Junjie, Yuan Junji, Liu Deyan, et al. Inter-and intra-annual variability and climatic responses of ecosystem water use efficiency in a cool-temperate freshwater wetland [J]. Ecological Indicators, 2024, 167: 112663.

[2] Huang Mengtian, Piao Shilong, Sun Yan, et al. Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades[J]. Global Change Biology, 2015, 21(6): 2366-2378.

[3] 王世杰,刘再华,倪健,等.中国南方喀斯特地区碳循环研究进展[J].地球与环境,2017,45(1):2-9. (Wang Shijie, Liu Zaihua, Ni Jian, et al. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in Karst area of South China[J]. Earth and Environment, 2017, 45(1):2-9. (in Chinese))

[4] 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. (Du Xiaozheng, Zhao Xiang, Wang Haoyu, et al. Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8296-8305. (in Chinese))

[5] Wang Feiyu, Xia Jun, Zou Lei, et al. Spatio-temporal heterogeneity and driving mechanism of ecosystem water use efficiency in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 56: 102012.

[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. (Zhang Ji, Zhou Xu, Jiang Xiao, et al. Spatial and temporal variability characteristics of water use efficiency in different landform regions and vegetation types of Guizhou Plateau, China[J]. Mountain Research, 2019, 37(2): 173-185. (in Chinese))
- [7] Tesfaye S, Taye G, Birhane E, et al. Spatiotemporal variability of ecosystem water use efficiency in northern Ethiopia during 1982-2014 [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126863.
- [8] 史晓亮, 吴梦月, 张娜, 等. 三江平原植被水分利用效率时空变化及其对气象因子变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 39(5): 1651-1663. (Shi Xiaoliang, Wu Mengyue, Zhang Na, et al. Spatial and temporal variation of vegetation water use efficiency and its response to meteorological factors in Sanjiang Plain [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(5): 1651-1663. (in Chinese))
- [9] 刘福红, 叶许春, 郭强, 等. 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[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 694-706. (Liu Fuhong, Ye Xuchun, Guo Qiang, et al. Spatio-temporal variation of carbon and water use efficiency of different land cover in the Poyang Lake Basin and their correlations with climate factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 694-706. (in Chinese))
- [10] Huang Ling, He Bin, Han Le, et al. A global examination of the response of ecosystem water-use efficiency to drought based on MODIS data [J]. Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 1097-1107.
- [11] 孙红, 方国飞, 阮琳琳, 等. 亚洲半干旱区碳水通量时空格局及驱动因素 [J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4742-4757. (Sun Hong, Fang Guofei, Ruan Linlin, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of carbohydrate flux in semi-arid region of Asia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4742-4757. (in Chinese))
- [12] Sun Shaobo, Song Zhaoliang, Wu Xiuchen, et al. Spatio-temporal variations in water use efficiency and its drivers in China over the last three decades [J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 292-304.
- [13] Jiao Fusheng, Xu Xiaojuan, Zhang Mingyang, et al. Contributory factors of the secular trends to changes in ecosystem water-use efficiency in China [J]. Journal of Hydrology 2022, 615: 128690.
- [14] Xiao Biqin, Bai Xiaoyong, Zhao Cuiwei, et al. Responses of carbon and water use efficiencies to climate and land use changes in China's Karst areas [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 128968.
- [15] 刘潇忆, 刘超, 聂锐华, 等. 2000—2014 年黄河源水分利用效率时空变化及其影响因素 [J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 61-67. (Liu Xiaoyi, Liu Chao, Nie Ruihua, et al. Spatiotemporal variation in water use efficiency and its determinants in 2000—2014 in the source region of Yellow River [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 61-67. (in Chinese))
- [16] Shi Xinyu, Bai Shuang, Chen Wei. Remote sensing of water use efficiency in southwest China's Karst area [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(47): 71166-71178.
- [17] Zhang Ji, Yang Shiqi, Yang Shengtian, et al. Spatio-temporal variations of ecosystem water use efficiency and its drivers in southwest China [J]. Land, 2023, 12(2): 397.
- [18] Hu Zeyin, Dai Quanhui, Yan Youjin, et al. Quantifying the water use efficiency of Karst ecosystems and response to environmental factors [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 53: 101799.
- [19] Li Guangchao, Chen Wei, Li Ruren, et al. Assessing the spatiotemporal dynamics of ecosystem water use efficiency across China and the response to natural and human activities [J]. Ecological Indicators, 2021, 126: 107680.
- [20] 李玉露, 吴雪晴, 袁野, 等. 黑龙江省植被碳-水利用效率时空演变及其驱动机制 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(12): 3349-3358. (Li Yulu, Wu Xueqing, Yuan Ye, et al. Spatial-temporal variation and driving mechanism of vegetation carbon and water use efficiency in Heilongjiang Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(12): 3349-3358. (in Chinese))
- [21] 马炳鑫, 和彩霞, 靖娟利, 等. 1982—2019 年中国西南地区植被变化归因研究 [J]. 地理学报, 2023, 78(3): 714-728. (Ma Bingxin, He Caixia, Jing Juanli, et al. Attribution of vegetation dynamics in Southwest China from 1982 to 2019 [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(3): 714-728. (in Chinese))
- [22] Liu Saihua, Xue Lianqing, Xiao Ying, et al. Dynamic process of ecosystem water use efficiency and response to drought in the Yellow River Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2024, 934: 173339.
- [23] 肖葵淞, 兰安军, 范泽孟, 等. 西南喀斯特地区水资源利用效率与经济发展水平协调度的时空差异解析 [J]. 中国农村水利水电, 2024(12): 19-26. (Xiao Kuisong, Lan Anjun, Fan Zemeng, et al. Spatial and temporal difference analysis of coordination degree between water resources use efficiency and economic development level in southwest Karst region [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(12): 19-26. (in Chinese))
- [24] 薛联青, 肖颖, 刘远洪, 等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应 [J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 32-41. (Xue Lianqing, Xiao Ying, Liu Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 32-41. (in Chinese))
- [25] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应 [J]. 河海大学学报 (自然科学版),

- 2021,49(6):515-520. (Xiao Zuxiang, Zhu Shuang, Luo Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- [26] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2017:80-83.
- [27] 叶鑫,顾羊羊,张琨,等. 西南喀斯特地区石漠化治理现状分析与对策研究:以贵州省黔西南州为例[J]. 环境保护, 2020, 48(22): 30-34. (Ye Xin, Gu Yangyang, Zhang Kun, et al. Current situation analysis and countermeasures of rocky desertification control in Southwest Karst region: a case study of Qianxinan Prefecture in Guizhou Province [J]. Environmental Protection, 2020, 48(22): 30-34. (in Chinese))
- [28] 罗旭玲,王世杰,白晓永,等. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 680-693. (Luo Xuling, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Southwest Karst area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 680-693. (in Chinese))
- [29] 薛联青,王文壮,刘远洪,等. 黄河流域植被总初级生产力对持续性干旱水分亏缺的响应[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 44-51. (Xue Lianqing, Wang Wenzhuang, Liu Yuanhong, et al. Response of gross primary productivity of vegetation to persistent drought-induced water deficit in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 44-51. (in Chinese))
- [30] Ito A, Inatomi M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles[J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(2): 681-694.
- [31] Huang Kai, Wang Rui, Wu Weixiong, et al. Trend of vegetation and environmental factors and their feedback in the Karst regions of southwestern China [J]. Sustainability, 2022, 14(23): 15941.
- [32] 张珂,刘林鑫,晁丽君,等. 2000—2014年云南省陆地生态系统水分利用效率的时空变化[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 1-5. (Zhang Ke, Liu Linxin, Chao Lijun, et al. Spatiotemporal variations of terrestrial ecosystem water use efficiency in Yunnan Province from 2000 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 1-5. (in Chinese))
- [33] 龙学智,刘苏峡,莫兴国,等. 基于 Copula 的京津冀平原作物水分利用效率驱动因子分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1833-1845. (Long Xuezhi, Liu Suxia, Mo Xingguo, et al. Analysis of water use efficiency and driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Province Plain using the Copula method [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1833-1845. (in Chinese))
- [34] 赵昶浩,孙红艳,陈辉,等. 柴达木盆地荒漠灌木水分利用效率及其影响因素[J]. 生态学报, 2025, 45(6): 2605-2620. (Zhao Yunhao, Sun Hongyan, Chen Hui, et al. Water use efficiency of desert shrub in Qaidam Basin and its influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2605-2620. (in Chinese))
- [35] 位贺杰,张艳芳,董孝斌,等. 渭河流域植被水分利用效率遥感估算及其时空特征[J]. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1275-1288. (Wei Hejie, Zhang Yanfang, Dong Xiaobin, et al. Estimating the spatio-temporal characteristic of vegetation water use efficiency over Weihe River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(8): 1275-1288. (in Chinese))
- [36] 杨卓琳,刘荣波,逢锦光,等. 陆地生态系统碳收支时空变化及影响因素:以湖南省郴州市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(5): 1066-1075. (Yang Zhuolin, Liu Rongbo, Pang Jinguang, et al. Spatio-temporal characteristics and driving factors of terrestrial carbon uptake: a case study of Chenzhou City, Hunan Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(5): 1066-1075. (in Chinese))
- [37] 胡信熹,周清华,徐勇. 东北地区植被碳利用率时空变化及其影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 274-283. (Hu Jixi, Zhou Qinghua, Xu Yong, et al. Spatiotemporal variation of vegetation carbon use efficiency and its influencing factors in northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 274-283. (in Chinese))
- [38] 利辉,刘铁军,王少慧,等. 2001—2021年内蒙古荒漠草原水分利用效率时空变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(6): 993-1003. (Li Hui, Liu Tiejun, Wang Shaohui, et al. Spatial and temporal variation of water use efficiency and its influencing factors in desert steppe of Inner Mongolia from 2001 to 2021 [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(6): 993-1003. (in Chinese))
- [39] 茆杨,蒋勇军,张彩云,等. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2878-2890. (Mao Yang, Jiang Yongjun, Zhang Caiyun, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in southwest China in the past 20 years and its response to ecological engineering [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2878-2890. (in Chinese))
- [40] Wang Jiyan, Chen Guo, Yuan Yirong, et al. Spatiotemporal changes of ecological environment quality and climate drivers in Zoige Plateau [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(7): 912.
- [41] 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. (Peng Dawei, Zhou Qiuwen, Wei Xiaocha, et al. Change of water use efficiency and its response to meteorological factors in Karst area of

Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (23):9470-9480. (in Chinese))

[42] 苏淑兰,姬海娟,张东,等. 青海草地生态系统水分利用效率特征及其影响因素分析[J]. *草地学报*,2023,31 (9):2814-2825. (Su Shulan, Ji Haijuan, Zhang Dong, et al. Characteristics of water use efficiency and its influencing factors of grassland ecosystem in Qinghai Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31 (9): 2814-2825. (in Chinese))

[43] 陈凌伟. 2001—2020 年黄河流域水分利用效率时空变化及其对环境因素的响应[J]. *水土保持通报*,2022,42 (5):222-230. (Chen Lingwei. Spatio-temporal variation of water use efficiency and its responses to environmental factors in Yellow River Basin during 2001-2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42 (5): 222-230. (in Chinese))

[44] 戴强玉,徐勇,赵纯,等. 四川盆地植被 EVI 动态变化及其驱动机制[J]. *中国环境科学*,2023,43 (8):4292-4304. (Dai Qiangyu, Xu Yong, Zhao Chun, et al. Dynamic variation of vegetation EVI and its driving mechanism in the Sichuan Basin [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43 (8): 4292-4304. (in Chinese))

[45] 徐虹,刘琴. 2001—2019 年云南省植被 NDVI 变化及其气候因子的关系[J]. *水土保持研究*,2022,29 (1):162-168. (Xu Hong, Liu Qin. Analysis of vegetation NDVI dynamic and its relationship with climatic factors in Yunnan Province during 2001-2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29 (1): 162-168. (in Chinese))

[46] Hao Xingming, Ma Haiyan, Hua Ding, et al. Response of ecosystem water use efficiency to climate change in the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,2019,191(9):561.

[47] Zheng Han, Lin Henry, Zhou Weijian, et al. Revegetation has increased ecosystem water-use efficiency during 2000-2014 in the Chinese Loess Plateau:evidence from satellite data[J]. *Ecological Indicators*,2019,102:507-518.

[48] 张艺菲,张俊玲. 气候变化和人类活动对云贵高原植被净初级生产力的影响[J]. *环境科学*,2025,46 (8):5217-5228. (Zhang Yifei, Zhang Junling. Impact of climate change and human activities on net primary productivity of vegetation in the Yunnan-Guizhou Plateau [J]. *Environmental Science*, 2025, 46 (8): 5217-5228. (in Chinese))

[49] 蒋忠诚,罗为群,童立强,等. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. *中国岩溶*,2016,35(5):461-468. (Jiang Zhongcheng, Luo Weiqun, Tong Liqiang, et al. Evolution features of rocky desertification and influence factors in Karst areas of southwest China in the 21 Century [J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35 (5): 461-468. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-13 编辑:王芳)

+++++

(上接第 67 页)

[22] 郑嘉璇. 不同空间尺度下城市洪涝韧性及洪涝风险评估研究[D]. 广州:华南理工大学,2024.

[23] 李国一,刘家宏,邵薇薇. 洪涝灾害风险评估与分区研究进展[J]. *水文*,2023,43 (4):15-20. (Li Guoyi, Liu Jiahong, Shao Weiwei. Research progress in flood disaster risk assessment and zoning [J]. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43 (4): 15-20. (in Chinese))

[24] Bhare S, Reddy M J. Flood risk assessment of suburban region in India by incorporating flood hazard, vulnerability and exposure[J]. *Natural Hazards*, 2025, 121 (6): 6625-6649.

[25] 尚楚豫. 雨洪灾害情景下城市内涝风险与韧性评估研究[D]. 北京:北京建筑大学,2023.

[26] Wang Guangpeng, Liu Yong, Hu Ziyi, et al. Flood risk assessment based on fuzzy synthetic evaluation method in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, China [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (4): 1451.

[27] Rather A F, Ahmed R, Bansal J K, et al. Glacial lake outburst flood risk assessment of a rapidly expanding glacial lake in the Ladakh region of Western Himalaya, using hydrodynamic modeling [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2024, 15 (1): 2413893.

[28] 张晚祺,翁朝晖,何小花,等. 洪水风险区划中综合风险度的确定方法探讨[J]. *中国防汛抗旱*,2025,35 (5):16-21. (Zhang Wanqi, Weng Zhaohui, He Xiaohua, et al. Discussion on the determination method of comprehensive risk degree in flood risk zoning [J]. *China Flood & Drought Management*, 2025, 35 (5): 16-21. (in Chinese))

[29] 宋利祥,胡晓张. 洪水实时模拟与风险评估技术研究及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[30] 李德龙,许小华,丁志雄,等. 基于综合风险度方法的大余县重点防洪区洪水风险区划研究[J]. *中国农村水利水电*,2022 (11):44-49. (Li Delong, Xu Xiaohua, Ding Zhixiong, et al. Research on the flood risk zoning of Dayu key flood control area based on the comprehensive risk method [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022 (11): 44-49. (in Chinese))

[31] 王舒,张骞,王子芳,等. 基于 GIS 的三峡库区生态风险评估及生态分区构建[J]. *生态学报*,2022,42 (11):4654-4664. (Wang Shu, Zhang Qian, Wang Zifang, et al. GIS-based ecological risk assessment and ecological zoning in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (11): 4654-4664. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-03 编辑:王芳)