引文格式：范文武,丁忆,黄潇莹,等. 三峡库区（重庆段）植被NPP时空变化及地形分异研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):44-48. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.02.009

三峡库区（重庆段）植被NPP时空变化及地形分异研究

范文武[1,2]，丁　忆[1,2]，黄潇莹[1,2]，郑　中[1,2]，陈　阳[1,2]，艾道骅[1,2]，殷　明[1,2]
（1. 重庆市地理信息和遥感应用中心，重庆 401120；
2. 自然资源部国土空间规划监测评估预警重点实验室，重庆 401120）

摘　要：以三峡库区（重庆段）为例，利用MOD17A3HGF和ASTER GDEM数据，采用Sen趋势分析、M-K显著性检验、变异系数，深入研究2000—2023年植被NPP时空变化格局与地形分异特征。研究表明：①2000—2023年植被年均NPP呈波动上升态势，增长斜率为4.65 gC m^{-2}·a^{-1}，平均值为624.24 gC m^{-2}·a^{-1}。空间上，植被年均NPP呈西南向东北逐渐增加态势；其中，600~800 gC m^{-2}·a^{-1}区间范围覆盖面积最广，面积及占比分别是22 823 km^2和49.4%。②24 a间植被生长状态整体得到改善，植被NPP状态改善、保持不变和植被退化面积分别为40 224 、4 023 km^2和1 929 km^2，面积占比分别为87.11%、8.72%和4.17%。植被NPP变异系数介于0~0.84之间，呈“低波动为主、高低波动共存”的空间分布格局。③2000—2023年各坡向植被NPP均呈增加趋势，植被年均NPP阳坡>半阴坡>半阳坡>阴坡。植被NPP随高程升高而逐渐增大，但在超过1 500~2 000 m高程带时呈缓慢下降趋势。各坡度带植被NPP随坡度增加呈梯度上升趋势，表明植被在高坡度区生长状态依然良好。

关键词：植被NPP；三峡库区；时空变化；地形因子
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0044-05

Research on the Spatio-temporal Change and Terrain Differentiation of Vegetation Net Primary Productivity in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)

FAN Wenwu[1,2], DING Yi[1,2], HUANG Xiaoying[1,2], ZHENG Zhong[1,2], CHEN Yang[1,2], AI Daohua[1,2], YIN Ming[1,2]
(1. Chongqing Geomatics and Remote Sensing Center, Chongqing 401120, China;
2. Key Laboratory of Monitoring, Evaluation and Early Warning of Territorial Spatial Planning Implementation, Ministry of Natural Resources, Chongqing 401120, China)

Abstract: Taking the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing section) for example, based on MOD17A3HGF and ASTER GDEM data, we used Theil Sen Median trend analysis, Mann Kendall significance test and coefficient of variation methods to deeply analyze the spatio-temporal change pattern of net primary productivity(NPP) and the characteristics of terrain differentiation from 2000 to 2023. The results showed that ① from 2000 to 2023 the annual average NPP exhibited an overall fluctuating upward trend, with a growth slope of 4.65 gC·m^{-2}·a^{-1} and an average value of 624.24 gC·m^{-2}·a^{-1}. In terms of spatial distribution, the annual average NPP increased gradually from southwest to northeast. Among them, the coverage area of the range of 600~800 gC·m^{-2}·a^{-1} was the widest, with an area and proportion of 22 823 km^2 and 49.4%, respectively. ②The overall vegetation growth status had improved over the past 24 years. And the areas of NPP improvement, remaining unchanged, and vegetation degradation were 40 224 km^2, 4 023 km^2, and 1 929 km^2, respectively, with area proportions of 87.11%, 8.72%, and 4.17%. The coefficient of variation of NPP ranged from 0 to 0.84, showing a spatial distribution pattern of “low volatility dominant, high and low volatility coexisting”. ③The NPP of all slope aspects showed an increasing trend, with the annual average NPP being highest on sunny slopes, followed by semi-shaded slopes, semi-sunny slopes, and shaded slopes in descending order. The NPP gradually increased with elevation, but exhibited a gradual decline when exceeding the elevation range of 1 500~2 000 m. In addition, the NPP of each slope zone increased with the increase of slope, indicating that vegetation grew well in high slope areas.

Key words: vegetation NPP, Three Gorges Reservoir Area, spatio-temporal change, terrain factor

植被净初级生产力（net primary productivity，NPP）是衡量陆地生态系统结构与功能特征、评价区域生态系统碳循环成效关键参数[1]。准确估算和定量分析植被NPP，能为区域乃至全球的碳平衡研究、生态系统服务功能评估提供数据支持，对维护陆地生态系统健康、促进区域可持续发展具备深远的学术意义[2-4]。

目前，国内外生态、地理和遥感等领域学者对植被NPP研究已取得显著进展[5-11]。但对于地形复杂、

项目来源：重庆市技术创新与应用发展专项（CSTB2024TIAD-KPX0107）；重庆市科研机构绩效激励引导专项（CSTB2024JXJL-YFX0018）。
第一作者简介：范文武（1990—），硕士，高级工程师，研究方向为地理信息和遥感应用，E-mail：942088791@qq.com。

生态脆弱的三峡库区，植被NPP时空变化与地形分异规律的研究仍显不足。

本文选取三峡库区（重庆段）为研究区[12-13]，基于2000—2023年长时间序列的MOD17A3数据集和数字高程模型（DEM）数据，运用Sen趋势分析、M-K显著性检验、变异系数，研究植被NPP时空变化特与地形分异规律，旨在为地形复杂、生态脆弱的区域植被NPP研究提供可借鉴的方法和思路。

1　研究区和数据来源

1.1　研究区概况

三峡库区（重庆段）坐落于我国长江上游核心地带，地理位置介于28°31′~31°44′ N和105°49′~110°12′ E之间，涵盖了重庆中心城区、江津、丰都、万州、云阳、巫溪等共计22个区县（图1），行政辖区总面积超过4.62万 km²。其中，中心城区囊括了渝中、北碚、巴南和渝北等9个区。该区域地势呈东部高、西部低的显著特征，海拔落差较大，最低处仅22 m，最高可达2 808 m。研究区更是跨越了川鄂湘黔隆起褶皱带、川东褶皱带和大巴山断褶带等三大关键地质构造单元带，地貌特征以山地和丘陵为主，形成了复杂多变的地形景观。植被覆盖率超过50%以上，生态环境优越。

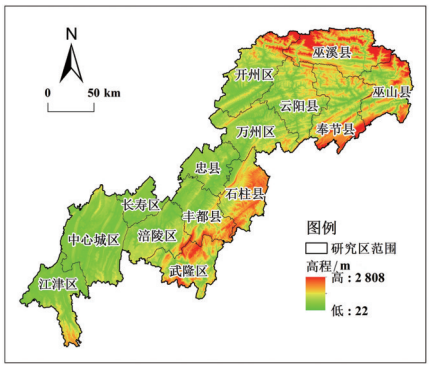


图1　研究区地理位置

审图号：渝S(2025)082

1.2　数据来源及处理

1.2.1　MOD17A3HGF数据

植被NPP来自美国NASA官网（ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov）MOD17A3HGF数据集，时间和空间分辨率分别为1 a和500 m。其内容涵盖逐年质量控制文件（NPP_QC），可准确反映植被净初级生产力精度。文中利用MODIS MRT工具对数据集进行批量拼接、格式转换、投影变换等预处理，参考产品比例因子0.0001，提取植被NPP真值，即将NPP单位转化为gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$。研究区植被净初级生产力数据质量的优、良可信度等级累积占比达96.78%，证明数据精度准确可靠。

1.2.2　地形数据

DEM来自地理空间数据云平台（www.gscloud.cn）上免费获取30 m数字高程模型。文中运用ArcGIS软件将研究区DEM数据批量拼接、剪裁之后，获取高程、坡度以及坡向信息。依据已有学者标准并结合实际情况，将坡向数据细分为阳坡（135~225°）、半阳坡（225~315°）、阴坡（315~45°）和半阴坡（45~135°）等4个坡向[14]。高程以500 m为梯度，细分为以下7个区间带：0~500 m、500~1 000 m、1 000~1 500 m、1 500~2 000 m、2 000~2 500 m、2 500~3 000 m。参考国家技术标准和已有学者研究成果，将研究区坡度细分成以下5个等级：≤2°、2~6°、6~15°、15~25°、>25°[15]。其中，坡度、坡向、高程先按30 m分辨率计算后再进行面积权重聚合至500 m像元，与NPP空间分辨率保持一致。

2　研究方法

2.1　趋势分析

Theil-Sen Median趋势分析（即Sen趋势分析）是凭借计算数据集中所有可能的点对之间的斜率，并选择这些斜率的中位数以获取整体趋势的稳健估计方法。该方法适宜长时间序列植被净初级生产力数据定量分析，能有效削弱极端值与噪声对研究区数据集产生的干扰[5]。计算公式如下：

$$\beta=\mathrm{median}\left(\frac{\mathrm{NPP}_j-\mathrm{NPP}_i}{j-i}\right) \quad (1)$$

式中，NPP_i和NPP_j为年份i和j的NPP数据值；β为指计算$n(n-1)/2$个数据组合的斜率的中位数；当$\beta>0$时，反映植被NPP呈增强态势；反之，则为减弱态势。

Mann-Kendall显著性检验（即M-K检验）是以非参数为基础的检验方法，无需预设数据分布形式，因而对数据的适应性强，且能有效抵御样本中异常值的干扰。本文采用M-K检验来评估植被净初级生产力变化趋势的显著性，并通过统计参数Z以直观反映检验结果，计算公式见参考文献[5]。在置信水平$\alpha=0.05$上评估植被NPP变化趋势显著性，将结果Z分显著变化（$|Z|>1.96$）和不显著变化（$|Z|<1.96$）。

2.2　变异系数

变异系数是通过样本标准差和平均值比值来表达，评定样本中观测值离散程度[15]。系数越大则数据波动范

围越大，且显示出更高离散程度[16]。计算公式如下：

$$C_v=\frac{S_{\mathrm{NNP}}}{\overline{\mathrm{NPP}}}\times 100\%=\frac{1}{\overline{\mathrm{NPP}}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(\mathrm{NPP}_i-\overline{\mathrm{NPP}})}{n-1}}\times 100\% \quad (2)$$

式中，C_v 为植被NPP变异系数；S_{NNP} 为植被NPP标准差；$\overline{\mathrm{NPP}}$ 为植被NPP均值。

3 结果与分析

3.1 NPP时空变化特征

3.1.1 NPP时间变化特征

2000—2023年研究区植被年均净初级生产力呈波动上升趋势，线性拟合直线斜率为4.65 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$（$P<0.01$），NPP在548.78~686.29 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$区间波动（图2）。

由图2可见，2000—2023年研究区植被NPP总体呈增长趋势，这反映出植被的固碳能力有所增强，生态环境逐步得到改善；但个别年份由于受到自然或人为活动干扰，导致植被NPP变化幅度出现波动。

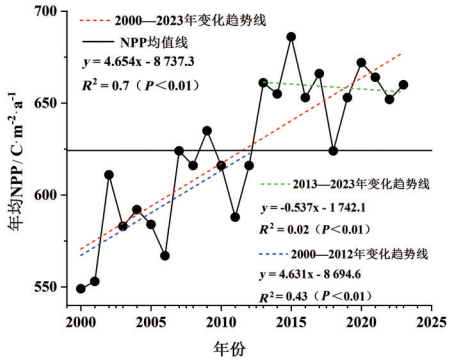


图2 2000—2023年三峡库区（重庆段）植被年均NPP年际变化

3.1.2 NPP空间变化特征

2000—2023年研究区植被NPP多年平均值整体呈西南向东北逐渐递增的空间格局（图3）。植被NPP多年均值为624.24 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$，植被固碳能力普遍较高。由图可见，高值区（600~800 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$）占研究区总面积49.4%（22 823 km^2），集聚在东北大部、中部长江以南中高海拔区。极高值区（800~1 200 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$）面积占比为6.34%（2 929 km^2），与东北部山脉走向和海拔高低分布较一致；该区域人类活动少，光照充足、雨水丰沛，生长着茂密的高山森林、草甸，全域植被覆盖度较高。中值区（400~600 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$）面积占比38.97%（18 004 km^2），聚集在西部地区以及中部长江以北中低海拔地区。低值区（0~400 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$）面积占比仅5.29%（2 444 km^2），相对集中在人类活动密集的城镇建成区，以及长江流域河谷地区。

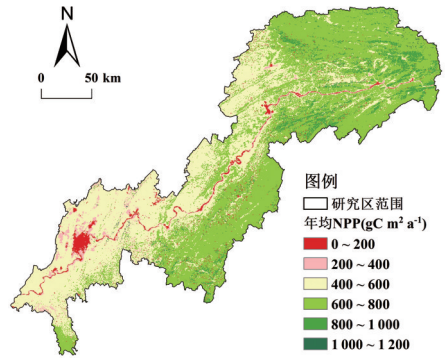


图3 2000—2023年三峡库区（重庆段）植被NPP多年平均值空间分布

审图号：渝S(2025)082

3.2 NPP时空变化趋势

3.2.1 NPP变化趋势和检验

凭借Sen趋势分析和M-K检验方法，分析2000—2023年研究区植被NPP年际变化态势、显著性（图4）。结果表明，研究区植被净初级生产力空间分布上总体呈改善趋势，各区县城镇建成区及其拓展区域有所退化。植被NPP变化率呈正增长，像元占比87.11%（40 224 km^2），说明研究区内大部分植被生长环境持续改善，植被碳汇能力逐年增强（表1）。其中，显著改善的区域分布面积最广，全域范围均有分布，面积占比72.65%（33 549 km^2）；不显著改善区域面积占比14.46%（6 675 km^2），主要分布于开州、巫溪和巫山的北部地区，以及江津、武隆、丰都和石柱的南部地区。植被NPP处于基本不变的区域面积占比8.72%（4 023 km^2），集中分布在中心城区、长寿、涪陵和万州等区县城镇已建成区域，以及长江流域河谷区域；植被NPP处于下降退化趋势的区域面积占比仅为4.17%（1 929 km^2），集中在各区县城镇建设拓展区域，其中库区西段中心城区内尤为突出。

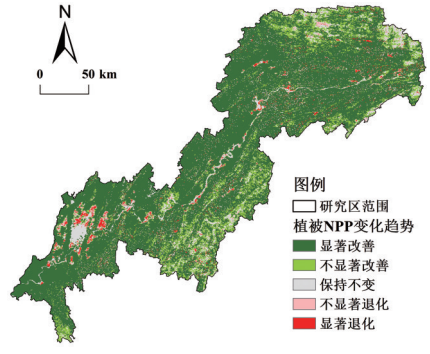


图4 2000—2023年三峡库区（重庆段）植被NPP变化趋势

审图号：渝S(2025)082

3.2.2 NPP变化稳定性分析

利用变异系数评价2000—2023年研究区植被NPP

表1　三峡库区（重庆段）植被NPP空间变化趋势统计表

β	Z	趋势特征	面积/km²	占比/%
$\beta>0$	$Z>1.96$	显著改善	33 549	72.65
$\beta>0$	$-1.96<Z<1.96$	不显著改善	6 675	14.46
$\beta=0$	$-1.96<Z<1.96$	保持不变	4 023	8.72
$\beta<0$	$-1.96<Z<1.96$	不显著退化	1 087	2.35
$\beta<0$	$Z<-1.96$	显著退化	842	1.82

稳定性。结果表明：植被净初级生产力变异系数空间分布介于0~0.84之间，平均值是0.22。空间上，植被NPP呈“低波动为主且高低波动共存”特征（图5）。具体而言：中心城区以及江津、长寿、云阳等区县的城市拓展区植被NPP变化最为剧烈，存在较大波动和变化，植被生长受到干扰；研究区中部和东北大部分区域植被NPP变化相对较小，表明期间植被生长状态相对稳定；中心城区已建成区域和长江河谷区域植被NPP基本稳定在低值域，数据波动较小。

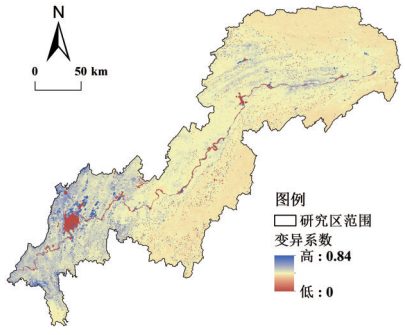


图5　2000—2023年三峡库区（重庆段）植被NPP变化的波动性

审图号：渝S(2025)082

3.3　NPP与地形因子的关系

3.3.1　NPP与坡向因子

研究区2000—2023年各坡向植被年均NPP情况见图6a，不同坡向2000—2023年植被年均NPP有明显差异；其中，阳坡植被NPP最高，是639 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$；其次为半阴坡植被NPP，是625 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$。相比之下，半阳坡和阴坡植被NPP接近，且低于全年植被NPP平均水平，分别为617 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$和616 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$。研究区植被NPP坡向呈规律分布，即：植被NPP阳坡>半阴坡>半阳坡>阴坡，反映坡向差异对植被生长的差异化影响。植被受到光照、温度、水分和植被类型等多种因素影响，阳坡由于光照充足、温度高，水热组合条件较好，通常有利于植被的生长和发育，植被净初级生产力一般相对较高；阴坡则相反，植被NPP一般相对较低。各坡向植被年均NPP年际变化见图6b，植被年均NPP均呈增加趋势，植被生长状况均得到明显改善，各坡向2000年植被NPP最低，2015年植被NPP最高。其中，阳坡植被NPP增加趋势最快，由2000年的562 gC·m^{-2} a^{-1}增至2023年的675 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$；阴坡植被NPP增加趋势最慢，由2000年542 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$增至2023年649 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$。24 a间，半阴坡植被NPP仅次于阳坡植被NPP，且高于半阳坡和阴坡植被NPP，长期稳居第二位，这与光照、水分和热量等要素影响有关，具有地域性特点；半阳坡植被NPP略高于阴坡植被NPP，且二者增长态势基本一致。

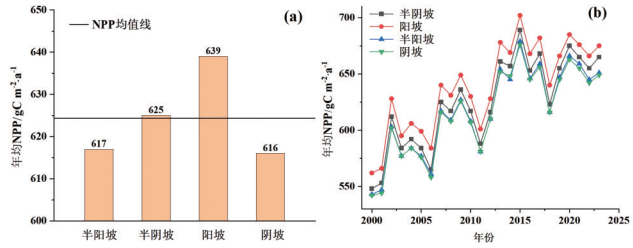


图6　2000—2023年三峡库区（重庆段）各坡向植被NPP情况和年际变化

3.3.2　NPP与高程因子

研究区2000—2023年各高程带植被年均NPP变化情况见图7a，垂直空间上，各高程带植被年均NPP随高程升高呈先增后减态势。各高程带植被年均NPP年际变化见图7b，植被年均NPP均呈均增加趋势。自2013年起开始缓慢下降。

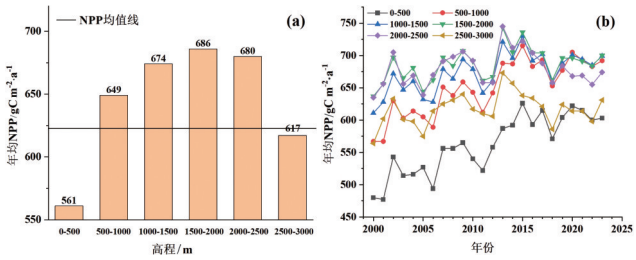


图7　2000—2023年三峡库区（重庆段）各高程植被NPP情况和年际变化

3.3.3　NPP与坡度因子

研究区2000—2023年各坡度植被年均NPP变化情况见图8a，各坡度带植被年均NPP随坡度增加呈梯度上升态势，但坡度大于25°植被NPP增幅（5.40%）相较于坡度15~25°植被NPP增幅（6.66%）有所回落。其中，植被年均NPP在0~2°、2~6°和6~15°坡度范围内分别为529 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$、556 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$和589 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$，均低于24 a全年NPP平均水平；随着坡度增加，在15~25°与大于25°的坡度范围内，植被年均NPP分别为631 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$和667 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$，均高于24 a全年NPP平均值。研究区植被净初级生产力与坡度之间存在复杂的关系，坡度通过影响植被的生长条件、土壤环境

和养分流失等间接影响植被净初级生产力的产出。各坡度带植被年均NPP年际变化见图8b，变化趋势较为一致且增加趋势层次分明。随时间年度递增，植被净初级生产力的波动范围比较稳定，24 a间波动区间由2000年的136 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$稳步过渡到2023年的131 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$；不同坡度带植被NPP整体呈波动增长态势，2002年、2009年、2015年植被NPP位于峰值区，2006年、2011年、2018年植被NPP位于谷值区。

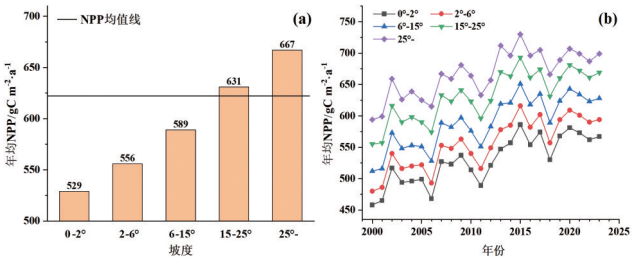


图8 2000—2023年三峡库区（重庆段）各坡度植被NPP情况和年际变化

4 结 语

2000—2023年，研究区植被年均NPP呈波动上升趋势，增长斜率为4.65 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$，空间上由西南向东北递增[11-18]。600~800 gC $m^{-2}\cdot a^{-1}$区间面积最广，占49.4%。大部分区域植被NPP改善，面积占比87.11%。坡向、高程和坡度对NPP影响显著：阳坡 > 半阴坡 > 半阳坡 > 阴坡；NPP随高程升高先增后降，在1 500~2 000 m以上转为下降；随坡度增加呈梯度上升，反映高坡度区域植被保护良好[19-21]。变异系数平均为0.22，空间以低波动为主。

参考文献

[1] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. New York:Springer,1975

[2] Yu Q S, He C Q, Anthony M A, et al. Decoupled Responses of Plants and Soil Biota to Global Change Across the World's Land Ecosystems[J]. Nature Communications, 2024,15(1):10369

[3] Wang S M, Ma Y T, Gong J. et al. Dynamic Variation of Vegetation NPP and Its Driving Forces in the Yellow River Basin, China[J]. Chinese Geographical Science, 2025, 35(2):24-37

[4] 赵月帅,张秀红,范田禾,等. 西安市植被碳汇时空演变特征及影响因素解析[J]. 地理空间信息,2024,22(2):30-33

[5] Zhang J, Zhang Y X, Qin Y, et al. The Spatiotemporal Pattern of Grassland NPP in Inner Mongolia Was More Sensitive to Moisture and Human Activities Than That in the Qinghai-tibetan Plateau[J]. Global Ecology and Conservation,2023,48:e02709

[6] Landsberg J J, Waring R H. A Generalised Model of Forest Productivity Using Simplified Concepts of Radiation-use Efficiency, Carbon Balance and Partitioning[J]. Forest Ecology and Management,1997,95(3):209-228

[7] 贾艳红,牛博颖,钱骏宸. 基于CASA模型的海州湾生态系统NPP估算[J]. 地理空间信息,2020,18(3):41-44

[8] 袁金国,杨紫妍,李卓琳,等. 滹沱河流域植被NPP时空演变及其影响因子分析[J]. 长江科学院院报,2025,42(3):76-83

[9] 刘宝锋. 川西北江河源区植被净初级生产力时空动态演变[J].地理空间信息,2017,15(5):103-106

[10] Xia T L, Han L S, Ren C, et al. Assessing the Impacts of Urbanization and Climate Change on NPP Under Different Habitat Quality Conditions over the Last two Decades in the Tibetan Plateau[J]. China. Land,2024,13(12):2139

[11] Xu C L, Zhong Q B, Yu Q, et al. Effects of Land Use Cover Change on Carbon Storage Between 2000 and 2040 in the Yellow River Basin China[J]. Ecological Indicators, 2023,151:11345

[12] 谢慧君,谢亚巍,曹聪,等. 重庆市植被净初级生产力时空变化特征及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境,2023,32(12):2581-2597

[13] 周丽君. 气候变化对三峡库区(重庆段)植被净初级生产力影响研究[D]. 重庆:重庆师范大学,2017

[14] 张江蕾,陈少辉. 祁连山自然保护区植被覆盖时空变化及地形分异研究[J]. 西部林业科学,2023,52(1):106-112

[15] 马成龙,纪童,何国兴,等. 2000—2020年岷县植被覆盖度时空变化及地形分异研究[J]. 草地学报,2024,32(11):3567-3578

[16] 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

[17] 符帆,赵德轩,张贝尔,等. 我国不同气候带多年植被覆盖度时空变化特征及其地形效应[J/OL].(2024-10-24)[2025-6-16]. 环境科学:https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202407184

[18] 张静,任志远. 汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因[J]. 生态学报,2016,36(23):7667-7679

[19] 张煦庭,张维敏,潘宇鹰,等. 2001—2020年黄河流域陕西段植被生长时空格局及驱动因子[J/OL].(2024-12-12)[2025-6-1]. 应用生态学报:https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202502.027

[20] 李慧,魏兴萍. 重庆岩溶区和非岩溶区植被NPP时空演变特征及驱动因素对比研究[J]. 生态学报,2025,45(5):1-15

[21] 范立红. 三峡库区土地利用/覆被变化对净初级生产力的影响[D]. 北京:中国林业科学研究院,2018