

基于 OPGD 模型的昆明市植被 NPP 时空演变及驱动机制

张仲芝^{1,2}, 赵俊三^{1,2}, 陈国平^{1,2}, 王琳^{1,2}, 林伊琳^{1,2}, 张丹丹^{1,2}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 自然资源智慧治理产学研融合创新基地, 昆明 650093)

摘要: [目的] 厘清植被净初级生产力(NPP)演变规律及驱动因素对测算植被的固碳能力和支撑碳交易等具有重要的意义。[方法] 基于 MODIS-NPP 数据, 运用 Theil-Sen Median 趋势法和 Mann-Kendall 检验法分析 2001—2020 年昆明市植被 NPP 的时空动态特征, 并采用参数最优地理探测器(OPGD)模型揭示气候、地形和人为因素对植被 NPP 的影响机制。[结果] 1) 昆明市植被 NPP 在空间上呈“西高-东低”的分布格局, 并以 $7.08 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计) 的速度显著增加。2) 植被景观破碎化程度加剧, 在空间上破碎度与植被 NPP 错位分布, 其对植被 NPP 时空分布有显著负向作用。3) 植被 NPP 变化是气候、人为活动和地形因素共同作用的结果。其中, 核归一化植被指数(kNDVI)、地表温度、植被景观破碎度解释力强于气温、降水和坡度等因子, 因子间交互作用能更好地解释植被 NPP 的时空变化。[结论] 昆明市 2001—2020 年植被 NPP 总体呈增加态势, 但主城区少部分地区形势不容乐观, 未来应综合统筹, 科学推进生态保护与社会经济的协调发展。

关键词: 植被净初级生产力; 参数最优地理探测器模型(OPGD); 双变量空间自相关; 核归一化植被指数(kNDVI); 昆明市

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0298-11

Spatiotemporal Evolution of NPP and Its Influencing Factors in Kunming City Based on the OPGD Model

ZHANG Zhongzhi^{1,2}, ZHAO Junsan^{1,2}, CHEN Guoping^{1,2}, WANG Lin^{1,2}, LIN Yilin^{1,2}, ZHANG Dandan^{1,2}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Natural Resources Intelligent Governance Industry-University-Research Integration Innovation Base, Kunming 650093, China)

Abstract: [Objective] Clarifying the changes in net primary productivity (NPP) and the driving factors is of great significance to measure the carbon sequestration capacity of vegetation and support carbon sink trading. [Methods] Net primary productivity data were obtained based on MODIS-NPP data, and combining the Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall test, and the characteristics of spatiotemporal variation of NPP in Kunming from 2001 to 2020 were revealed. The optimal parameters-based geographical detectors (OPGD) model was adopted to explore the influencing mechanisms of climate, topography and anthropogenic factors on NPP. [Results] 1) The annual mean distribution of vegetation NPP in Kunming City was spatially and temporally heterogeneous, with a distribution pattern higher in the west and lower in the east, and increased significantly at an average annual growth rate of $7.08 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (C-based). 2) The fragmentation degree of the vegetation landscape increased; the fragmentation degree was mismatched with vegetation NPP in terms of space, and it had a significant negative effect on the spatial and temporal distribution of vegetation NPP. 3) Changes in vegetation NPP were the result of the combined effects of climatic, anthropogenic and topographic factors; the kernel Normalized Difference Vegetation Index (kNDVI), land surface temperature, and vegetation landscape fragmentation had stronger

收稿日期: 2024-10-16

修回日期: 2024-11-08

录用日期: 2024-11-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-01-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(42301304); 昆明理工大学校人培育基金项目(KKZ3202421124); 云金地青年科研基金项目(2024-02); 测绘科学与地球空间信息技术自然资源部重点实验室联合资助基金项目(2024-04-14); 云南省哲学社会科学规划项目(ZD202315)

第一作者: 张仲芝(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统碳汇和土地利用研究。E-mail: 2835319311@qq.com

通信作者: 陈国平(1981—), 男, 副教授, 主要从事土地生态系统与 GIS 时空建模研究。E-mail: chenguoping@kust.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

explanatory power than factors such as temperature, precipitation, and slope; and the interactions between the factors better explained the spatial and temporal changes in vegetation NPP. [Conclusion] The vegetation NPP in Kunming showed an increasing trend from 2001 to 2020 in general. However, the ecological situation in certain areas of the main urban districts is not optimistic. In the future, comprehensive planning should be implemented to scientifically promote the coordinated development of ecological protection and social economy.

Keywords: net primary productivity of vegetation; optimal parameters-based geographical detectors model (OPGD); bivariate spatial autocorrelation; kernel normalized difference vegetation index (kNDVI); Kunming City

Received: 2024-10-16

Revised: 2024-11-08

Accepted: 2024-11-15

Online (www.cnki.net): 2025-01-20

近年来,过量碳排放引起严重的气候问题,极端天气频发,使得全球生态环境面临巨大挑战,尽管自2010年以来全球碳排放增速有所减缓,但2023年全球碳排放量依旧达到35.8 Gt,碳排放量消耗剩余碳预算的10.0%~66.7%^[1]。为应对全球碳排放问题,联合国通过《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》《巴黎协定》等协议^[2]。我国作为世界第二大经济体及全球最大的碳排放国^[3],在2020年提出碳达峰、碳中和的“双碳”目标^[4],即碳排放量在2030年前达峰值,并计划2060年前实现相对“零排放”,“减排-增汇”是实现“双碳”目标的主要途径。

植被与自然界各因素关系密切,是陆地生态系统碳循环及能量流动的重要组成部分^[5]。植被净初级生产力(NPP)指植被在一定时期内积累的有机物的总量,即植物通过光合作用所获得的总有机物质,扣除其自身的呼吸所需,剩余的以供植物生长和繁殖的有机物总量^[6]。因此,植被NPP不仅是衡量植被碳汇能力的一个重要指标,还是气候变化和人类活动的相对敏感指标^[7]。目前,基于遥感数据和模型对植被NPP进行估算和探究其影响因素是植被NPP研究的热点,国内外学者从不同区域、不同尺度开展诸多探索,普遍认为气候变化与人类活动是植被NPP变化的主要驱动力^[8-9],其中土地利用类型的转换是关键因素^[10]。土地利用及覆被变化不仅改变各覆盖类型的面积和空间分布,而且使景观类型呈现碎片化。景观破碎化导致自然生境破碎、生境质量下降^[11]和小区域气候环境变化,进而影响固碳服务流^[12]。目前植被NPP驱动力分析方法主要有相关性分析^[13]、偏相关性分析^[14]及地理探测器模型^[15]。然而,前二者忽略影响因子间相互作用带来的影响,后者在因变量离散化过程中存在一定主观性,致使结果不够客观。参数最优地理探测器通过计算自变量确定最佳离散组合,能较大程度上减少人为因素对结果的影响^[16]。

“双碳”目标是实现高质量发展不可或缺的先决条件,为此多地开展林业碳汇试点工作,以提高林业碳储和生态系统碳汇能力,充分发挥森林“碳库”作用。昆明市以盘龙区、寻甸县入选云南省林业碳汇试点为契机,在增加森林碳储量与提高森林碳汇、精准监测、林业碳汇项目开发等方面开展探索创新,打造林业碳汇样板。因此,探析昆明市植被NPP的时空演化特征及驱动因素,对于深入理解陆地生态系统碳循环过程和应对可持续发展等都有十分重要的实践价值。本文基于历年遥感、气候、地形、土地利用等多源数据,分析昆明市2001—2020年植被NPP时空演变过程,运用参数最优地理探测器模型进一步探究植被景观破碎度、核归一化植被指数(kNDVI)、蒸散发、地表温度等因素对植被NPP的影响机制,为陆地生态系统研究提供思路,以助力“双碳”目标的实现。

1 材料与方法

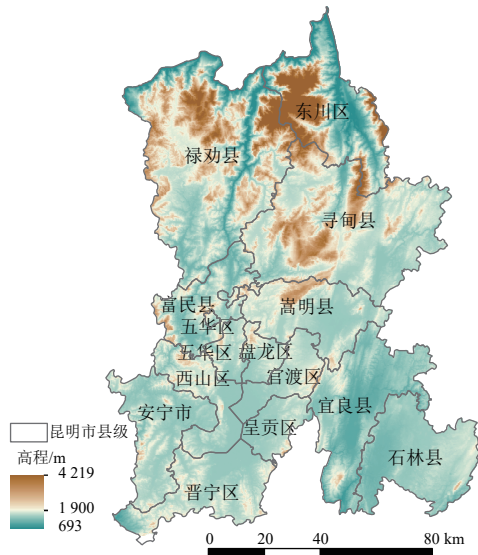
1.1 研究区概况

昆明市(24°23'~26°33'N, 102°10'~103°40'E)是云南省省会,属典型湖盆岩溶高原地貌,地势北高南低,由北向南阶梯式递减,属于亚热带高原山地季风气候。受印度洋西南部暖湿气流的影响,全年气温差异较小,年平均气温15℃,降雨、日照充足,年平均降水量1 035 mm,霜冻期较短,为植被生长提供得天独厚的自然条件,具有极其丰富植被资源,地理位置见图1。

1.2 数据来源与预处理

本文所使用的植被NPP数据、核归一化植被指数(kernel normalized difference vegetation index, kNDVI)及蒸散发数据来源于MODIS数据集(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),利用GEE(Google Earth Engine)云计算平台处理。其中,2001—2020年植被净初级生产力数据来源于MOD17A3数据集(<http://reverb.echo.nasa.gov>),数据空间分辨率为

500 m, 时间分辨率为 1 a。kDNVI 数据来源于 MOD13Q1 数据集, 蒸散发 (evapotranspiration, ET) 数据来源于 MOD16A2 数据集, 空间分辨率均为 250 m。



注: 该图基于审图号为 GS(2019)1823 号的标准地图制作, 底图无修改。下同。

图 1 昆明市地理位置

Fig. 1 Geographic location of Kunming

研究中使用的气候、地形和人为因素等数据来源、分辨率等信息见表 1。其中, 气温、降水、蒸散发、景观破碎度、kNDVI、景观格局指数等均采用平均值合成法计算其平均值, 坡度、坡向数据根据研究区高

程计算。为方便分析, 所有数据经预处理后均统一坐标系 (Krasovsky_1940_Albers) 及分辨率 (1 km)。

1.3 研究方法

1.3.1 时空演变趋势分析 本文基于 Matlab 软件, 采用 Theil-Sen-Median (Sen) 趋势法、Mann-Kendall (MK) 检验法对研究区 2001—2020 年植被 NPP 时空演变特征进行分析。Sen 趋势分析方法对观测误差、异常值等因素无明显影响, MK 显著性检验不依赖于观测数据是否符合正态分布, 也不依赖于趋势的线性, 即使有缺失值或异常值也不影响其显著性^[17]。

1.3.2 植被景观破碎化计算 景观格局指数种类较多, 根据景观格局指数的生物学意义和现有研究^[12, 18], 结合研究目的及实际情况, 选取斑块数量 (NP)、景观形状指数 (LSI)、斑块密度 (PD)、聚合度指数 (AI)、凝聚度 (COHESION)、分离度指数 (DIVISION)、最大斑块指数 (LPI) 和平均斑块面积 (Area_AM) 等 8 个景观指数以表征研究区植被景观破碎化程度。基于土地利用数据, 运用 Fragstates 软件移动窗口^[18]模块对景观指数进行计算, 参考现有研究成果及利用半变异函数对景观格局指数的稳定性进行多尺度预试验后发现, 移动窗口尺度为 1 200 m 时景观格局指数的空间变异性最为稳定。因此, 本研究选择该尺度对研究区植被景观格局指数进行计算。

表 1 影响因素的数据来源

Table 1 Data sources for the influencing factors

影响因素	来源	分辨率	网址
降水	国家青藏高原科学数据中心	1 km	https://data.tpc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2
气温			https://data.tpc.ac.cn/zh-hans/data/71ab4677-b66c-4fd1-a004-b2a541c4d5bf
海拔	中国科学院资源环境与数据中心	1 km	http://www.resdc.cn/DOI
坡度			
坡向			
地表温度			
GDP 密度			
人口数量			
蒸散发	MODIS 数据集	250 m	https://earthexplorer.usgs.gov/
核归一化差异植被指数 (kNDVI)			
土地覆盖数据	武汉大学及国家冰川冻土沙漠科学数据中心	30 m	https://open.geovisearth.com/service/resource/31 http://www.ncdc.ac.cn

为减少破碎化信息的冗余性, 使用主成分分析方法^[18]将 8 个景观指数进行加权降维, 得到 1 个能够描述研究区植被景观破碎化程度的综合

变量。本文采用 SPSS 软件对 2020 年 8 个植被景观指数进行主成分分析 (表 2) 发现, 第 1、2 主分的解释力分别达到 61.9% 和 21.6%, 累计方差

贡献率达到 83.4%,能够表征破碎程度,计算公式为:

$$F=0.742F_1+0.258F_2 \tag{1}$$

式中: F 、 F_1 、 F_2 分别为综合变量、第 1 主成分、第 2 主成分, F_1 、 F_2 的权重由主成分占累加贡献率的百分比决定。

表 2 昆明市景观指数主成分分析

Table 2 Principal component analysis of landscape indices in Kunming

景观指数	公因子方差		主成分荷载矩阵		成分	初始特征值		
	初始	提取	1	2		总计	方差%	累积%
斑块密度(PD)	1	0.88	0.94	0.05	1	4.95	61.85	61.85
斑块数量(NP)	1	0.88	0.94	0.05	2	1.73	21.56	83.41
景观形状指数(LSI)	1	0.75	0.87	-0.39	3	0.69	8.63	92.05
最大斑块指数(LPI)	1	0.96	-0.85	0.48	4	0.44	5.55	97.59
分离度指数(DIVISION)	1	0.90	-0.83	0.51	5	0.17	2.16	99.75
凝聚度指数(COHESION)	1	0.83	0.76	0.42	6	0.02	0.23	99.98
平均斑块面积(Area_AM)	1	0.96	-0.35	0.84	7	0	0.02	100
聚合度指数(AI)	1	0.52	0.15	0.71	8	0	0	100

1.3.3 双变量空间自相关分析 双变量空间自相关分析可以探索要素的空间分布特征及要素间的关联程度^[19]。本研究选用双变量空间自相关指数以表征植被 NPP 与景观破碎度之间的关联性。全局双变量 Moran' I 指数描述空间单元在整个区域上与周围区域的关联程度,其值为 $[-1,1]$,正负表示相关方向,绝对值则代表相关性的强弱,当值为 0 时表示空间上无关联性。局部双变量 Moran' I 指数用于刻画空间单元格与其相邻单元格在研究变量上的空间差异程度和显著性,通过生成聚类图(包括不相关、高-高、低-低、高-低、低-高)来可视化研究变量在空间上的聚集情况^[20-21]。

1.3.4 参数最优地理探测器模型 地理探测器(GD)模型是一个既能探测空间分异性,又能揭示其内在驱动机制的统计模型^[22-23]。传统的地理检测器模型在空间尺度、自变量离散化方式及类别数目的设置上都是以经验为依据,具有一定的主观性。SONG 等^[16]对参数进行优化,提出最优参数的地理探测器(optimal parameters-based geographical detector,OPGD)模型,该模型以 R 语言为基础,计算最大解释力(q 值)确定离散方式,用 q 值大小表示自变量与因变量的关联程度, q 值计算公式为:

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^LN_h\sigma_h^2 \tag{2}$$

式中: q 为驱动因子对植被 NPP 的解释力,值为 0~1; $h=1,2,3,\cdots$; L 为植被 NPP 或驱动因子的分类或分层; N_h 和 N 分别为层 h 的单元数和全区域的单元总数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的植被 NPP 的方差。本研究结合相关性系数表达各因素间的相关性。

现有研究^[24-25]表明,气候、地形、植被自身及人为活动等众多因子都对植被 NPP 产生影响。根据研究区特点,选择气温、降水、蒸散发、地表温度、土

地利用类型、景观破碎度和 kNDVI 等作为驱动因子来探究自然因素与人为活动对植被 NPP 空间分异的影响。

自变量的不同离散化方式对因子的解释力有影响,本研究采用 OPGD 模型,选取自然断点法、几何间距法、分位数法、相等间隔分类法、标准差分类法 5 种方式^[26]对自变量进行离散化处理,将分类数设置为 4~10 类,计算不同离散化组合下 q 值的大小,选择使 q 值最大的离散化方法和离散数的组合作为最优离散化组合,结果见表 3。

表 3 离散化及分类数结果

Table 3 Statistics of discretization and classification results

符号	驱动因子	分级方法	分级层数
X1	气温	相等间隔分类法	7
X9	坡度	分位数法	7
X4	地表温度		6
X5	核归一化植被指数	自然断点法	7
X3	蒸散发		10
X8	海拔		10
X2	降水		5
X10	坡向		7
X6	破碎度	几何间距法	10
X11	GDP 密度		10
X12	人口数量		10

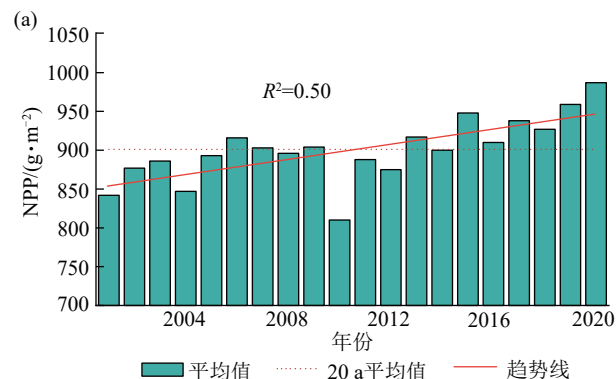
2 结果与分析

2.1 昆明市植被 NPP 的时间演变

基于 2001—2020 年昆明市植被 NPP 值,采用一元线性回归分析方法对其进行分析(图 2a)发现,研究区植被 NPP 值为 813.65~987.67 g/m²,波动幅度为 174.02 g/m²。最低值出现在 2010 年,最高值出现在 2020 年,多年平均值为 905.07 g/m²,总体呈波动上升

趋势($R^2=0.50$)。植被净初级 NPP 在时间序列上是不连续的,2001—2005 年 NPP 值均低于平均水平,除 2004 年低于上年外,其余年份相比于上年有不同程度的增加;2006—2010 年,NPP 值在平均值附近波动,总体呈下降趋势。其中,2009—2010 年下降幅度最大;2011—2015 年,NPP 值呈波动上升趋势;2016—2020 年,NPP 值均高于平均值,并逐年增加。从整体来看,2001—2010 年植被 NPP 值普遍低于平均值,在平均线下波动上升,2011—2020 年则普遍高于平均值。

将 2001—2020 年植被 NPP 值分为 6 个等级,统计分析各等级面积所占总面积的百分比(图 2b)。植被 NPP 值为 0~600、1 200~2 200 g/m^2 的区域占



比较小,面积总和低于研究区域的 1/3,随时间推移,0~600 g/m^2 区域逐渐减少,而 1 200~2 200 g/m^2 的区域逐渐增多,但区域总和依旧小于研究区域的 1/3;800~900、900~1 000 g/m^2 区域波动较小,而 600~800、1 000~1 200 g/m^2 区域变化较为显著,前者呈上升趋势,后者呈下降趋势。2016—2020 年植被 NPP 值不断提高,表现为低值区域(0~800 g/m^2)不断减少,高值区域(1 000~2 200 g/m^2)在不断增加。特别是 2010 年,年平均 NPP 低值区域(0~800 g/m^2)占整个研究区域的 1/2 以上,高值区域(1 000~2 200 g/m^2)占比显著减少,尤其是在 1 000~1 200 g/m^2 区域远低于其他年份,2010 年植被 NPP 年平均值为 20 a 最低值。

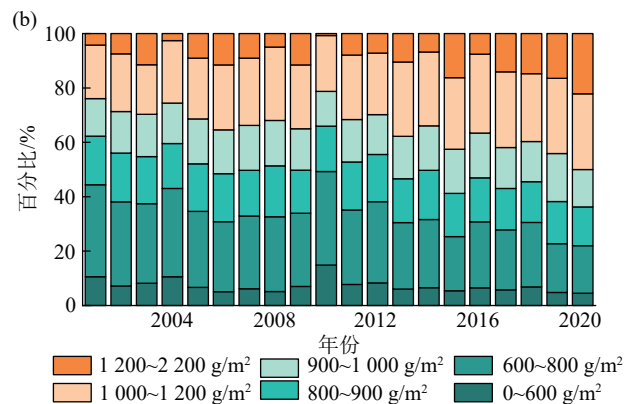


图 2 2001—2020 年昆明市植被 NPP 时间变化趋势及等级统计

Fig. 2 Temporal trend and class statistics of vegetation NPP in Kunming during 2001—2020

2.2 昆明市植被 NPP 的空间演变

研究区 2001—2020 年植被 NPP 平均值空间分布结果(图 3a)表明,植被 NPP 平均值存在显著的空间异质性。整体来看,植被 NPP 平均值呈“西高东低”的分布格局,且区域差异性显著,年平均最低值为 203.64 g/m^2 ,而最高值则达到 1 939.06 g/m^2 ,区域平均值为 905.07 g/m^2 。禄劝县、富民县、西山区、晋宁区等县区因森林覆盖率较高,地理条件优越,植被 NPP 平均值较高;而东川区、石林县北部、呈贡区、寻甸县中部、官渡区、晋宁区东部地区植被 NPP 值相对较低。这些区域由于森林覆盖率较低,且城市扩张较为明显,植被 NPP 值偏低。

采用趋势分析方法对研究区 2001—2020 年植被 NPP 年平均值进行逐像元分析(图 3b)显示,2001—2020 年研究区植被 NPP 整体呈上升趋势,但不同县区的演变存在差异。显著增加和极显著增加趋势的区域面积占比分别为 22.0% 和 38.5%,合计占总面积的 61.0%,主要分布于研究区东部;而显著减少和极显著减少区域仅占整个研究区的 4.6%,其中极显著减少区域主要位于晋宁区北部至

嵩明县中部一带,该区域城市扩张较为严重,植被碳汇能力受到限制;不显著增加区域主要分布于五华区、西山区和东川区,约占总面积的 24.2%。整体来看,2001—2020 年昆明市各区域植被 NPP 值均有增加,说明一系列林业生态工程的实施使昆明市林业有质的提升。

2.3 昆明市植被景观破碎度分析

采用降维处理后的破碎度综合变量来表征植被景观破碎化程度(图 3c、图 4)。对 2001 年、2010 年、2020 年 3 期破碎度空间分布、破碎度变化趋势及破碎度等级面积统计结果进行分析(图 3c、图 4、表 4)表明,2001—2020 年研究区植被破碎度呈增加和减少趋势的面积占比分别为 49.7% 和 49.2%,破碎度整体上略有增加。

昆明市 3 期(2001 年、2010 年和 2020 年)景观破碎度空间分布基本一致,禄劝县、西山区植被景观破碎化程度较低,低破碎度区域呈块状分布;东川区、寻甸县、宜良县、官渡区、呈贡区植被景观破碎化程度较高,富民县、安宁市、五华区、盘龙区、晋宁区只有部分区域破碎化程度较高。2010 年与 2001

年相比,其植被景观破碎化程度在加剧,除安宁市的高破碎化地区面积有所减少外,随着人类活动的加剧其他地区均呈向外扩展趋势,具体表现为极低破碎度区域逐渐减少,其余区域逐渐增大,破碎度等级面积占比变化量依次为-1.6%、0.5%、0.6%、0.4%和0.1%,但总体变化不大,面积占比变化量<2%。

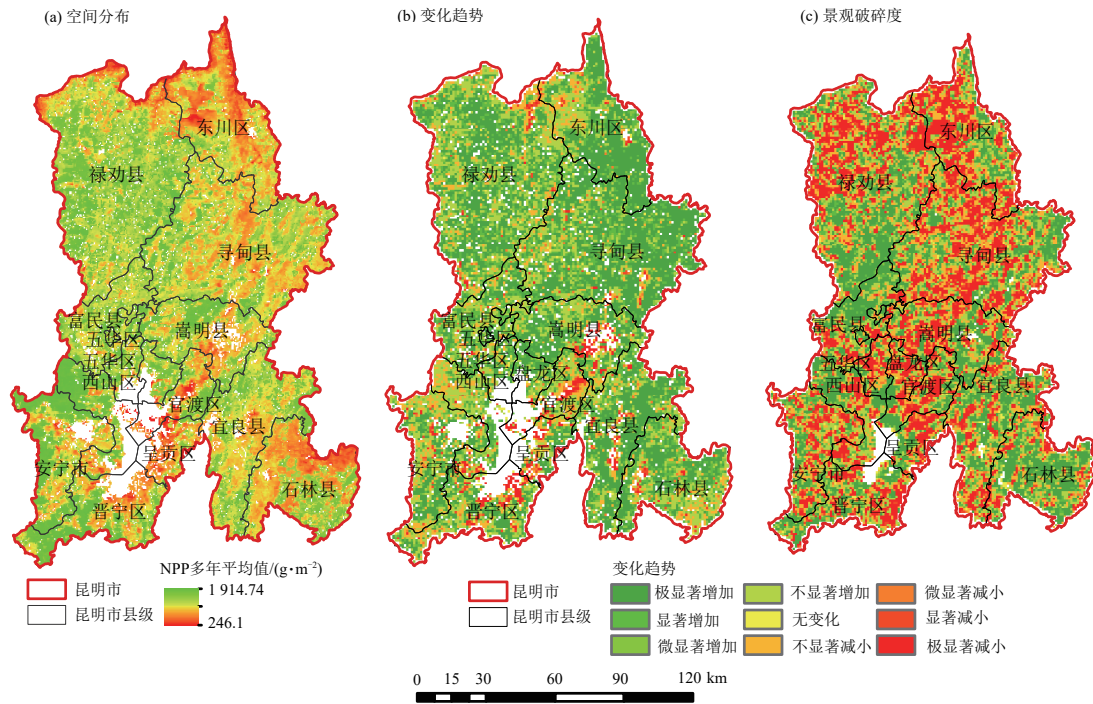


图 3 2001—2020 年昆明市植被 NPP 空间分布、植被 NPP 变化趋势及景观破碎度变化趋势

Fig. 3 Spatial distribution of vegetation NPP, change trend of vegetation NPP and change trend of landscape fragmentation degree in Kunming during 2001—2020

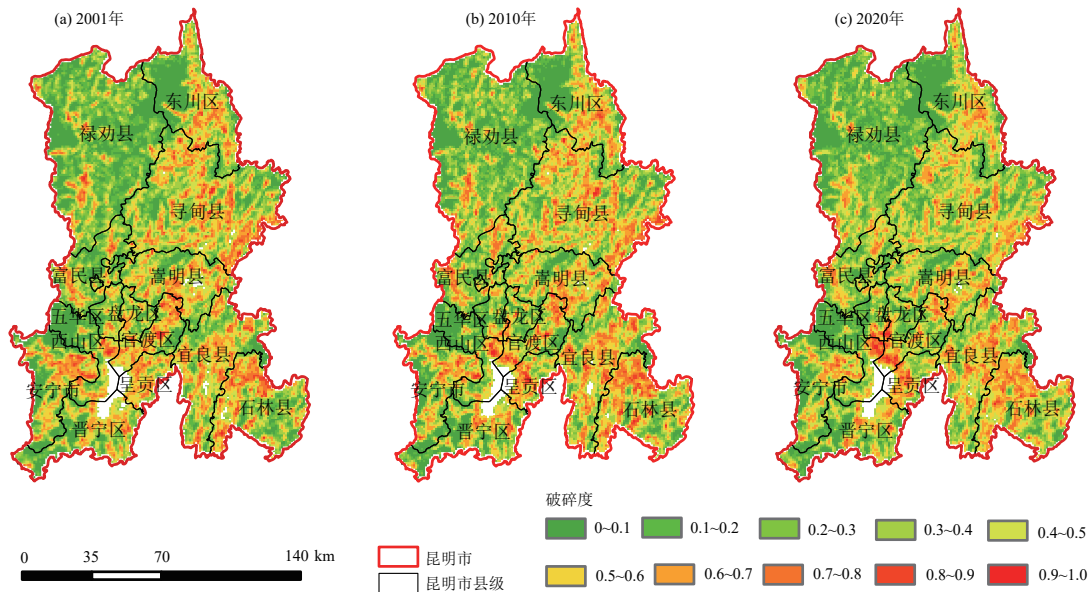


图 4 2001—2020 年昆明市植被景观破碎度

Fig. 4 Fragmentation degree of vegetation landscape in Kunming from 2001 to 2020

2020 年与 2010 年相比,区域的破碎化程度差异较大,除昆明市主城区景观破碎化程度加剧显著外,其余区域景观破碎化程度均有减缓趋势,破碎度较高的寻甸县和宜良县减缓趋势尤为显著,

破碎度等级面积占比变化量依次为-10.4%、0.8%、5.0%、3.5%和1.0%。总体上,研究区东部

区域植被景观破碎化程度低于西部区域,但破碎化扩张趋势比西部区域显著。

2.4 昆明市植被 NPP 与植被景观破碎度相关性分析

基于 2001 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年研究区景观破碎度与植被 NPP Moran'I 指数,分

析景观破碎度与植被 NPP 间的相关性。本研究发现,全局 Moran' I 均 $< -0.3 (q < 0.001)$, 分别为 -0.40 、 -0.37 、 -0.37 、 -0.34 和 -0.42 (表 5),表明研究区植被 NPP 与植被景观破碎度在空间上呈显著负相关,即人类活动引起的植被景观破碎度的增加在一定程度上影响植被碳汇能力。

表 4 昆明市不同破碎化程度的面积比

Table 4 Area ratios of different degrees of fragmentation in Kunming %					
年份	极低	低	中	高	极高
2001	29.6	24.8	26.3	17.7	1.5
2010	28.0	25.3	26.9	18.1	1.6
2020	17.7	26.1	31.9	21.6	2.6

从图 5 可以看出,局部 Moran' I 指数在空间上存在差异,整体上以“高-低”聚集为主,植被 NPP 高值区域被植被景观破碎度低值区域包围,“高-低”聚集和“低-高”聚集分别呈块状集中分布于研究区西部和东部,而“高-高”聚集区域零星分布于整个研究区内。“低-低”聚集区域主要分布于禄劝北部及东川西部区域,该区域地势较高、环境较为恶劣,受人为干扰较小,随着植树造林等生态工程的实施,该区域的环境和景观格局有所改善。因此,“低-低”聚集区域面积逐年减少。

表 5 2001—2020 年昆明市植被 NPP 与破碎度全局莫兰指数
Table 5 Global Moran index of vegetation NPP and fragmentation degree in Kunming from 2001 to 2020

指数	2001 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
Moran' I	-0.397	-0.374	-0.374	-0.339	-0.416
q	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Z	-126.885	-122.172	-123.385	-116.246	-129.336

2.5 植被 NPP 驱动因子分析

采用 OPGD 模型单因子探测模块对 ET、kNDVI、海拔、破碎度等 12 个单因子解释力大小分析发现,不同因子对植被 NPP 的解释力存在显著差异(表 6)。各因子对植被 NPP 的影响程度依次为 kNDVI>土地利用类型>景观破碎度>地表温度>GDP 密度>海拔>蒸散发>气温>坡向>人口数量>降水>坡度。kNDVI 解释力最强,超过 60%;土地利用类型、景观破碎度和地表温度对植被 NPP 的解释力较强,解释力为 30%~20%;气温、GDP 密度、蒸散发、海拔对植被 NPP 的解释力中等,而坡向、坡度、降水、人口数量解释力最弱,解释力均 $< 10.0\%$ 。通过相关性分析(图 6b)发现,kNDVI 与 NPP 呈显著正相关,相关系数超过 0.7,而景观破碎度与土地利用类型与 NPP 呈显著负相关。坡度、坡向、人口数量、GDP 密度与 NPP 相关性较小。整体来看,昆明市人为活动对植被 NPP 的影响大于自然因素。

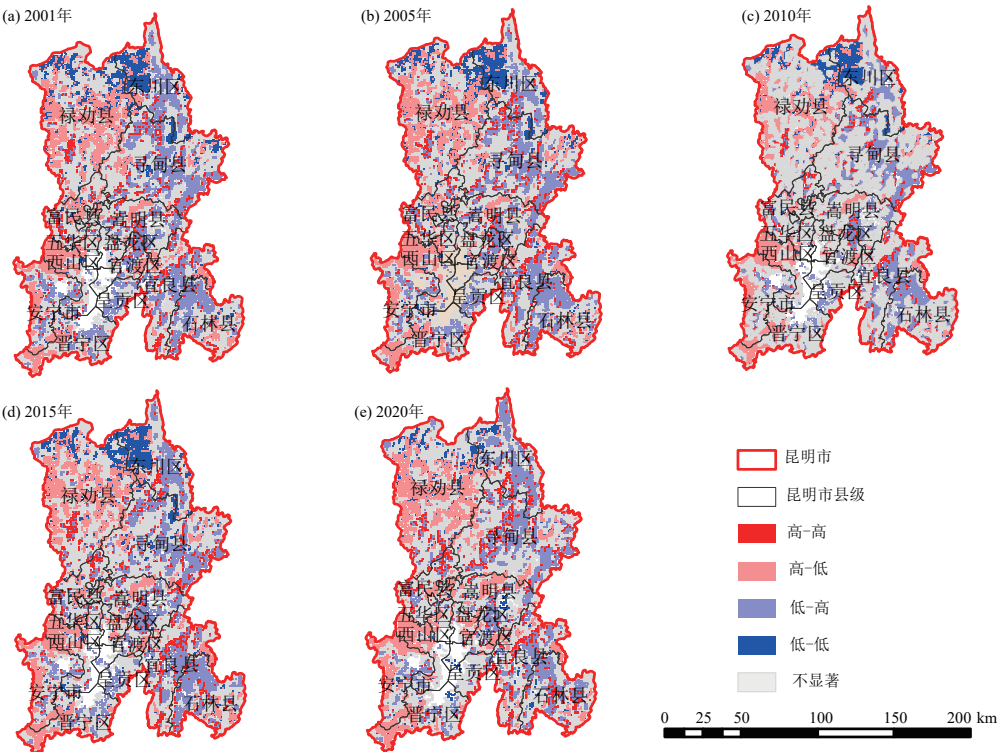
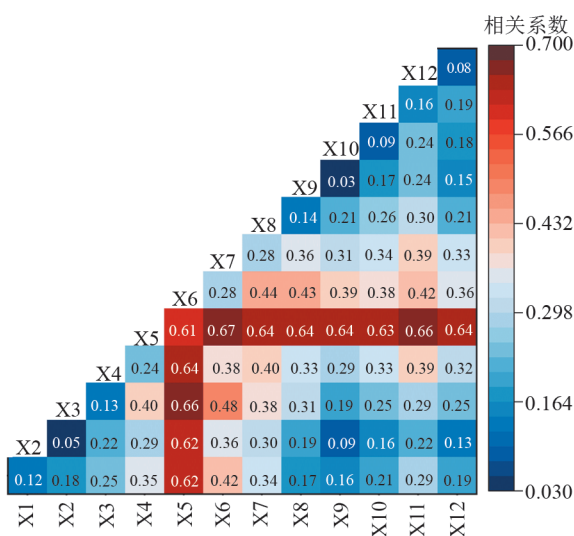


图 5 2001—2020 年昆明市植被 NPP 与破碎度局部空间聚集
Fig. 5 Local spatial aggregation of vegetation NPP and fragmentation degree in Kunming from 2001 to 2020
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

表 6 昆明市植被 NPP 单因子探测结果单因子探测分析结果
Table 6 Single-factor detection results of vegetation NPP in Kunming

符号	驱动因子	q 值	排序
X5	核归一化植被指数	0.61	1
X7	土地利用类型	0.28	2
X6	景观破碎度	0.28	3
X4	地表温度	0.24	4
X11	GDP 密度	0.16	5
X8	海拔	0.14	6
X3	蒸散发	0.13	7
X1	气温	0.12	8
X10	坡向	0.09	9
X12	人口数量	0.08	10
X2	降水	0.05	11
X9	坡度	0.03	12

(a)



2.6 因子交互探测分析

植被 NPP 受单因子影响的同时,也受不同因子间相互作用的影响,经交互探测分析(图 6a)发现,各因子间存在非线性增强和双因子增强关系,因子交互可以显著提高因子对植被 NPP 的解释力,不同因子间的交互作用表现出不同的增强效应。除坡向表现为非线性增强外,kNDVI 与其他因子之间均表现出线性增强,其中与景观破碎度的增强效应最强,其增强效果达到 67%,蒸散发次之,增强效果为 66%。单因子解释力<10%的坡度、坡向、降水和人口密度与其他因子交互后解释力显著增强,均超过 10%。交互作用探测分析表明,研究区植被 NPP 的驱动因素具有复杂性,在考虑单因子影响的同时也应该关注因子间交互作用的影响。

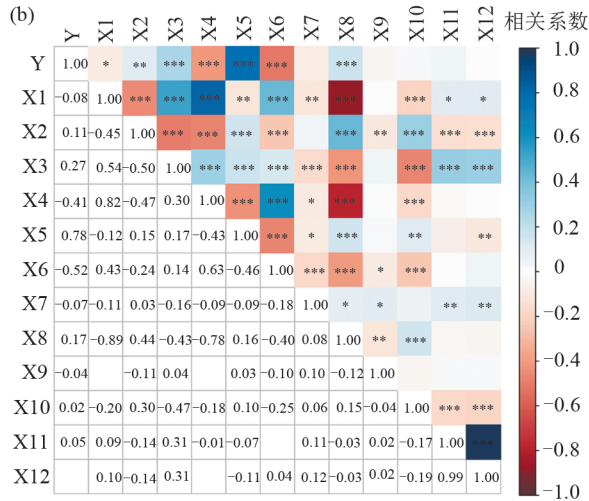


图 6 昆明市植被 NPP 双因子交互探测结果及相关系数

Fig. 6 Two-factor interaction detection results and correlation coefficients of vegetation NPP in Kunming

3 讨论

3.1 植被 NPP 时空演变差异

植被是陆地生态系统的主体,是地球上异养生物的主要食物来源,也是表征植被生产力的重要指标之一,代表着生物圈碳的初始输入,其对研究碳循环具有重要现实意义^[27]。本研究发现,受气候条件、地形因子、人类活动等因素影响,昆明市植被 NPP 在空间上呈现“西部高、东部低”的分布格局,主要因为西部以林地为主,东部主要类型为耕地。研究区 2001—2020 年植被 NPP 值呈波动上升趋势,与其他相关研究^[13,17,28]结果一致。2004 年和 2010 年出现大幅波动,可能与干旱等自然灾害有关。根据云南省极端气候研究^[29-31],2004 年和 2010 年研究区均发生较为严重的干旱,2004 年年降水量及湿润度较低,而

2010 年则为近年来最严重干旱事件之一。植物生长需水期对水分较为敏感,干旱对植物的水分需求造成严重影响,抑制植被生长,导致这 2 a NPP 值与相邻年发生较大波动。因此,应加强生态保护及修复的力度,提高生态系统的抗干扰能力和生态韧性,以应对极端天气。

趋势分析表明,2001—2020 年昆明市超过 2/3 区域植被 NPP 在上升,主要分布于研究区东部,且超 1/3 区域植被 NPP 极显著增加,表明 2001—2020 年植被生长状况良好。一方面得益于昆明市独特的地理环境和气候环境有利于植物生长;另一方面,与近年来当地政府实施的退耕还林、还草、还湖等一系列重大生态工程有关。生态工程的实施有效遏制对土地的过度开发,使得昆明市实现森林覆盖率及蓄积量“双增长”,特别是干旱缺水、地势陡峻、地质侵蚀强烈、

立地条件差的东川区,在人工造林、封山育林等措施的推动下,超过 2/3 区域植被 NPP 呈极显著增加。植被 NPP 极显著减少区域分布于城市及周边,说明城镇化对植被造成显著性的破坏,土地利用类型的转换对土壤等生态系统产生负面影响,进一步抑制植被碳汇。综上,昆明市森林由过度消耗型向恢复增长型转变,森林覆盖逐步恢复不仅提高森林固碳能力,改善并提高生态系统环境,也促进林业产业及社会经济的发展。

3.2 植被 NPP 驱动机制

人为活动不仅改变下垫面类型,而且破坏景观连通性。本研究表明,昆明市植被景观破碎度与植被 NPP 之间存在负相关。破碎度的增大打破原有生态系统平衡,进而影响植被健康和生长状况,与其他研究^[12,18]结果相符。单因子探测表明,kNDVI、土地利用类型、景观破碎度是影响昆明市植被 NPP 的主要因素。kNDVI 与蒸散发的增加有利于植被对碳的吸收,而景观破碎度和地表温度的升高干扰植被的碳储存能力。年平均降水量超过 600 mm 的区域,植被对热量因子的变化比水分因子的变化更加敏感,过度的升温使植被的生产活动受到限制,降雨量的增加能促进植被生长,与相关研究^[32]结论相似。坡度与海拔对植被 NPP 值有正面影响,随着坡度、海拔的升高,植被受到人类活动干扰的可能性和程度减少,植被能保持自然生长状态,固碳能力相应提高。从交互探测结果可以看出,因子间交互作用对植被 NPP 的解释力显著高于单因子,且因子间表现出双因子增强效应和非线性增强效应,也与现有研究^[5,15,26]结果一致。研究表明,植被 NPP 的演变是多种因素耦合驱动的,而非单因素所能解释。因此,在制定生态保护策略和可持续发展目标时不仅需要综合考虑自然、社会等因素,而且还应关注恢复植被景观的完整性。

4 结 论

1)2001—2020 年昆明市植被 NPP 表现出显著的空间异质性,西部区域碳汇能力高于东部。随时间推移,超 2/3 区域植被 NPP 呈增加趋势,近 1/3 地区极显著增加,而减少区域仅为 14.1%。

2)植被景观破碎度整体呈逐渐加剧趋势,空间上与植被 NPP 错位分布,NPP 高值区域被低破碎度包围,二者之间存在显著负相关。破碎化程度的加剧导致区域地表温度和气温上升,同时蒸散发和降水减少。

3)植被 NPP 变化是多种因素共同作用的结果,就单因子来说,主要受 kNDVI 的影响,其次是土地利

用类型、景观破碎度和地表温度。各影响因子间存在双因子增强及非线性增强关系,交互后解释力得到显著提高,因子之间复杂的交互作用在植被生长过程中至关重要。蒸散发、日照时间及降水有利于植被生长,而地表温度、植被破碎度则限制植被生长。

本研究对昆明市 2001—2020 年植被 NPP 时空变化过程和规律进行动态分析,揭示气候变化和人类活动是植被 NPP 变化的主导因素。植被 NPP 影响机制复杂,未来将考虑加入城市绿化、土壤湿度、土壤类型、森林结构与林龄、极端气候及氮沉降等驱动因素。OPGD 虽可以探究双因子对植被 NPP 变化的影响,但未能进一步揭示多种驱动因子之间的耦合作用对植被 NPP 的影响机制,未来将进一步结合多源遥感数据与统计分析方法,开展植被碳汇能力变化的机理研究。

参考文献:

- [1] LIU Z, DENG Z, DAVIS S J, et al. Global carbon emissions in 2023[J].*Nature Reviews Earth and Environment*, 2024, 5(4): 253-254.
- [2] 罗仁娟.滇中地区农业碳排放时空演变及其驱动因素研究[D].昆明:云南师范大学,2023.
LUO R J. Spatial-temporal evolution of agricultural carbon emissions in central Yunnan and its driving factors [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2023.
- [3] LIU Z, DENG Z, DAVIS S, et al. Monitoring global carbon emissions in 2022[J].*Nature Reviews Earth and Environment*, 2023, 4(4): 205-206.
- [4] 汪晓珍,呼海涛,吴建召,等.2000—2020 年陕西省陆地生态系统 NPP 时空变化与潜力[J].*水土保持学报*, 2024, 38(3): 325-334.
WANG X Z, HU H T, WU J Z, et al. Spatial and temporal variation and potential of NPP in terrestrial ecosystems in Shaanxi Province from 2000 to 2020[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 325-334.
- [5] 李霞,张乐艺,吴晨.基于 GEE 和地理探测器的河南省不同流域植被变化及影响因素[J].*应用生态学报*, 2024, 35(7): 1887-1896.
LI X, ZHANG L Y, WU C. Vegetation changes and influencing factors in different watersheds of Henan Province based on GEE and geographic detectors[J].*Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(7): 1887-1896.
- [6] SONG L Y, LI M Y, XU H, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of vegetation net primary productivity in a typical karst area in China from 2000 to 2010[J].*Ecological Indicators*, 2021, 132: e108280.
- [7] PENG W F, KUANG T T, TAO S. Quantifying influ-

- ences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 353-367.
- [8] TIAN H W, JI X J, ZHANG F M. Spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity and its response to meteorological factors across the Yellow River basin during the period 1981—2020 [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: e949564.
- [9] 刘文利, 姜亮亮, 刘冰, 等. 中国植被碳源/汇时空演变特征及其驱动因素 [J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1456-1467.
- LIU W L, JIANG L L, LIU B, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors analysis of vegetation carbon sources/sinks in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1456-1467.
- [10] YIN C H, LUO M, MENG F H, et al. Contributions of climatic and anthropogenic drivers to net primary productivity of vegetation in the Mongolian Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): e3383.
- [11] PU J, SHEN A R, LIU C X, et al. Impacts of ecological land fragmentation on habitat quality in the Taihu Lake basin in Jiangsu Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: e111611.
- [12] 闫晓露, 武帅, 吴雪雪, 等. 海岸带景观破碎化对固碳服务流的影响 [J]. *地理学报*, 2024, 79(1): 114-133.
- YAN X L, WU S, WU X X, et al. Impacts of landscape fragmentation of coastal zone on carbon sequestration service flow [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(1): 114-133.
- [13] 洪辛茜, 黄勇, 孙涛. 我国西南喀斯特地区 2001—2018 年植被净初级生产力时空演变 [J]. *生态学报*, 2021, 41(24): 9836-9846.
- HONG X Q, HUANG Y, SUN T. Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the karst region of Southwest China from 2001 to 2018 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9836-9846.
- [14] 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 Y, JIANG Y J, ZHANG C Y, 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.
- [15] 潘洪义, 黄佩, 徐婕. 基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究 [J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7621-7631.
- PAN H Y, HUANG P, XU J. The spatial and temporal pattern evolution of vegetation NPP and its driving forces in middle-lower areas of the Min River based on geographical detector analyses [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7621-7631.
- [16] SONG Y Z, WANG J F, GE Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience and Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [17] 李益敏, 冯显杰, 李媛婷, 等. 云南省植被覆盖时空变化特征及影响因素研究 [J]. *自然资源遥感*, 2024, 36(2): 116-125.
- LI Y M, FENG X J, LI Y T, et al. Exploring the spatio-temporal variations and influencing factors of vegetation cover in Yunnan Province [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36(2): 116-125.
- [18] 梁加乐, 陈万旭, 李江风, 等. 黄河流域景观破碎化时空特征及其成因探测 [J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1993-2009.
- LIANG J L, CHEN W X, LI J F, et al. Spatiotemporal patterns of landscape fragmentation and causes in the Yellow River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5): 1993-2009.
- [19] 贾天朝, 胡西武, 杨海娟, 等. 生境质量对气候变化与人类活动的空间响应: 以青藏高原为例 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5): 203-211, 224.
- JIA T C, HU X W, YANG H J, et al. Spatial response of habitat quality to climate change and human activities: Taking the Qinghai-Xizang Plateau as an example [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 203-211, 224.
- [20] 武燕, 吴映梅, 高彬嫔, 等. 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 173-182.
- WU Y, WU Y M, GAO B P, et al. Spatial relationship between human activity intensities and ecosystem services value in Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 173-182.
- [21] 孟晓璐, 张艳芳. 景观格局变化下陕西汉江流域生态价值与风险的相关性研究 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 190-200.
- MENG X L, ZHANG Y F. Study on correlation between ecological value and risk of Hanjiang River basin in Shaanxi Province under landscape pattern change [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 190-200.
- [22] 陈超男, 王丽园, 朱文博, 等. 秦巴山地极端气候变化特征及其对植被动态的影响 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 276-287.
- CHEN C N, WANG L Y, ZHU W B, et al. Characteristics of extreme climate change in the Qinling-Daba Mountains and its impact on vegetation dynamics [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 276-287.

- [23] ZHAO X Y, TAN S C, LI Y P, et al. Quantitative analysis of fractional vegetation cover in southern Sichuan urban agglomeration using optimal parameter geographic detector model, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: e111529.
- [24] 贾一越, 齐璇璇, 黄蕊, 等. 山西省植被覆盖度的时空变化及驱动因子[J]. 应用生态学报, 2024, 35(4): 1073-1082.
JIA Y Y, QI X X, HUANG R, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of vegetation coverage in Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4): 1073-1082.
- [25] 胡蓉, 董灵波. 黑龙江流域植被覆盖度时空动态及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2024, 35(6): 1518-1524.
HU R, DONG L B. Temporal and spatial variations of vegetation coverage in Heilongjiang basin and its responses to climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(6): 1518-1524.
- [26] 奎国娴, 史常青, 杨建英, 等. 内蒙古草原区植被覆盖度时空演变及其驱动力[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2713-2722.
KUI G X, SHI C Q, YANG J Y, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving force in Inner Mongolia grassland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2713-2722.
- [27] IMHOFF M L, BOUNOUA L, DEFRIES R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 434-443.
- [28] 刘逸娴, 张军, 唐莹, 等. 昆明市 2011—2020 年植被覆盖时空变化特征分析及其归因[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8124-8132.
LIU Y X, ZHANG J, TANG Y, et al. Analysis of spatiotemporal variation of vegetation coverage in Kunming City from 2011 to 2020 based on MODIS₃DVI and its attribution [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(19): 8124-8132.
- [29] 金燕, 况雪源, 晏红明, 等. 近 55 年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J]. 气象, 2018, 44(9): 1169-1178.
JIN Y, KUANG X Y, YAN H M, et al. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9): 1169-1178.
- [30] 张青雯, 崔宁博, 赵禄山, 等. 基于相对湿润指数的云南省季节性干旱变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 278-284.
ZHANG Q W, CUI N B, ZHAO L S, et al. Seasonal drought characteristics based on relative moisture index in Yunnan Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 278-284.
- [31] 王胜国, 许丽人, 庞宇婷, 等. 基于强度-持续时间-面积的干旱相似性研究[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 2024: 1-14. <http://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20241018.1352.008>.
WANG S G, XU L R, PANG Y T, et al. Drought similarity analysis based on intensity-duration-area characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024: 1-14. <http://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20241018.1352.008>.
- [32] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
JIAO K W, GAO J B, WU S H, et al. Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2229-2238.
- (上接第 297 页)
- [32] 袁建钰, 李广, 闫丽娟, 等. 黄土高原不同灌水量下春小麦土壤与植物碳氮磷含量及其化学计量比特征[J]. 草业科学, 2020, 37(9): 1803-1812.
YUAN J Y, LI G, YAN L J, et al. Soil and plant carbon, nitrogen, and phosphorus content and their stoichiometry in spring wheat under different irrigation treatments in the Loess Plateau [J]. Pratacultural Science, 2020, 37(9): 1803-1812.
- [33] 黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 等. 不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2848-2858.
HUANG S W, ZHAO Y K, ZHU X Y, et al. Integrated analysis of soil organic matter molecular composition changes under different land uses [J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2848-2858.
- [34] 刁二龙, 曹广超, 袁杰, 等. 香日德—柴达木河流域不同土地利用方式下土壤颗粒分形特征[J]. 西南农业学报, 2022, 35(10): 2353-2360.
DIAO E L, CAO G C, YUAN J, et al. Fractal characteristics of soil particles under different land use patterns in Xiangride-Chaidamu River basin [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(10): 2353-2360.
- [35] LU J N, FENG S, WANG S K, et al. Patterns and driving mechanism of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry across Northern China's desert-grassland transition zone[J]. Catena, 2023, 220: e106695.