2000—2023年皖西大别山区NDVI变化趋势及其驱动因子

於 冉[1,2], 金 胜[1,2], 姚 璐[1,2], 韩有有[1,2], 苏 越[1]
(1.安徽农业大学 经济管理学院, 安徽 合肥 230036; 2.安徽农业大学 国土资源研究所, 安徽 合肥 230036)

摘 要: [目的]探究皖西大别山区NDVI未来变化趋势及其驱动因子,为区域生态环境健康发展提供科学依据。[方法]以皖西大别山区为例,基于2000—2023年归一化植被指数(NDVI)数据集,采用Theil-Sen median趋势分析和Mann-Kendall检验、稳定性分析和未来趋势分析以及地理探测器探讨NDVI对自然和社会经济等不同因素的响应。[结果]①从时空变化上看,2000—2023年皖西大别山区NDVI年均值为0.73~0.79,时间上呈上升趋势,空间上总体呈西北高,东南低的分布特征,多数属于优质植被区。②从未来变化趋势上看,皖西大别山区NDVI未来变化整体呈现增加趋势,南部和北部少数地区呈现极显著减少趋势;NDVI变化趋势总体稳定性较高并存在空间分异性,大部分处于极低波动区,东部与南部地区存在较低波动区和中度波动区。③从Hurst指数结果看,皖西大别山区中部核心林区未来呈现持续性改善趋势,北部、南部以及东部等部分地区未来呈现反持续退化以及持续性退化。④地理探测器分析结果表明,皖西大别山区NDVI变化是不同驱动因子交互作用的结果,其中土地利用类型与其他驱动因子的交互作用尤为显著。[结论]皖西大别山区NDVI总体呈现增加趋势,但仍有部分地区存在退化趋势,未来需要通过不同地区的交流合作,创新数据共享模式,促进植被保护区域间协同发展。

关键词: 归一化植被指数(NDVI); 趋势分析; 地理探测器; 大别山区; 皖西
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0204-10 **中图分类号:** Q948

文献参数: 於冉, 金胜, 姚璐, 等.2000—2023年皖西大别山区NDVI变化趋势及其驱动因子[J].水土保持通报,2026,46(3):204-213. Yu Ran, Jin Sheng, Yao Lu, et al. NDVI trends and driving factors in Dabie Mountains of western Anhui Province during 2000—2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):204-213.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.029 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.029**

NDVI trends and driving factors in Dabie Mountains of western Anhui Province during 2000—2023

Yu Ran[1,2], Jin Sheng[1,2], Yao Lu[1,2], Han Youyou[1,2], Su Yue[1]
(1.*School of Economics and Management*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei*, *Anhui* 230036, *China*; 2.*Institute of Land Resources*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei*, *Anhui* 230036, *China*)

Abstract: [Objective] The future trends and driving factors of NDVI in the Dabie Mountains of western Anhui Province were investigated in order to provide a scientific foundation for the healthy development of the regional ecological environment. [Methods] NDVI data (2000—2023) from the Dabie Mountains of western Anhui Province were used, and Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall test, stability analysis, future trend analysis, and geodetector were applied to assess NDVI responses to natural and socio-economic factors. [Results] ① In terms of spatiotemporal dynamics, annual NDVI averaged 0.73—0.79 (2000—2023), with an upward trend and a spatial pattern of higher values in the northwest and lower values in the southeast. Most areas were high-quality vegetation zones. ② Regarding future trends, NDVI was projected to increase overall, but extremely significant decreases were observed in parts of the south and north. The trend was generally stable yet spatially heterogeneous, with very low fluctuation being widespread, and low-to-moderate fluctuation in eastern and southern areas. ③ Hurst index

收稿日期:2025-10-20 **修回日期:**2025-12-10 **采用日期:**2025-12-12
资助项目:国家自然科学基金项目"耦合微观利益主体需求和生态系统服务供给的耕地利用优化研究"(42201281)
第一作者:於冉(1984—),男(汉族),安徽省巢湖市人,博士,副教授,主要从事土地利用碳排放研究。Email:yuran@ahau.edu.cn。
通信作者:金胜(2002—),女(汉族),安徽省安庆市人,硕士研究生,研究方向为土地利用与规划。Email:jinsheng@stu.ahau.edu.cn。

indicated sustained improvement in the core forest areas of the central Dabie Mountains of western Anhui Province, while northern, southern and eastern regions exhibited anti-persistent degradation and persistent degradation. ④ The geodetector results indicated that NDVI changes resulted from interactions among multiple drivers, with the interaction between land use types and other factors being particularly significant. [Conclusion] Although NDVI in the Dabie Mountains of western Anhui Province shows an overall increase, degradation trends remain in some areas. Future efforts should promote regional collaboration, innovative data-sharing, and coordinated vegetation conservation to support ecological restoration and regional sustainable development.

Keywords: normalized difference vegetation index (NDVI); trend analysis; geodetector; Dabie Mountains; western Anhui Province

中国共产党第二十次全国代表大会报告强调生态文明建设需从单一造林转向“山水林田湖草沙”一体化保护和系统治理,通过重大生态工程、国家公园体系建设等强化国土空间生态效能。作为陆地生态系统的初级生产者,植被不仅支撑着物质循环、能量流动与碳汇过程,还可作为人类活动及气候变化的敏感指示器[1-4]。植被覆盖状况不仅表征着植被的生长动态,也是评判生态系统健康状况的重要指标[5]。城镇化与工业化在驱动空间扩张和人为干扰的同时,也对生态、植被及气候产生双向影响。一方面,它们改变生态过程,导致生态系统服务衰减,削弱城市植被功能,使其成为全球气候变化的早期指示单元;另一方面,这种胁迫也驱动生态系统的适应与重塑,并通过规划干预可能形成服务于城市的局地小气候与生态功能[6-8]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为植被光合作用强度与生物量累积的重要衡量指标,被确立为监测植被生长动态及空间格局演变的核心诊断参数[9]。

近年来,NDVI数据集正被广泛运用于植被覆盖动态监测研究。姜浩等[10]构建了温度-降水-植被综合干旱指数,为长江流域干旱监测提供了新方法;邓太国等[11]基于NDVI监测江仓矿区露天采煤对植被的影响;马磊等[12]则通过植被覆盖度变化评估了生态修复工程的区域差异性效果。同时NDVI数据集的运用服务于农业生产、地理空间的相关研究[13-15],在研究方法上,学者[16-18]主要采用Sen+MK趋势检验和Hurst指数探究NDVI未来变化趋势,利用相关性分析等方法揭示导致NDVI变化的主导因素。现有研究主要围绕NDVI时空变化,但多数研究时间跨度有限,在综合考虑自然以及社会经济因素对植被覆盖率的交互作用方面具有一定的片面性。根据已有研究结果,皖西大别山区的林地比例为67.10%,远优于安徽省水平(29.44%)[19],其以高植被覆盖率提升了安徽省林地比例,同时对于全省的地表径流量具有调节作用,是长江中下游和淮河流域的重要生态屏障,承担着水源涵养、水土保持、生物多样性保护等核心功能,实现在省级尺度水源调节与生态防护的双重核心功能,在此区域进行植被覆盖度研究具有一定代表性意义。为此,本文结合已有研究成果,运用Theil-Sen median趋势分析和Mann-Kendall检验、稳定性分析和未来趋势分析来揭示研究区NDVI时空变化特征,并采取地理探测器方法探究自然与社会经济因素对NDVI的影响,以期为该区域乃至全国生态安全屏障建设提供参考。

1　研究区域与数据来源

1.1　研究区概况

研究区为安徽省内大别山区,地理位置为东经115°36′—117°25′,北纬29°58′—32°07′,具体包括六安市霍山县、金安区、金寨县、舒城县、叶集区和裕安区以及安庆市潜山市、宿松县、太湖县、桐城市和岳西县。皖西大别山区属于北亚热带向暖温带过渡的湿润季风气候,年平均气温12～16 ℃,随海拔变化较大,年均降水量1 200～1 600 mm,是安徽省降水最丰沛的区域之一,温光同季,雨热同期,兼具显著的山地垂直气候分异与森林生态系统局地小气候特征。

1.2　数据来源

NDVI数据来源于MOD13A3数据集的2000—2023年逐月的NDVI栅格数据,采用年最大值的方法得到2000—2023年逐年的归一化植被指数(NDVI)栅格数据,数据分辨率为1 km。驱动因子方面主要分为自然因素和社会经济因素,具体来源详见表1。为保证数据的真实性和完整性,利用ArcGIS 10.8对栅格数据进行裁剪,并对研究区建立1 km×1 km的渔网,采用网格法提取数据。

2　研究方法

2.1　Theil-Sen median趋势分析和Mann-Kendall显著性检验

Theil-Sen median趋势分析和Mann-Kendall显著性检验基于严格的统计学理论,为长时间序列数据变化趋势的分析提供了可靠方法[20-21]。Theil-Sen

median趋势分析基于非参数统计原理，构建具有强稳健性的趋势量化计算框架，可以有效减少数据异常值的影响[22-23]。计算公式为

$$\beta = \mathrm{median}\left(\frac{X_a - X_b}{a - b}\right) \quad (\forall a > b) \tag{1}$$

式中：β表示趋势估计；median表示对所有可能的斜率取中位数；X_a表示时间点a对应的观测值；X_b表示时间点b对应的观测值；$\frac{X_a - X_b}{a - b}$表示两点之间的趋势变化率。

表1 研究数据来源

Table 1 Data sources of study

驱动因子	数据名称	格式	分辨率	数据来源
自然因素	DEM数据	tif	90 m	地理空间数据(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	tif	1 km	通过ArcGIS 10.8进行坡度分析
	年降水量	tif	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
	平均气温	tif	1 km	中国科学院地理科学与资源研究所(https://www.geodata.cn/main/)
社会经济因素	土地利用数据	tif	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	人口密度	tif	1 km	WorldPop网站(https://www.worldpop.org/)
	GDP	Excel		安徽统计年鉴
	路网密度	Excel		安徽统计年鉴
	夜间灯光	tif	1 km	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)

Mann-Kendall检验作为非参数假设检验框架，用于判断趋势的显著性，该方法下的样本分布无须遵守一定规律，也很少受到异常值的干扰[24-25]。计算公式为

$$Z = \begin{cases} \dfrac{Q}{\sqrt{\mathrm{var}(Q)}} & (Q > 0) \\ 0 & (Q = 0) \\ \dfrac{Q+1}{\sqrt{\mathrm{var}(Q)}} & (Q < 0) \end{cases} \tag{2}$$

式中：Z表示最终标准化的统计量；Q为趋势检验统计量；A_w，A_y分别表示在时间点w和y的数据值，若$A_w < A_y$，$Q > 0$，表示存在上升趋势；若Aw>Ay，$Q < 0$，表示存在下降趋势；若数据点无明显先后大小关系，$Q = 0$，则表示无趋势。var(Q)为统计量Q的方差。计算公式如公式(3)；var(Q)的计算公式如下：

$$Q = \sum_{w=1}^{n-1} \sum_{j=w+1}^{n} \mathrm{sgn}\,(A_j - A_w) \tag{3}$$

$$\mathrm{var}(Q) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{4}$$

式中n表示数据点总数；sgn为符号函数，用于判断数据对的变化方向，基于β值和Z值，可以进行趋势判别，结果详见表2。

2.2 稳定性分析与未来趋势预测

在趋势预测前，采用变异系数C_v分析NDVI年际变化的稳定性。C_v通过量化长时间序列数据的相对离散程度，表征其波动异质性与稳定性，值越大表明波动性越强[26]。计算公式为

$$C_v = \frac{Q}{\mathrm{NDVI}} = \frac{1}{\mathrm{NDVI}} \times \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^{a} (\mathrm{NDVI}_k - \mathrm{NDVI})^2}} \tag{5}$$

式中：NDVI_k代表某个特定时间点k的NDVI值；a表示计算斜率时所有可能的点对数量。

表2 Mann-Kendall检验趋势类别

Table 2 Trend categories identified by Mann-Kendall test

β	Z	趋势判别
$\beta>0$	$2.58<Z$	极显著增加
	$1.96<Z\leqslant 2.58$	显著增加
	$1.65<Z\leqslant 1.96$	弱显著增加
	$Z\leqslant 1.65$	不显著增加
$\beta=0$	—	无变化
$\beta<0$	$Z\leqslant 1.65$	不显著减少
	$1.65<Z\leqslant 1.96$	弱显著减少
	$1.96<Z\leqslant 2.58$	显著减少
	$2.58<Z$	极显著减少

注：β，Z分别为趋势变化率和标准化统计量。

运用Hurst指数预测NDVI未来趋势。该指数通过R/S分析量化时间序列的持续性特征，以判断趋势的持久性或反持续性[27-28]。对于时间序列$\mathrm{NDVI}_{(x)}$，其计算公式为

$$\lg\left[R_{(p)}/S_{(p)}\right] = a + H\lg(p) \tag{6}$$

式中：H表示Hurst指数；p表示子序列的长度；R(p)表示子序列长度p的极差；$S(p)$表示子序列长度p的标准差；a为截距项。

$$R(p)=\max_{1\leqslant e\leqslant p}X_{(e,p)}-\min_{1\leqslant e\leqslant p}X_{(e,p)}\quad(p=1,2\cdots n)\tag{7}$$

$$S_{(p)}=\left[\frac{1}{p}\sum_{\epsilon=1}^{p}\left(\mathrm{NDVI}_{(\epsilon)}-\mathrm{NDVI}_{(p)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}\quad(p=1,2\cdots n)\tag{8}$$

式中:e表示子序列内部的索引;p为当前计算的子序列长度;$X_{(e,p)}$为累计离差;$\mathrm{NDVI}_{(e)}$表示子序列中在第e个时间点的原始NDVI值;NDVI(p)表示子序列中在第p个时间点的原始NDVI值。对于比值$R(p)/S(p)$,如存在$R_{(p)}/S_{(p)}\propto p^H$,则时间序列存在Hurst现象。$H$值根据式(6)利用最小二乘法拟合得到。$H=0.5$表示序列变化随机;$0<H<0.5$表示反持续性变化,即未来趋势可能逆转;$0.5<H<1$表示持续性,即当前趋势可能延续甚至强化。

2.3　地理探测器模型

地理探测器是一种通过分析自变量与因变量空间分布耦合强度来量化地理要素间驱动关系的统计方法[29]。其核心模块包括因子、生态、风险与交互探测[30]。本研究选用因子探测与交互探测,以量化自然与社会经济因素对NDVI变化趋势的解释力。因子探测公式为

$$q=1-\frac{\sum_{t=1}^{u}N_t R_t^2}{NR^2}\tag{9}$$

式中:q表示各因子对NDVI空间分异的解释力;t表示因子的分层;u表示驱动因子(自变量)x的分类数量或分区数量;N_t,N分别表示因子的层t和研究区样本数;R_t,R分别表示层t和研究区NDVI的方差。q值范围为[0,1],q值越大表示因子解释力越强。

交互探测用于分析因子间的交互作用,通过比较单因子与两因子交互的q值判断作用类型,主要包括非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立及非线性增强5种结果。

3　结果与分析

3.1　皖西大别山区NDVI总体变化的时空特征

3.1.1　时间变化特征

由图1可知,2000—2023年皖西大别山区NDVI年均值为0.73~0.79,近24 a平均值为0.77,其变化速率为1.1×10^{-3}/a($R^2=0.24$)。NDVI取值为−1~1,越接近1表示植被越茂密。因此皖西大别山区属于高植被覆盖区,这与该地区作为国家重点生态功能区的定位相符。从其变化速率看,皖西大别山区呈现出缓慢正向增长的趋势,具体而言,在2000—2019年上升幅度较大,并在2009年达到峰值(0.793 3),这期间正值“退耕还林”“天然林保护”等工程的关键实施期,森林覆盖率稳步提高。至2009年末,叠加了长期植被自然演替的积累效应。2010—2023年皖西大别山区NDVI仍呈现波动上升趋势,其中2022年NDVI年均值较同期下降明显,这是由于2022年长江流域经历了自1961年有完整气象记录以来最严重的特大干旱,极端气候导致NDVI年均值波动较大,同时生态修复工程投入相对放缓,并且与2021年相比,林地封育面积增速有所下降,导致自然恢复力减弱,但这种情况在2023年有所好转。

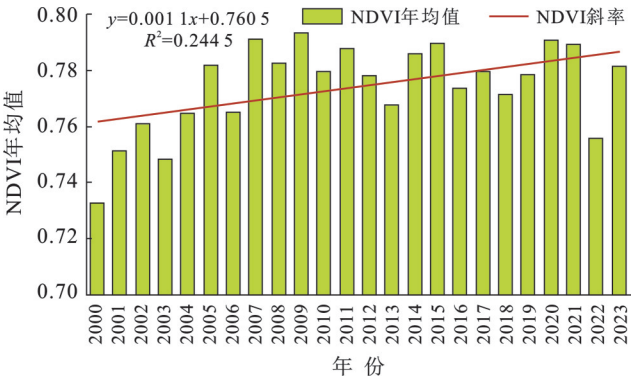


图1　皖西大别山区2000—2023年NDVI年均值年际变化
Fig.1　Interannual variation of annual mean NDVI in Dabie Mountains of western Anhui Province from 2000 to 2023

综合表3及图2可得到皖西大别山区NDVI年均值等级转移情况,将其分为5个等级,[−1,0.05)表示极度稀疏区,[0.05,0.2)表示稀疏植被区,[0.2,0.4)表示一般植被区,[0.4,0.7)表示良好植被区,[0.7,1]表示优质植被区。皖西大别山区优质植被区比例超过80%,极度稀疏区、稀疏植被区以及一般植被区比例均不足1%,由此可以看出皖西大别山区植被覆盖度非常高,同时优质植被区也从2003年的83.76%提升至2023年的90.17%。这是生态保护与修复工程的累积效应,也与城乡人居环境整治息息相关。极稀疏植被区比例存在波动上升现象,未来需要针对这些地区因时因地制宜,在政策驱动、工程实施、产业转型和精准治理的协同合力下,推动皖西大别山区生态文明建设进入高水平新阶段。

3.1.2　空间变化特征

皖西大别山区NDVI总体呈现西北高、东南低的空间分布特征。皖西大别山区多数属于优质植被区(图3),这得益于其作为国家重点生态功能区的定位——承担长江、淮河水系水源涵养核心功能,并通过省、市、县、乡、村5级林长体系及全域网格化管理,实现生态保护责任的具体落实。西部岳西县、霍山县、

金寨县等地大部分属于优质植被区，少数属于良好植被区，与这些县区产业绿色发展升级息息相关，例如霍山县大力发展生态种植；岳西县农家乐等第三产业的迅速发展；金寨县建立光伏、风电等清洁能源基地，实现资源的循环利用。同时西北部地区人口稀少，受人类活动影响较小，陡峭的地形也极大限制了农业发展和城镇扩张。在南部宿松县和太湖县以及西部桐城市存在少数植被极度稀疏区，因为桐城市、太湖县曾存在大量采矿点，导致地表破坏严重、土壤贫瘠且保水性差，自然恢复缓慢；沿江圩区存在围湖造田与过度养殖问题，导致植被覆盖率有所下降。大别山水源地横向补偿向霍山、金寨倾斜，霍山县作为“国家重点生态功能区”获得了持续且规模较大的中央财政转移支付，宿松、太湖的湖泊湿地获得生态补偿资金主要依靠省级层面的纵向转移支付，项目资金投入不足导致退化湿地修复项目缺乏发展动力。同时东南地区地形较低，人口稠密，经济相对比较发达，是传统的农业发展区和人口集聚区，大规模的城镇化、基础设施建设和农业扩张会侵占自然植被的空间，导致NDVI值降低。未来需要加速产业转型升级以及生态补偿投入，通过制度化、法治化、规模化方法来提升植被覆盖率，实现“成本共担、效益共享”。

表3 皖西大别山区年平均NDVI等级变化面积及比例

Table 3 Area and percentage of changes in annual mean NDVI classes in Dabie Mountains of western Anhui Province

NDVI年均值	等级	2003年		2008年		2013年		2018年		2023年	
		面积	比例/%	面积	比例/%	面积	比例/%	面积	比例/%	面积	比例/%
[−1,0.05)	极度稀疏区	85.70	0.39	55.13	0.25	217.10	0.98	127.43	0.57	188.72	0.85
[0.05,0.2)	稀疏植被区	89.64	0.40	46.57	0.21	64.83	0.29	63.31	0.29	37.38	0.17
[0.2,0.4)	一般植被区	143.26	0.65	81.99	0.37	92.22	0.42	131.56	0.59	110.63	0.50
[0.4,0.7)	良好植被区	3 283.91	14.80	1 353.28	6.10	2 244.40	10.11	2 404.09	10.83	1 845.42	8.32
[0.7,1]	优质植被区	18 585.81	83.76	20 659.14	93.08	19 573.00	88.20	19 468.95	87.72	20 007.92	90.17

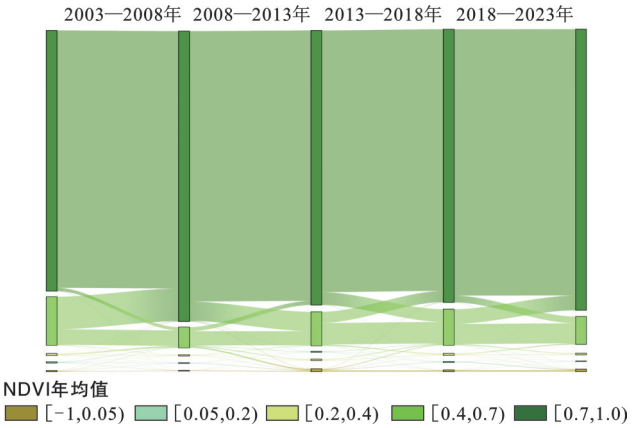


图2 皖西大别山区NDVI年均值变化转移桑基图

Fig.2 Sankey diagram of annual mean NDVI transition in Dabie Mountains of western Anhui Province

3.2 皖西大别山区NDVI变化趋势分析

3.2.1 Theil-Sen median趋势分析和Mann-Kendall显著性检验结果

如图4所示，皖西大别山区NDVI整体呈现增加趋势，南部和北部少数地区呈现极显著减少趋势。皖西大别山区中部地区NDVI变化趋势呈现极显著增加，中部地区作为大别山区的核心，成为各项保护政策的核心实施区，同时中部地区人口稀少，居民点分散，传统农业发展较慢，劳动力外流使得撂荒地自然恢复为林草地。此外长三角生态屏障建设等政策出台，旨在提升森林质量并强化水源涵养功能，中部山区作为核心实施区域，获得专项修复资金支持，其退化林修复规模位于全省前列。而北部叶集区、裕安区、金安区等地以及南部宿松县等存在连片NDVI显著减少趋势，主要是由于北部城区连片开发，叶集区、金安区作为六安市产业转移核心区，大量的林地、农田被转换为城市建设用地；南部宿松县等地围湖造田导致植被覆盖率下降，虽然在2017年拆除了境内龙感湖以及黄湖等水域的养殖围网，但是污染物仍然抑制植被恢复；同时北部等地区发展高效益农业模式，开挖沟渠破坏了原有植被，农药化肥的过度使用同样会抑制植被生长。南部和北部丘陵地带是经济作物的主要产区，将原生林转为单一的经济林也会导致NDVI值的下降。从趋势分析结果可以看出，皖西大别山区大部分NDVI呈显著增加趋势，但仍有NDVI显著减少区域零星分布，未来需严格执行《林地占补平衡实施方案》，将生态修复纳入国土空间“一张图”，并推动跨区域协同，落实“产业准入生态化、修复技术标准化、补偿机制全域化”，以实现区域发展与生态韧性的同步提升。

3.2.2 稳定性分析与未来趋势预测结果

皖西大别山区NDVI年际变化C_v值范围为0.008～3.177，总体表现为稳定性较高并存在空间分

异性。由图5可知,皖西大别山区大部分处于极低波动区,东部与南部地区存在较低波动区和中度波动区,在宿松县南部和太湖县东南部出现较高波动区和极高波动区。皖西大别山区归一化植被覆盖率的高度稳定性是因为大别山主体山势较高、地形复杂,在一定程度上为生态系统提供了相对稳定的环境,总体NDVI波动较小。同时是政策法规刚性约束、系统性生态保护工程、自然条件优势及人为干扰有效控制的综合结果。严控建设项目侵占生态林地,要求开发占地需等量优质林地置换,确保生态空间总量稳定,此类政策使得原生林保存率显著提升;“十四五”期间退化林地修复重点向混交林改造倾斜,增强生态系统抗干扰能力;皖西大别山区以天然次生林和人工林为主,森林覆盖率高,冠层郁闭度高,研究表明,林地NDVI年际波动远低于农田和草地,因其深层根系可缓冲短期气候波动。东部与南部地区存在较低波动区和中度波动区,是因为建设用地扩张侵占生态空间,导致NDVI变化趋势受到阶段性开发干扰,同时土地流转低效经营,违背了因地制宜原则。较高波动区和极高波动区的出现则是因为区域内以发展高效益农业代替自然植被,因此农地扩张和土地流转导致生态空间被挤压,加剧植被破碎化;同时城市扩张导致土地平整,将一些低覆盖灌草丛转为建设用地。未来需落实《长三角生态屏障建设方案》,以流域为单元统筹植被波动治理,推动波动区向韧性生态廊道转化,并通过强化产业生态约束、扩大生态补偿范围、提升修复与监管标准来保障实施。

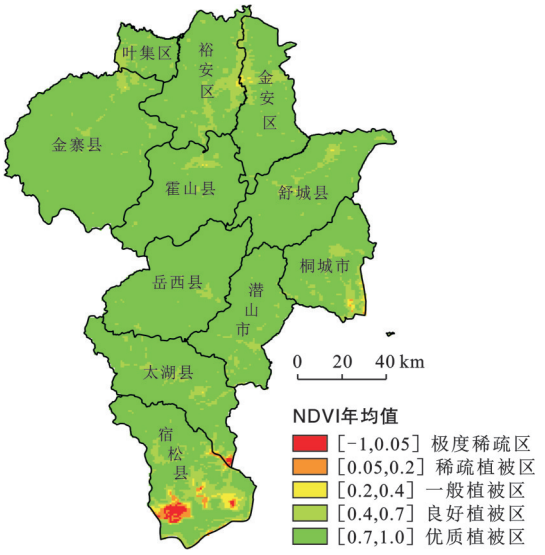


图3　皖西大别山区多年平均年最大NDVI空间分布

Fig.3　Spatial distribution of multi-year average annual maximum NDVI in Dabie Mountains of western Anhui Province

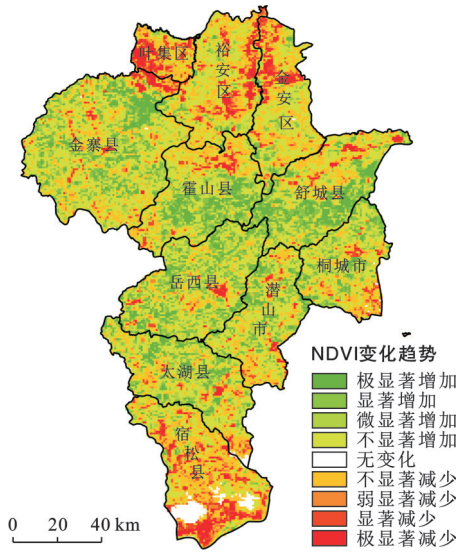


图4　皖西大别山区NDVI变化趋势

Fig.4　Trends of NDVI in Dabie Mountains of western Anhui Province

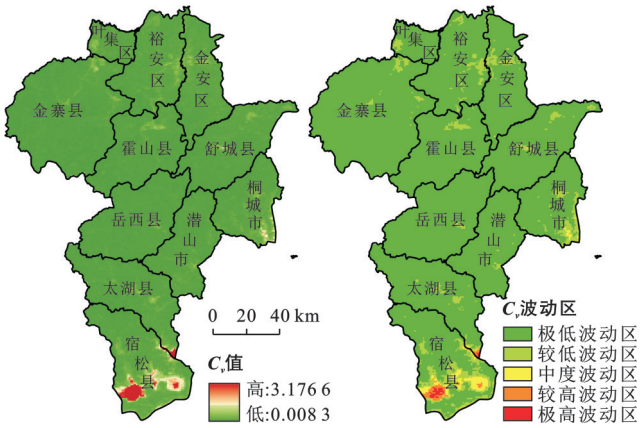


图5　皖西大别山区变异系数(C_v)值与波动区分布

Fig.5　Spatial pattern of variation coefficient (C_v) values and variability zones in Dabie Mountains of western Anhui Province

如图6所示,将皖西大别山区Hurst指数分为[0,0.5]以及[0.5,1],[0,0.5]表示研究区NDVI未来变化趋势呈反持续性,即与当前变化趋势相反;[0.5,1]则表示研究区NDVI未来变化趋势与当前基本一致,甚至会强化当前变化趋势。皖西大别山区中部核心林区未来呈现持续性改善趋势,这是由于这些地区退耕还林等生态保护政策的实施以及生态保护观念深入人心,同时生态补偿机制的不断完善也促进了植被自然恢复的正反馈循环;北部如叶集区、裕安区以及南部宿松县,东部桐城市等部分地区未来呈现反持续退化以及持续性退化,这些区域主要是因为城市开发挤压生态空间,同时政府补偿资金不足导致生态修复工作难以进行以及采矿等历史遗留问题的存在。Hurst指数是表示生态修复优先级的科学指

标。未来需要强化持续性改善趋势地区，并且对于持续性以及反持续性退化地区打破“人为干扰-自然恢复”的矛盾。

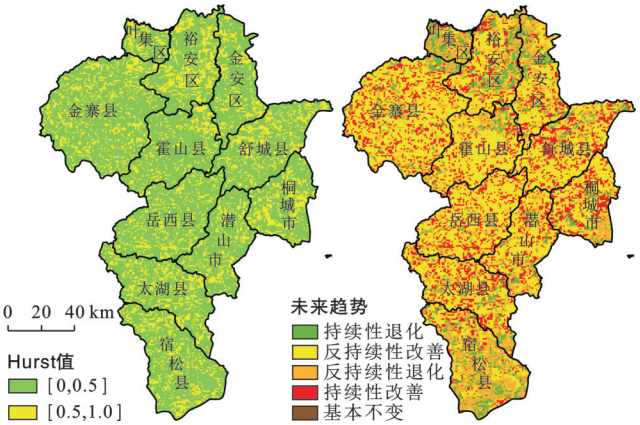


图 6 皖西大别山区 Hurst 值与未来趋势变化

Fig.6 Hurst exponent and future trends in Dabie Mountains of western Anhui Province

3.3 皖西大别山区 NDVI 变化驱动因子分析

3.3.1 因子探测分析

为探究近 10 a 来皖西大别山区 NDVI 变化驱动因素，本文以 5 a 为期，选取夜间灯光(X_1)、土地利用类型(X_2)、人口密度(X_3)、平均气温(X_4)、年降水量(X_5)、坡度(X_6)、DEM(X_7)、GDP(X_8)、路网密度(X_9)作为驱动因子，通过地理探测器模型计算得出 2013，2018 和 2023 年皖西大别山区的因子探测结果(如图 7 所示)，不同驱动因子对皖西大别山区 NDVI 格局演变的驱动作用不同，各驱动因子的影响强度呈现显著的时间异质性，且在全部观测时点均通过显著性水平($p<0.001$)检验。2013 年和 2018 年，各因子对 NDVI 变化的解释程度排序为：土地利用类型＞平均气温＞DEM＞坡度＞路网密度＞GDP＞年降水量＞夜间灯光＞人口密度。2023 年各驱动因子解释力排序为：土地利用类型＞平均气温＞DEM＞坡度＞GDP＞夜间灯光＞人口密度＞年降水量＞路网密度。其中土地利用类型 q 值最大，解释力均大于 40%。安徽省允许增减挂钩节余指标省域内调剂使用，这导致城镇建设加速扩张，沿江及城市周边区域大量耕地、林地被转为建设用地；建设用地扩张呈“网状辐射”模式，沿交通廊道延伸，直接影响植被连片性，降低 NDVI 稳定性；高标准农田建设政策推动耕地集中化，虽提升粮食产能，但导致生态边际土地(如草地、灌木林)被垦殖，局部 NDVI 下降。由此可见，土地利用结构变化会导致 NDVI 的变化。平均气温、坡度与 DEM 对 NDVI 的解释力也比较强，多项政策明确将年均温作为植被生产力评估的核心指标；坡度对于 NDVI 的变化同样很重要，例如在“长江防护林工程”中，在 15°～25°坡地实施梯田化与乔灌草立体种植使 NDVI 得到改善；而＞25°坡地通过封禁自然恢复为林草植被的重点区域；由 DEM 所衍生的海拔带作为生态保护的核心依据，低海拔区纳入城镇开发边界，中高海拔区则划为水源涵养核心区。路网密度、GDP、年降水量、夜间灯光、人口密度则对 NDVI 变化的解释力较弱。未来我们需要利用这些驱动因子对 NDVI 的正向影响，促进生物多样性，优化区域协调可持续发展。

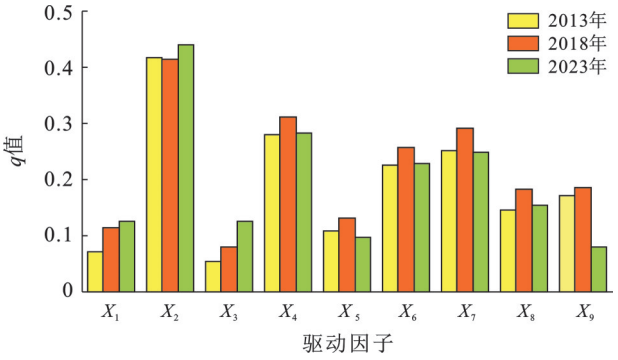


图 7 皖西大别山区 NDVI 变化单因子探测结果

Fig.7 Single-factor detection results of NDVI changes in Dabie Mountains of western Anhui Province

3.3.2 交互探测分析

通过交互探测分析不同驱动因子对 NDVI 的交互作用，结果表明，研究区两个因子交互作用下的 q 值明显大于单因子探测 q 值。由图 8 可知，2013 年平均气温和土地利用类型的交互作用最大，为 0.540 95。2013 年夏季极端高温伴随干旱现象，在相同的气候条件下，不同土地利用类型对气候的响应表现出差异，林地因水分充足受负面影响较小，而农田和草地则因水分匮乏而受较大负面影响。所以气温和土地利用类型对于 NDVI 变化的交互作用强。2018 年年降水量和土地利用类型的交互作用最大，为 0.501 60。这是因为不同土地利用类型对于水分的获取能力不同。例如林地能够凭借深层根系汲取地下水分，而农田作物主要分布在表层土壤，水分的获取完全依赖于降水。2023 年夜间灯光和土地利用类型，以及土地利用类型和人口密度之间的交互作用均为 0.573 39。夜间灯光主要反映了人类活动强度，在城镇建设用地上，夜间灯光主要来自建筑、道路，与 NDVI 呈现显著的负相关；在农田上，夜间灯光主要来自居民点、农业设施以及道路，这些人类活动为农业生产提供了支持；在生态用地上，夜间灯光通常意味着旅游开发、违规建设、道路扩张等，与 NDVI 呈现显著负相关，因此夜间灯光与土地利用类型对 NDVI 的交互作

用较强。同时人口密度与土地利用类型的交互作用体现在建设用地扩张,农田灌溉或侵占生态用地等方面。其中土地利用类型与其他所有驱动因子的交互作用值均在0.4以上,表明土地利用类型是皖西大别山区NDVI值变化的主要解释因素。

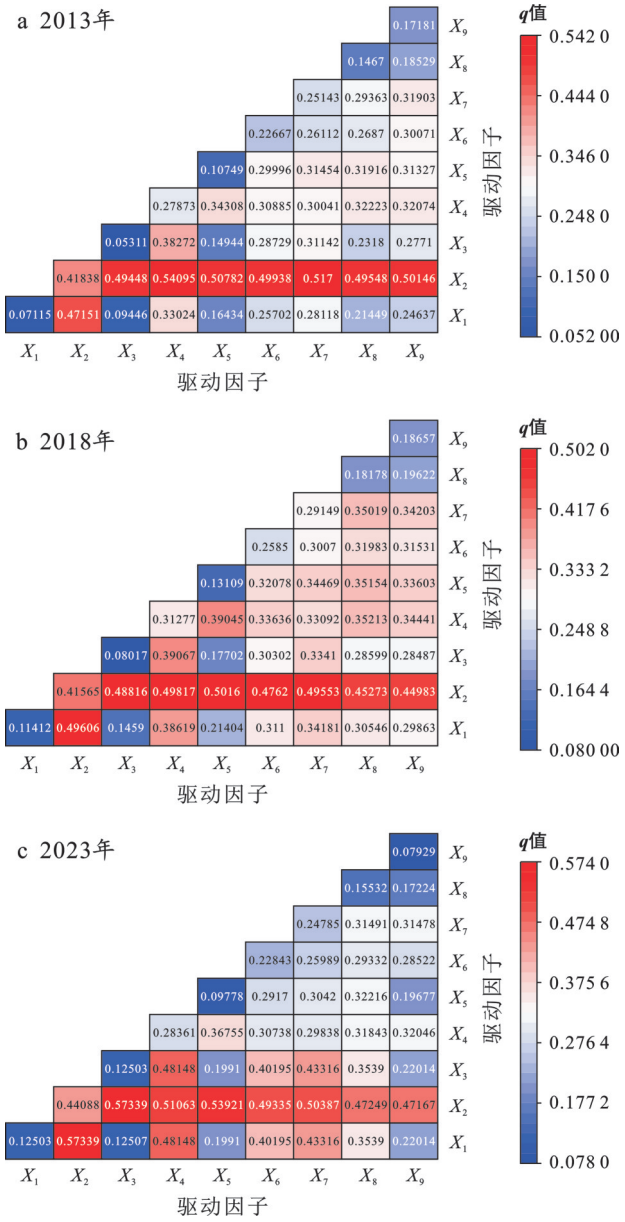


图8　皖西大别山区NDVI变化各驱动因子交互探测结果

Fig.8　Interaction detection results of driving factors of NDVI changes in Dabie Mountains of western Anhui Province

4　讨　论

纵向来看,本文发现皖西大别山区NDVI变化呈现上升的趋势,与以安徽省为研究区域的核算结论一致[31],也与国家层面的“山水林田湖草沙”一体化保护和修复工程相契合;横向来看,皖西大别山区NDVI变化受自然和社会经济因素的驱动,并且存在显著的空间分异性,这与孙语晗等[32]评估气候变化和人类活动对植被动态综合驱动机制的研究结果一致,但本文选取典型区域进行NDVI变化趋势分析,探究结果更细致,在驱动因素的选择上更加全面,结论具有指导意义。通过分析皖西大别山区NDVI变化及其驱动因素,可揭示生态演变机理,为生态环境保护与可持续发展提供科学参考,并有助于优化国土空间治理、促进区域协同。

针对该区域NDVI的未来发展与保护,本文提出以下建议:①对于NDVI呈增加趋势的地区,需要强化生态屏障功能,分区精准提升森林质量,高海拔的成熟林区需严格保护原生林,禁止商业采伐,同时设立生态监测站实时监控;前人研究表明水分保障可使NDVI年均增速提高0.8%[31],因此保障幼龄林生长需水尤为重要;强化国土空间治理,抑制城镇化发展对于NDVI的负向影响,确保绿地面积随人口密度同步提升。②对于NDVI呈下降趋势的地区,亟需遏制退化并加强生态补偿投入,设立绿色产业基金吸引社会资本;促进水资源优化配置与节水灌溉,在大于25°的陡坡耕地要逐步退耕还林还草,确不宜退耕的陡坡耕地可修建梯田拦蓄径流;开发退化区林业碳汇项目并纳入全国碳市场,推动产业与生态经济协同;建立健全智慧监测平台实时识别退化热点。通过“自然修复-政策调控-产业转型”三轨协同,为长江中下游生态屏障建设提供关键支撑。③大别山区作为长江、淮河分水岭与长三角生态屏障,其森林覆盖率和NDVI水平直接决定下游水质,并为合肥、南京、上海等30余城市提供生态水源补给,NDVI持续增长可削减洪峰流量。对于皖西大别山区NDVI退化区要进行林草补植和矿山修复,遏制NDVI下滑;推动碳汇交易实现生态价值转化;建立健全国家公园体制,保护自然生态系统。

对于NDVI变化趋势及驱动因素的分析是一项长期且复杂的任务,因此本文在很多方面仍存在进一步研究的空间。①本文主要研究了近20 a来NDVI变化趋势,未来可以结合过去NDVI变化趋势,延长时间序列,使研究结果更具代表性。②本文在NDVI变化驱动因素分析时,因素的选择仍有一定的局限性,未来仍需综合分析人口、经济、生态及社会政策等多维因素,系统剖析皖西大别山区NDVI的变化机制,以提升研究结果的科学性。

5　结　论

(1)从皖西大别山区NDVI时间变化特征看,

2000—2023年皖西大别山区NDVI整体呈波动上升趋势，年均值介于0.73～0.79，多年平均为0.77，变化速率为0.001 1/a（R^2=0.24），并于2009年达到峰值（0.793 3）。空间上呈现“西北高，东南低”的分布格局，大部分属优质植被区，其中西部岳西、霍山、金寨等县植被状况优良，南部宿松、太湖及东部桐城市零星分布有植被稀疏区。

（2）从皖西大别山区NDVI未来变化趋势看，整体呈现增加趋势，南部和北部少数地区呈现极显著减少趋势。皖西大别山区NDVI年际变化C_v值范围为0.008～3.177，总体稳定性较高并存在空间分异性，大部分处于极低波动区，东部与南部地区存在较低波动区和中度波动区，在宿松县南部和太湖县东南部出现较高波动区和极高波动区；皖西大别山区中部核心林区未来呈现持续性改善趋势；北部如叶集区、裕安区以及南部宿松县，东部桐城市等部分地区未来呈现反持续退化以及持续性退化。

（3）从皖西大别山区NDVI变化驱动因素看，单因子探测结果显示2013年和2018年，各因子对NDVI变化的解释程度排序为：土地利用类型＞平均气温＞DEM＞坡度＞路网密度＞GDP＞年降水量＞夜间灯光＞人口密度；2023年各驱动因子解释力排序为：土地利用类型＞平均气温＞DEM＞坡度＞GDP＞夜间灯光＞人口密度＞年降水量＞路网密度。不同驱动因子的交互作用最强的组合分别为2013年平均气温和土地利用类型（0.540 95）；2018年年降水量和土地利用类型（0.501 60）；2023年夜间灯光和土地利用类型以及土地利用类型和人口密度（0.573 39）。

参考文献（References）

[1] Higgins S I, Conradi T, Muhoko E. Publisher Correction: Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends [J]. Nature Geoscience, 2023,16(6):546.

[2] Pausas J G, Bond W J. On the three major recycling pathways in terrestrial ecosystems [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2020,35(9):767-775.

[3] 杜佳瑜，刘宪锋，孙高鹏，等.2003—2018年黄土高原植被光学厚度时空变化及其影响因素[J].中国沙漠，2024,44(3):222-230.
Du Jiayu, Liu Xianfeng, Sun Gaopeng, et al. Spatiotemporal variation in vegetation optical depth and its influencing factors over the Loess Plateau during 2003-2018 [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(3):222-230.

[4] 杜勇，李建柱，牛凯杰，等.1982—2015年永定河山区植被变化及对天然径流的影响[J].水利学报，2021,52(11):1309-1323.
Du Yong, Li Jianzhu, Niu Kaijie, et al. Analysis of vegetation change and its impact on natural runoff in the mountain area of the Yongding River basin from 1982 to 2015 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11):1309-1323.

[5] 兰梦瑶，周德志，关颖慧.延安市归一化植被指数时空变化及其驱动因素[J].浙江农林大学学报，2024,41(6):1293-1302.
Lan Mengyao, Zhou Dezhi, Guan Yinghui. Spatiotemporal variation and driving factors of normalized difference vegetation index(NDVI)in Yan'an City [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024,41(6):1293-1302.

[6] 赵丹，李锋，王如松.城市地表硬化对植物生理生态的影响研究进展[J].生态学报，2010,30(14):3923-3932.
Zhao Dan, Li Feng, Wang Rusong. Effects of ground surface hardening on plant eco-physiological processes in urban landscapes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14):3923-3932.

[7] Zhao Shuqing, Liu Shuguang, Zhou Decheng. Prevalent vegetation growth enhancement in urban environment [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016,113(22):6313-6318.

[8] Calfapietra C, Peñuelas J, Niinemets Ü. Urban plant physiology: Adaptation-mitigation strategies under permanent stress [J]. Trends in Plant Science, 2015,20(2):72-75.

[9] 陈燕丽，罗永明，莫伟华，等.MODIS NDVI与MODIS EVI对气候因子响应差异[J].自然资源学报，2014,29(10):1802-1812.
Chen Yanli, Luo Yongming, Mo Weihua, et al. Differences between MODIS NDVI and MODIS EVI in response to climatic factors [J]. Journal of Natural Resources, 2014,29(10):1802-1812.

[10] 姜浩，张寒博，刘诚斌，等.基于温度-降水-植被综合干旱指数的长江流域干旱时空动态监测[J].农业机械学报，2025,56(8):95-106.
Jiang Hao, Zhang Hanbo, Liu Chengbin, et al. Spatiotemporal dynamics monitoring of drought in Yangtze River basin using temperature-precipitation-vegetation integrated dryness index(TPVDI) [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8):95-106.

[11] 邓太国，胡夏嵩，刘昌义，等.基于Landsat影像的高寒矿区排土场植被覆盖度动态监测[J].水利水电快报，2025,46(4):107-113.
Deng Taiguo, Hu Xiasong, Liu Changyi, et al. Dynamic monitoring of vegetation coverage in Alpine mining dump based on Landsat imagery [J]. Express

Water Resources & Hydropower Information, 2025, 46(4):107-113.

[12] 马磊,李成,司洪涛,等.矿山公园植被恢复动态监测及影响因素:以渝北铜锣山为例[J].中国水土保持科学,2023,21(6):111-120.
Ma Lei, Li Cheng, Si Hongtao, et al. Dynamic monitoring and influencing factors of vegetation restoration on a mine park: A case study of Tongluo Mountain [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(6): 111-120.

[13] 陈志波,匡泓臻,颜雨霏,等.福建南安市地质灾害分布特征及驱动力分析[J].中国地质灾害与防治学报,2026,37(1):145-155.
Chen Zhibo, Kuang Hongzhen, Yan Yufei, et al. Distribution characteristics and driving force analysis of geological hazards in Nan'an City, Fujian Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2026,37(1):145-155.

[14] 陈珍,蔡朝朝,马楠,等.2001—2023年新疆NDVI时空格局与驱动力分析[J].干旱区研究,2025,42(5):922-932.
Chen Zhen, Cai Zhaozhao, Ma Nan, et al.Spatial-temporal pattern and driving force analysis of NDVI in Xinjiang from 2001 to 2023 [J]. Arid Zone Research, 2025, 42(5):922-932.

[15] Zhao Yu, Feng Qi. Identifying the spatiotemporal pattern and driving factors of vegetation dynamics in Shaanxi Province, China [J]. Geocarto International, 2022,37(27):17890-17916.

[16] 白舒婷,王珊,迟文峰,等.2000—2023年科尔沁沙地植被NDVI时空动态及其对气候变化和人类活动的响应[J].干旱区资源与环境,2025,39(7):74-83.
Bai Shuting, Wang Shan, Chi Wenfeng, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation NDVI and its responses to climate change and human activities in the Horqin sandy land from 2000 to 2023 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025, 39(7): 74-83.

[17] 封建民,郭玲霞,刘宇峰,等.2000—2021年泾河流域植被NDVI变化及影响因素[J].水土保持研究,2025,32(1):249-256.
Feng Jianmin, Guo Lingxia, Liu Yufeng, et al. The spatiotemporal changes and its influencing factors of vegetation NDVI in the Jinghe River basin from 2000 to 2021 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(1):249-256.

[18] 孙炼.基于NDVI的四川省植被变化动态监测及驱动因素分析[J].西南农业学报,2023,36(5):1082-1089.
Sun Lian. Dynamic monitoring and driving factor analysis of vegetation change in Sichuan Province [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(5):1082-1089.

[19] 钱贞兵,潘成荣,徐升,等.安徽大别山区生态质量评价与监管格局构建[J].中国环境监测,2024,40(增刊1):30-39.
Qian Zhenbing, Pan Chengrong, Xu Sheng, et al. Ecological quality evaluation and suggestions on the construction of regulatory structure in the Dabie Mountain area of Anhui Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2024,40(S1):30-39.

[20] Jiang Weiguo, Yuan Lihua, Wang Wenjie, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River basin [J]. Ecological Indicators, 2015, 51:117-126.

[21] 蔡博峰,于嵘.基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J].遥感学报,2009,13(6):1170-1186.
Cai Bofeng, Yu Rong. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6):1170-1186.

[22] Theil H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis [M] //Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 1992:345-381.

[23] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968,63(324):1379-1389.

[24] McLeod A I. Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test [J]. R Package Kendall, 2005,602:1-10.

[25] Tošić I. Spatial and temporal variability of winter and summer precipitation over Serbia and Montenegro [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 77(1): 47-56.

[26] 刘星宇,张美玲,马子茗.甘肃省1981—2020年植被覆盖度时空变化特征及气候因子分析[J].环境科学,2025,46(12):7831-7840.
Liu Xingyu, Zhang Meiling, Ma Ziming. Spatiotemporal changes in vegetation cover and analysis of climatic factors in Gansu Province from 1981 to 2020 [J]. Environmental Science, 2025,46(12):7831-7840.

[27] 徐德华,刘强,李端,等.1986—2023年吕梁山区归一化植被指数(NDVI)动态及驱动力[J].中国沙漠,2025,45(5):78-91.
Xu Dehua, Liu Qiang, Li Duan, et al. Changes and driving forces of NDVI in the Lvliang Mountain area from 1986 to 2023 [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(5):78-91.

(下转第408页)