DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.06.005

戚海梅,郑培龙,王云琦,等,双因子协同驱动近 21 年三峡库区 NDVI 时空演变[J].水土保持学报,2024,38(6);224-233.

QI Haimei, ZHENG Peilong, WANG Yunqi, et al. The spatio-temporal evolution of NDVI in the Three Gorges Reservoir Area driven by the synergistic effect of two factors over the past 21 Years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):224-233.

双因子协同驱动近 21 年三峡库区 NDVI 时空演变

戚海梅1,郑培龙2,王云琦1,王佳妮1,李成3,张晓明4

(1.北京林业大学水土保持学院重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083;2.北京水保生态工程咨询有限公司,北京 100055;3.重庆地质矿产研究院自然资源部重庆典型矿区生态修复野外科学观测研究站,重庆 401120;4.中国水利水电科学研究院,北京 100083)

摘 要:[目的] 为明确三峡库区植被时空演变特征,定量分析植被与气候、地形及人类活动等各影响因子的关系。[方法] 基于归一化植被指数(NDVI)数据,采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、Hurst 指数分析、地理探测器模型等方法,探究 2000—2020 年三峡库区 NDVI 时空分布特征及其驱动机制。[结果](1)三峡库区 2000—2020 年 NDVI 变化整体呈上升趋势,平均变化率 2.89×10⁻³/a, NDVI 值呈由西南向东北递增的规律。(2)高程、人口密度和地表温度等因子较好地解释了 NDVI 的可变性,解释力均>0.4。(3)高程与夜间灯光是三峡库区 NDVI 的主导交互因子,q值为 0.641,交互结果呈非线性加强或双因子协同加强,双因子对 NDVI 变化的解释力始终大于单因子对 NDVI 变化的解释力。[结论]研究结果为三峡库区生态环境保护政策的制定及生态可持续发展等提供科学支撑。

关键词:三峡库区; NDVI; 时空分布; 地理探测器; 驱动机制

中图分类号:Q948.12 文献标识码:A 文章编号:1009-2242-(2024)06-0224-10

The Spatio-temporal Evolution of NDVI in the Three Gorges Reservoir Area Driven by the Synergistic Effect of two Factors over the Past 21 Years

QI Haimei¹, ZHENG Peilong², WANG Yunqi¹, WANG Jiani¹, LI Cheng³, ZHANG Xiaoming⁴

(1. Beijing Forestry University School of Soil and Water Conservation, Three-gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, Beijing 100083, China; 2. Beijing Water Conservation Ecological Engineering Consulting Co., Ltd, Beijing 100055, China; 3. Ministry of Natural Resources Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Observation and Research Station of Ecological Restoration for Chongqing Typical Mining Areas,

Chongqing 401120, China; 4. Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To clarify the spatio-temporal characteristics of vegetation evolution in the Three Gorges Reservoir Area, and to quantitatively analyze the relationships between vegetation and key determinants, including climate, terrain, and human activities. [Methods] Based on Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) data, a suite of analytical techniques was employed, including Theil-Sen Median Trend Analysis, the Mann-Kendall Test for significance, Hurst Exponent Analysis, and Geographic Detector Modeling, to investigate the spatio-temporal patterns and driving forces of NDVI within the Three Gorges Reservoir Area from the year 2000 to 2020. [Results] (1) The change of NDVI in the Three Gorges Reservoir Area showed an overall ascending trend from 2000 to 2020, with a mean annual rate of increase at 2.89×10⁻³/a, and the value of NDVI increased from the southwestern to the northeastern parts of the area. (2) Elevation, population density, and surface temperature are pivotal factors that significantly account for the variability observed in NDVI, with an explanatory power for each exceeding the threshold of 0.4. (3) Elevation and nocturnal illumination are the key interactive drivers of NDVI in the Three Gorges Reservoir Area, with a pronounced q value of 0.641.

收稿日期:2024-05-15 **修回日期:**2024-07-10 **录用日期:**2024-07-20 **网络**

网络首发日期(www.cnki.net):2024-10-31

资助项目:国家自然科学基金项目(32371963);重庆市人才项目一博士直通车项目(CSTB2022BSXM—JCX0156)

第一作者:戚海梅(2000—),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持工程研究。E-mail:1975409453@qq.com

通信作者:王云琦(1979一),女,教授,博士生导师,主要从事水土保持工程研究。E-mail:wangyunqi@bjfu.edu

Their interplay showed a nonlinear or synergistic enhancement, and the integrated explanatory power of the two factors on NDVI changes is always greater than that of single factors. [Conclusion] The results of this study can offer a robust scientific support for the formulation of ecological and environmental conservation policies and for sustainable ecological development within the Three Gorges Reservoir Area.

Keywords: Three Gorges Reservoir Area; Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); spatio-temporal distribution; geodetector; driving mechanism

Received: 2024-05-15 **Revised**: 2024-07-10 **Accepted**: 2024-07-20 **Online**(www.cnki.net): 2024-10-31

植被作为陆地生态系统的关键组成部分,对于维 持全球碳循环的平衡、降低温室气体浓度及保持生物 多样性具有不可替代的作用[1]。植被既是气候变化的 承受者,也是气候变化的反馈者。已有研究[2]表明,植 被覆盖变化主要受气候变化和人类活动等驱动因子的 共同影响。AHMAD等[3]研究得出,NDVI与温度呈 负相关,而 LU 等[4]研究表明,NDVI 与温度呈正相关。 降水与植被生长之间的关系呈现出地理上的异质性。 在干旱地区,植被覆盖率通常与降水量呈正相关;在湿 润地区,强烈的降雨有时对植被状况产生不利影 响[5-6]。除气候因子,人类活动也是影响植被变化的一 个重要因子。自20世纪90年代起,中国实施包括天 然林保护工程、退耕还林还草工程及喀斯特地区石漠 化治理工程在内的多项生态修复计划[7],在生态修复 方面投入巨大的人力和财力,显著提升植被覆盖度和 生态系统的整体状况。这些因子可能独立作用或共 同作用,塑造着植被动态的发展方向。目前各驱动因 子对植被的影响重要性尚不明确,识别出主导植被变 化的因子对于理解当地生态系统与外部干扰之间的 相互作用至关重要。

植被指数作为表征地表植被变化的关键参数,主 要包括归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)[8]、增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)[9] 和叶面积指数(leaf area index, LAI)[10]等。由于 NDVI 能高效地反映特定 区域植被覆盖程度与生长状态,已被广泛应用于植被 生长状况和覆盖变化监测[11]。在研究驱动因子对 NDVI 影响的统计方法中,线性回归和残差分析等方 法已被广泛应用于不同尺度的植被动态分析。在全 国尺度上,金凯等[12]通过变化趋势分析和多元回归 残差分析,研究了中国 NDVI 变化的基本特征及气 候变化和人类活动对其的影响。涂又等[13]运用多元 线性回归模型和残差分析等方法,对大尺度上的植被 进行研究。在区域尺度上,研究者通常选择生态脆弱 地区或快速发展的城市作为研究对象。田智慧等[14] 利用 Mann-Kendall 检验、Theil-Sen 斜率估算、相关 性分析和残差分析等方法,研究了黄河流域的 NDVI 植被变化;于璐等[15]采用相关分析和趋势分析方法,

研究自然因素和人类活动对京津风沙源区 NDVI 时空变化的影响。尽管已有大量研究关注影响 NDVI 变化的因子,但对三峡库区的研究相对较少。在探讨 NDVI 与驱动因子之间的关系时,以上方法受限于各因子之间存在的非线性关系,难以深入量化植被对这些驱动因子的复杂响应。地理探测器作为一种先进的工具,能测试响应变量与解释变量之间的耦合关系,并更有效地量化各种驱动因子及其对 NDVI 的非线性影响。

三峡库区作为长江中下游地区生态环境的重要保护区,库区的生态环境质量对动植物的生存和发展至关重要,同时也是保障防洪、航运、发电和灌溉等功能的关键。因此,定量分析 NDVI 与各驱动因子的关系对三峡库区生态保护和可持续发展具有重要的实践价值。鉴于此,本研究利用 2000—2020 年的 NDVI数据,结合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、Hurst 指数分析及地理探测器模型等方法,对三峡库区 NDVI 时空演变特征及其驱动机制进行定量研究。研究重点在于分析各驱动因子在 NDVI变化过程中的贡献大小,旨在为三峡库区的生态环境保护政策制定和生态可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区(28°30′20″-31°44′43″N,105°48′25″-111°40′14″E)作为长江流域的关键生态经济区域,具有独特的生态功能和重要的战略地位。总面积约5.8×10⁴km²,涉及湖北省和重庆市的25个区县,位于大巴山褶皱带、川东平行岭谷和川鄂湘黔隆起褶皱带交汇处,以山地和丘陵为主(图1)。库区自然资源丰富,森林覆盖率约为48%,气候类型为典型的亚热带湿润季风气候,多年平均气温15~19℃,年平均降水量1000~1200mm。土壤类型多样,包括黄棕壤、黄褐土、棕壤、暗棕壤、石灰(岩)土、紫色土、黄壤、红壤、粗骨土、山地草甸土和水稻土等。库区植被类型丰富,包括针叶林、阔叶林、灌丛、草地及栽培植被等。2020年,三峡库区的GDP为9691.5亿元,人口为1561万人,人口密度为269人/km²,显著高于中国的平均水平。

1.2 数据来源与处理

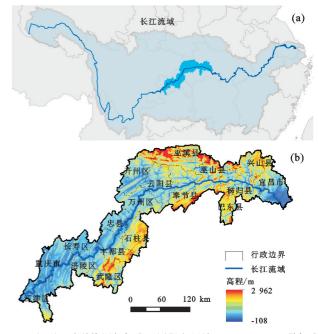
研究所选驱动因子分为 3 类:气候因子、地形因子和人类活动因子。气候因子包括降水量、气温、日照时间、地表温度、太阳辐射 5 个因子,地形因子包括高程、坡向、坡度、距水体距离、土壤类型 5 个因子,人类活动因子包括人口密度、夜间灯光、距建成区距离、距道路距离、土地利用类型、植被类型 6 个因子(表1)。本研究根据自然间断点法将降水量、气温、日照时间、地表温度、太阳辐射、高程、坡度、距水体距离、人口密度、夜间灯光、距建成区距离、距道路距离分为6类,坡向、土地利用类型、植被类型、土壤类型根据其固有属性分别划分为9类、6类、6类和12类(图2)。本文选取栅格为基本研究单元,为统一数据尺度,将所有驱动因子的评价单元尺寸定义为30 m×30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验 Theil-Sen Median 趋势分析又称 Sen 斜率估计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,计算高效,对于测量误差和离群数据不敏感,可用于长时间序列数据的趋势分析[16]。计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall_j > i$$
 (1)

式中: x_i 和 x_j 分别为第 i 和第 j 年的 NDVI 值。当 β 0 时,NDVI 的变化为上升趋势,当 β < 0 时,则为下降趋势。



注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1822 号标准 地图制作,底图边界无修改。

图 1 三峡库区地理位置及高程

Fig.1 Location and elevation of the Three Gorges Reservoir Area

表 1 数据来源与说明 Table 1 Data sources and descriptions

 类型	 指标因子		 数据说明
——————		· · · ·	
	降水量 (X_1)	https://data.tpdc.ac.cn/	2000—2020 年逐月降水量数据集,分辨率为 1 km
	气温 (X_2)	https://data.tpdc.ac.cn/	2000—2020 年逐月平均气温数据集,分辨率为 1 km
气候因子	日照时数 (X_3)	http://www.resdc.cn/	2000-2020 年各区县的平均日照时间数据
	地表温度 (X_4)	http://www.resdc.cn/	2000-2020 年地表温度数据集,分辨率为 1 km
	太阳辐射(X_5)	https://data.tpdc.ac.cn/	2000—2010 中国 716 个气象站太阳辐射日平均值数据集
	高程(X6)	https://www.gscloud.cn/	分辨率 30 m
	坡度(X7)	_	_
地形因子	坡向(X8)	_	_
	土壤类型(X9)	http://www.resdc.cn/	中华人民共和国土壤图,比例尺1:100万
	距水体距离(X ₁₀)	http://www.resdc.cn/	2020年水系数据,分辨率为1km
	人口密度 (X_{11})	https://www.worldpop.org/	2000-2020 年人口密度栅格数据集,分辨率为 1 km
	夜间灯光 (X_{12})	http://www.resdc.cn/	2000-2020 年夜间灯光栅格数据集,分辨率为 1 km
1 米江二	距建成区距离 (X_{13})	http://www.resdc.cn/	2020年建成区数据,分辨率为1km
人类活动	距道路距离 (X_{14})	https://www.openstreetmap.org/	2018年道路数据,分辨率为1km
	土地利用类型(X ₁₅)	http://www.resdc.cn/	2020年土地利用类型数据,分辨率为 30 m
	植被类型(X16)	http://www.resdc.cn/	中国植被类型空间分布数据,比例尺1:100万
NDVI	NDVI h	ttps://search.earthdata.nasa.gov/searc	ch 2000—2020 年最大值合成产品,分辨率为 1 km

Mann-Kendall 显著性检验又称 MK 检验,是一种非参数的时间序列趋势性检验方法,适用于长时间序列数据的趋势显著性检验[17]。当 Z 的绝对值大于

1.65, 1.96, 2.58 时, 表示趋势分别通过置信度为 90%, 95%和 99%的显著性检验, 本文采用通过 95%的信度检验。

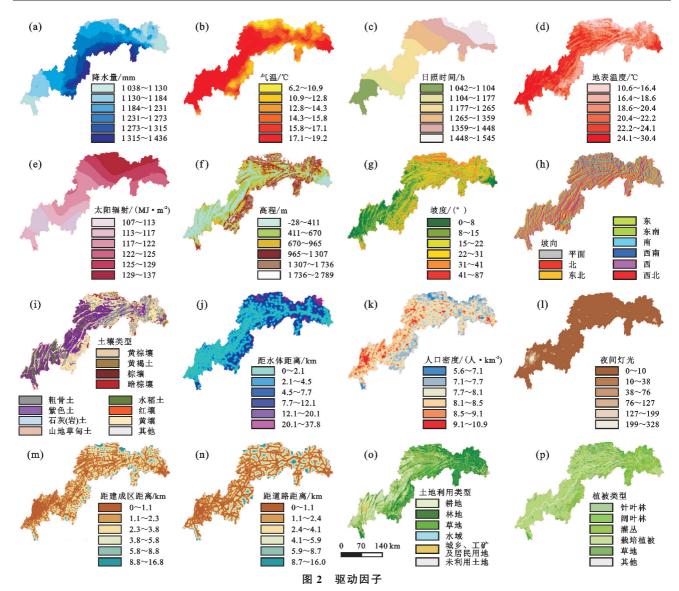


Fig.2 Driving factors

1.3.2 Hurst 指数 Hurst 指数是由 HURST^[18]开创,随后由 MANDELBROT 等^[19]改进。Hurst 指数表现与时间序列的相关性,能反映序列未来变化趋势,具有与时间相关的长记忆性,适用于评估长时间序列数据变化的持续性。计算步骤为:

- (1)将长时间序列 $\{\xi_{(\tau)}\}\ (\tau=1,2,\cdots,n)$ 划分为 τ 个子序列 $\{\xi_{(\tau)}\}\ (t=1,2,\cdots,\tau)$ 。
 - (2) 定义时间序列的平均序列。

$$\overline{\boldsymbol{\xi}_{(\tau)}} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \boldsymbol{\xi}_{(\tau)} \left(\tau = 1, 2, \dots, n \right)$$
 (2)

(3)计算逐像元的累积偏差。

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{t=1}^{\tau} (\xi_{(t)} - \overline{\xi_{(\tau)}}) (1 \leqslant t \leqslant \tau)$$
 (3)

(4)定义极差范围。

$$R_{(\tau)} = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)} (\tau = 1, 2, \dots, n)$$

(5)定义一个标准差序列。

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\boldsymbol{\xi}_{(t)} - \boldsymbol{\xi}_{(\tau)})^{2}\right]^{\frac{1}{2}} (\tau = 1, 2, \dots, n)$$

$$(5)$$

(6) 计算 Hurst 指数。

$$\frac{R_{(\tau)}}{S_{(\tau)}} = (c\tau)^H \tag{6}$$

(7) Hurst 指数通过拟合方程得到。

$$\ln\left(\frac{R}{S}\right)_{n} = \alpha + H \times \ln n \tag{7}$$

式中:H 为 Hurst 指数,H 范围为[0,1];c 为常数; α 为截距。若 H=0.5,表明未来时间序列是随机变化的;若 H>0.5,表明 NDVI 未来时间序列的变化与研究期间有同样的趋势;若 H<0.5,表明 NDVI 未来时间序列的变化与研究期间有相反的趋势。

1.3.3 地理探测器模型 地理探测器是基于空间数据的分层异质性,为量化空间异质性(SSH)提供了一种统计分析方法^[20]。

(4)

(1)因子探测。探测因变量Y的空间异质性和自变量X对Y空间分异的解释程度。q值越大,NDVI空间异质性越明显,X对 NDVI的解释力越强。

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}}$$
 (8)

$$SSW = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2, SST = N\sigma^2$$
 (9)

式中:q 为自变量 X 对因变量 Y 的解释力,范围为[0,1];研究区域分为 $h=1,2,\cdots,L$ 区域;N 分别为 h 层和整个区域的单位数; σ_h^2 和 σ^2 别为 h 层和区域的 Y 值的方差;SSW 和 SST 分别为层内方差和区域总方差之和。

(2)交互作用。不同驱动因子之间交互之后解释 Y 的空间分异的程度,比较单、双因子的 q 值及 2 个因子相互作用的和,判断它们对 NDVI 空间分异的解释力是增强还是减弱(表 2)。

表 2 2 个自变量对因变量交互作用的类型

Table 2 Types of interaction between two covariates

判断	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1),q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1),q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max [q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

2 结果与分析

2.1 NDVI 时空变化特征

2.1.1 时间变化特征 库区 2000—2020 年 NDVI 变化整体呈上升趋势,以 0.002 1/a 的速率增长,趋势线决定系数 (R^2) 为 0.568,拟合可靠性较高 (图 3)。随着人们对环境保护的意识逐渐增强,2000—2020年 NDVI 值上升 0.046,在 2012年到达峰值 0.748。在此过程中,NDVI 变化呈波动式上升,与我国实施的

退耕还林还草等政策有关,2010年退耕还林还草政策基本落实,NDVI逐渐增加。2001年、2006年、2008年、2011年和2013年的NDVI值相对较低,2016—2018年库区NDVI值连续3年减少,可能与西南地区严重于旱有关。

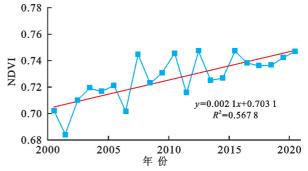


图 3 2000-2020 年三峡库区 NDVI 年际变化

Fig.3 Interannual variation of NDVI in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

2.1.2 空间分布特征 为分析三峡库区 NDVI 空间格局,逐像元尺度上计算 2000—2020 年三峡库区多年平均 NDVI 值(图 4)。从整体来看,三峡库区 NDVI 表现明显的空间异质性,平均变化率为 2.89×10^{-3} /a, NDVI 值从西南至东北呈阶梯状增加,各个区县的 NDVI 值不断增大,变化率最高至 26.74×10^{-3} /a,库区的 NDVI 值与高程等地形条件有关。三峡库区的西南部和东部地区 NDVI 呈下降趋势,变化率低至 -25.26×10^{-3} /a,主要分布在重庆市和宜昌市主城区。2000—2020 年 NDVI 值为 $0.6 \sim 0.8$, $0.2 \sim 0.4$ 和 <0.2 所占比例分别下降 38.49%, 0.25%和 0.01%; NDVI 值为 $0.4 \sim 0.6$ 和>0.8 所占比例分别增加 0.03%和 38.72%(表 3), NDVI 值的变化主要为 $0.6 \sim 0.8$ 向>0.8 的区域转变。

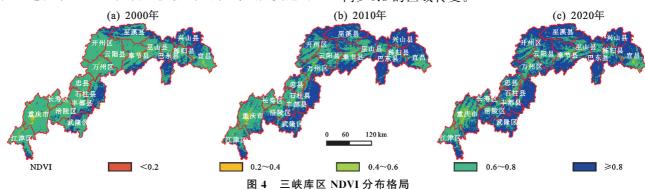


Fig.4 Distribution patterns of NDVI in the Three Gorges Reservoir Area

为探究多年 NDVI 变化趋势及显著性,进一步对 2000—2020 年三峡库区 NDVI 进行 Sen 斜率估计及 MK 检验。根据计算结果和库区实际情况,将库区内 NDVI 变化趋势划分为 5 种类型(图 5b)。三峡库区 NDVI 变化类型呈"中部增加,两边减少"的分布,显著增加,占 75.41%(表 4),主要分布于武隆区、

丰都县、石柱县、忠县、万州区、开州区、云阳县、巫溪县、奉节县、巫山县、巴东县、兴山县及秭归县等区域;显著减少和不显著减少的区域仅占5.70%,主要分布于宜昌城区、江津区、重庆城区、长寿区、涪陵区等人类活动强度较大的县城及周边区域;不显著增加的区域占15.01%,主要分布在宜昌城区、江津区、重庆城

区、长寿区、涪陵区、丰都县、忠县、万州区、开州区、巫山县、巴东县、秭归县、兴山县等区域。

表 3 2000-2020 年三峡库区 NDVI 动态变化
Table 3 Dynamic changes of NDVI in the Three Gorges
Reservoir Area from 2000 to 2020 %

NDVI	2000年	2010 年	2020年	2000—2020 年
NDVI	占比	占比	占比	占比变化
<0.2	0.03	0.05	0.02	-0.01
$0.2 \sim 0.4$	0.62	0.56	0.38	-0.25
$0.4 \sim 0.6$	2.83	1.97	2.86	0.03
$0.6 \sim 0.8$	72.46	43.40	33.97	-38.49
≥0.8	24.06	54.01	62.78	38.72

2.2 NDVI 持续性变化

将 Sen 斜率估计和 MK 趋势检验的结果与 Hurst 指数进行叠加分析(图 6b),划分为持续显著 增加、持续不显著增加、不持续增加、稳定、不持续减少、持续不显著减少及持续显著减少7种变化趋势。 库区未来 NDVI 变化主要表现为不持续增加,占比76.68%(表4)。从空间分布来看,NDVI 持续增加区零星分布于库区,占比13.72%,主要分布在宜昌城区、兴山县、秭归县、巴东县、石柱县、丰都县和武隆县;稳定不变区域占3.89%,分布于重庆城区、江津区、涪陵区和宜昌城区等;持续显著减少与持续不显著减少占比分别为1.05%和0.99%,主要分布于重庆城区和宜昌城区,表明城市化进程的快速推进可能影响城市周围及内部绿化面积被侵占。密集度较高的城镇地区受人类活动的干扰较严重,易造成植被破坏,这类地区仍然需要当地各级政府和生态保护等相关部门密切关注。

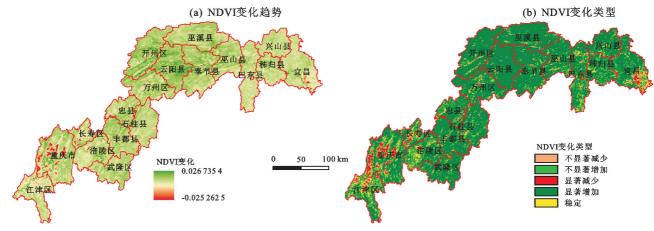


图 5 2000-2020 年 NDVI 变化趋势及类型

Fig.5 Variation trend and type of NDVI in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020 表 4 2000—2020 年三峡库区 Hurst 指数分布及 NDVI 变化持续性

Table 4 Hurst index distribution and NDVI change in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

NDVI 变化	Z	趋势特征	占比/%	Hurst 指数	变化类型	占比/%
≥0.000 5	≥1.96	显著增加	75.41	>0.5	持续显著增加	11.10
≥0 . 000 5	$-1.96\sim 1.96$	不显著增加	15.01	>0.5	持续不显著增加	2.62
≥0.000 5				<0.5	不持续增加	76.68
$-0.0005 \sim 0.0005$		无变化	3.89		稳定	3.89
<-0.000 5				<0.5	不持续减少	3.66
<-0.000 5	$-1.96\sim 1.96$	不显著减少	3.46	>0.5	持续不显著减少	0.99
<-0.000 5	≤ -1.96	显著减少	2.24	>0.5	持续显著减少	1.05

2.3 NDVI 驱动机制探测

2.3.1 单因子对 NDVI 的影响 采用因子探测计算 出各因子对 NDVI 的解释力(q)(表 5)。结果显示除 坡向 (X_8) 外,其他 15 种环境因子均通过显著性检验 (p < 0.05)。其中,高程的 q 值最大为 0.501,表明高程 是影响三峡库区 NDVI 分布的主要因素;人口密度和 地表温度对 NDVI 分布的解释力达到 40%以上,q 值 分别为 0.422 和 0.415;气温、土壤类型、距水体距离、距 建成区距离和土地利用类型的解释力>30%;夜间灯

光影响陆表和大气之间的能量及物质交换,影响了地表的能量平衡,对区域气候变化产生重要影响,从而影响植被的生长;降水量、太阳辐射和坡向对 NDVI 分布的解释力<10%,表明降水量、太阳辐射和坡向因子对三峡库区 NDVI 分布的贡献较小。

2.3.2 双因子交互作用对 NDVI 的影响 采用交互 探测评估双因子对 NDVI 变化的解释力是否增强,单 一的变量不足以解释 NDVI 的空间分异,需要考虑各 环境因素的交互作用对植被变化的影响。探测结果 (图 7)表明,降水量与日照时间、太阳辐射、坡度、坡向相互作用,太阳辐射与日照时间、坡向相互作用,坡向与日照时间、土壤类型相互作用的类别为非线性增强,其余交互作用类别为双因素增强类别。高程与其余因子交互作用最强,解释力均为50%以上;其次是人口密度和地表温度2个因子与其余因子的交互作用,解释力均在40%以上。高程与夜间灯光(0.641)是三峡库

区 NDVI 的主导交互因子,对库区内 NDVI 变化的解释力最强;其次为高程与土地利用类型(0.635)和高程与人口密度(0.602)。研究结果表明,任意 2 个因子的叠加均增强单一因子对地区植被 NDVI 的解释能力,因子交互作用表现为非线性加强或双因子的协同加强,没有相互独立的关系,表明 NDVI 变化是由多种因素共同作用的结果。

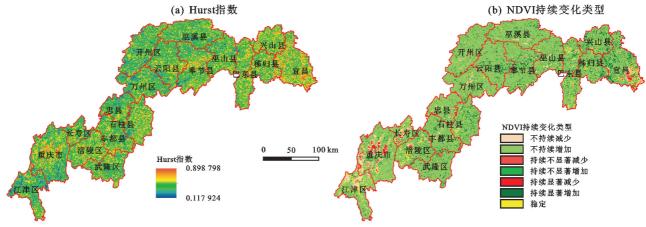


图 6 2000-2020 年 NDVI Hurst 指数及持续变化类型

Fig.6 NDVI Hurst index and type of continuous change from 2000 to 2020

Table 5 q value of various factors in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

2000-2020 年三峡库区各因子的 q 值

指标因子	q	Þ
降水量(X ₁)	0.087	O
气温 (X_2)	0.370	O
日照时数 (X_3)	0.116	0
地表温度 (X_4)	0.415	0
太阳辐射 (X_5)	0.072	0
高程 (X_6)	0.501	0
坡度(X7)	0.111	0
坡向 (X_8)	0.003	0.108
土壤类型 (X_9)	0.312	0
距水体距离(X ₁₀)	0.318	0
人口密度 (X_{11})	0.422	0
夜间灯光(X12)	0.297	0
距建成区距离 (X_{13})	0.355	0
距道路距离 (X_{14})	0.156	0
土地利用类型 (X_{15})	0.348	0
植被类型(X16)	0.199	0

3 讨论

3.1 NDVI 时空变化分析

本研究表明,三峡库区 NDVI 呈波动性上升的 趋势,该研究结果与以往研究相印证。陈田田等^[21] 研究表明,2000—2019 年,三峡库区的 NDVI 同样表

现出波动增长的趋势。在时间尺度上,三峡库区NDVI 在 2000-2020 年以 0.002 1/a 的速率增长,这与徐勇 等[22]研究结果一致。易浪等[23]研究表明,长江流域 NDVI 增长速率为 0.003 4/a,这一增长速率明显差距 归因于本文以 2000-2020 年 NDVI 最大值时间序列 为研究数据,易浪等[23] 是以长江流域生长季的 NDVI 为研究数据。库区 2012 年达到 0.748 的峰值,2001 年、2006年、2008年、2011年、2013年和2016年的 NDVI 分布相对较低,主要受到 2001 年、2006 年、 2011年、2013年和2016年的严重干旱[24]和2008年 的低温冰雪天气等极端气候事件的影响[25]。在空间 尺度上, NDVI 呈上升趋势的区域主要分布在万州 区、开州区、云阳县、巫溪县、奉节县、巫山县等区域。 这一增长趋势可以归因于2个主要因素:一是"十一 五"期间川渝地区实施的一系列生态工程,如退耕还 林还草、水土流失防护和城乡绿化等[26];二是重庆地 区气候变化的多样性,有利于农林业的发展,促进植被 的恢复和改善。在 75.41%的区域中, NDVI 表现出显 著的增加趋势,而显著减少的区域仅占 2.24%,主要位 于城镇地区; Hurst 指数为 0.117~0.899, 平均值为 0.411,表明 2000—2020 年三峡库区的 NDVI 变化具有 较好的持续性。重庆作为退耕还林还草政策的主要实 施地区,自2000年以来已开展2轮生态保护工程建 设,显著改善省内的生态环境,并在生态和经济效益上

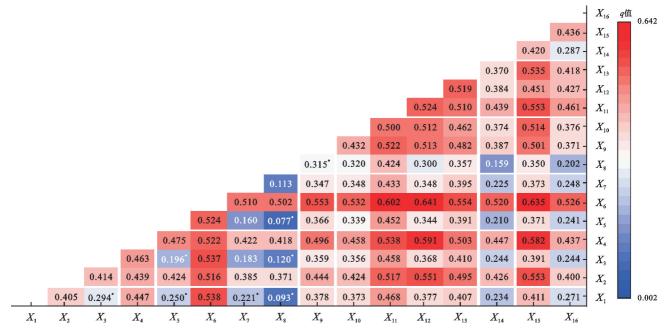
取得积极成果。

3.2 NDVI 驱动因子分析

高程、人口密度和地表温度是影响三峡库区 NDVI 变化的关键因素。随着海拔的升高, NDVI 值 呈阶梯状增加。这种分布与区域的海拔高度密切相关,中部和东北部的高海拔地区植物多样性丰富,人类活动较少,生态系统更为稳定。李建国等[27]的研究指出,地形因素是三峡库区植被生长状况的决定性 因素,与本研究结果一致。人口密度对库区 NDVI 分布具有显著的解释力,与西部农村改革和城乡发展不平衡导致的人口迁移有关,迁移改变了区域人口密度,进而影响土地利用和植被生长[28]。本研究发现,气温对 NDVI 变化的解释力为 0.370,且 NDVI 与气温呈负相关,是由于温度达到植物生长的阈值,导致

土壤水分蒸发加速,抑制植物生长^[29]。NDVI与降水之间的关系通常比温度弱^[30],与本研究发现的降水量对NDVI的解释力比气温对NDVI的解释力小的结果相吻合,是由于在亚热带地区,光照和热量的自然条件限制,以及相对湿润的气候降低植被对降水的敏感性,因此,降水并非主导植被生长的因素。

交互作用探测结果表明,三峡库区 NDVI 空间分异主要受高程与夜间灯光、高程与人口密度及高程与土地利用类型的共同作用,其相互作用 q 值均 > 60%,表明库区主要受地形因子和人类活动共同的影响。这是由于位于长江中上游的三峡库区海拔较高,长江中游各流域单元地处"第二级阶梯"到"第三级阶梯"的过渡带,地形起伏较大,人类活动强度逐渐加强,对 NDVI 分布产生显著影响[22]。



注:*表示2个因子的交互作用为非线性增强,其余未标注的都表示作用类型为双因子增强。

图 7 2000-2020 年三峡库区各环境因子交互探测解释力

Fig.7 Explanatory power of interaction detection of various environmental factors in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

4 结论

(1)三峡库区 2000—2020 年 NDVI 变化呈波动式上升,平均变化率 $2.89 \times 10^{-3}/a$,变化率最高至 $26.74 \times 10^{-3}/a$,变化率最低至 $-25.26 \times 10^{-3}/a$ 。 NDVI 值从西南至东北阶梯状变大,主要为 $0.6 \sim 0.8$ 向 $\geqslant 0.8$ 的区域转变。

(2)高程、人口密度和地表温度均是影响三峡库区 NDVI 变化的主要因素,q值分别为 0.501,0.422 和 0.415。降水量、太阳辐射和坡向对 NDVI 分布的解释 力<10%,对三峡库区 NDVI 分布的贡献较小。

(3)驱动因子对 NDVI 的影响存在交互作用,因 子交互结果呈现为非线性加强或双因子协同加强,双 因子对 NDVI 的解释力始终大于单因子对 NDVI 的解释力。高程与夜间灯光(0.641)、高程与土地利用类型(0.635)和高程与人口密度(0.602)的交互作用 q 值均>60%,在地形因素和人类活动双重作用下,三峡库区 NDVI 空间分异性更明显。

参考文献:

- [1] LEWIS S L, BRANDO P M, PHILLIPS O L, et al. The 2010 Amazon drought [J]. Science, 2011, 331 (6017):e554.
- [2] ALKAMA R, FORZIERI G, DUVEILLER G, et al.

 Vegetation-based climate mitigation in a warmer and
 greener World [J]. Nature Communications, 2022, 13

- (1).e606.
- [3] AHMAD W, HAN A U, HAN F A, et al. How vegetation spatially alters the response of precipitation and air temperature? evidence from Pakistan[J]. Asian Journal of Atmospheric Environment, 2020, 14(2):133-145.
- [4] LUCP, HOUMC, LIUZL, et al. Variation characteristic of NDVI and its response to climate change in the middle and upper reaches of Yellow River Basin, China[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 8484-8496.
- [5] WANG Z H, DAUN C, YUAN L, et al. Assessment of the restoration of a degraded semi-humid evergreen broadleaf forest ecosystem by combined single-indicator and comprehensive model method[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(6):757-767.
- [6] XU G, ZHANG H F, CHEN B Z, et al. Changes in vegetation growth dynamics and relations with climate over China's landmass from 1982 to 2011[J]. Remote Sensing, 2014, 6(4): 3263-3283.
- [7] 邵全琴,刘树超,宁佳,等.2000—2019 年中国重大生态 工程生态效益遥感评估[J].地理学报,2022,77(9): 2133-2153. SHAO Q Q, LIU S C, NING J, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in
- ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000-2019 using remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2133-2153.

 [8] 高滢, 孙虎, 徐崟尧, 等. 陕西省植被覆盖时空变化及其
- [8] 高滢, 孙虎, 徐釜尧, 等. 陕西省植被覆盖时至变化及具对极端气候的响应[J].生态学报,2022,42(3):1022-1033. GAO Y, SUN H, XU Y Y, et al. Temporal and spatial variation of vegetation cover and its response to extreme climate in Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(3):1022-1033.
- 驱动因素分析[J].云南大学学报(自然科学版),2022,44(5):981-989.

 LIAO C H, ZENG Y, YAO K, et al. Spatio-temporal dynamic monitoring and driving factor analysis of vegetation EVI in Jiangxi Province[J].Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition),2022,44(5):981-989.

[9] 廖成浩,曾艳,姚昆,等.江西植被 EVI 时空动态监测及

- [10] MELVILLE T, SUTHERLAND M, WUDDIVIRA M N. Assessing trends and predicting the cover management factor in a tropical island state using Enhanced Vegetation Index[J].SN Applied Sciences, 2020, 2(10); e1686.
- [11] 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. Character-

- istics 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.
- [12] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和 人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020,75(5);961-974.
 - JIN K, WANG F, HAN J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974.
- [13] 涂又,姜亮亮,刘睿,等.1982—2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析[J].农业工程学报,2021,37(22):75-84.
 - TU Y, JIANG L L, LIU R, et al. Spatiotemporal changes of vegetation NDVI and its driving forces in China during 1982—2015 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(22):75-84.
- [14] 田智慧,任祖光,魏海涛.2000—2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制[J].环境科学,2022,43(2):743-751.
 TIAN Z H, REN Z G, WEI H T. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2022,43(2):743-751.
- [15] 于璐,武志涛,杜自强,等.气候变化背景下京津风沙源区人类活动对植被影响的量化分析[J].应用生态学报,2020,31(6):2007-2014.
 - YU L, WU Z T, DU Z Q, et al. Quantitative analysis of the effects of human activities on vegetation in the Beijing-Tianjin sandstorm source region under the climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6):2007-2014.
- [16] 章维鑫,曹建华,吴秀芹.基于 Landsat 影像的石漠化区 植被动态监测及治理效益研究[J].农业工程学报, 2019,35(8);221-229.
 - ZHANG W X, CAO J H, WU X Q. Dynamic monitoring and control benefits of vegetation in rocky desertification areas based on Landsat images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(8);221-229.
- [17] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global and Planetary Change, 2013, 100:172-182.
- [18] HURST H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J].Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116(1):770-799.
- [19] MANDELBROT B B, WALLIS J R. Robustness of the

- rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long Run statistical dependence [J]. Water Resources Research, 1969, 5(5):967-988.
- [20] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报, 2017,72(1):116-134.
 - WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116-134.
- [21] 陈田田,黄强,彭立,等.三峡库区植被覆盖时空变化特征及归因分析[J].应用基础与工程科学学报,2023,31 (2);296-308.
 - CHEN T T, HUANG Q, PENG L, et al. Spatiotemporal variation characteristics and impact factors of vegetation coverage in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 296-308.
- [22] 徐勇,郑志威,郭振东,等.2000—2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测[J].环境科学,2022,43 (7):3730-3740.
 - XU Y, ZHENG Z W, GUO Z D, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2022, 43(7):3730-3740.
- [23] 易浪,孙颖,尹少华,等.2000—2019 年长江流域植被覆盖时空演化及其驱动因素[J].生态学报,2023,43(2):798-811.
 - YI L, SUN Y, YIN S H, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving factors in the Yangtze River Basin from 2000 to 2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2):798-811.
- [24] 毛泳,王勇.近 30 年来重庆极端高温变化特征及其趋势 分析[J].科技通报,2019,35(4):60-68.
 - MAO Y, WANG Y. Characteristics and trend analysis of extreme high temperature in Chongqing in recent 30 years[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35 (4):60-68.
- [25] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等.中国南方 2008 年 1 月罕见

- 低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系「J7.气象学报,2008,66(5):808-825.
- DING Y H, WANG Z Y, SONG Y F, et al. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(5):808-825.
- [26] 黄麟,曹巍,祝萍.退耕还林还草工程生态效应的地域分 异特征[J].生态学报,2020,40(12):4041-4052.
 - HUANG L, CAO W, ZHU P. The regional variation characters of ecological effects of the Grain for Green Project[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4041-4052.
- [27] 李建国,濮励杰,刘金萍,等.2001 年至 2010 年三峡库区 重庆段植被活动时空特征及其影响因素[J].资源科学, 2012,34(8):1500-1507.
 - LIJG, PULJ, LIUJP, et al. The temporal and spatial characteristics of vegetation activity in Three Gorges Reservoir area (Chongqing) from 2001 to 2010 and its influencing factors[J]. Resources Science, 2012, 34(8): 1500-1507.
- [28] 熊雪婷,李传华,陈佳豪.植被对气候变化响应的地形调控作用[J].地理学报,2023,78(9);2256-2270.

 XIONG X T, LI C H, CHEN J H. Topographic regulatory role of vegetation response to climate change[J].

 Acta Geographica Sinica,2023,78(9);2256-2270.
- [29] YIL, SUNY, OUYANGX, et al. Identifying the impacts of climate change and human activities on vegetation cover changes: A case study of the Yangtze River Basin, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(10); e6239.
- [30] 靖娟利,赵婷,王永锋,等.西南喀斯特核心分布区植被对极端气候的响应[J].中国环境科学,2024,44(6):3353-3364.
 - JING J L, ZHAO T, WANG Y F, et al. Response of vegetation to extreme climate in the Karst core areas of Southwest China [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3353-3364.