

# 2013—2023 年三峡库区植被覆盖度 时空变化及其驱动力 ——以湖北省巴东县为例

丁凡桢, 史超, 李书

(水利部长江勘测技术研究所, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** [目的] 分析三峡库区湖北省巴东县植被覆盖度时空变化及其驱动机制, 为该区植被恢复水土保持和生态保护提供科学参考。[方法] 基于 MODIS NDVI 数据, 分析 2013—2023 年巴东县植被覆盖度时空变化规律, 探讨基于地形、地质、气候等影响因子的植被覆盖度分异特征, 并运用地理探测器和随机森林模型探究主导因子及交互效应。[结果] ① 2013—2023 年, 巴东县植被覆盖度整体较高, 以 0.001 7/a 的速率呈波动增长趋势; ② 基于不同影响因子的植被覆盖度分异特征明显, 植被覆盖度与高程、坡度、年降水量分布变化呈正相关, 与年均气温负相关, 且受坡向、地层岩性、植被类型、土壤类型等因子影响; ③ 通过地理探测器探测到高程、年均气温为主要驱动因子, 解释力均在 40% 以上, 地层岩性、地貌类型、年降水量为次级因子, 且多因子交互表现为协同增强效应, 高程与地层岩性的联合解释力达到 55%; 随机森林模型进一步验证了主导因子重要性排序: 高程 > 年均气温 > 地层岩性 > 年降水量。[结论] 地理探测器与随机森林模型共同揭示高程为 2013—2023 年三峡库区巴东县植被覆盖度核心驱动因子, 年均气温、地层岩性、年降水量次之。

**关键词:** 植被覆盖度; 三峡库区; 时空变化; 地理探测器; 随机森林; 驱动力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0421-12

中图分类号: S127, Q948.2

**文献参数:** 丁凡桢, 史超, 李书. 2013—2023 年三峡库区植被覆盖度时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 421-432. Ding Fanya, Shi Chao, Li Shu. Spatiotemporal variations and driving forces of vegetation coverage in Three Gorges reservoir area during 2013—2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 421-432. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.022; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.022.

## Spatiotemporal variations and driving forces of vegetation coverage in Three Gorges reservoir area during 2013—2023 —A case study at Badong County, Hubei Province

Ding Fanya, Shi Chao, Li Shu

(Changjiang Institute of Survey Technical Research, Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** [Objectives] The spatiotemporal variations of vegetation coverage and its driving mechanisms at Badong County, Hubei Province, Three Gorges reservoir area were analyzed, in order to provide scientific references for vegetation restoration, soil and water conservation, and ecological protection. [Methods] Based on MODIS NDVI data, the spatiotemporal dynamics of fractional vegetation coverage in Badong County from 2013 to 2023 was analyzed and the differentiation characteristics of vegetation coverage influenced by topography, geology, and climate factors was explored. Furthermore, the geodetector and random forest models were employed to identify dominant factors and their interaction effects. [Results] ① From 2013 to 2023, vegetation coverage at Badong County exhibited a fluctuating upward trend at a rate of 0.001 7/a, with overall high coverage levels. ② Vegetation coverage showed distinct spatial differentiation across influencing factors: it correlated positively with the spatial variation of elevation, slope, and annual precipitation, but negatively with mean annual temperature. It was also influenced by aspect, lithology, vegetation type, and soil type. ③ Geodetector analysis identified elevation and mean annual temperature as primary drivers (explanatory power >40%), while

收稿日期: 2025-04-28

修回日期: 2025-06-13

采用日期: 2025-06-17

资助项目: 水利部重大科技项目“三峡库区河流湿地‘碳汇’潜力评价研究”(SKS-2022082)

第一作者: 丁凡桢(1989—), 女(汉族), 湖南省常德市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事遥感应用和水利信息化方面的研究。Email: dingfanya@126.com。

lithology, geomorphological type, and annual precipitation were secondary factors. Multi-factor interactions demonstrated synergistic enhancement, with elevation and lithology jointly explaining 55% of variation. Random forest model further validated the importance ranking of dominant predictors: elevation > mean annual temperature > lithology > annual precipitation. [Conclusion] The geodetector and random forest model jointly reveal elevation as the core driver of fractional vegetation coverage changes at Badong County in Three Gorges reservoir area during 2013—2023, followed by mean annual temperature, lithology, and precipitation.

**Keywords: fractional vegetation coverage; Three Gorges reservoir area; spatiotemporal variation; geodetector; random forest; driving force**

植被是陆地生态系统的重要组成部分,堪称生态环境质量的“指示器”,在气候调节、物质循环、水土保持等诸多方面发挥着不可或缺的作用<sup>[1]</sup>。植被覆盖度(fractional vegetation coverage, FVC)作为衡量植被茂密程度,反映植被生长态势的重要指标,能够直观地表征区域生态环境状况<sup>[2]</sup>。通过遥感技术量化估算植被覆盖度,开展其时空变化研究以及揭示驱动力机制,对评估区域环境质量和维护生态系统平衡具有重要的现实意义<sup>[3-4]</sup>。

近年来,植被覆盖空间变化规律及其驱动机制研究已成为生态学领域的热点问题。传统研究方法(如数学统计、线性回归等)主要适用于单因子分析,在解析多因子交互作用时存在局限<sup>[5-6]</sup>。地理探测器模型(geodetector)作为一种新型空间统计方法,可通过空间分层异质性检验有效量化多因子协同影响,已成功应用于黄河流域、海河流域等区域的植被覆盖驱动分析<sup>[7-8]</sup>。同时,随着机器学习技术的发展,随机森林等算法凭借特征重要性排序和交互效应检测优势,为复杂非线性关系研究提供新范式,并已在地表生物量估算、生产力演变趋势分析等研究中取得良好效果<sup>[9-11]</sup>。

三峡库区作为长江经济带重要生态屏障,其生态稳定性关乎中下游流域安全。研究区湖北省巴东县位于库区腹地,具有典型山地生态脆弱性特征,地质环境复杂,地形高陡,降雨充沛,水土流失面积比例超过28%,地质灾害风险等级居库区前列<sup>[12-15]</sup>。植被覆盖度作为水土保持效益的敏感指示因子,其时空演变规律与驱动机制研究,可为水土流失治理及生态修复工程提供精准施策依据。然而,现有研究多聚焦库区整体尺度<sup>[15-17]</sup>,针对巴东县这类典型脆弱单元的精细化研究仍显不足,特别是多因子交互驱动机制亟待系统揭示。因此,本研究基于2013—2023年MODIS NDVI数据集,构建“时空演变—分异特征—驱动力解析”的研究思路,系统分析巴东县植被覆盖度的时空演变规律,综合考虑地形、地质、气候等多维度影响因素,探讨基于影响因子的植被覆盖分异特征,运用地理探测器和随机森林模型研究不同因子对植被覆盖度的驱动力,识别主导因子

并解析因子间交互驱动机制,以期为区域植被恢复、水土保持和生态保护提供科学参考。

## 1 研究区概况

巴东县位于湖北省西南部,地处长江三峡库区腹地,县域国土面积3 352 km<sup>2</sup>,是连接长江中上游的重要生态廊道。该区域地形南北狭长,山水资源丰富,大巴山、巫山、武陵山盘踞,长江、清江“黄金水道”横卧其中,地势西高东低,南北高低悬殊。处于新华夏系一级隆起带的第三隆起带,长江中下游东西向构造带和淮阳山字型西翼反射弧3个构造体系的交汇处,构造格局复杂。地层自前震旦系结晶杂岩至第四系松散岩类,除缺失石炭系上、下统、泥盆系下统、三叠系上统和新近系外,其他地层皆有出露。主要出露二叠系、三叠系下统大冶组及嘉陵江组、中统巴东组第一段、第三段碳酸盐岩,三叠系中统巴东组第二段、第四段、第五段碎屑岩。地处亚热带季风区,温暖多雨,湿热多雾,四季分明。年平均降雨量为1 100~1 900 mm,多集中4—9月。森林覆盖率达67.36%,主要植被类型包括常绿阔叶林、针阔混交林和灌草丛等<sup>[12,18]</sup>。近年来,随着三峡后续规划建设和城镇化进程加快,区域生态环境面临新的压力,开展植被覆盖变化及其驱动机制研究对于指导该区域生态修复和可持续发展具有重要的现实意义。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据获取与处理

本研究采用的MODIS NDVI遥感数据是从NASA官网([https://e4\\_ftl01.cr.usgs.gov](https://e4_ftl01.cr.usgs.gov))获取的MOD13Q1数据产品,该产品的空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d,且已经过辐射校正、几何校正和大气校正,通过批处理提取每半月NDVI数据,并通过年最大化合成法(maximum value composite, MVC)获得逐年最大化NDVI数据。地形数据采用地理空间数据云官网(<https://www.gscloud.cn>)提供的30 m空间分辨率SRTM DEM数据,并基于此数据生成坡度图和坡向图。地层岩性来源于全国地质资料馆

(<http://www.ngac.cn>)提供的1:20万地质图。地貌类型数据、土壤类型数据、植被类型数据分别来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)编制的《中华人民共和国地貌图集(1:100万)》《1:100万中华人民共和国土壤图》《1:100万中国植被集》栅格图像,分辨率均为1 km。气温、降水数据来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/>)提供的《中国1 km分辨率逐月平均气温数据集(1901—2023年)》和《中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2023年)》。所有数据均经过统一预处理,包括投影转换、研究区裁剪等步骤,并统一重采样至1 km分辨率,确保各数据集在空间参考系统和像元大小上的一致性,为后续分析提供可靠的数据基础,各影响因子空间分布特征如图1所示。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 植被覆盖度

像元二分模型是一种利用遥感数据进行估算的模型,以其简洁性和实用性广泛应用于估算特定区域的植被覆盖度<sup>[19]</sup>。通过解析地表像元中植被与非植被组分的比例关系,可有效实现区域植被覆盖度的定量反演。利用植被在红光波段具有高吸收、在近红外波段具有高反射的特点,引入NDVI(归一化植被指数)作为表征植被生长状态的关键参数<sup>[20]</sup>。采用改进的像元二分模型进行植被覆盖度估算,其计算公式为

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中:FVC表示植被覆盖度;NDVI<sub>soil</sub>表示裸土地区植被指数;NDVI<sub>veg</sub>表示完全植被覆盖地区植被指数。本研究选取置信度为2%附近累计百分比作为NDVI<sub>soil</sub>,同样选取置信度在98%附近累计百分比作为NDVI<sub>veg</sub>,根据以上模型估算每年植被覆盖度。

### 2.2.2 趋势分析

为系统探究植被覆盖度的时空变化特征,本研究采用一元线性回归分析法对植被覆盖度的时间序列变化趋势进行定量分析。该方法基于最小二乘法原理,通过拟合植被覆盖度随时间变化的斜率,能够有效表征研究时段内植被覆盖度的变化趋势<sup>[20]</sup>。具体计算公式为

$$\theta_{slope} = \frac{n \times (\sum_{i=1}^n i \times FVC_i) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n FVC_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: $\theta_{slope}$ 表示研究时段植被覆盖度线性拟合变化趋势斜率; $n$ 为总的研究年数( $n=11$ ); $FVC_i$ 表示第 $i$ 年的植被覆盖度(这里取植被覆盖度均值)。斜率值 $\theta_{slope}$

具有明确的统计学意义:正值表征植被覆盖度呈改善趋势,负值指示退化趋势,绝对值大小反映变化强度。

### 2.2.3 地理探测器

地理探测器是一种基于空间分异性原理的统计模型,能够有效量化自变量与因变量之间的交互作用关系<sup>[21-22]</sup>。其核心思想是,若某个自变量对因变量具有重要影响,则两者在空间分布格局上应呈现显著的协同分异特征<sup>[23]</sup>。本研究主要采用地理探测器中因子探测器和交互作用探测器这两个核心模块。因子探测器主要用来探测自变量 $X$ 对因变量 $Y$ 的解释程度<sup>[24]</sup>,采用 $q$ 来表示,计算表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (5)$$

式中: $h=1, \dots, L$ 为变量 $Y$ 或因子 $X$ 的分层,即分类或分区; $N_h, N$ 分别为层 $h$ 和全区的单元数; $\sigma_h^2, \sigma^2$ 分别是层 $h$ 和全区的 $Y$ 值的方差。 $SSW, SST$ 分别为层内方差之和及全区总方差。 $q$ 的值域为 $[0, 1]$ , $q$ 值越大,表示其解释力越强。

交互作用探测器是解析多因子协同效应机制的核心模块,通过量化双因子组合对地理现象空间分异的联合解释力,揭示因子间交互作用。它通过比较单一因子独立作用 $[q(X_1), q(X_2)]$ 与双因子交互作用 $[q(X_1 \cap X_2)]$ 的统计量差异,来判定交互作用类型。其结果分为5类:非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立作用、非线性增强。

### 2.2.4 随机森林

随机森林是一种基于Bagging集成策略的监督学习框架,其通过构建多棵结构差异化的决策树实现模型泛化能力的提升。该算法通过双重随机性注入机制——特征子集随机选择和数据子集随机采样,有效规避单棵决策树的过拟合风险,最终通过多树输出的多数投票(分类任务)或加权平均(回归任务)形成稳健预测结果。这种集成策略不仅增强了模型对噪声数据的容忍度,更通过群体决策显著提升了预测结果的统计稳定性,现已成为机器学习领域最具代表性的集成算法之一<sup>[25-26]</sup>。在模型解释性方面,随机森林通过计算特征重要性来评估各特征对预测结果的贡献度。具体而言,基于基尼不纯度或信息增益的减少量,计算每个特征在所有树中的平均不纯度减少程度。特征重要性得分反映特征在模型决策中的全局贡献度,数值越大表明特征对目标变量的解释力越强<sup>[27-28]</sup>。

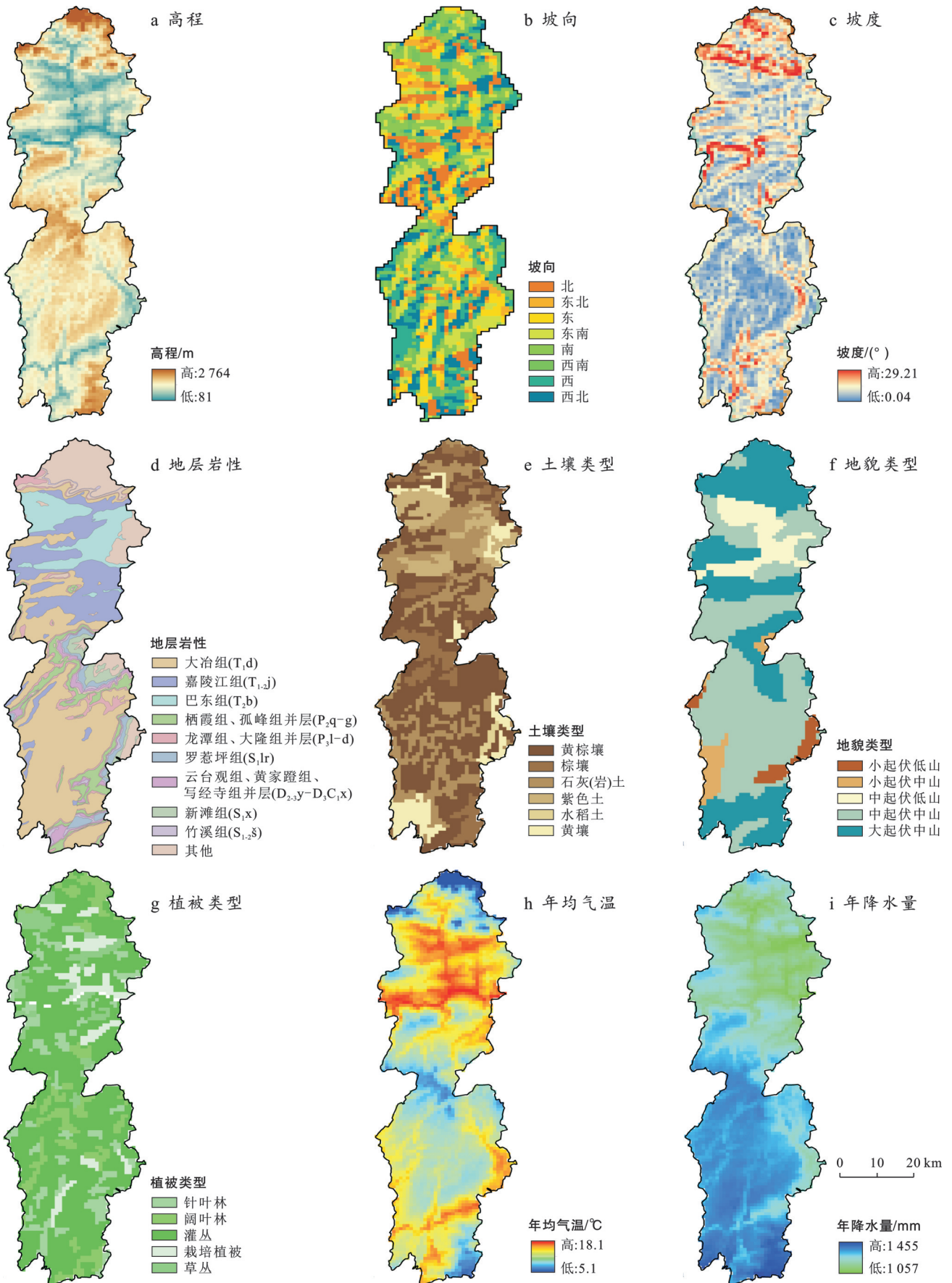


图1 巴东县植被覆盖影响因子空间分布特征

Fig.1 Spatial distribution characteristics of influencing factors of vegetation coverage at Badong County

### 3 结果与分析

#### 3.1 巴东县植被覆盖度时空变化分析

##### 3.1.1 植被覆盖度年际变化特征

基于改进的像元二分模型,获取研究区2013—2023年植被覆盖度空间分布数据,并统计年度均值。由图2可知,巴东县2013—2023年的植被覆盖度年度均值在0.81~0.85波动,整体呈现波动中略有上升的趋势。从2013年的0.834到2023年的0.837,FVC均值在11 a间仅微增0.003。通过一元线性回归模型分析发现,线性倾向率为0.0017/a,且回归模型的解释力较低( $R^2=0.2196$ ),趋势并不显著,长期呈微弱增长态势。从阶段性变化来看,2014年和2020年植被覆盖度分别较前一年下降2.5%和2.3%,形成明显的波谷,这种短期波动可能与气候异常有关。通过

降水关联性分析发现,这些植被覆盖度下降年份存在共同气候特征,即前一年降水量明显偏少(2013年相较于多年均值偏低6.9%,2019年偏低5.5%),而当年降水量又较前一年大幅增加(2014年增加9.4%,2020年增加15.1%)。这种降水的剧烈波动表明该时期确实存在气候异常,从而对植被覆盖度产生阶段性扰动。2023年的变化模式也呈现出类似特征。2015—2017年植被覆盖度持续上升,年均增长率达0.8%,2021—2022年植被覆盖度均值持续高于0.85,时间上与新一轮退耕还林工程实施周期吻合,表明退耕还林等生态修复工程初见成效,植被覆盖度增长受益于生态红线政策强化与森林管护力度提升。综合而言,巴东县的植被覆盖度在11 a间表现出“波动上升、总体稳定”的特点,未出现持续性退化或显著改善。

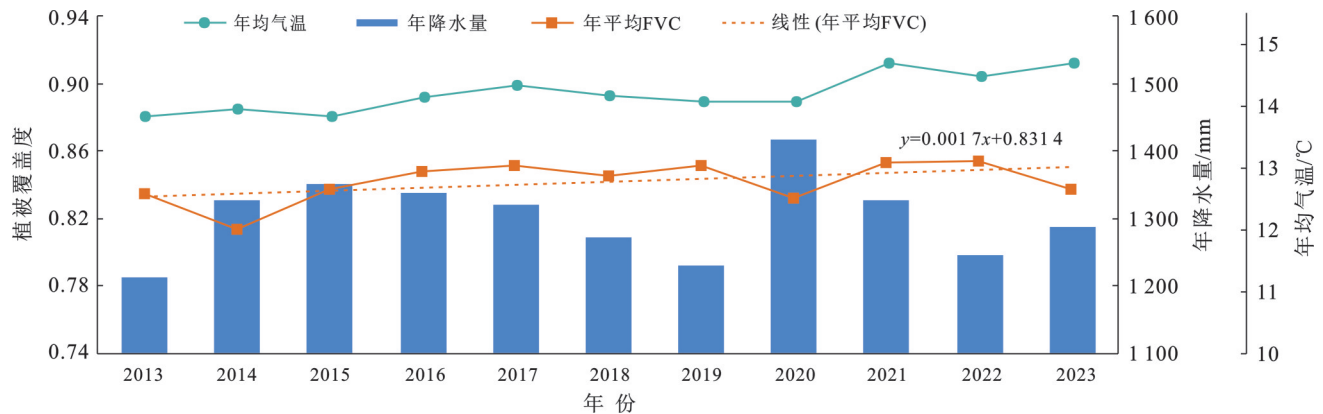


图2 巴东县2013—2023年植被覆盖度及气温、降水量年际变化

Fig.2 Interannual variations of fractional vegetation coverage, temperature, and precipitation at Badong County from 2013 to 2023

##### 3.1.2 植被覆盖度空间变化格局

2013—2023年,巴东县植被覆盖度年均值为0.84,表明研究区整体植被覆盖状况良好。参考已有的相关研究成果<sup>[2-3,29-30]</sup>,将植被覆盖度分为5个等级:(0~0.4]为低覆盖,(0.4~0.55]为中低覆盖,(0.55~0.7]为中覆盖,(0.7~0.85]为中高覆盖,(0.85~1]为高覆盖;空间分布上,植被覆盖度呈现显著的地域分异特征(图3):高覆盖度区域主要集中分布于研究区最北部及中南部,面积比例为57.25%,这些区域多位于海拔800~1500 m的中起伏中山区,受人类活动干扰较小,是区域生态屏障的重要组成部分;中高覆盖区比例为39.31%,广泛分布于中北部低山丘陵带,地貌类型以中起伏低山(海拔300~800 m)为主,岩性组合为嘉陵江组灰岩与巴东组泥质粉砂岩互层,该区域的年降水量相对较低,而月均气温相对较高,形成暖干生态位;中、中低及低

覆盖区合计比例为3.44%,零散分布于城镇建成区及长江、清江干支流沿岸,此类区域受高强度人类活动影响显著。

基于2013与2023年植被覆盖度空间差值分析,植被覆盖变化特征如图4所示。结果显示,研究区91%的区域FVC变化幅度在±0.08范围内,表明植被覆盖整体呈现高度稳定性。显著变化区域( $|\Delta FVC| \geq 0.15$ )集中分布于中北部的官渡口镇、沿渡河镇、溪丘湾乡和东瀼口镇。具体来说,显著增加区域主要分布于集中实施近10 a退耕还林的官渡口镇西部和北部及沿渡河镇南部区域、溪丘湾乡平阳河小流域治理区等处,印证生态修复工程阶段性成效;显著降低区域集中出现在溪丘湾乡高铁新区、东瀼口物流码头建设及产业园区、沿渡河镇光伏发电项目区等城镇建设区域,植被覆盖度变化与城镇开发建设密切相关。

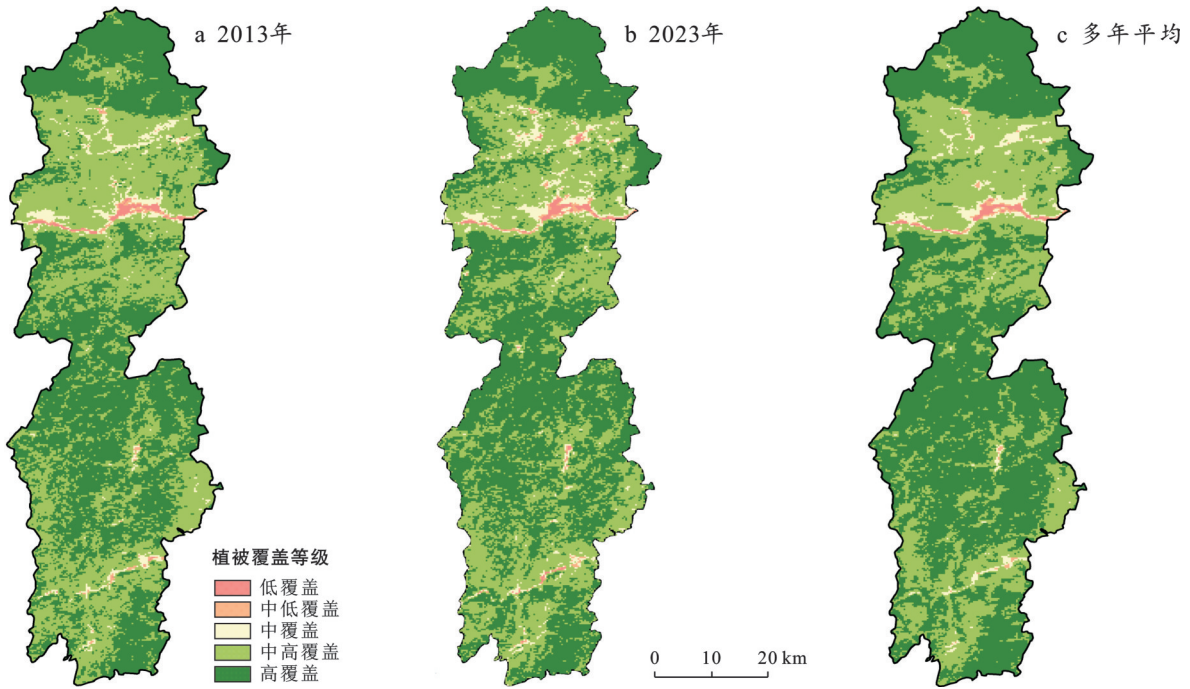


图3 巴东县 2013 和 2023 年及多年平均植被覆盖度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of fractional vegetation coverage at Badong County in 2013, 2023 and multi-year average

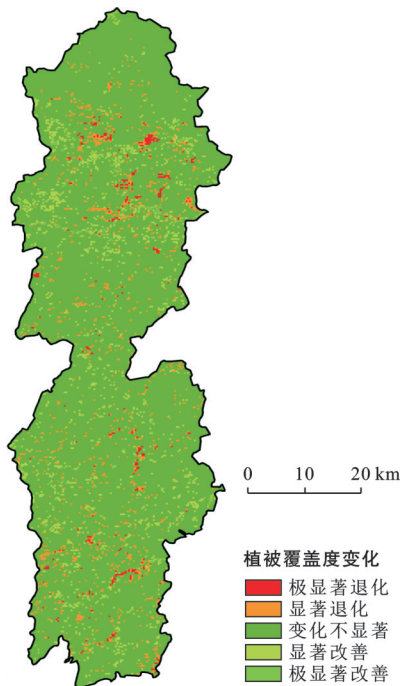


图4 巴东县 2013—2023 年植被覆盖度逐像元变化  
Fig.4 Pixel-level variation of fractional vegetation coverage at Badong County from 2013 to 2023

3.2 基于不同影响因子的植被覆盖度分异特征分析

环境与气候的差异会导致水热状况的不同,进而对植被覆盖度的分布格局产生不同程度的影响<sup>[31]</sup>。在参考相关文献<sup>[32-34]</sup>的基础上,结合研究区实际情况,选取高程、坡度、坡向、地层岩性、土壤类型、植被类型、地貌类型、年均气温、年降水量等 9 类自然环境因子,构建多尺度植被覆盖度驱动分析框架。

旨在揭示不同自然环境因子对植被覆盖度空间分异的贡献度及其交互作用机制,为深入理解区域生态系统空间异质性提供科学依据。参考相关文献<sup>[2-4]</sup>,并根据研究区的地形、地貌、气候特征,对各类因子进行分类分级。坡向按方位角划分为北,东北,东,东南,南,西南,西,西北 8 个方向。地层岩性根据地质年代和岩性特征划分为大冶组(T<sub>1d</sub>),嘉陵江组(T<sub>1-2j</sub>),巴东组(T<sub>2b</sub>),栖霞组、孤峰组并层(P<sub>2q-g</sub>),龙潭组、大隆组并层(P<sub>3l-d</sub>),罗惹坪组(S<sub>1lr</sub>),云台观组、黄家蹬组、写经寺组并层(D<sub>2-3y-D<sub>3</sub>C<sub>1x</sub></sub>),新滩组(S<sub>1x</sub>),竹溪组(S<sub>1-2s</sub>),其他(面积较小合并)10 类。土壤类型、地貌类型、植被类型按照数据已有的标准分类;土壤类型按照黄棕壤,棕壤,石灰(岩)土,紫色土,水稻土,黄壤分为 6 类;地貌类型按照小起伏低山,小起伏中山,中起伏低山,中起伏中山,大起伏中山分为 5 类;植被类型按照针叶林,阔叶林,灌丛,栽培植被,草丛分为 5 类。高程、坡度、年均气温、年降水量结合数据分布特点采用等间距法分级。高程按照 ≤250, 250~500, 500~750, 750~1 000, 1 000~1 250, 1 250~1 500, 1 500~2 000, >2 000 m 分为 8 类;坡度按照 ≤5°, 5~10°, 10~15°, 15~20°, 20~25°, >25° 分为 6 类;年均气温按照 ≤8, 8~11, 11~14, 14~17, >17 °C 分为 5 类;年降水量按照 ≤1 140, 1 140~1 200, 1 200~1 260, 1 260~1 320, 1 320~1 380, >1 380 mm 分为 6 类。分类分级处理后,采用像元统计分析方法,计算不同因子等级下的

植被覆盖度均值,量化不同因子等级下的植被覆盖度响应特征。

### 3.2.1 地形因子

基于高程、坡度、坡向等地形因子的植被覆盖度响应特征如图 5 所示。由图 5 可以看出,植被覆盖度随高程增加呈上升趋势,垂直梯度效应显著,在大于 2 000 m 高度区间植被覆盖度均值达到最大(0.909),此区间通常受人类活动干扰较少,且水热条件适宜,更适宜植物生长;而小于 250 m 的区间植被覆盖度均值最低(0.600),此区间多受城镇化和农业活动影响,植被覆盖度较低。在不同坡向上,整体呈现出“东西

高,南北低”的格局。西坡向植被覆盖度均值最高(0.862),北坡向植被覆盖度均值最低(0.833)。不同的坡面朝向会影响太阳辐射量及土壤水分,进而造成植被分布特征的差异。在坡度方面,各级植被覆盖度均值差异较小,先是随着坡度的增加而降低,在 5°~10° 区间达到最低,随后随着坡度增加不断增大。坡度代表着地表单元的陡缓程度,会影响到水分再分配的过程,进而影响植被的生长与分布。陡坡区域通常不利于人类活动,植被得以较好保存。而低坡度(<5°)区域多分布在中南部高海拔山区,植被覆盖度高于人类活动频繁的中等坡度(5°~15°)区域。

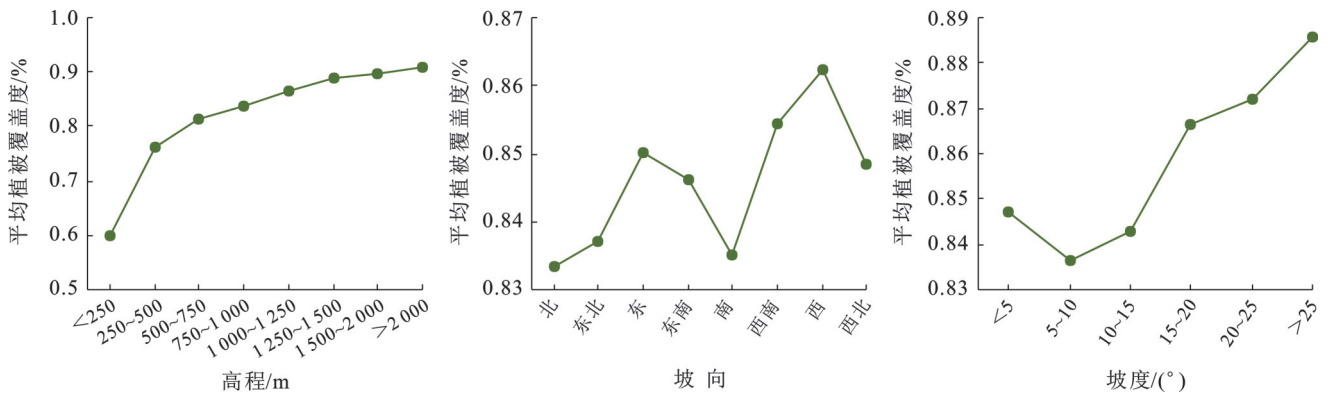


图 5 基于地形因子的巴东县植被覆盖度响应特征

Fig.5 Response characteristics of fractional vegetation coverage at Badong County based on terrain factors

### 3.2.2 地质与土壤因子

图 6 展示了基于地层岩性、土壤类型等地质与土壤因子的植被覆盖度响应特征。在地层岩性方面,研究区面积分布最广的 3 类是大冶组、嘉陵江组和巴东组。巴东组和嘉陵江组植被覆盖度显著低于大冶组,最低的巴东组植被覆盖度均值仅为 0.752,形成明显空间分异。不同岩性特征影响着土壤发育程度和持水性

能,进而对植被的生长和分布格局产生深远影响<sup>[32]</sup>。

在不同土壤类型中,植被覆盖度最低的紫色土(0.761)多分布在陡坡和侵蚀严重的区域,土壤贫瘠且保水能力差,植被生长受限。植被覆盖度最高的水稻土(0.888)是长期水耕熟化形成,通过灌排、耕作和施肥等一系列农业措施,改善了其保水、保肥性能和适性,使土壤肥力不断发展。

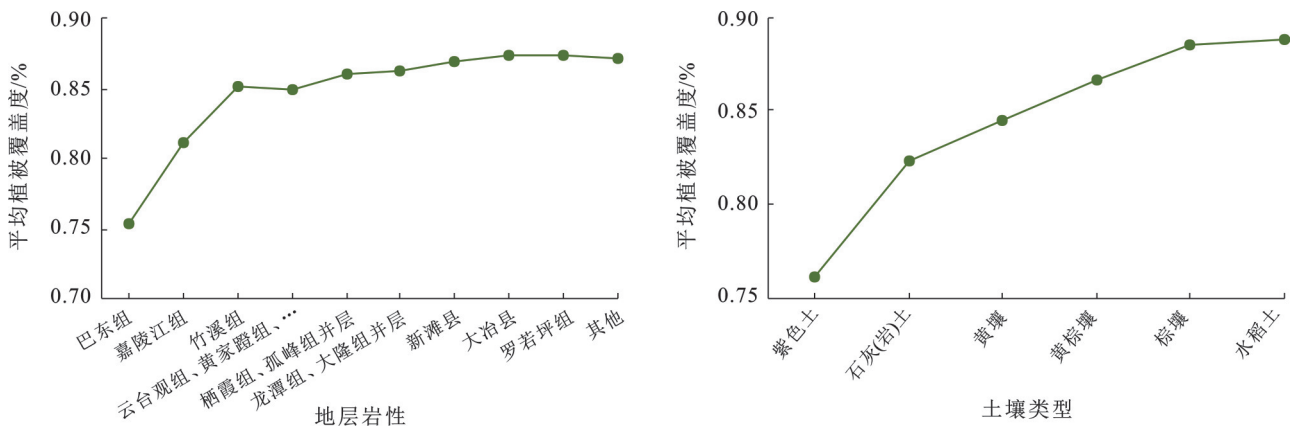


图 6 基于地质与土壤因子的巴东县植被覆盖度响应特征

Fig.6 Response characteristics of fractional vegetation coverage at Badong County based on geological and soil factors

### 3.2.3 生物与地貌因子

基于植被类型、地貌类型等生物与地貌因子的

三峡库区巴东县植被覆盖度响应特征如图 7 所示。由图 7 可以看出,从植被类型上来看,植被覆盖度从

低到高依次为栽培植物(0.782)、草丛(0.828)、针叶林(0.848)、灌丛(0.850)、阔叶林(0.890)。栽培植被通常为单一作物或树种,植被层次简单,受耕作等人为活动影响较大,覆盖度较低。阔叶林通常为多树种混交林,植被层次复杂,冠层郁闭度高且地表覆盖连续,植被生长旺盛。研究区内地貌类型主要有5类,

植被覆盖度从低到高依次是中起伏低山(0.732)、小起伏低山(0.803)、小起伏中山(0.851)、中起伏中山(0.857)、大起伏中山(0.866)。中山区通常水热条件较好,大起伏区因地形复杂性限制了人类活动干扰,植被覆盖度较高;低山区多受人类活动干扰,整体植被覆盖度较低。

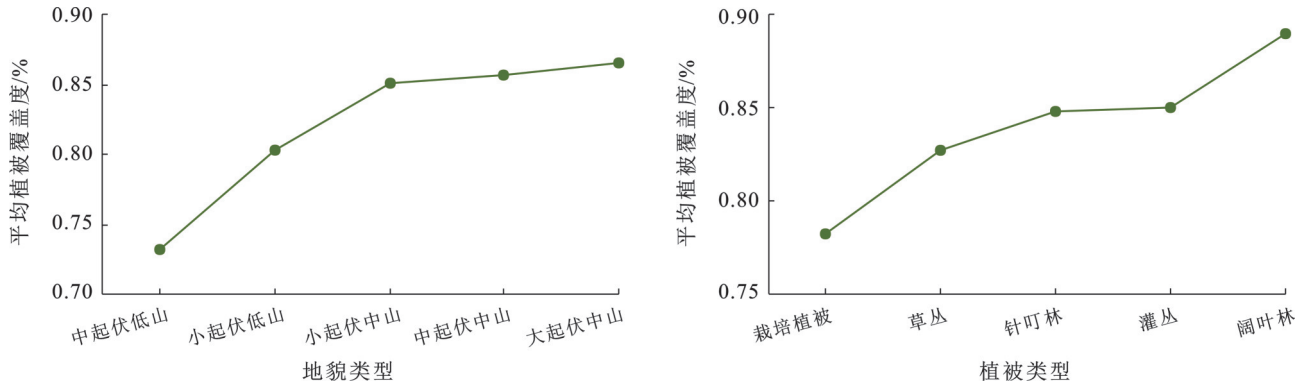


图7 基于生物与地貌因子的巴东县植被覆盖度响应特征

Fig.7 Response characteristics of fractional vegetation coverage at Badong County based on biological and geomorphic factors

### 3.2.4 气候因子

基于年均气温、年降水量等气候因子的三峡库区巴东县植被覆盖度响应特征如图8所示。由图8可以看出,植被覆盖度随年均气温升高呈下降趋势,大于17℃区间的植被覆盖度均值最低(0.688),中等温度区(8~11℃)植被覆盖度均值达0.91,为植被生长的最优区间。温度对植物的生长发育和生理代谢有着直接的影响。低温区域通常水分条件

较好,植被覆盖度较高,高温区域蒸发强烈,抑制植被生长。

植被覆盖度随降水量增加呈上升趋势,年降水量小于1140mm区间的植被覆盖度最低(0.746),在大于1260mm区间整体植被覆盖度较高。降水是植被生长的关键限制因子,它对植物的生理代谢、养分吸收和土壤水分含量都有着直接影响,降水量较高的区域通常植被覆盖度较高。

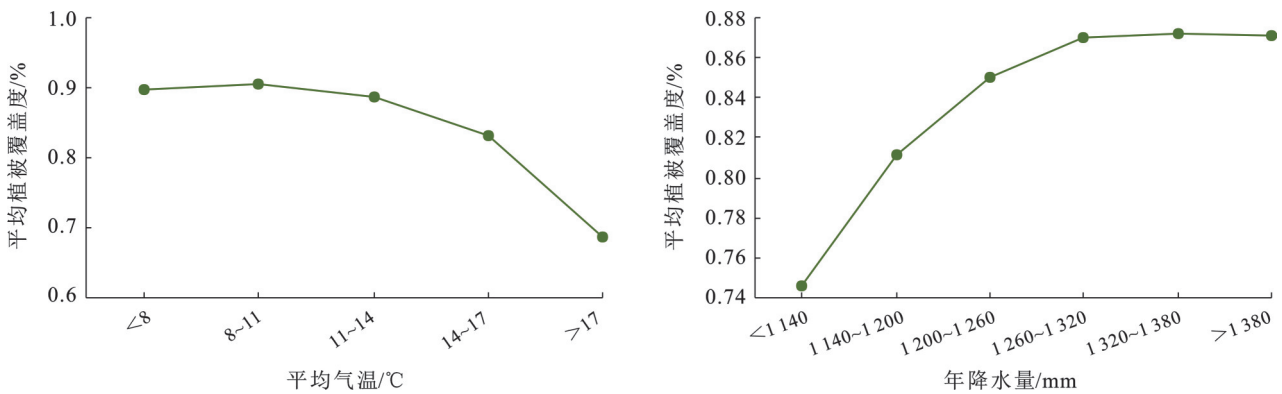


图8 基于气候因子的巴东县植被覆盖度响应特征

Fig.8 Response characteristics of fractional vegetation coverage at Badong County based on climate factors

## 3.3 植被覆盖空间分布驱动力分析

### 3.3.1 基于地理探测器的驱动力分析

为进一步揭示研究区植被覆盖度的空间分异机制,采用地理探测器模型量化各影响因子对植被覆盖度的解释力(q值),各因子的q值从大到小依次为:高程(0.4824)>年均气温(0.4001)>地层岩性(0.2565)>地貌类型(0.2458)>年降水量(0.2449)

>土壤类型(0.1839)>植被类型(0.1766)>坡度(0.0191)>坡向(0.0145)。高程和年均气温的解释力均超过40%,构成植被覆盖分异的核心驱动力。高程通过影响水热条件间接调控植被分布,而气温则直接影响植物的生长周期和代谢活动。地层岩性、地貌类型和年降水量的解释力在20%以上,是影响植被覆盖度的次级因子,它们通过岩-土互馈、地形

阻隔及水分供给间接影响覆盖度。土壤类型和植被类型的解释力在 10% 以上,对植被覆盖分异具有一定的驱动作用。弱驱动因子坡度与坡向的解释力不足 2%,反映微地形对植被覆盖的直接影响有限,但可能通过与其他因子交互作用产生间接效应。

通过地理探测器的交互作用探测发现,各因子间普遍存在双因子增强或非线性增强效应,表明植被覆盖度受多因子耦合驱动。地理探测器模型各影响因子联合解释力如图 9 所示,高程与地层岩性的联合  $q$  值达到 0.550 0,显著高于单因子的解释力,揭示垂直带谱与岩性控水的协同作用。高程与土壤类型、地貌类型、植被类型、年均气温、年降水量等因子的联合  $q$  值均超过 0.500 0,表明这些因子的协同效应对植被覆盖度的空间分异具有重要贡献。尽管坡度与坡向的单因子解释力较弱,但与其他因子(如高程、年均气温)的联合分析显示存在双因子增强或非线性增强效应,表明这两个因子通过与其他因子的协同作用对植被覆盖度产生间接影响。

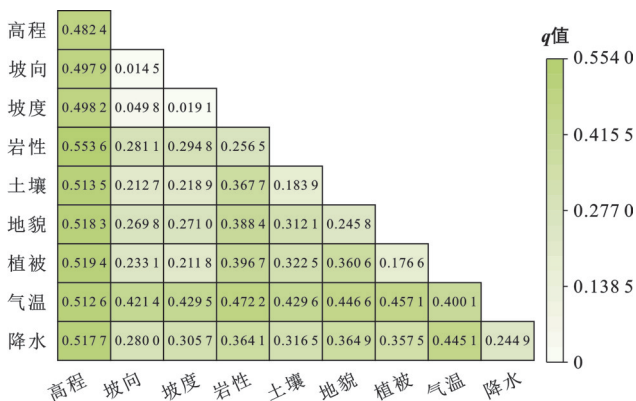


图 9 地理探测器模型各影响因子联合解释力  
Fig.9 Joint explanatory power of each influencing factor in Geodetector model

### 3.3.2 基于随机森林的驱动力分析

随机森林是目前应用最广泛的机器学习模型之一,能够相对客观地量化特征的影响程度。本研究仍选用高程、坡度、坡向、地层岩性、土壤类型、植被类型、地貌类型、年降水量、年均气温等 9 类自然环境因子作为自变量,以对应像元的植被覆盖度作为因变量,构建随机森林分类模型,进而对特征变量进行重要性排序,客观分析各类因子对植被覆盖度的驱动力大小。样本划分采用简单随机抽样法,将全域样本按 8:2 比例划分为训练集(模型构建)与测试集(性能验证),确保空间分布代表性。通过网格搜索法进行参数调优,确定最优决策树数目为 200,最大深度为 10。此时训练集数据的准确度评分 0.858,测试集数据的准确度评分 0.754。基于基尼不纯度下降

法计算的特征重要性排序为:高程(0.254 6) > 年均气温(0.125 0) > 地层岩性(0.111 4) > 年降水量(0.110 7) > 坡向(0.108 3) > 坡度(0.086 2) > 地貌类型(0.075 3) > 土壤类型(0.068 0) > 植被类型(0.060 5)。高程重要性得分显著高于其他因子,表明高程通过调控水热条件对植被分布起主导作用。年均气温、地层岩性和年降水量是影响植被覆盖度的第二梯队因子,其重要性得分均超过 0.11,反映热量条件、水分供应和地质背景对植被生长的关键作用。坡向重要性得分超过 0.10,说明光照条件对植被分布也具有重要影响。而坡度、地貌类型、土壤类型和植被类型重要性较低,表明这些因子对植被覆盖度的直接影响相对有限。

地理探测器与随机森林双模型验证表明,高程作为核心驱动因子,其主导地位具有方法稳健性,印证了垂直地带性通过调控水热再分配和人类活动强度对植被格局的宏观控制,这一发现与既有山地生态研究结果<sup>[3-4]</sup>形成互证。次驱动因子体系呈现水热—地质耦合特征,年均气温、地层岩性和年降水量共同构建了植被发育的基础环境框架。对于弱驱动因子,两种方法呈现显著差异,坡向、坡度在地理探测器方法中解释力有限,但在随机森林模型中重要性显著提升,说明基于空间分异的方法可能低估地形微环境效应。地理探测器擅长量化因子空间分异的独立解释力,而随机森林更能捕捉非线性作用与高阶交互效应,这种多模型互证策略不仅增强了主要结论的可信度,更通过方法差异为理解复杂生态系统提供了互补视角。

## 4 结论

(1) 2013—2023 年,巴东县植被覆盖度整体呈波动增长的趋势,线性倾向率为 0.001 7/a。巴东县植被覆盖度均值为 0.84,整体覆盖度较高。通过 2013 和 2023 年空间分布差异分析发现,大部分区域植被覆盖度变化较小,显著增加和降低的区域比例为 9%,分别集中在退耕还林区和城镇建设区。

(2) 巴东县植被覆盖度基于自然环境因子的分异特征明显。植被覆盖度与高程、坡度、年降水量分布变化呈正相关,与年均气温呈负相关。另外,在东西坡向、大冶组、大起伏中山、水稻土、阔叶林等类型中呈现较高植被覆盖度,相反地,在南北坡向、巴东组、中起伏低山、紫色土、栽培植物等类型中呈现较低值。

(3) 基于地理探测器探测不同影响因子对植被覆盖度的解释力( $q$  值)的结果表明,高程、年均气温

的解释力均超过40%,为主要驱动因子,地层岩性、地貌类型、年降水量是次级因子。通过交互探测发现,各影响因子之间均为双因子增强或非线性增强,说明植被生长受到多因子协同作用影响。

(4) 基于随机森林分类模型重要性评估可知,高程、年均气温、地层岩性和年降水量为高驱动力因子,与地理探测器的结论高度一致。综合来看,高程是影响植被覆盖度的核心驱动因子,其驱动力显著强于其他因子。值得注意的是,地层岩性的影响也不容忽视。

### 参考文献 (References)

- [1] Gao Wande, Zheng Ce, Liu Xiuhua, et al. NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us sandy land, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137:108745.
- [2] 王琳,李娜,文广超,等. 黄河流域河南段植被覆盖度变化及其驱动力[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(6):393-399. Wang Lin, Li Na, Wen Guangchao, et al. Vegetation coverage changes and driving forces in He'nan section of Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6):393-399.
- [3] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等. 2006—2016年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2019, 39(5):1583-1594. Zhu Cong, Peng Wenfu, Zhang Lifang, et al. Study of temporal and spatial variation and driving force of fractional vegetation cover in upper reaches of Minjiang River from 2006 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5):1583-1594.
- [4] 袁江龙,赵宏慧,刘晓煌,等. 2000—2020年昆仑山植被覆盖度时空变化驱动力分析及生态评价[J]. *中国地质*, 2024, 51(6):1822-1838. Yuan Jianglong, Zhao Honghui, Liu Xiaohuang, et al. Driving force analysis and ecological assessment of spatio-temporal changes in vegetation cover in the Kunlun Mountains from 2000 to 2020 [J]. *Geology in China*, 2024, 51(6):1822-1838.
- [5] 钤会冉,翟家齐,马梦阳,等. 海河流域生长季植被覆盖度时空变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4):309-317. Qian Huiran, Zhai Jiaqi, Ma Mengyang, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its driving forces during the growing season in Haihe River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):309-317.
- [6] Yi Lang, Sun Ying, Ouyang Xiao, 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):6239.
- [7] 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 Xia, Zhang Leyi, Wu Chen. 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.
- [8] 高文晶,程诺,张露月,等. 基于参数最优地理探测器的福建省植被NPP时空分异及驱动力探究[J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(4):120-130. Gao Wenjing, Cheng Nuo, Zhang Luyue, et al. Spatio-temporal differentiation and driving force of vegetation NPP in Fujian Province based on optimal parameter geographical detector [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(4):120-130.
- [9] Morais T G, Teixeira R F M, Figueiredo M, et al. The use of machine learning methods to estimate aboveground biomass of grasslands: A review [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130:108081.
- [10] 刘欢欢,陈印,刘悦,等. 基于随机森林模型的黄土高原草地净初级生产力时空格局及未来演变趋势模拟[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(1):123-131. Liu Huanhuan, Chen Yin, Liu Yue, et al. Simulation of spatial pattern and future trends of grassland net primary productivity in the Loess Plateau based on random forest model [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(1):123-131.
- [11] 宋梦来,陈海涛,丁晗,等. 1990—2020年天津市植被覆盖度时空演变特征及影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(1):154-163. Song Menglai, Chen Haitao, Ding Han, et al. Temporal and spatial variation characteristic and influencing factors of vegetation coverage in Tianjin during 1990—2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1):154-163.
- [12] 张勤丽,吴海松,陈江平,等. 湖北省巴东县地质灾害发育特征与防治对策[J]. *资源环境与工程*, 2008, 22(6):591-595. Zhang Qinli, Wu Haisong, Chen Jiangping, et al. Developing characteristics and countermeasures of geological hazards in Badong, Hubei [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2008, 22(6):591-595.
- [13] 巴东县水土保持中心. 巴东县水土保持公报(2023) [EB/OL]. (2024-12-20) [2025-05-22]. [http://www.hbbd.gov.cn/xxgk/dfbmptlj/xz/xslj/fdzdgnr/sl/202412/t20241220\\_1648087.shtml](http://www.hbbd.gov.cn/xxgk/dfbmptlj/xz/xslj/fdzdgnr/sl/202412/t20241220_1648087.shtml) Badong County Soil and Water Conservation Center.

- Bulletin on Soil and Water Conservation of Badong County(2023)[EB/OL](2024-12-20)[2025-05-22]. [http://www.hbbd.gov.cn/xxgk/dfbmptlj/xz/xslj/fdzdgknr/sl/202412/t20241220\\_1648087.shtml](http://www.hbbd.gov.cn/xxgk/dfbmptlj/xz/xslj/fdzdgknr/sl/202412/t20241220_1648087.shtml)
- [14] 詹小国,谭德宝,朱永清,等.基于RS和GIS的三峡库区水土流失快速动态监测研究[J].长江科学院院报,2003,20(1):44-46.
- Zhan Xiaoguo, Tan Debao, Zhu Yongqing, et al. Research on rapid and dynamical supervision on water and soil erosion in Three Gorges reservoir area based on RS and GIS [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003,20(1):44-46.
- [15] 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.
- [16] 崔红婧,褚琳,尹雅琦,等.1990—2020年三峡库区植被物候时空格局及其演变机制[J].生态学报,2024,44(9):3775-3790.
- Cui Hongjing, Chu Lin, Yin Yaqi, et al. Spatio-temporal patterns of vegetation phenology and their evolutionary mechanisms in the Three Gorges reservoir area from 1990 to 2020 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(9):3775-3790.
- [17] 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 Tiantian, Huang Qiang, Peng Li, et al. Spatio-temporal 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.
- [18] 巴东县档案馆.自然资源[EB/OL](2024-01-01)[2025-05-22]. [http://www.hbbd.gov.cn/zjbd/zrzy/202411/t20241106\\_1632209.shtml](http://www.hbbd.gov.cn/zjbd/zrzy/202411/t20241106_1632209.shtml)
- Badong County Archives. Natural Resources[EB/OL](2024-01-01)[2025-05-22]. [http://www.hbbd.gov.cn/zjbd/zrzy/202411/t20241106\\_1632209.shtml](http://www.hbbd.gov.cn/zjbd/zrzy/202411/t20241106_1632209.shtml).
- [19] 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.
- Zhang Jianglei, Chen Shaohui. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and terrain differentiation in Qilian Mountains Nature Reserve [J]. Journal of West China Forestry Science, 2023,52(1):106-112.
- [20] 张会霞,李永梅,张娜.汾河流域植被覆盖度时空特征与地形因子的关系[J].水土保持通报,2022,42(1):353-359.
- Zhang Huixia, Li Yongmei, Zhang Na. Relationship between temporal and spatial characteristics of vegetation coverage and topographic factors in Fenhe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):353-359.
- [21] 徐刘洋,郭伟玲,贾纪昂.东南丘陵地区土壤侵蚀时空变化及其驱动因素:以湖南省张家界市为例[J].水土保持通报,2024,44(1):218-226.
- Xu Liuyang, Guo Weiling, Jia Ji'ang. Spatial and temporal variability and driving factors of soil erosion in hilly areas of southeast China: A case study of Zhangjiajie City, Hunan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):218-226.
- [22] Hua Ding, Hao Xingming. Spatiotemporal change and drivers analysis of desertification in the arid region of northwest China based on geographic detector [J]. Environmental Challenges, 2021,4:100082.
- [23] 文妙霞,何学高,刘欢,等.基于地理探测器的宁夏草地植被覆盖时空分异及驱动因子[J].干旱区研究,2023,40(8):1322-1332.
- Wen Miaoxia, He Xuegao, Liu Huan, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of grassland vegetation cover in Ningxia based on geographical detectors [J]. Arid Zone Research, 2023,40(8):1322-1332.
- [24] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [25] 王雪梅,杨雪峰,赵枫,等.基于机器学习算法的干旱区绿洲地上生物量估算[J].生态环境学报,2023,32(6):1007-1015.
- Wang Xuemei, Yang Xuefeng, Zhao Feng, et al. Estimation of aboveground biomass in the arid oasis based on the machine learning algorithm [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(6):1007-1015.
- [26] 徐悦,李佳潼,郭齐韵,等.南昌市NDVI时空演化特征及其气候驱动因子分析[J].森林工程,2024,40(5):50-61.
- Xu Yue, Li Jiatong, Guo Qiyun, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of NDVI and its climate driving factors in Nanchang City [J]. Forest Engineering, 2024,40(5):50-61.
- [27] 张秀梅,马波,张怡捷.基于机器学习的东非植被变化因子重要性分析[J].水土保持通报,2023,43(6):227-236.
- Zhang Xiumei, Ma Bo, Zhang Yijie. Importance analysis of vegetation change factors in east Africa based on

- machine learning [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(6):227-236.
- [28] Zahura F T, Bisht G, Li Zhi, et al. Impact of topography and climate on post-fire vegetation recovery across different burn severity and land cover types through random forest [J]. *Ecological Informatics*, 2024, 82: 102757.
- [29] 李霞, 陈永昊, 陈喆, 等. 中国沿海地区植被 NDVI 时空变化及驱动力分析[J]. *生态环境学报*, 2024, 33(2): 180-191.  
Li Xia, Chen Yonghao, Chen Zhe, et al. Analysis of spatio-temporal changes and driving vegetation NDVI in coastal areas of China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(2):180-191.
- [30] 马骏, 马朋, 李昌晓, 等. 2000—2011年三峡库区重庆段植被覆盖景观格局变化[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(12):141-147.  
Ma Jun, Ma Peng, Li Changxiao, et al. Changes in landscape patterns of vegetation coverage in Chongqing section of the Three Gorges reservoir region from 2000 to 2011 [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 36(12):141-147.
- [31] 白欣, 贺炳彦, 高婷, 等. 基于 GEE 云平台的榆林市植被覆盖度时空变化研究[J]. *湖北农业科学*, 2022, 61(16):70-75.  
Bai Xin, He Bingyan, Gao Ting, et al. Research on the temporal and spatial changes of vegetation coverage in Yulin based on GEE cloud platform [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(16):70-75.
- [32] 廖春贵, 熊小菊, 胡宝清, 等. 广西不同岩性植被覆盖变化及对人类活动的响应[J]. *生态经济*, 2018, 34(6): 168-173.  
Liao Chungui, Xiong Xiaoju, Hu Baoqing, et al. Variation of vegetation cover on various lithology and its response to human activities in Guangxi [J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(6):168-173.
- [33] 刘冬冬, 潘萍, 付佳, 等. 2000—2020年赣南植被覆盖时空变化特征及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(11):2919-2928.  
Liu Dongdong, Pan Ping, Fu Jia, et al. Spatiotemporal variation and driving factor of vegetation coverage from 2000 to 2020 in southern Jiangxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 2919-2928.
- [34] 李自闯, 董国涛, 姚楠. 1982—2015年黄河中游 NDVI 时空变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(2):202-210.  
Li Zichuang, Dong Guotao, Yao Nan. Analysis of spatiotemporal variations and driving forces of NDVI in the middle reaches of Yellow River during 1982-2015 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(2): 202-210.
- ~~~~~
- (上接第346页)
- [24] 任立良, 王宇, 江善虎, 等. 基于 GRACE 和 GRACE-FO 的黄河流域陆地水储量及影响因素分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4):26-32.  
Ren Liliang, Wang Yu, Jiang Shanhu, et al. GRACE and GRACE-FO-based terrestrial water storage and its influencing factor analysis of the Yellow River basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4):26-32.
- [25] Hu Yungang, Li Huan, Wu Dan, et al. LAI-indicated vegetation dynamic in ecologically fragile region: A case study in the three-north shelter forest program region of China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120:106932.
- [26] 廉泓林, 韩雪莹, 刘雅莉, 等. 基于标准化降水蒸散指数 (SPEI) 的毛乌素沙地 1981—2020 年干旱特征研究[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4):71-80.  
Lian Honglin, Han Xueying, Liu Yali, et al. Study on spatiotemporal characteristics of atmospheric drought from 1981 to 2020 in the Mu Us sandy land of China based on SPEI index [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(4):71-80.
- [27] 尹宜舟, 李多, 孙劭, 等. 2019 年全球重大天气气候事件及其成因[J]. *气象*, 2020, 46(4):538-546.  
Yin Yizhou, Li Duo, Sun Shao, et al. Global major weather and climate events in 2019 and the possible causes [J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(4): 538-546.
- [28] 侯承志, 黄丹青, 桂东伟, 等. 1961—2019 年中国北方沙漠沙地极端气候变化特征及其影响因素[J]. *地理科学*, 2023, 43(8):1495-1505.  
Hou Chengzhi, Huang Danqing, Gui Dongwei, et al. Spatiotemporal variations of climate extremes and influential factors in deserts and sandy fields of northern China from 1961 to 2019 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(8):1495-1505.
- [29] 中国气象局. 2019 年中国气候公报[R]. 北京: 中国气象局, 2020.  
China Meteorological Administration. 2019 China Climate Bulletin [R]. Beijing: China Meteorological Administration, 2020.
- [30] Li Binbin, Li Panpan, Zhang Wantao, et al. Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2021, 399:115122.