

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.05.011 CSTR:32310.14.stbxb.2025.05.011

王昊,董斌,徐志立,等.2000—2023年巢湖流域植被时空演化及其影响因素的空间异质性[J].水土保持学报,2025,39(5):411-420.

WANG Hao, DONG Bin, XU Zhili, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation and spatial heterogeneity of influencing factors in Chaohu Lake basin from 2000 to 2023[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 411-420.

## 2000—2023年巢湖流域植被时空演化及其影响因素的空间异质性

王昊<sup>1,2</sup>, 董斌<sup>1</sup>, 徐志立<sup>1</sup>, 屈建伸<sup>1,2</sup>, 韩月侠<sup>1,3</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036;

3. 安徽农业大学经济管理学院, 合肥 230036)

**摘要:** [目的] 监测巢湖流域的植被覆盖度 (fractional vegetation coverage, FVC) 并分析其影响因素的空间异质性, 为巢湖流域环境保护、水资源调配等提供科学依据。[方法] 利用 GEE 平台计算巢湖流域 2000—2023 年的 FVC, 使用 Theil-Sen Median 斜率估计、Mann-Kendall 趋势检验、变异系数和 Hurst 指数分析其变化特征及趋势, 使用地理探测器和多尺度地理加权回归 (MGWR) 探讨植被时空变化及其影响因素的空间异质性并实现可视化。[结果] 1) 巢湖流域 FVC > 0.4 的面积占比为 60.96%; 2000—2023 年 FVC 总体呈上升趋势, 整体改善区域占比 58.21%, 但未来 FVC 可能面临由改善转为退化的风险。2) 地理探测器因子探测表明, 各影响因素与 FVC 均显著相关; 交互探测显示, 双因素交互作用显著增强对 FVC 的解释能力。3) MGWR 结果显示, 不同影响因素对巢湖流域植被的作用表现出明显的空间差异。4) 各影响因素对巢湖流域 FVC 表现出不同的作用尺度, 其中 GDP、日照时间和高程为全局变量, 其余影响因素为局部变量。[结论] 研究结果有效揭示不同影响因素在空间上的异质性, 为巢湖流域的生态保护提供量化依据和理论支持, 促进区域内的可持续发展。

**关键词:** 植被覆盖度; 时空演化; 影响因素; 地理探测器; 多尺度地理加权回归; 空间异质性

**中图分类号:** X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2025)05-0411-10

## Spatiotemporal Evolution of Vegetation and Spatial Heterogeneity of Influencing Factors in Chaohu Lake Basin from 2000 to 2023

WANG Hao<sup>1,2</sup>, DONG Bin<sup>1</sup>, XU Zhili<sup>1</sup>, QU Jianshen<sup>1,2</sup>, HAN Yuexia<sup>1,3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. School of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to monitor the Fractional Vegetation Coverage (FVC) in the Chaohu Lake basin and analyze the spatial heterogeneity of its influencing factors, providing a scientific basis for environmental conservation and water resource allocation in the basin. [Methods] Using the Google Earth Engine (GEE) platform, FVC in the Chaohu Lake basin was calculated from 2000 to 2023. The Theil-Sen Median slope estimator, Mann-Kendall trend test, coefficient of variation, and Hurst index were applied to analyze the variation characteristics and trends. Furthermore, the geodetector and Multi-scale Geographically Weighted Regression (MGWR) were employed to explore the spatial heterogeneity of spatiotemporal changes in vegetation and their influencing factors, and to visualize results. [Results] 1) Areas with FVC > 0.4 accounted for 60.96% of the Chaohu Lake basin. From 2000 to 2023, FVC of the basin exhibited an overall upward trend, with 58.21% of its area showing vegetation improvement. However, the analysis suggested a potential reversal from greening to

收稿日期: 2025-01-13 修回日期: 2025-02-26 录用日期: 2025-03-11 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-11

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (32071600, 41571101); 安徽省自然资源科技项目 (2022-k-1)

第一作者: 王昊 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事植被覆盖变化及生态服务研究。E-mail: 2290251351@qq.com

通信作者: 董斌 (1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事测绘地理信息技术及其生态环境应用研究。E-mail: dongbin@ahau.edu.cn

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

degradation in the future. 2) Geodetector analysis showed significant correlations between all influencing factors and FVC. Moreover, interactive detection demonstrated that two-factor interactions significantly strengthened the explanatory power for FVC. 3) MGWR results showed pronounced spatial heterogeneity in the effects of various influencing factors on vegetation across the Chaohu Lake basin. 4) Different influencing factors showed distinct scales of impact on FVC in the Chaohu Lake basin, with GDP, sunlight duration, and elevation as global-scale determinants, while the remaining factors were local-scale variables. [Conclusion] The findings effectively elucidate the spatial heterogeneity of different influencing factors, providing quantitative evidence and theoretical foundations for ecological conservation in the Chaohu Lake basin, which contributes to regional sustainable development.

**Keywords:** fractional vegetation coverage; spatiotemporal evolution; influencing factors; geodetector; multi-scale geographically weighted regression; spatial heterogeneity

Received: 2025-01-13

Revised: 2025-02-26

Accepted: 2025-03-11

Online(www.cnki.net): 2025-06-11

植被覆盖度(FVC)是指在单位面积内植被地上部分在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,是地球表面生态系统的重要指标之一,对环境健康、生物多样性和气候调节具有重要影响<sup>[1]</sup>。因此,在全球气候变化和人类活动的持续影响下,FVC的研究变得愈发关键,监测植被时空变化并探索其驱动机制既是科学保护生态环境的需求,也是推动绿色发展和促进人与自然和谐共生的重要科学依据。

近年来,遥感技术已被广泛应用于植被动态变化监测,遥感技术的发展使得其提供的影像数据种类多、信息量大、分辨率高,保证数据在时间和空间上的连续性,且GEE云计算平台可满足大尺度、长时序遥感数据的快速精确处理,为实现FVC长时序动态演化研究提供数据支撑<sup>[2-3]</sup>。通过遥感影像提取计算出的归一化植被指数(NDVI)在植被监测方面得到广泛应用,以NDVI为基础采用像元二分模型估算FVC是现阶段最常用的方法。有研究<sup>[4]</sup>表明,该方法得出的FVC能很好地表征地表植被生长和覆盖状况,并且能改善NDVI对高覆盖度植被易饱和、对低覆盖度植被难区分的不足,可以更好地反映植被演化的特征。

目前,对国内外不同地区的植被时空演化已有较多研究<sup>[5-7]</sup>,分别利用线性回归、趋势分析、Hurst指数和重心迁移模型等方法分析FVC时空变化,有效揭示植被的演化特征和趋势。地理探测器作为一种空间异质性分析工具,在筛选显著影响因素和揭示各影响因素及其交互作用对植被的驱动机制方面被广泛应用。例如,LI等<sup>[8]</sup>使用地理探测器探究滇中城市群的植被覆盖变化中自然因素与人为因素之间的关系;徐勇等<sup>[9]</sup>量化气候因子、地形因子和人为因子对长江流域FVC变化的驱动作用。然而地理探测器等模型得出的空间异质性结果难以可视化,且未考

虑植被与相关影响因素间的空间非平稳性<sup>[10]</sup>,即影响因素对FVC的驱动作用随空间位置发生的变化,故FOTHERINGHAM等<sup>[11]</sup>提出多尺度地理加权回归模型(MGWR),该模型在解析变量间关系的空间异质性时考虑空间非平稳性,能更好地模拟自变量和因变量的地理响应过程,并且提供驱动因素如何影响因变量的空间尺度信息,实现影响因素对因变量驱动作用的可视化<sup>[12]</sup>。将MGWR应用于FVC及其影响因素的空间异质性研究,研究FVC与不同类型要素的空间非平稳关系,可为巢湖流域应对气候变化、城市扩张及提升生态系统适应能力提供理论依据。

巢湖是安徽省最大淡水湖,中国第五大淡水湖,作为长江下游的重要湖泊,每年向长江输送水量约40亿 $m^3$ ,巢湖流域的FVC时空演化对安徽省的生态平衡具有重要影响。近年来,巢湖流域在生态保护和修复方面取得较大成效<sup>[13]</sup>,且目前对于巢湖流域FVC的研究较少,故研究巢湖流域植被时空演化,探索主要影响因素的驱动机制,对巢湖流域未来生态环境保护和植被资源管理具有重要意义。巢湖流域内地形和气候因素均呈明显的空间分异特征,流域内人类活动强度也较大,且已有研究<sup>[14]</sup>表明,上述因素对FVC变化均有直接或间接影响,故本研究从地形、气候及社会3个方面选择影响因素。

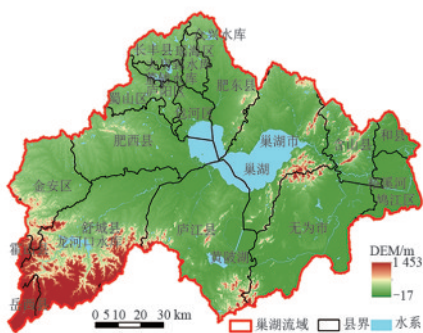
综上所述,针对以往研究对影响因素与植被空间关系的非平稳性考虑不足,且当下对巢湖流域的FVC研究较少,本研究将借助GEE平台对巢湖流域2000—2023年的FVC进行计算,采用Theil-sen趋势分析、Mann-Kendall趋势检验、变异系数法和Hurst指数法对FVC的时空演化特征进行探讨,使用地理探测器模型筛选显著影响因素并量化其交互作用,最后对筛选出的显著影响因素使用MGWR模型定量分

析其对植被演化的驱动作用并实现可视化,以揭示巢湖流域 FVC 时空演化及其影响因素的空间异质性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

巢湖是中国的第五大淡水湖,位于安徽省中部。巢湖流域(30°56′~32°02′N,117°00′~118°29′E)属长江下游左岸水系,东濒长江,西北为江淮分水岭,东北邻滁河流域,南与陈瑶湖、菜子湖及皖河流域毗连,流域总面积 13 544.7 km<sup>2</sup>。巢湖流域年平均地表水资源总量为 53.6 亿 m<sup>3</sup>,其中年平均入湖水量 34.9 亿 m<sup>3</sup>。巢湖流域东西长、南北短,有西高东低、中间低洼平坦形成巢湖盆地的态势,属于江淮丘陵中心地带。巢湖流域涉及合肥市、六安市、安庆市、芜湖市、马鞍山市等 5 市 17 县(市、区)(图 1)。



注:该图基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

### 1.2 数据来源

本研究因变量数据和自变量数据分别对应 FVC 和各项影响因素(表 1)。其中 FVC 是利用 GEE 平台计算得到,数据来自 NASA 的 MODIS 植被指数产品数据 MOD13Q1,数据空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,时间为 2000 年 2 月至 2023 年 12 月。影响因素可分为地形因素、气候因素和人为因素 3 类,包括高程、坡度、降水、气温、相对湿度、蒸散发、日照时间、GDP、人口密度和夜间灯光,各因素的空间分布见图 2。

### 1.3 研究方法

1.3.1 像元二分法反演植被覆盖度 植被覆盖度采用像元二分模型进行计算<sup>[15]</sup>,计算公式为:

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

式中:NDVI<sub>soil</sub>为纯裸地像元的 NDVI 值;NDVI<sub>veg</sub>为纯植被像元的 NDVI 值。其中,纯裸地像元值和纯植被覆盖像元值的理论值应分别接近 0 和 1。本研究中采用 5% 置信度截取 NDVI 上下阈值,分别计算 NDVI<sub>soil</sub>和 NDVI<sub>veg</sub>。

表 1 影响因素数据

影响因素	单位	数据来源
坡度	(°)	美国地质调查局 (https://www.usgs.gov/)
高程	m	
年平均降水量	mm	
年平均气温	°C	国家地球系统科学数据 中心 (http://www.geodata.cn)
蒸散发	mm	
相对湿度	%	
日照时间	h	
GDP	万元/km <sup>2</sup>	中国科学院资源与环境科学 数据中心 (http://www.resdc.cn/)
人口密度	万人/km <sup>2</sup>	
夜间灯光数据	—	国家青藏高原数据中 心 (http://data.tpdc.ac.cn)

1.3.2 时空演化分析方法 本文将 Theil-Sen Median (Sen)斜率估计与 Mann-Kendall(MK)趋势检验相结合,分析 FVC 在像元尺度上的变化趋势<sup>[16]</sup>。Sen 斜率计算公式为:

$$\beta_{FVC} = \text{Median}\left(\frac{FVC_j - FVC_i}{j - i}\right) \quad (2)$$

式中:Median 为取中值,若  $\beta_{FVC} > 0$ ,表明植被覆盖度为增长趋势;反之为下降趋势。

MK 趋势检验的计算步骤为:对于已有的 FVC 时间序列数据,先确定各数据点间的大小关系,此大小关系用 S 表示,后使用检验统计量 Z 进行趋势分析,计算公式为:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(FVC_j - FVC_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中:FVC<sub>j</sub>和 FVC<sub>i</sub>分别为第 j 年和第 i 年的 FVC 值;n 为时间序列的长度。对于给定的置信水平,查找标准正态分布表,确定临界值 Z<sub>1-a/2</sub>。当 |Z| ≤ Z<sub>1-a/2</sub> 时,接受原假设,即趋势不显著;若 |Z| > Z<sub>1-a/2</sub>,则拒绝原假设,表明存在显著趋势<sup>[17]</sup>。本文给定显著性水平 a=0.05,则当 Z 的绝对值 > 1.96 时,表示趋势通过可信度为 95% 的显著性检验。

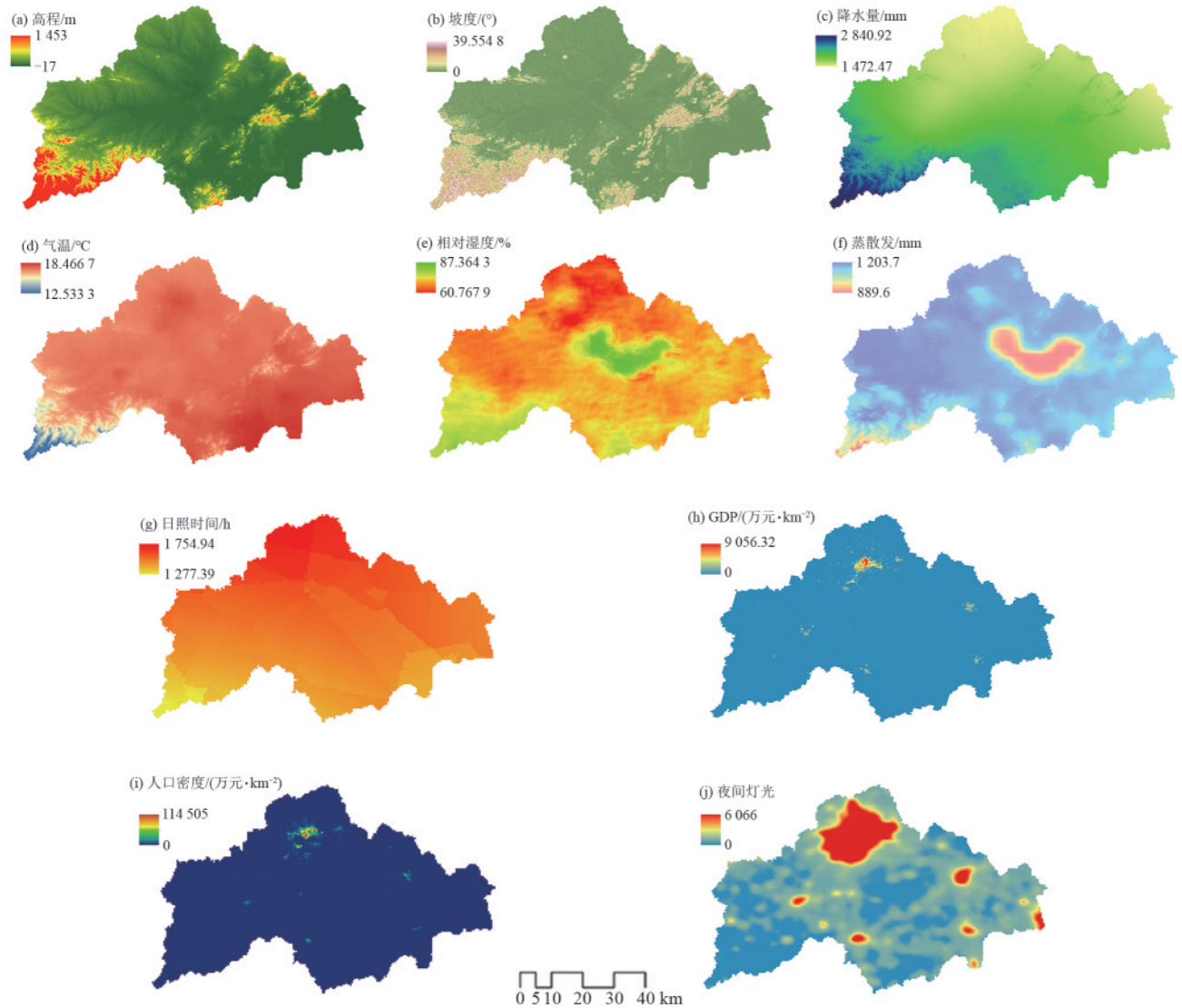


图 2 影响因素空间分布

Fig.2 Spatial distribution of influencing factors

1.3.3 变异系数法 变异系数(coefficient of variation, CV)是一种用于衡量数据变异程度的统计量<sup>[18]</sup>,本研究使用其衡量FVC时空演化的波动性。当变异系数值较大时,说明数据波动较明显,表示植被变化较大;反之,变异系数值较小表示数据波动较平缓,植被变化较为稳定。变异系数的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (FVC_i - \overline{FVC})^2}{n}} \quad (7)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\overline{FVC}} \quad (8)$$

式中: $\sigma$ 为植被覆盖度的标准差; $n$ 为观测年份; $FVC_i$ 为第*i*年的植被覆盖度; $\overline{FVC}$ 为2000—2023年的平均植被覆盖度;CV为变异系数。

1.3.4 Hurst指数 Hurst指数是一种用于衡量时间序列的长期记忆性或自相似性的统计量,本研究使用Hurst指数来分析未来FVC的演变趋势,其取值为0~1<sup>[19]</sup>。

Hurst指数的含义为:如果 $H=0.5$ ,表示时间序列呈随机游走状态,即FVC未来变化没有趋势和自相关性,序列中的数据点之间相互独立;如果 $H<0.5$ ,表示时间序列是一种反依赖性,即FVC的未来变化趋势与过去相反;如果 $H>0.5$ ,表示时间序列是一种正依赖性,即FVC的未来变化趋势与过去相同。

1.3.5 地理探测器 本研究将通过地理探测器筛选对FVC空间异质性<sup>[20]</sup>具有显著解释力的因子并量化其交互作用,从而选取具有显著性的影响因素进一步使用地理加权回归研究其空间异质性。

因子探测器通过*q*值度量自变量对因变量空间异质性的解释力,*q*的值域为[0,1],可用因子探测得出的*p*值检验*q*值是否显著,本研究设置显著性标准为 $p=0.05$ ;交互作用探测用于评估2个驱动因素间的相互作用对因变量的解释力是增强、减弱或独立。

1.3.6 驱动分析方法 多尺度地理加权回归(MGWR)模型是一种空间统计分析方法,用于探索空间数据中变量之间的关系,并考虑空间异质性和尺度效应, MGWR模型是地理加权回归(GWR)的扩展,允许在不同空间尺度上对回归系数进行建模,从而更好地捕捉空间数据的复杂性和变化特征<sup>[21-22]</sup>。故本研究使用MGWR模型以研究其他因子对巢湖流域植被覆盖度空间分布的影响效应与驱动作用,其计算公式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^J \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i \quad (9)$$

式中: $y_i$ 为第*i*个空间单元的因变量; $x_{ij}$ 为第*i*个空间单元的第*j*个自变量; $\beta_0$ 为截距项; $\beta_{bwj}$ 为第*j*个自变量的回归系数; $\epsilon$ 为误差项。在MGWR模型中,每个空间单元都有自己的参数 $\beta_0$ 和 $\beta_{bwj}$ ,这些参数可以根据空间位置的不同而变化。MGWR模型还考虑地理加权矩阵来反映空间上相邻单元之间的关联性。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被覆盖时空演化特征

2.1.1 巢湖流域植被空间分布 本研究基于GEE云平台,计算得到2000—2023年巢湖流域平均FVC的空间分布,并将FVC划分为5个等级(图3)。巢湖流域的中等水平植被覆盖度(FVC为0.4~0.6)的区域面积占比最大,为43.60%;FVC为0~0.2的面积占比为14.27%,主要分布于合肥市区、巢湖水域及其他县市的城区范围内;FVC为0.2~0.4的区域占比为24.77%,主要分布于城市周边及平原地区,为农作物种植的主要区域;FVC为0.6~0.8和0.8~1.0的面积占比分别为9.14%和8.22%,主要分布在西南方海拔较高的大别山区及零星分布的小面积山区。整体来看,巢湖流域FVC处于中上水平,FVC>0.4的面积占比为60.96%。

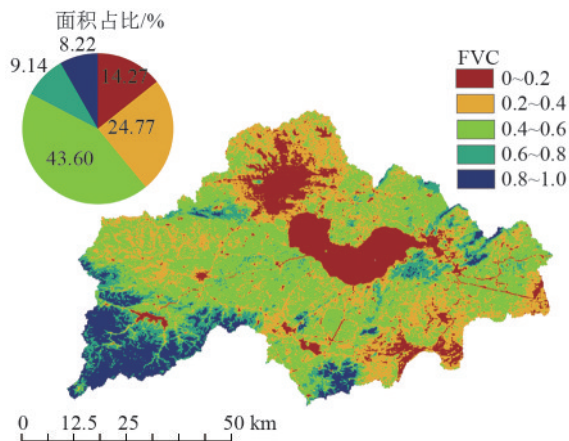


图3 巢湖流域植被覆盖度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of FVC in Chaohu Lake basin

2.1.2 巢湖流域植被时空变化 本研究以2000—2023年的巢湖流域FVC数据为数据源,利用Matlab

编写代码实现 Theil-Sen Median斜率估计和 Mann-Kendall趋势分析,以此得到FVC的变化趋势结果并将其划分为5个等级(表2、图4)。

表2 植被覆盖度变化趋势分级

Table 2 Classification of changing trends of FVC

$S_{FVC}$	Z值	FVC变化趋势
$\geq 0.0005$	$\geq 1.96$	显著改善
$\geq 0.0005$	$-1.96 \sim 1.96$	轻微改善
$-0.0005 \sim 0.0005$	—	稳定不变
$\leq -0.0005$	$-1.96 \sim 1.96$	轻微退化
$\leq -0.0005$	$\leq -1.96$	严重退化

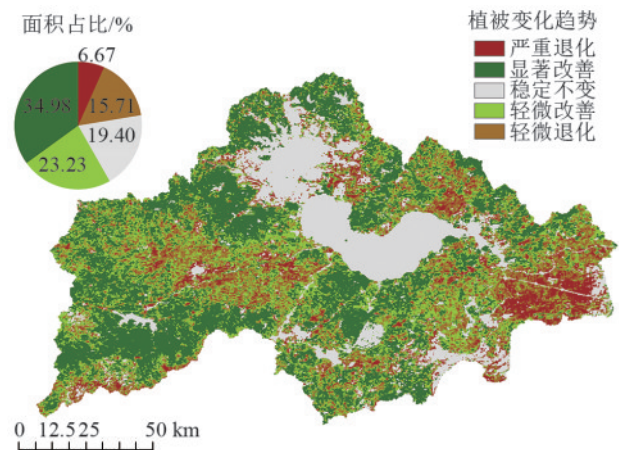


图4 巢湖流域植被覆盖度变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of changing trends of FVC in Chaohu Lake basin

巢湖流域大部分区域的FVC都处于改善趋势,轻微改善和显著改善的面积占比分别为23.23%和34.98%。巢湖流域FVC严重退化的区域占比为6.67%,主要分布于巢湖流域东部的裕溪河两岸、六安市舒城县周边及巢湖东北部区域。由图5可知,巢湖流域2000—2023年间的FVC呈波动上升趋势,到2023年巢湖流域FVC已达到0.49,FVC最低时为2002年的0.39。整体看来,巢湖流域的FVC在2000—2023年得到很大程度的改善,未来也需加强对植被退化区域的重视。

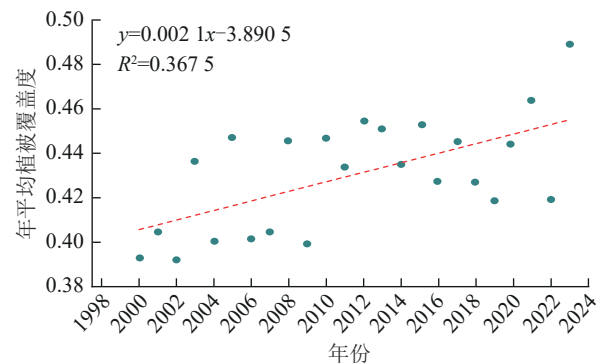


图5 巢湖流域年平均植被覆盖度变化曲线

Fig. 5 Changing curve of annual FVC in Chaohu Lake basin

2.1.3 巢湖流域植被变化稳定性 以巢湖流域 2000—2023 年的 FVC 为数据源,基于 Matlab 软件计算其像元值变异系数,按照计算结果将稳定性分为 5 个等级(图 6),分别为低等波动变化( $<0.05$ )、中低等波动变化( $0.05\sim 0.10$ )、中等波动变化( $0.10\sim 0.15$ )、中高等波动变化( $0.15\sim 0.20$ )和高等波动变化( $>0.20$ )。高等变化区域面积占比最高,为 28.84%,主要分布于合肥市周围及巢湖南部;中高等和中等波动变化的区域面积占比分别为 17.65% 和 21.27%,主要分布于巢湖流域的平原地区;中低等和低等波动变化区域面积占比分别为 11.94% 和 20.33%,处于海拔较高的山地丘陵地区。

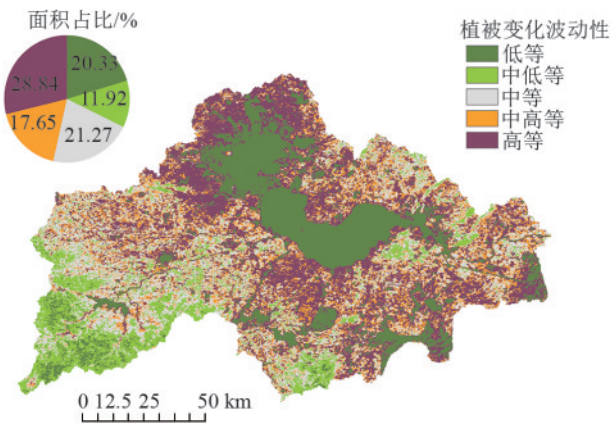


图 6 巢湖流域植被变化稳定性空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of vegetation change stability in Chaohu Lake basin

2.1.4 巢湖流域植被未来变化趋势 本研究将植被覆盖变化趋势与 Hurst 指数进行耦合,得到巢湖流域未来 FVC 变化趋势的空间分布图,以此预测未来巢湖流域的植被覆盖变化。从表 3 和图 7 可以看出, FVC 由改善转为退化为主的面积占比为 38.08%,故未来巢湖流域大部分区域的 FVC 变化趋势将以由改善向退化转变为主。由退化转为改善的面积占比为 12.93%,主要分布于裕溪河两岸的含山、无为和鸠江,证明未来该区域的 FVC 将有所改善;持续改善和持续退化的面积占比分别为 20.14% 和 9.41%,分布位置比较零散。

表 3 植被未来变化趋势分级

$S_{FVC}$	Hurst 指数( $H$ )	FVC 未来变化趋势
$<0$	$<0.5$	由退化转为改善
$>0$	$<0.5$	由改善转为退化
—	$=0.5$	不确定
$<0$	$>0.5$	持续退化
$>0$	$>0.5$	持续改善

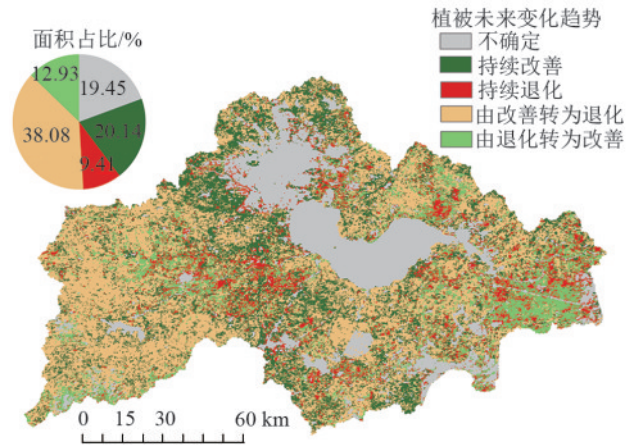


图 7 巢湖流域植被未来变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of future changing trends of vegetation in Chaohu Lake basin

## 2.2 植被覆盖影响因素显著性检验及交互探测

2.2.1 因子探测 地理探测器因子探测所得结果见表 4。本研究以表 4 中的  $p$  值进行影响因素显著性检验,因子探测结果表明,10 项影响因素的  $p$  值均为 0,均通过显著性检验。由表 4 可知,影响因素对 FVC 的解释力从大到小分别为坡度( $0.67$ ) $>$ 高程( $0.62$ ) $>$ 降水量( $0.52$ ) $>$ 气温( $0.50$ ) $>$ 日照时间( $0.42$ ) $>$ 夜间灯光( $0.40$ ) $>$ 相对湿度( $0.40$ ) $>$ 人口密度( $0.14$ ) $>$ 蒸散发( $0.13$ ) $>$ GDP( $0.10$ )。

表 4 地理探测器因子探测结果

序号	影响因素	$q$ 值	$p$ 值
1	坡度	0.67	0
2	高程	0.62	0
3	降水	0.52	0
4	气温	0.50	0
5	日照时间	0.42	0
6	夜间灯光	0.40	0
7	相对湿度	0.40	0
8	人口密度	0.14	0
9	蒸散发	0.13	0
10	GDP	0.10	0

2.2.2 交互探测 了解影响因素间的相互作用更有利于对其空间异质性的解释,本研究使用地理探测器交互探测识别 2 个影响因素相互作用对 FVC 变化的影响(图 8)。图 8 中 X1~X10 分别对应高程、坡度、气温、相对湿度、人口密度、日照时间、GDP、降水量、夜间灯光和蒸散发。结果表明,本研究中任意 2 个驱动因素间的相互作用均为双因素增强,其中坡度和夜间灯光的交互作用最强,解释能力  $q$  值为 0.809 9;夜间灯光和高程的交互作用次之,解释能力  $q$  值为 0.768 0; GDP 和人口密度的交互作用最弱, $q$  值为 0.153 5。

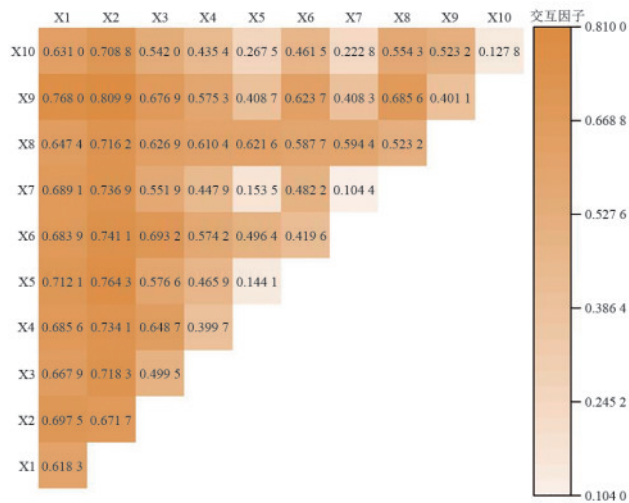


图 8 地理探测器交互探测结果

Fig. 8 Results of interactive detection in geodetector

### 2.3 植被变化影响因素的空间分异特征

2.3.1 影响因素的空间异质性 本研究采用 5 km×5 km 渔网将巢湖流域划分为 584 个样本,借助多尺度地理加权回归(MGWR)模型得出影响因素与 FVC 间的空间异质性,得到各显著影响因素回归系数的空间分布(图 9),其中回归系数的绝对值表明影响因素对于 FVC 的影响程度,回归系数的正负表明影响的方向。因巢湖水域 FVC 基本为 0,且巢湖水体占巢湖流域面积较大,故在进行植被变化影响因素的空间异质性研究时,将巢湖流域水体进行掩膜处理,以减少水体对 FVC 的影响。本文将对影响因素从地形、气候及社会 3 个方面来分析不同因素对于巢湖流域植被变化的驱动力。

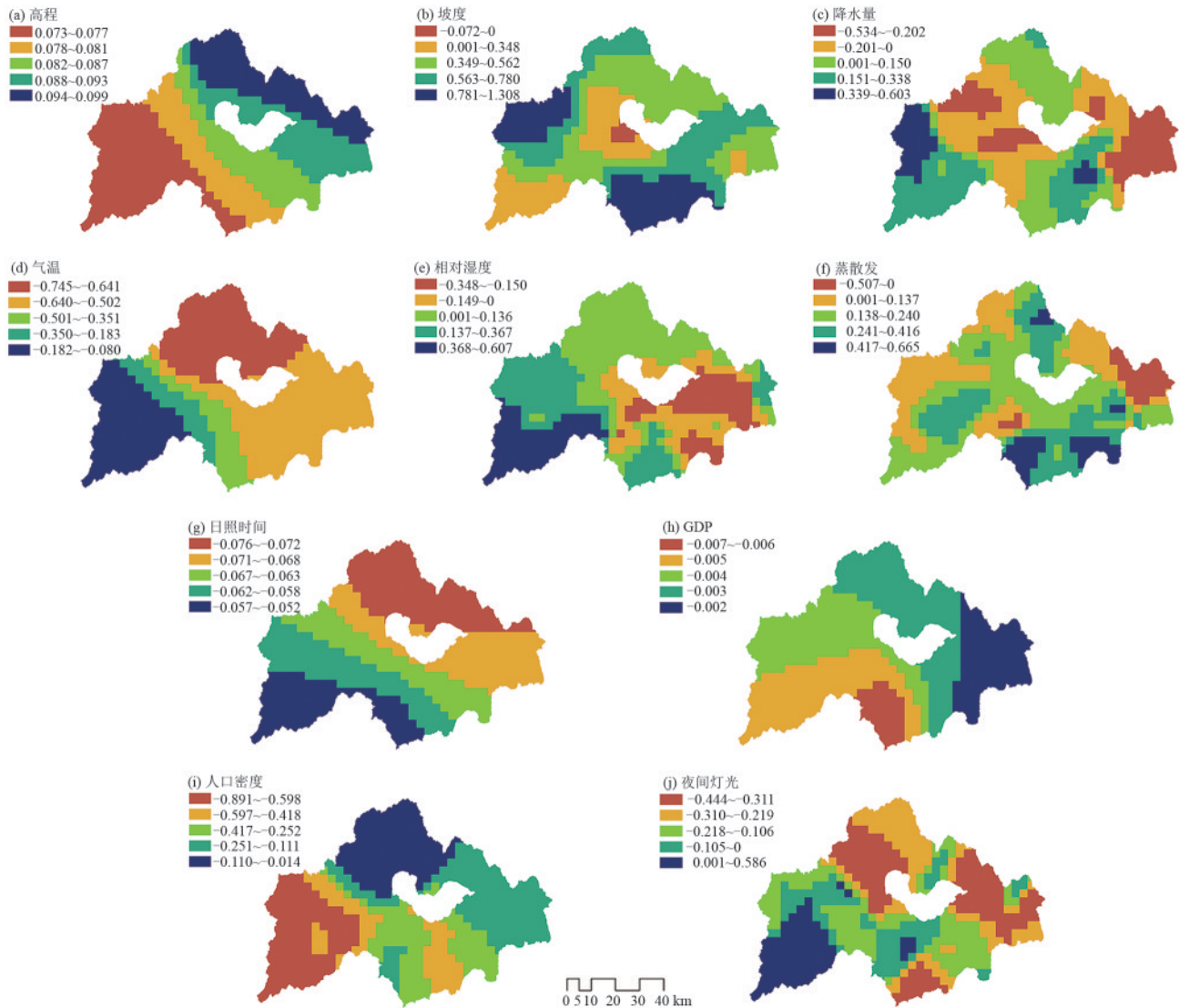


图 9 巢湖流域植被影响因素的回归系数

Fig. 9 Regression coefficients of vegetation influencing factors in Chaohu Lake basin

地形因素方面,高程对巢湖流域整体呈正向作用,回归系数为 0.073~0.099,影响程度由西南向东北逐渐增强。坡度回归系数为-0.072~1.308,其对

巢湖西南侧小部分区域呈负向作用,对其余区域均呈正向作用,其中对巢湖流域西侧和南侧正向作用程度最强。

气候因素方面,降水对巢湖流域FVC存在正负双向作用,回归系数为 $-0.534\sim 0.603$ ,其中对巢湖东西两侧平原地区呈负向作用,对西南山区及巢湖南北两侧区域呈正向作用。气温对巢湖流域全域具有负向作用,回归系数为 $-0.745\sim -0.080$ ,对巢湖北部区域作用最强,对巢湖流域西南部作用较弱。相对湿度对巢湖流域FVC存在正负双向作用,回归系数为 $-0.348\sim 0.607$ ,巢湖流域西南侧呈负向作用,其余区域呈正向作用。蒸散发对巢湖流域FVC存在正负双向作用,回归系数为 $-0.507\sim 0.665$ ,负向作用区域主要位于巢湖流域东侧,大部分区域呈正向作用。日照时间对巢湖流域FVC呈单一负向作用,回归系数为 $-0.076\sim -0.052$ ,呈现由西南向东北逐渐增强趋势。

人为因素方面,GDP对巢湖流域FVC呈单一负向作用,回归系数为 $-0.007\sim -0.002$ ,作用强度较弱且区别不大。人口密度对巢湖流域FVC的影响为负向作用,回归系数为 $-0.891\sim -0.014$ ,其中西南区域的影响最强,北部区域影响最弱。夜间灯光对巢湖流域FVC的影响为正负双向作用,回归系数为 $-0.444\sim 0.586$ ,其中西南区域呈正向作用,巢湖东西两侧及巢湖流域南部负向作用较强。

2.3.2 影响因素的尺度差异 相较于经典的GWR模型而言,MGWR考虑各变量间差异化的异质尺度,允许每个解释变量都在不同的空间尺度上运行,可以反映不同变量对FVC作用尺度的差异。变量带宽代表各变量在空间上的作用尺度,带宽越大,表明变量作用效果的空间异质性越小,反之其空间异质性越大。由图10可知,GWR带宽均为74,占总样本数量的12.6%,而MGWR模型变量带宽选值更加丰富,不同变量的作用尺度有较大的差异,其中坡度带宽为43,蒸散发和降水带宽为44,相对湿度、夜间灯光带宽为45,带宽仅占样本数量的7.5%,证明上述因子对巢湖流域FVC的作用尺度更小,存在显著的空间异质性;GDP、日照时间和高程的带宽为584,为全局作用尺度;人口密度和气温的带宽分别为111和261。

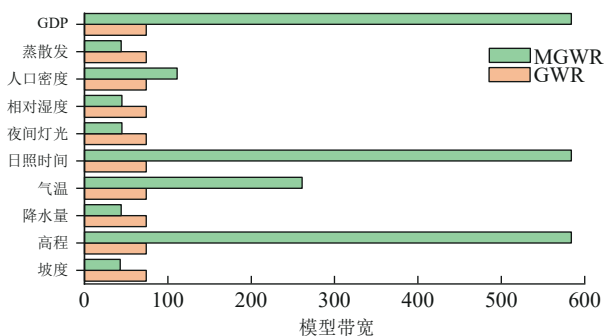


图 10 GWR 和 MGWR 模型带宽

Fig. 10 Bandwidth parameters of GWR and MGWR models

### 3 讨论

#### 3.1 巢湖流域植被时空变化特征分析

本研究发现,巢湖流域FVC分布存在显著的空间异质性。从时间变化来看,2000—2023年巢湖流域FVC总体呈波动上升趋势,与研究区其他相关研究<sup>[23]</sup>结果一致,但巢湖流域各年的FVC波动幅度较大,通过分析变异系数分布可知,波动较高的区域分布于城镇周边和农田,主要受气候波动、农业管理措施和人类活动的共同影响,降水量的年际变化可能导致作物生长状况差异,而轮作制度和休耕政策则进一步加剧FVC的波动性。

从空间变化来看,巢湖流域FVC东部区域呈严重退化趋势,与长三角一体化进程中芜湖市和马鞍山市的大力发展有关,巢湖流域中部平原区作为灌溉农业的重点区域,受益于有效的水资源管理和先进的灌溉技术,植被也得到良好的生长条件,大部分区域FVC明显改善。从未来变化趋势看,巢湖流域FVC可能面临退化风险,尤其是西南大别山区大面积呈现出由改善转为退化趋势,需对该区域重点关注,加强大别山地区的生态保护,在原有高植被覆盖的基础上提升森林的连通性。

#### 3.2 巢湖流域植被变化驱动因素空间异质性分析

地理探测器和MGWR模型的结合为解析多尺度空间异质性提供新思路。地理探测器通过 $q$ 值量化因子解释力,能有效筛选出显著影响因素,但其对空间非平稳性的表征存在局限;而MGWR通过局部回归系数揭示驱动因子作用的区域差异,弥补传统全局模型的不足。本研究结果表明,植被覆盖变化是地形、气候和人为因素共同作用的结果,从地形因素方面看,地形因素是巢湖流域FVC空间分异的核心驱动因素,坡度和高程通过调节水热分布和限制人类活动范围,显著影响植被覆盖格局<sup>[24-25]</sup>,如西南大别山区因地形陡峭、人类干扰较少,FVC普遍高于0.6,与MGWR呈现出的高程和坡度与FVC变化正相关的结果相对应。从气候因素方面看,降水对西南山区及部分海拔较高区域呈现正向作用,可能与西南山区土壤持水能力较强、植被类型对水分需求较高有关;在平原地区降水与FVC呈负相关,可能与城市化导致地表硬化、降水径流增加、土壤水分渗透率下降有关,进而抑制植被根系吸水<sup>[26]</sup>。平原地区农业灌溉依赖人工水源,自然降水的年际波动对植被生长的直接影响较弱,进一步削弱降水与FVC的相关性。气温对巢湖流域全域均具有反向影响,特别在城市化较高的巢湖流域北部作用更为明显,可能与城市热岛效应加剧植被蒸腾胁迫、土壤水分亏

缺有关<sup>[27]</sup>。日照时间的增加可能加剧地表蒸发,导致土壤水分亏缺,抑制植被生长,故日照时间对巢湖流域全域呈负向作用,其作用强度差异也表明降水较低的北部旱作区更容易受到日照时间的影响。相对湿度对巢湖东南侧FVC呈负向作用,湿度升高可能与热岛效应叠加,加剧植被的蒸腾胁迫,尤其在夏季高温时段,高湿度环境可能导致植物气孔关闭,抑制光合作用。

从人为因素方面看,人口密度和GDP对巢湖流域FVC的作用类型均为全域负相关,反映经济发展与生态保护的潜在矛盾,但夜间灯光对巢湖流域西南区域呈正向作用,证明适度的人类活动在局部区域可能促进植被恢复,说明快速城镇化、不合理的垦殖、采矿及旅游开发等活动导致植被退化,而区域实行退耕还林、天然林保护、矿山修复等生态政策,积极调整工、农业生产结构,使退化严重的植被得以不断恢复。本研究分析巢湖流域植被时空演化特征及其影响因素的空间异质性,表明区域植被向好发展,MGWR模型捕捉不同影响因素空间异质性水平的差异<sup>[28]</sup>,各驱动因素在不同空间位置形成正向或负向作用,使得巢湖流域FVC在地形、气候和人为因素的共同影响下空间异质性显著,研究结果可为巢湖流域制定区域型植被恢复政策及区域环境保护策略提供重要依据。然而,本研究也存在一定局限性。一方面,MGWR模型对样本量和数据质量的敏感性可能影响回归系数的稳定性,未来可通过设置不同尺寸的渔网样本对影响结果进行分析;另一方面,为更加全面反映区域植被变化情况,可考虑增加如坡向、工业企业分布和距道路距离等因素。

## 4 结论

1)巢湖流域FVC时空演化明显。空间上,FVC以合肥市区和巢湖为中心向外递增,其中海拔较高的大别山区最高。时间上,2000—2023年巢湖流域FVC呈波动上升趋势,年增速为0.215%;植被改善区域(58.21%)高于植被退化区域(35.11%),但东部区域退化趋势较明显。未来,巢湖流域FVC有退化风险,预计38.08%的区域将由改善转为退化。

2)地理探测器结果表明,选取的10项影响因素均通过显著性检验,坡度、高程和降水是FVC演化的主导驱动因子,气温、日照时间和夜间灯光次之;任意2项因子的交互作用均强于单一因子的独立影响,表明多因子协同效应是FVC演化的重要机制。

3)多尺度地理加权回归得出各影响因素回归系数的空间分布,将各影响因素对FVC的驱动作用可视化,得出植被与各驱动因素间的响应过程表现出

显著的空间异质性。依据MGWR的结果,可精准识别区域植被演化的主要驱动因素,通过与未来植被变化趋势相结合,制定差异化生态管理策略,为巢湖流域生态恢复提供理论指导,促进巢湖流域及周边区域的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] LIU C X, ZHANG X D, WANG T, et al. Detection of vegetation coverage changes in the Yellow River basin from 2003 to 2020[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: e108818.
- [2] PEI H W, LIU M Z, JIA Y G, et al. The trend of vegetation greening and its drivers in the agro-pastoral ecotone of northern China, 2000—2020[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: e108004.
- [3] DONG H, LIU Y H, CUI J, et al. Spatial and temporal variations of vegetation cover and its influencing factors in Shandong Province based on GEE [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(9): e1023.
- [4] YAN K, GAO S, CHI H J, et al. Evaluation of the vegetation-index-based dimidiate pixel model for fractional vegetation cover estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: e4400514.
- [5] LIN J, BO W H, DONG X P, et al. Evolution of vegetation cover and impacts of climate change and human activities in arid regions of Northwest China: A Mu Us Sandy Land case [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2024: 1-20.
- [6] 周美林,刘家宏,刘希胜,等.青海湖流域植被动态变化驱动力及空间粒度效应[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(3): 1497-1506.  
ZHOU M L, LIU J H, LIU X S, et al. Analysis of driving forces and spatial scale effects on vegetation dynamics in the Qinghai Lake basin [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(3): 1497-1506.
- [7] OBRECHT L, GÖTTSCHE F M, SENN J A, et al. Mapping changes in fractional vegetation cover on the Namib gravel plains with satellite-retrieved land surface emissivity data [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(1): e159.
- [8] LI Y J, SONG Y H, CAO X Z, et al. Temporal: Spatial changes in vegetation coverage under climate change and human activities: A case study of central Yunnan urban agglomeration, China [J]. *Sustainability*, 2024, 16(2): e661.
- [9] 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]. *Envi-*

- ronmental Science, 2022, 43(7):3730-3740.
- [10] ZHU L J, MENG J J, ZHU L K. Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. Ecological Indicators, 2020, 117:e106545.
- [11] FOTHERINGHAM A S, YANG W B, KANG W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 107(6):1247-1265.
- [12] 郑启航, 徐光来, 刘永婷, 等. 基于 InVEST 和 MGWR 模型的安徽省生境质量评估及驱动[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3):373-382.
- ZHENG Q H, XU G L, LIU Y T, et al. Assessment and driving of habitat quality in Anhui Province based on InVEST and MGWR models[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3):373-382.
- [13] 高俊峰, 闫人华, 蔡永久, 等. 巢湖流域水生态系统状况变化研究[J]. 湿地科学与管理, 2024, 20(4):21-26.
- GAO J F, YAN R H, CAI Y J, et al. Changes of aquatic ecosystem status in Chaohu Lake catchment[J]. Wetland Science and Management, 2024, 20(4):21-26.
- [14] 李永平, 赵晓燕, 谈树成, 等. 川南城市群植被覆盖度时空演变及驱动力[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5):399-409.
- LI Y P, ZHAO X Y, TAN S C, et al. Spatial and temporal evolution of vegetation cover and driving forces in the urban agglomeration of south Sichuan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5):399-409.
- [15] 杨绘婷, 徐涵秋. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2):533-542.
- YANG H T, XU H Q. Assessing fractional vegetation cover changes and ecological quality of the Wuyi Mountain National Nature Reserve based on remote sensing spatial information[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2):533-542.
- [16] 赵楠, 赵颖慧, 邹海凤, 等. 1990—2020 年黑龙江省植被覆盖度的时空变化趋势及驱动力[J]. 应用生态学报, 2023, 34(5):1320-1330.
- ZHAO N, ZHAO H Y, ZOU H F, et al. Spatial and temporal trends and drivers of fractional vegetation cover in Heilongjiang Province, China during 1990—2020 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(5):1320-1330.
- [17] YUAN W P, SUN H, CHEN Y, et al. Spatio-temporal evolution and spatial heterogeneity of influencing factors of SO<sub>2</sub> emissions in Chinese cities: Fresh evidence from MGWR[J]. Sustainability, 2021, 13(21):e12059.
- [18] HE J, SHI X Y, FU Y J. Identifying vegetation restoration effectiveness and driving factors on different micro-topographic types of hilly Loess Plateau: From the perspective of ecological resilience [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 289:e112562.
- [19] 刘雨亭, 王磊, 李谢辉, 等. 西南地区 2000—2020 年植被覆盖度时空变化与影响因素分析[J]. 高原气象, 2024, 43(1):264-276.
- LIU Y T, WANG L, LI X H, et al. Analysis on spatio-temporal variability of fractional vegetation cover and influencing factors from 2000 to 2020 in southwestern China[J]. Plateau Meteorology, 2024, 43(1):264-276.
- [20] HUANG L Y, WANG J, CHEN X J. Ecological infrastructure planning of large river basin to promote nature conservation and ecosystem functions[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 306:e114482.
- [21] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARLTON M. Geographically weighted regression[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series D, 1998, 47(3):431-443.
- [22] MA Z, FAN H. Influential factors of tuberculosis in mainland China based on MGWR model[J]. PLoS One, 2023, 18(8):e0290978.
- [23] 王亚琼, 高曼莉, 罗劲松, 等. 2001—2021 年巢湖流域植被覆盖时空变化及驱动分析[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(6):58-68.
- WANG Y Q, GAO M L, LUO J S, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and driving forces in Chaohu Lake basin from 2001 to 2021 [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(6):58-68.
- [24] XIONG Y L, LI Y R, XIONG S Y, et al. Multi-scale spatial correlation between vegetation index and terrain attributes in a small watershed of the upper Minjiang River[J]. Ecological Indicators, 2021, 126:e107610.
- [25] PENG W F, KUANG T T, TAO S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233:353-367.
- [26] LI J, WANG J L, ZHANG J, et al. Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar economic corridor based on Google Earth Engine and geographic detector[J]. Ecological Indicators, 2022, 136:e108620.
- [27] WANG S R, MENG W, JIN X C, et al. Ecological security problems of the major key lakes in China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5):3825-3837.
- [28] XUE C L, ZHANG H Q, WU S M, et al. Spatial-temporal evolution of ecosystem services and its potential drivers: A geospatial perspective from Bairin Left Banner, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 137:e108760.