

基于 OPGD-RF 模型的城市化对长沙市生态韧性的影响及其驱动因素研究

卢雨桐¹, 黄春华^{1,2,3}, 周娥强¹, 张慧琦¹

(1.南华大学 松霖建筑与设计艺术学院, 湖南 衡阳 421001; 2.湖南省健康城市营造工程技术研究中心, 湖南 衡阳 421001; 3.生态型区域—城市规划与管理衡阳市重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘要: [目的] 测度城市化发展水平对生态韧性的影响并识别生态韧性下降的关键影响因素, 为长沙市可持续发展与生态保护提供理论支持。[方法] 以长沙市为例, 采用熵值法通过“人口-经济-土地-生态”多维度测算综合城市化水平(UL), 应用“抵抗—适应—恢复”模型评估生态韧性。运用空间自相关模型分析二者时空关联特征, 并利用最优参数地理探测器和随机森林耦合模型(OPGD-RF 模型)揭示城市化水平及其他驱动因子对生态韧性的影响机制。[结果] ①2000—2024 年长沙市城市化水平总体以中高水平为主, 呈现出高度城市化地区由单中心圈层式转为多中心极核式的空间分异特征; ②生态韧性则总体处于中低水平, 呈现“北部和西部高, 中部和东北部低”“低值集聚, 高值分散”的空间分布特征; ③土地城市化是导致生态韧性下降的核心驱动因素。④人口集聚与经济增长并非必然导致生态韧性下降, 其影响方向与强度存在阶段性差异。[结论] 在不同发展阶段, 生态韧性主导驱动因子会动态变化。平衡城市化发展与生态韧性不仅对区域的稳定至关重要, 也是确保其在未来挑战中长期生存的关键所在。

关键词: 城市化水平; 生态韧性; “抵抗—适应—恢复”模型; 最优参数地理探测器; 随机森林模型; 长沙市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0378-13

中图分类号: F301.21

文献参数: 卢雨桐, 黄春华, 周娥强, 等. 基于 OPGD-RF 模型的城市化对长沙市生态韧性的影响及其驱动因素研究[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 378-390. Lu Yutong, Huang Chunhua, Zhou Eqiang, et al. Impacts of urbanization on ecological resilience and its driving factors in Changsha City based on OPGD-RF model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 378-390.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.017

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.017

Impacts of urbanization on ecological resilience and its driving factors in Changsha City based on OPGD-RF model

Lu Yutong¹, Huang Chunhua^{1,2,3}, Zhou Eqiang¹, Zhang Huiqi¹

(1.Songlin College of Architecture and Design, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2.Health City Construction Engineering Technology Center of Hunan Province, Hengyang, Hunan 421001, China;

3.Hengyang City Key Laboratory of Ecological Region Urban Planning and Management, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: [Objective] The impacts of urbanization level on ecological resilience and identify the key influencing factors of ecological resilience decline were measured, in order to provide theoretical support for the sustainable development and ecological protection of Changsha City. [Methods] Taking Changsha City as an example, this study employed the entropy method to calculate the urbanization level (UL) through a ‘population-economy-land-ecology’ multi-dimensional framework and applied the ‘resistance-adaptation-recovery’ model to evaluate ecological resilience (ER). Spatial autocorrelation analysis was used to examine the spatiotemporal correlation characteristics between the two, and the optimal parameters-based geodetector coupled with random forest model

收稿日期: 2025-05-06

修回日期: 2025-09-08

采用日期: 2025-09-11

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“温度层结条件下气态污染物迁移扩散规律”(U1867221); 南华大学博士科研启动基金“夏热冬冷地区传统村落空间结构的弱化因素及多元共生建设模式研究”(190XQD047)

第一作者: 卢雨桐(1997—), 女(汉族), 黑龙江省牡丹江市人, 硕士研究生, 研究方向为城市规划方法与技术。Email: 20232019111424@stu.usc.edu.cn.

通信作者: 黄春华(1967—), 女(汉族), 湖南省湘潭市人, 博士, 教授, 主要从事城乡规划、建筑设计、景观设计理论与应用研究。Email: 2017001007@usc.edu.cn.

(OPGD-RF model) was utilized to reveal the impact mechanisms of urbanization level and other driving factors on ecological resilience. [Results] ① From 2000 to 2024, the urbanization level in Changsha City was predominantly medium to high, exhibiting spatial differentiation characteristics where highly urbanized areas shifted from a single-center concentric pattern to a multi-center polar-core pattern. ② Ecological resilience was generally at medium to low levels, showing spatial distribution patterns of 'higher in the north and west, lower in the central and northeast regions' and 'clustered low values and scattered high values'. ③ Land urbanization was the core driving factor causing a decline in ecological resilience. ④ Population agglomeration and economic growth did not necessarily lead to a decline in ecological resilience. Their direction and intensity of impact varied across different stages. [Conclusion] At different development stages, the dominant driving factors of ecological resilience change dynamically. Balancing urbanization development and ecological resilience is not only crucial for regional stability but also key to ensuring its long-term survival in the face of future challenges.

Keywords: urbanization level; ecological resilience; resistance-adaptation-recovery model; optimal parameters-based geodetector; random forest model; Changsha City

快速城市化对全球生态系统可持续性构成严峻挑战,主要表现为城市建成区扩张破坏了生态结构与功能,土地覆盖变化导致栖息地丧失和生物多样性降低,生态环境承载力下降;同时,城市化进程增加不透水表面积,减少自然土壤覆盖,引发局地气候变化、洪涝风险上升及碳储量降低^[1-2]。快速城市化的负面影响在城市群区域尤为明显,这些区域集中了大量的人口、经济活动和资源消耗,同时也承受了最大的环境压力^[3]。在此背景下,生态韧性作为一种系统适应和应对干扰能力的概念,逐渐成为城市化与生态研究的核心议题^[4]。探讨城市化进程中生态韧性的演变特征,城市化进程如何影响生态韧性,对实现城市生态可持续性具有重要意义。

1973年加拿大生态学家霍林^[5]将韧性研究引入生态系统学,认为生态韧性是指生态系统恢复平衡的速度,应对危机并且进行自我恢复以及适应新环境的能力。在快速城市化背景下,评估生态韧性(ecological resilience, ER)并探讨城市化与生态韧性之间的关系已成为当前研究热点^[6]。在相关研究^[7]中,城市化的影响已经被广泛探讨,尤其是城市化对生态系统结构、功能的复杂影响。现有的研究大多集中在城市群和区域尺度的分析^[8],涵盖了省级地区^[9],经济区等^[10]方面,研究内容主要包括演化特征、城市化与生态韧性的地理联系、生态韧性演化的驱动因素^[11-13]。研究表明,快速城市化过程通常伴随着生态环境的退化,尤其是在土地利用和覆被变化的驱动下,生态系统的原有功能受到了极大压缩,进而影响了生态韧性的恢复能力。

目前,评估生态韧性的主要框架包括“压力—状态—响应”(PSR)模型,“抵抗—适应—恢复”模型^[3]和“形态—密度—协调”模型^[14]。这些框架为评估城市生态系统的韧性提供了系统性的理论依据,并且

在不同尺度的研究中得到了广泛应用^[15]。这些方法提供了更加细化的分析视角,有助于识别和量化城市化进程中的生态风险因素。

对于空间关系的研究,学者们通常采用空间自相关模型^[16],耦合协调模型^[17]以及Tapio解耦模型等方法^[18],以揭示城市化与生态环境之间的复杂关系。例如,空间自相关模型可以用来分析城市扩张对生态环境分布的影响,而耦合协调模型则能揭示城市化与生态恢复力之间的协同作用^[19]。

此外,用于确定影响因素的模型包括地理加权回归(GWR)、地理和时间加权回归(GTWR)、地理探测器等^[20-22]。地理探测器通过量化不同变量间的空间异质性,能够有效识别影响因素的空间分布特征。其优点在于操作简单、直观,尤其适用于探讨区域尺度上不同变量之间的非线性关系。然而,地理探测器的局限性也不容忽视,它无法处理变量之间的复杂交互效应,也缺乏对空间自相关的有效处理,这可能导致某些空间模式未能得到充分揭示。通过这些方法的综合应用,研究者能够更深入地分析城市化与生态韧性之间的内在联系,为区域生态环境保护与可持续发展提供理论支撑。

现有的生态韧性研究主要集中在城市群、都市圈、流域等范围,对单一城市的生态韧性研究较少。且尽管现有研究通过地理探测器、地理加权回归等模型对生态韧性驱动机制进行了探索,但方法学层面仍存在双重局限,首先传统地理探测器在设定关键空间参数(如网格尺度)时多依赖经验或简单遍历,影响空间异质性探测的精度,难以解析多维驱动因子间的非线性交互效应,对空间自相关的忽视可能弱化因果推断的稳健性;其次单一机器学习模型虽能捕捉复杂非线性关系,却缺乏对空间异质性的显式表征。

针对上述问题,本文以长沙市为研究对象,探索构建“最优参数地理探测器—随机森林”(optimal parameters-based geodetector-random forest, OPGD-RF)耦合分析框架。该框架的核心在于通过方法整合与优化,更有效地解析城市化对单城市生态韧性的影响及其多维驱动机制。具体工作包括:①空间参数校准优化。针对传统地理探测器的空间异质性探测对参数敏感的局限,系统评估不同空间离散化方案(q 值,选取 q 值最大的方案确定最优空间划分参数。此优化步骤旨在提升地理探测器对长沙市生态韧性空间分异格局探测的客观性与准确性。②因子贡献量化方法的协同耦合。OPGD因子探测与RF变量重要性分析。OPGD揭示各驱动因子影响力的空间分异性,而RF则量化其非线性贡献及交互效应强度。这种双向合机制旨在弥合“空间异质性”与“非线性关系”分析之间的割裂,提供更全面的驱动因子解析。③基于交叉验证的融合效果评估。设计严格的交叉验证流程,将数据集划分为训练集与验证集。在训练集上分别构建OPGD-RF耦合模型、单一OPGD模型及单一RF模型,并在验证集上对比其预测精度及关键驱动因子识别的一致性。结果表明OPGD-RF在预测精度与驱动因子识别的稳健性上均显著优于单一模型。本研究提出的OPGD-RF框架,主要在针对特定方法局限(空间异质性与非线性表征的割裂)所进行的方法整合策略优化。通过这一框架,旨在深入分析城市化进程中单一城市生态韧性的多维驱动因素,推动对其复杂作用机制的深入理解。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长沙市是中国湖南省的省会城市,位于湖南省的北部,湘江下游,总面积约为11 800 km²。长沙市行政区划包括9个区、县和县级市,分别是岳麓区、天心区、开福区、雨花区、芙蓉区、望城区、长沙县、浏阳市和宁乡市。长沙市地势较为平坦,地形以河谷平原和丘陵为主,属于亚热带湿润气候区,具有四季分明,春秋温和,夏季炎热,冬季寒冷的气候特点,年平均温度约为16.8℃。截至2024年,长沙市常住人口超过1 060万人,人均地区生产总值(GDP)超过20 000美元;三次产业增加值总计达到15 268亿元以上。

研究区域2000—2024年耕地、林地和草地面积分别减少9.58%,3.50%和3.46%,2024年建设用地规模是2000年的3.00倍。相关文献^[23]表明,长沙市

城市扩张以“吞噬”模式进行,导致城市景观破碎化、形状复杂化,生境质量退化,发展与保护之间的冲突在该地区十分突出。因此需注重生态韧性与城市空间的协调发展,确保自然生态系统的健康与城市活动的和谐共存,从而提高城市对环境变化的适应能力和恢复力,保障长沙市的长期繁荣与居民福祉。

1.2 数据来源与数据预处理

研究数据主要包括2000,2010和2024年的自然地理数据和社会经济数据(表1)。2000,2010和2024年的土地利用数据来自中国科学院的资源与环境科学数据登记和发布系统,土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6个基本类型。本文结合最新的遥感影像数据,对研究区域内的土地利用分类进行了详细的验证与修正,确保土地利用类型的划分与实际情况相符,进一步提高数据的精度和可靠性。各区县粮食产量、播种面积、农产品价格、社会经济发展指标数据均来自2001,2011和2025年《湖南省统计年鉴》,其他数据来源参考表1。采用网格技术对栅格数据进行处理和分析,根据研究目的、研究数据特征和相关计算验证,将研究区域划分为1 km×1 km的网格,共计12 382个网格。

2 研究方法

2.1 熵权法

熵权法是根据各指标所包含的信息来确定各评价指标的权重^[24]。该方法计算过程简单,它的主要优势在于能够根据数据本身的特征确定各指标的重要性,避免人为主观因素的干扰,因此在城市化水平的综合评估中得到广泛应用。本研究通过熵权法确定指标权重,为后续的城市化水平计算提供客观依据。初始评价矩阵由 m 个评价指标和 n 个评价对象组成。

$$(\mathbf{x}_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $(\mathbf{x}_{ij})_{m \times n}$ 表示一个矩阵,其中 x_{ij} 是矩阵中的元素, m 和 n 分别是矩阵的行数和列数。矩阵 $(\mathbf{x}_{ij})_{m \times n}$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)中的所有索引值 x_{ij} 根据等式(2)进行归一化。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (2)$$

式中: x'_{ij} 表示归一化后的矩阵元素,即第 i 行第 j 列的元素经过归一化处理后的值; x_{ij} 表示原始矩阵 i 中第

行第 j 列的元素; n 表示矩阵的列数。

然后,可以获得每个评价指标的熵 e_i :

$$e_i = \frac{\sum_{j=1}^n x'_{ij} \ln x'_{ij}}{\ln n} \quad (3)$$

式中: e_i 表示第 i 行的熵值; x'_{ij} 表示归一化后的矩阵元素,即第 i 行第 j 列的元素经过归一化处理后的值。

各评价指标的权重可通过公式(4)计算:

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad (4)$$

式中, w_i 表示第 i 个元素的权重; m 表示总的元素的数量。满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。熵权值越大,指标对方案的

影响越大。即指标包含和传递的决策信息较多,对最终评价决策的影响较大。

现有研究多侧重于单一因素(如人口或土地利用)衡量城市化水平,而本研究则构建“人口-经济-土地-生态”多维评价模型,旨在全面测度城市化水平。为此,我们通过熵值法确定各指标的权重,并进行叠加分析,最终计算出城市化水平(urbanization level, UL),作为生态韧性影响因素之一(X_{12})。在此过程中,所有数据经过标准化处理,使得数值统一到[0, 1]区间。参考已有研究成果,从土地城市化、人口城市化、经济城市化和生态城市化4个维度选取11个指标,构建长沙市城市化综合测度的指标体系(表1)。

表 1 长沙市城市化综合水平指标体系

Table 1 Comprehensive urbanization level indicator system in Changsha City

一级指标	二级指标	三级指标	指标含义	性质	数据来源
X ₁₂ 城 市 化 水 平	土地城市化	X ₁ 夜间灯光	反映建成区活跃度	正向	www.resdc.cn
	人口城市化	X ₂ 人口密度/(人·km ⁻²)	反映人口聚集程度	正向	www.worldpop.org
	经济城市化	X ₃ GDP/(万元·km ⁻²)	反映空间经济强度	正向	www.resdc.cn
		X ₄ 碳排放/t	反映工业与能源消耗强度	正向	edgar.jrc.ec.europa.eu
	生态城市化	X ₅ 土壤侵蚀/(t·hm ² ·a ⁻¹)	反映人为开发强度	正向	essd.copernicus.org
		X ₆ 归一化植被指数	反映生态空间稀缺度	负向	www.resdc.cn
		X ₇ PM _{2.5} 浓度/(μg·m ⁻³)	反映城市环境污染水平	正向	data.tpdac.ac.cn
		X ₈ 地表温度/K	反映地面热力强度	正向	www.resdc.cn
		X ₉ 建成区比例/%	反映城市土地扩张程度	正向	www.gscloud.cn
	土地城市化	X ₁₀ 路网密度/(km·km ⁻²)	反映基础设施完善度	正向	www.resdc.cn
	X ₁₁ 距行政中心距离/km	反映土地开发梯度	负向		

2.2 “抵抗—适应—恢复”模型

根据国际地方环境倡议理事会(ICLEI)定义的弹性城市的概念和内涵,基于城市和区域面对干扰的弹性的基本要素,构建了“抵抗—适应—恢复”模型,本研究将这一模型应用于长沙市的生态韧性评估,为理解和量化城市生态系统在城市化进程中的应对能力提供了有效框架。采用景观生态学方法,以“生态系统服务价值”“景观格局指数”和“生态恢复系数”分别表征抵抗力(P)、适应力(A)和恢复力(R)3个指标,并将结果标准化处理,再叠加得到生态韧性水平(ER)^[25]。计算公式为:

$$ER = \sqrt[3]{P \cdot A \cdot R} \quad (5)$$

式中:ER为生态韧性水平; P, A, R 分别为抵抗力、适应力和恢复力的标准化值。

$$P = ESV = \sum A_k \cdot VC_{jk} \quad (6)$$

式中:ESV为生态系统服务价值; A_k 是土地利用类型 K 占总用地面积的比例; VC 是土地利用类型 K 的第

f 项生态系统价值系数,其系数来自相关研究土地利用类型的部分生态系统服务价值系数(表2)。

利用生态系统景观结构稳定性相关指标来表述模型的适应力,采用景观指数评估景观稳定性,重点分析景观异质性和连通性。这两者分别描述生态系统景观结构的两个方面,彼此不能替代,因此其权重可假设为相等,具体指标详见表3。

$$R = \sum A_k \cdot RC_i \quad (7)$$

式中: R 为生态系统恢复力; RC_i 土地利用类型 K 的生态恢复力系数(表4),系数参考 Peng Jian 等^[26]的研究成果。

2.3 空间自相关模型

空间自相关模型是用于衡量空间变量的分布是否具有集聚性,是分析空间格局的重要方法和有效手段^[27]。生态韧性与自然地理要素分布、社会发展状况等多种因素相关,这些因素在空间上均具有随机性和结构性,具有地学特征,存在着一定的空

间关联性,可以运用空间自相关进行分析。空间自相关分析可分为全局空间自相关分析和局部空间自相关分析,一般利用 Moran's I 指数来表示。本研究

采用全局 Moran's I 和双变量 local Moran's I 分析 UL 和 ER 的空间关系,识别 UL 和 ER 的空间分布模式,并得出局部空间相关的 Lisa 聚类结果^[28]。

表 2 研究区生态系统服务价值等值系数
Table 2 Equivalent factors of ecosystem service value in study area

生态系统分类	生态服务价值系数						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
供给服务	食物生产	1.36	0.29	0.38	0.80	0	0
	原料生产	0.09	0.66	0.56	0.23	0	0
	水资源供给	-2.63	0.34	0.31	8.29	0	0
调节服务	气体调节	1.11	2.17	1.97	0.77	0	0.02
	气候调节	0.57	6.50	5.21	2.29	0	0
	净化环境	0.17	1.93	1.72	5.55	0	0.10
	水文调节	2.72	4.74	3.82	102.24	0	0.03
支持服务	土壤保持	0.01	2.65	2.40	0.93	0	0.02
	维持养分循环	0.19	0.20	0.18	0.07	0	0
	生物多样性	0.21	2.41	2.18	2.55	0	0.02
文化服务	美学景观	0.09	1.06	0.96	1.89	0	0.01

表 3 景观指数及权重
Table 3 Landscape indices and weights

项目	景观指数	权重
景观异质性	香农多样性指数	0.25
	面积加权平均斑块分形维数	0.25
景观连通性	景观破碎度	0.50

表 4 不同土地利用类型的生态恢复系数
Table 4 Ecological restoration coefficients for different land use types

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
生态恢复系数	0.3	0.8	0.5	0.8	0.2	1

2.4 最优参数地理探测器—随机森林模型

Geodetector 是一种空间统计模型,用于识别地理分层异质性并阐明其潜在原因;它可以量化空间异质性,找到解释因素并研究变量的相互作用^[29]。因子的解释程度通过 q 值来衡量, q 值在 $[0,1]$ 的范围内; q 值越接近 1,空间异质性越显著,因子的解释能力越好^[30]。

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

式中: $h=1, \dots, L$ 表示因变量 Y 或自变量 X 的分层; N_h, N 分别表示第 h 层和整个区域中的单元数量; σ_h^2, σ^2 分别表示第 h 层内和整个区域中 Y 值的方差。

Geodetector 模型通过数值比较 $q(X_1), q(X_2)$ 和 q

$(X_1 \cap X_2)$, 可以评估两个因素的联合作用是否提高或降低单个因素对因变量的解释力。使用 Geodetector 分析连续数据需要离散化数据,但传统的离散化方法存在主观性。为克服这一问题,OPGD 模型通过多种离散化方法的迭代,自动确定最优的空间分类尺度,从而提高分析精度。本研究基于 R 语言软件包“GD”,使用 OPGD 模型分析长沙市生态韧性的空间异质性,识别关键影响因素及其相互作用。随机森林模型是一种基于决策树的机器学习算法。该算法通过计算变量的非线性效应来规避多变量协方差的问题;它不需要选择变量,并且通过特征重要性排序和产生有偏依赖图来提高模型的可解释性。以 $X_1 - X_{12}$ 为解释变量,以 ER 为因变量,建立 RF 回归模型。使用 %IncMSE(均方误差增加百分比)作为按重要性对变量进行排序的标准化标准。如果该值增加,则表明该变量在创建 RF 模型时更重要。该模型是用 R 语言 4.2.0 实现的。OPGD-RF 模型结合地理探测器和随机森林两种方法,能够识别生态韧性的空间异质性,并量化影响因素及其相互作用。Geodetector 模型通过空间分层异质性分析,可识别各因子对生态韧性的影响程度,而随机森林回归则能够捕捉因变量与解释变量之间的复杂非线性关系。这一方法的结合提高了分析的精度和解释性。

3 结果与分析

3.1 长沙市生态韧性的时空演变特征

由图 1 抵抗力(P)、适应力(A)和恢复力(R)标准

化值的空间分布图可以看出,水域和林地具有突出的生态系统服务价值,抵抗力较高,但湘江周边生产生活空间为抵抗力低值区。适应力低值区主要分布在耕地、建设用地范围以及林地。水域和林地的恢复力较高,建设用地的恢复力低。图2为2000—2024年长沙城市生态韧性水平的时空变化。从时

间上来看,城市生态韧性水平呈现下降趋势,从网格水平上统计其均值下降了34.48%,标准差也下降了10.01%;空间分布来看,城镇建设区为低值区,水域林地为高值区;2000—2024年长沙市中心城区ER显著下降,生态韧性低值区域向长沙市中心城区的东北和西北方向扩张。

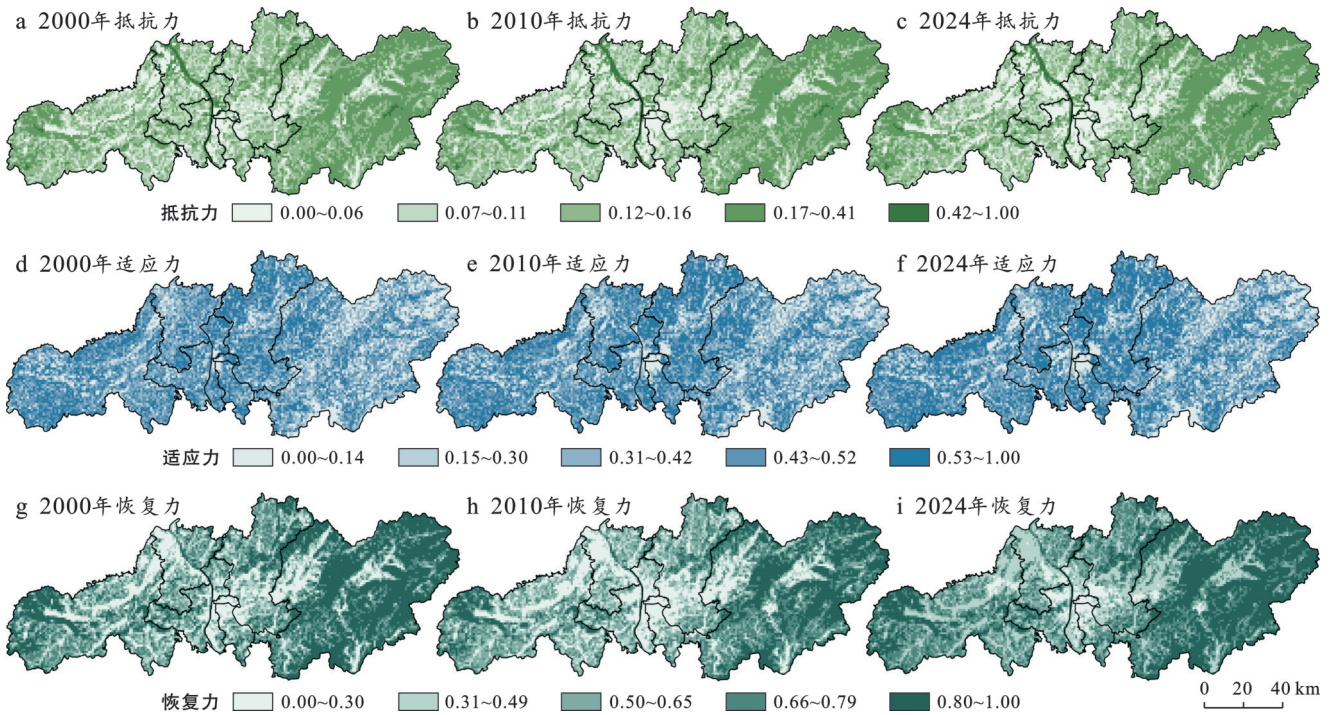


图1 长沙市2000—2024年抵抗力(P)、适应力(A)和恢复力(R)空间分布

Fig.1 Spatial distribution of resistance (P), adaptation (A) and recovery (R) in Changsha City from 2000 to 2024

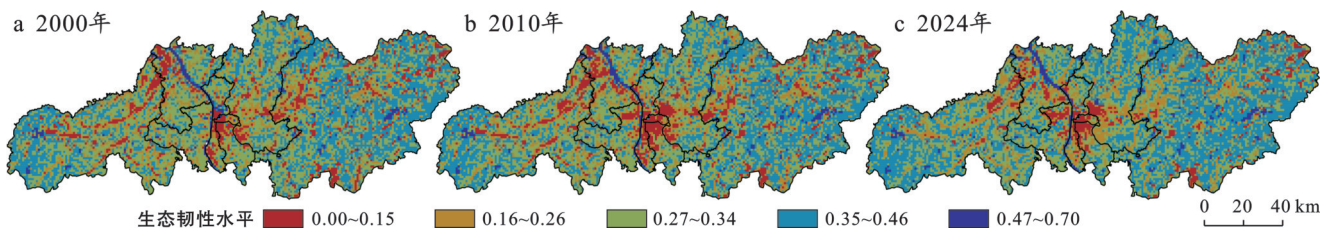


图2 长沙市2000—2024年生态韧性空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological resilience in Changsha City from 2000 to 2024

3.2 城市化与生态韧性的空间关系

2000,2010和2024年城市化水平的全局Moran's I值分别为0.754,0.847和0.812($p < 0.01$),表明城市化水平呈现出正的空间相关性,并趋于聚集,相关性先增大后减小。

城市化水平空间分布的结果(图3)表明:①总体而言,长沙市的高值区普遍存在于岳麓区、开福区、雨花区、天心区和芙蓉区,且范围圈层式继续扩大;②2000—2024年长沙市中心城区城市化水平最高值水平呈下降趋势,2010年以后,城市化集聚区沿湘江呈带状扩展,且宁乡市和浏阳市城市化地区进一步扩大。根据城市化水平和生态韧性的空间相关性分

析,2000,2010年和2024年的双变量“UL-ER”全局Moran's I值分别为-0.215,-0.231和-0.396($p < 0.01$),表明城市化水平与生态韧性存在空间负相关,且负相关程度逐渐增强。

通过二元local Moran's I计算,得到“UL-ER”地理分布的丽莎聚类图(图4)。由图4可知,长沙市的城市化水平和生态韧性存在相当大的地理异质性:①高-低集聚区主要分布在长沙市主城区、宁乡市中部、长沙县中部、浏阳市西侧,杭长高速附近。长沙市中心城区高-低集聚区覆盖面积2000—2024年持续扩大,宁乡市和浏阳市高低集聚区覆盖面积2010—2024年减少;②低-低集聚区主要分布在湘

江及周围区域,2010—2024年长沙市低-低型聚集向不显著型聚集转变;③低-高的集聚主要集中在

山地,2010—2024年长沙高低聚类周围的高-高聚类略微减少。

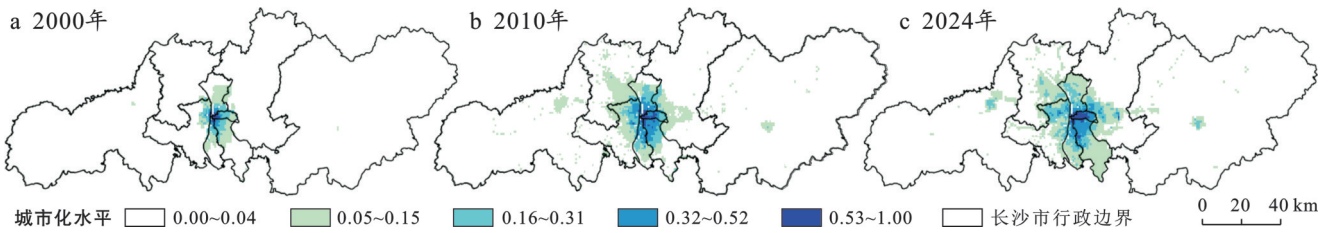


图3 长沙市2000—2024年城市化水平空间分布

Fig.3 Spatial distribution of urbanization level in Changsha City from 2000 to 2024

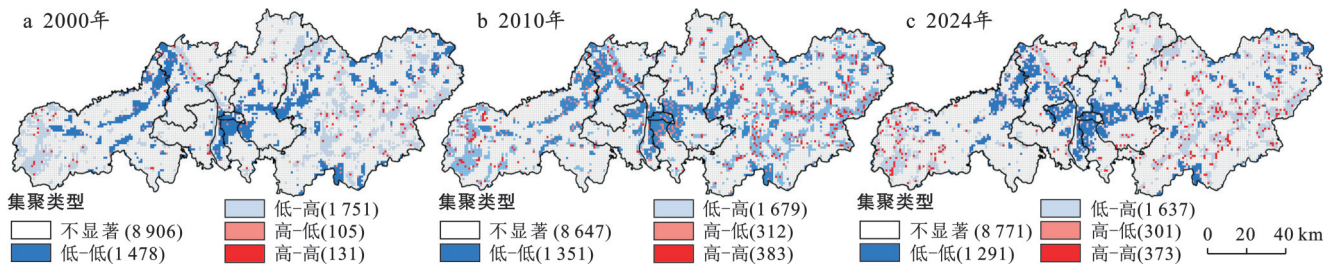


图4 长沙市2000—2024年城市化水平—生态韧性Lisa聚类图

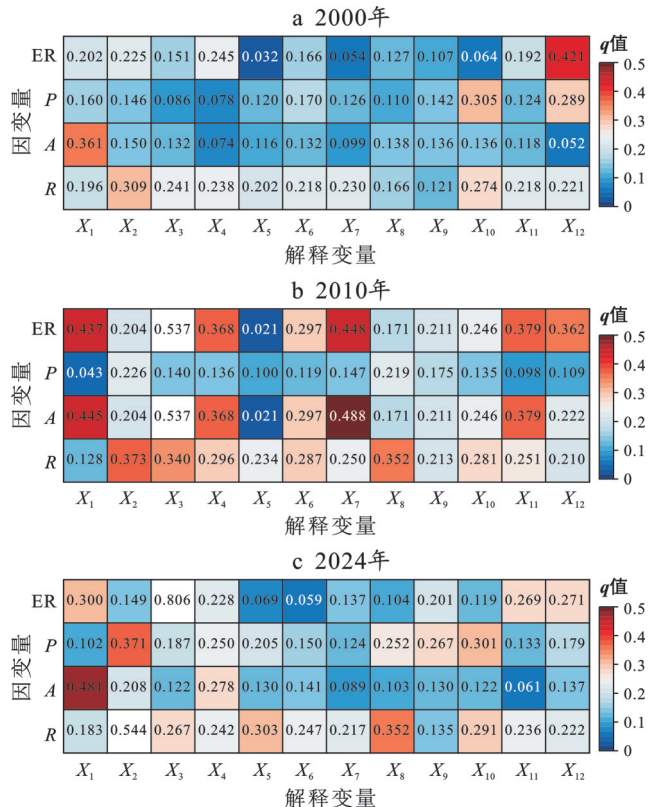
Fig.4 Lisa clustering map of urbanization level and ecological resilience in Changsha City from 2000 to 2024

3.3 基于OPGD模型的生态韧性驱动因素识别与分析

利用OPGD模型,以生态韧性水平(ER),抵抗力(P),适应力(A)和恢复力(R)为因变量,以 X_1 — X_{12} 为解释变量,分析长沙市2000,2010和2024年生态韧性的影响因素。选择相等、自然、分位数、几何和标准差5种分类方法,迭代解释变量的最佳分类,找到3~6个区间的最佳分类。

图5为研究区单因子检测的结果($p < 0.01$)。总体来看,城市化水平对生态韧性的空间异质性的解释力逐年提高。综合2000,2010和2024年的结果来看,城市化水平子系统的土地城市化(夜间灯光强度 X_1)对生态韧性的驱动力最强; $PM_{2.5}$ 浓度(X_7)在2000年对生态韧性的驱动力最弱,但在2010年显著增加,在2024年驱动力又变弱。在生态韧性子系统中,城市化对生态抵抗力(P)的影响最大。对ER,P,A和R与12个影响因素的交互作用进行检测($p < 0.01$),图6为长沙市生态韧性驱动因素双因子交互探测结果。

由图6可知,所有因子之间的交互作用绝大部分为非线性增强或双因子增强。2000年碳排放和地表温度对生态韧性空间分异的解释力明显增强($q > 0.5$),2010年夜间灯光和 $PM_{2.5}$ 浓度对生态韧性空间分异的解释力增强($q > 0.6$),2024年GDP和 $PM_{2.5}$ 浓度对生态韧性空间分异的解释力进一步增强($q > 0.8$)。



注: X_1 代表夜间灯光强度; X_2 代表人口密度; X_3 代表GDP; X_4 代表碳排放总量; X_5 代表土壤侵蚀强度; X_6 代表归一化植被指数; X_7 代表 $PM_{2.5}$ 浓度; X_8 代表地表温度; X_9 代表建成区比例; X_{10} 代表路网密度; X_{11} 代表距行政中心距离; X_{12} 代表综合城市化水平。P代表抵抗力;A代表适应力;R代表恢复力;ER代表生态韧性。下同。

图5 长沙市生态韧性驱动因素单因子探测
Fig.5 Single-factor detection of ecological resilience driving factors in Changsha City

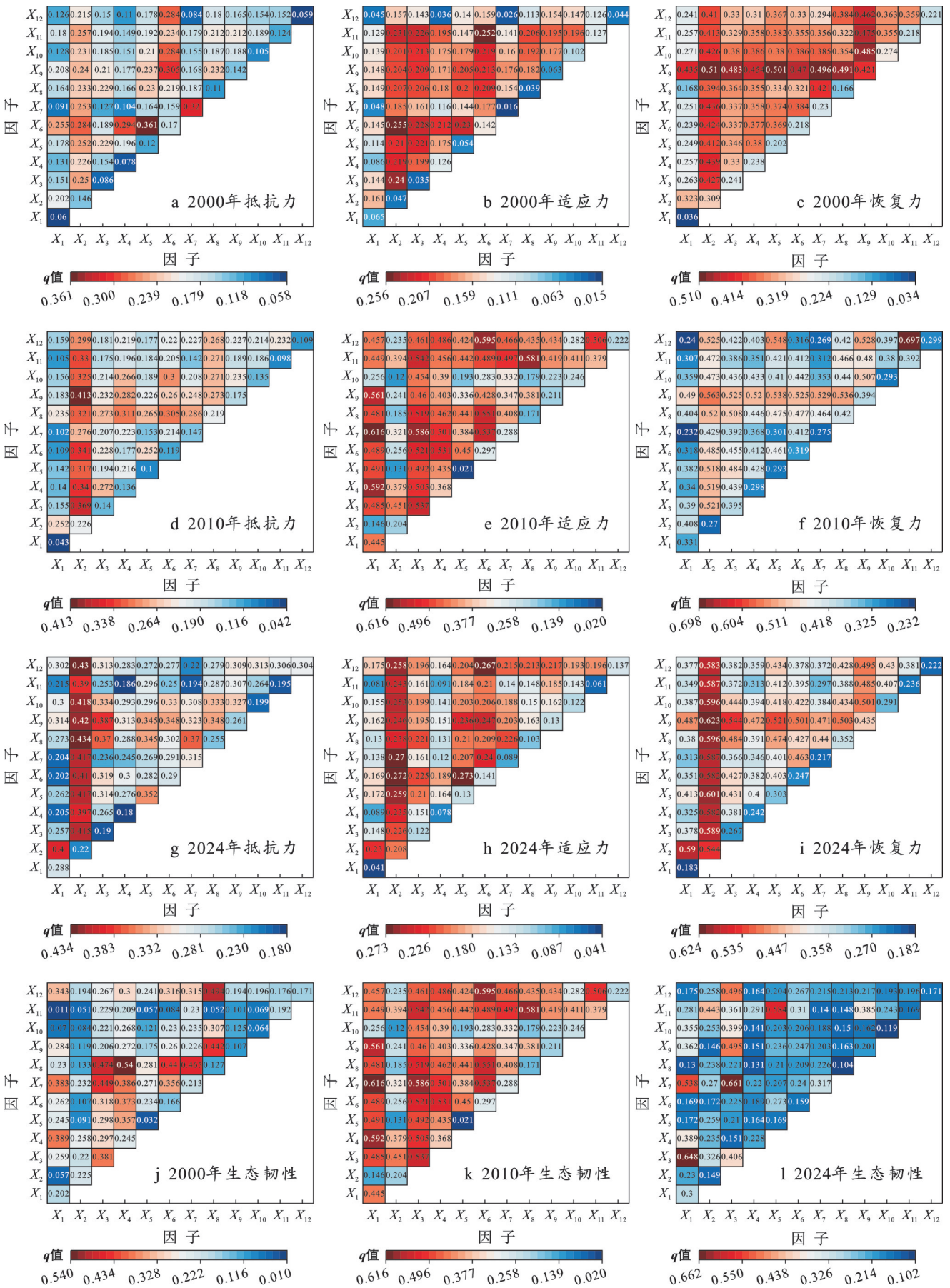


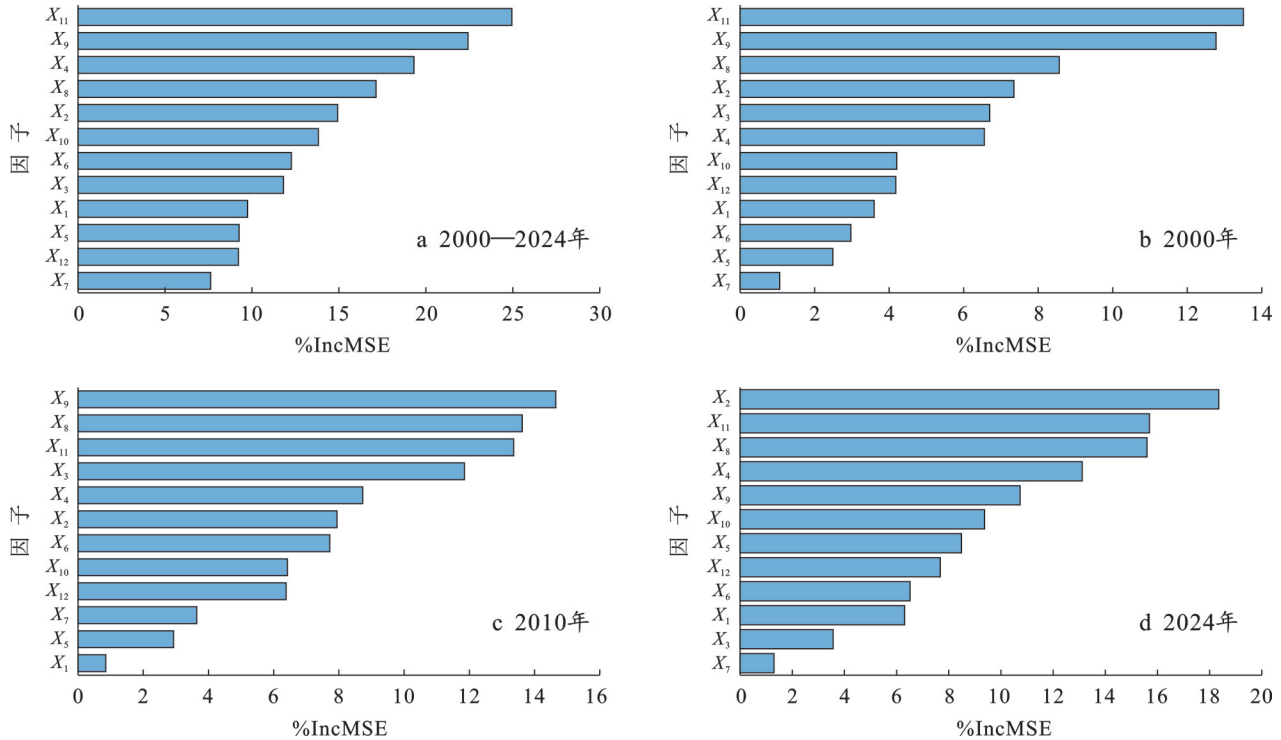
图 6 长沙市生态韧性驱动因素双因子交互探测图

Fig.6 Two-factor interaction detection of ecological resilience driving factors in Changsha City

3.4 基于 RF 模型的生态韧性驱动因素识别与分析

图 7 为随机森林模型对生态韧性的影响因素的重要性排序。结果表明,就研究区而言,2000—2024 年中影响生态韧性的前 4 位因子依次为距行政中心距

离(X_{11})、建成区比例(X_9)、碳排放(X_4)和地表温度(X_8)。变量对生态韧性的影响在不同年份之间变化不大,但可以看到人口密度(X_2)的影响略有增加(从 2000 年的 13.6% 增加到 2024 年的 18.5%)。



注:%IncMSE为均方误差增加百分比。

图 7 长沙市生态韧性驱动因素重要性排序

Fig.7 Importance ranking of ecological resilience driving factors in Changsha City

生态韧性与其驱动因素之间的相关性可以通过特征重要性图来显示(图 8),其中水平坐标显示驱动因素的值,而垂直坐标显示变量对生态韧性的影响程度。由图 8 可知,生态韧性随距行政中心距离(X_{11})的增加而增加,随夜间灯光(X_1)、归一化植被指数(X_6)的增加而下降。土壤侵蚀(X_5)、PM_{2.5}浓度(X_7)、地表温度(X_8)、建成区比例(X_9)和 UL(X_{12})与生态韧性的关系呈先增大后减小的趋势。当建成区比例(X_9)<27%时,建成区比例对生态韧性的影响程度最大,之后随着建成区比例(X_9)的增加,建成区比例(X_9)对生态韧性的影响逐渐减小,当建成区比例(X_9)>87%时,建成区比例(X_9)对生态韧性的影响程度最小。随着 X_2 增加,生态韧性逐步降低,当 X_2 >11 235 人/km²时,生态韧性变得稳定。当 GDP(X_3)<12.3 亿元/km²时,生态韧性随 GDP(X_3)升高而增加,超过这一值后生态韧性趋于稳定甚至略有下降。与此相反的是,生态韧性随碳排放(X_4)的增加急速下降,到达最低值后略有上升之后趋于平稳。生态韧性随路网密度(X_{10})的增加先增加再减小。

3.5 最优参数地理探测器(OPGD)与随机森林(RF)的比较

RF 通过均方误差确定因素的重要性等级(图 7)。地理探测器通过 q 值来确定各因子对生态韧性空间异质性的解释力。两个模型都是按照影响程度对驱动因素进行排序的,因此可以使用这些排序对模型进行比较,两个模型都认为土地城市化列为最重要的因素。这说明土地城市化对长沙市的影响最大,且相对稳定。这两种模式的排名差异,或许有很多原因。数据分布不均匀会导致 RF 模型中少数类别样本的识别率较低,不同的参数设置会影响模型的准确性。对于地理检测器中的离散化或对于分类的间隔数没有通用标准,这可能增加分析中的不确定性。

地理检测器中的分析是基于统计关系而不是因果关系的,这会限制其结果的适用性。随机森林模型(RF)特征重要性图的(图 8)与最优参数地理探测器(OPGD)地理检测器单因子探测图(图 5)的进一步比较表明,两种模型中每个因子对生态韧性的影

响范围相似。因此,OPGD-RF可以用来确定驱动因素对长沙市生态韧性变化的解释力,为分析生态韧性驱动因子在空间尺度上的变化提供了很好的方法框架。

性驱动因子在空间尺度上的变化提供了很好的方法框架。

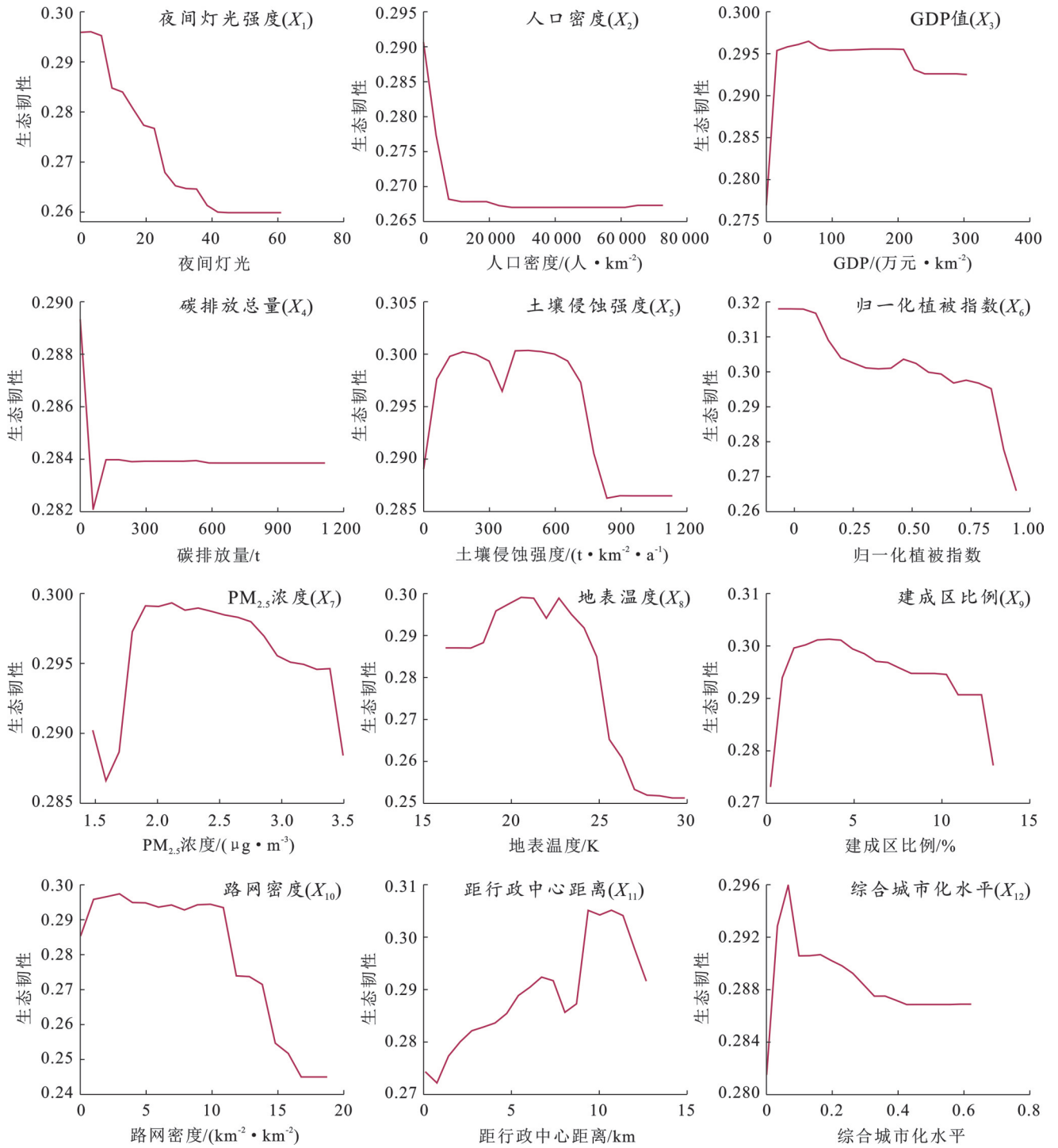


图 8 长沙市生态韧性驱动因素特征重要性图

Fig.8 Feature importance of ecological resilience driving factors in Changsha City

4 讨论

4.1 城市化特征与生态韧性响应

总体来看,从2000—2024年长沙市的UL-ER空间分布逐渐形成了较为明显的聚集效应,尤其是在

市区周围高-高集聚区的面积逐步扩大,而低-低集聚区呈现逐渐外迁的趋势。这表明随着城市化进程的加快,长沙市的生态韧性在局部地区有所增强,但在更大范围上是降低的。研究区城市化水平高值集聚区为长沙市中心城区。2000年后,长沙市进入快速

城市化阶段,人口总量和城市化率均快速增长。在城市空间结构上,2000—2010年长沙中心城区以单中心圈扩张为主,城市化发展处于绝对集中状态;2010年以后,在相关政策和规划的推动下,城市空间向多中心极核式结构演变,城市化发展处于相对集中的状态。城市化水平测度结果(图3)中反映的空间特性与城市空间结构的总体发展相一致。在多中心极核式扩张的规划政策带动下,长沙市主城区2010—2024年城市化水平最高值略有下降,但中高值区($UL > 0.2$)范围明显扩大。尽管政策推动多中心结构发展,但因主城区集聚惯性较强,次中心培育周期不足,2010—2024年长沙市建设用地仍整体呈现连片扩张态势,且局部存在无序侵占生态空间的现象。除去中心城区的5个区,长沙市其余区县城市化起步较晚,2010年人口城镇化率低于50%,但此后发展迅速,到2024年平均提高了18.38%。研究区内存在两种类型的生态韧性低值区(图2):①中心城区。2000—2010年长沙市中心区生态韧性低值($ER < 0.15$)范围迅速扩大,与UL值的增长相一致。②耕地区。耕地区2000—2010年生态韧性也呈下降趋势。这一现象可能源于农业集约化经营引发的多重生态胁迫:高强度耕作与化肥过量施用导致土壤有机质持续流失,规模化单一作物种植造成生物栖息地破碎化,而配套农业基础设施则进一步阻断了生态廊道,3者的复合效应最终导致耕地区生态韧性显著下降。

4.2 城市化对生态韧性的影响

总体而言,长沙市的城市化对生态韧性产生了负面影响。在此,土地城市化对生态韧性的不利影响最为突出,生态韧性子系统的适应力受城市化的影响最大(图5—6)。2010—2024年长沙市中心城区建设用地的扩张导致了土地城市化快于人口和经济城市化。这对区域生态的稳定性产生了较大的影响,高强度扩张造成的生态问题极难恢复。2024年人口城镇化和经济城镇化对土地城镇化的负面影响叠加效应突出(图6)。值得注意的是,岳麓内城市化区域为长沙市传统城区,土地利用结构变化相对平缓,经济结构以高科技、低污染产业为主。虽然各项社会经济指标处于前列,但生态韧性值并非最低。因此,生态韧性的状况并不完全取决于少数几个因素,人口和经济集聚并不一定导致生态韧性低;县区的发展模式和发展方向有着重要影响。

4.3 生态韧性提升策略

针对长沙市的生态韧性下降问题,从空间尺度与地域特性出发,对市域维度和区县维度提出建议。

市域维度上,深化湘江流域韧性管理,建立市级流域联席会议,精准划定生态缓冲带并实施严格管控:结合滨江区域地形差异,部署海绵城市技术(如滞雨水花园、生态植草沟、高透水铺装)。采用丘陵型城市雨洪管理模型(如SWMM-LID耦合模型)进行全过程雨洪管理。区县维度上,中心五区(芙蓉、天心、岳麓、开福、雨花)拓展生态空间网络:推行屋顶绿化与垂直绿化,建设小微绿地与口袋公园,改造硬质护岸为生态驳岸。利用核心区土地溢价收益,建立绿色债券与生态补偿基金,支持高密度区域的生态基础设施建设(如地下调蓄隧道、智能雨洪管理系统)。各区县应明确生态功能定位,制定精细化管控策略。如望城加强滨江湿地保护,长沙县建设绿色隔离带,浏阳与宁乡建设生态屏障。在城乡过渡带与乡村区域推广生态技术,如生态沟渠、人工湿地处理生活污水等;在农林区域,推行生态农业模式与灾害预警系统建设,提升灾害应急响应能力。

5 结论

(1) 2000—2024年长沙市生态韧性显著下降,生态韧性低值区域以长沙市中心城区为核心,并持续向东北和西北方向扩张,城市建设对生态系统的压力在不断增大。

(2) 城市化水平与生态韧性之间存在显著的空间负相关关系,且这种负面影响在研究期内逐渐增强。长沙主城区为城市化高值区,其扩张方向与生态韧性低值区的扩张一致。其中,土地城市化对生态韧性,尤其是恢复力的负面影响最为显著。

(3) 生态韧性的变化是多重因素交互作用的复杂结果。研究发现,土地城市化(如夜间灯光强度)是影响长沙市生态韧性最主要的且作用稳定的驱动因素。同时,距行政中心的距离、碳排放和地表温度等也是关键驱动因子,各因子对生态韧性的影响存在非线性关系。在不同发展阶段,生态韧性主导驱动因子会动态变化。

(4) 人口和经济发展因素对研究区生态韧性的影响具有潜在的复杂性,人口和经济集聚并不必然导致低生态韧性。需要合理的生态保护策略,以建立人口密集地区环境建设与社会经济发展的协同效应。在此基础上,提出了基于差异化发展路径的区域生态韧性强化策略,为区域国土空间生态治理提供决策支持。

参考文献(References)

- [1] Cui Linli, Shi Jun. Urbanization and its environmental effects in Shanghai, China [J]. Urban Climate, 2012, 2: 1-15.

- [2] Theodorou P. The effects of urbanisation on ecological interactions [J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2022, 52:100922.
- [3] 夏楚瑜,董照樱子,陈彬.城市生态韧性时空变化及情景模拟研究:以杭州市为例[J].*生态学报*, 2022, 42(1): 116-126.
Xia Chuyu, Dong Z, Chen Bin. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1):116-126.
- [4] 黄学艺,陆汝成,叶宗达.中国陆地边境城市经济发展质量与生态韧性的耦合测度及交互响应[J].*水土保持通报*, 2024, 44(6):256-268.
Huang Xueyi, Lu Rucheng, Ye Zongda. Economic development quality and ecological resilience of China's land border cities coupling measure and interactive response [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(6):256-268.
- [5] Karsai I, Schmickl T, Kamps G. Resilience and Stability of Ecological Systems [M]. Cham: Springer, 2020.
- [6] 李雪婷,杨亮洁,杨永春,等.河西走廊经济带城镇化与生态韧性的耦合协调分析[J].*应用生态学报*, 2025, 36(2):547-558.
Li Xueting, Yang Liangjie, Yang Yongchun, et al. Analysis on coupling and coordination of urbanization and ecological resilience in Hexi Corridor economic belt, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(2):547-558.
- [7] Mitchell M G E, Devisscher T. Strong relationships between urbanization, landscape structure, and ecosystem service multifunctionality in urban forest fragments [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 228:104548.
- [8] 王松茂,牛金兰.黄河流域城市生态韧性时空演变及其影响因素[J].*生态学报*, 2023, 43(20):8309-8320.
Wang Songmao, Niu Jinlan. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban ecological resilience in the Yellow River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20):8309-8320.
- [9] 牟云平,朱庆林.环黄渤海省(市)海岸带可持续发展的生态韧性研究[J].*海洋环境科学*, 2023, 42(6):920-926.
Mu Yunping, Zhu Qinglin. Study on coastal zone ecological resilience of provinces and cities around the Yellow Sea and Bohai Sea based on sustainable development theory [J]. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(6): 920-926.
- [10] 李燕凌,李民梁.长江经济带新型城镇化与生态韧性:耦合协调、时空格局及动态影响[J].*长江流域资源与环境*, 2024, 33(11):2329-2341.
Li Yanling, Li Minliang. Coupling coordination, spatial-temporal patterns and dynamic impact of the new urbanization and ecological resilience in the Yangtze River economic belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(11):2329-2341.
- [11] 欧阳晓,陈键,魏晓,等.长江中游城市群生态韧性时空分异格局与演化机理[J].*地理学报*, 2025, 80(6): 1572-1584.
Ouyang Xiao, Chen Jian, Wei Xiao, et al. Spatio-temporal differentiation and evolutionary mechanism of ecological resilience in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, 80(6):1572-1584.
- [12] 杨丽莎,陈妍,谢会强.黄河流域城市群生态韧性的时空格局与驱动因素分析[J].*生态经济*, 2024, 40(2): 99-108.
Yang Lisha, Chen Yan, Xie Huiqiang. Spatio-temporal patterns and driving factors of ecological resilience in urban agglomerations in the Yellow River basin [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(2):99-108.
- [13] 彭文斌,谢晓琪.环长株潭城市群生态韧性对城市更新的响应研究[J].*长江流域资源与环境*, 2024, 33(11): 2369-2378.
Peng Wenbin, Xie Xiaoqi. Response of ecological resilience to urban renewal in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(11):2369-2378.
- [14] 王少剑,崔子恬,林靖杰,等.珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J].*地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.
Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River delta [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4):973-991.
- [15] Jiao Liudan, Wang Lvwen, Lu Hao, et al. An assessment model for urban resilience based on the pressure-state-response framework and BP-GA neural network [J]. *Urban Climate*, 2023, 49:101543.
- [16] 夏圣洁,陈慧儒,张钧韦,等.生态用地动态演变与热环境的空间自相关分析:以山西中部城市群为例[J].*中国环境科学*, 2024, 44(2):1032-1040.
Xia Shengjie, Chen Huiru, Zhang Junwei, et al. Spatial autocorrelation analysis of ecological land dynamic evolution and thermal environment: A case study of Shanxi central urban agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(2):1032-1040.
- [17] 孙浩,刘慧芳,王瑾,等.山西省黄河流域生态绩效时空演变及提升路径[J].*水土保持通报*, 2024, 44(6):339-352.
Sun Hao, Liu Huifang, Wang Jin, et al. Spatio-temporal evolution and improvement path of ecological

- performance in Yellow River basin of Shanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(6):339-352.
- [18] 汪东川, 龙慧, 王康健, 等. 京津冀城市群城市化强度与生态韧性的耦合协调分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(15):6321-6331.
Wang Dongchuan, Long Hui, Wang Kangjian, et al. Coupling coordination analysis of urbanization intensity and ecological resilience in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15):6321-6331.
- [19] Huang Bowen, Zha Ruibo, Chen Shifa, et al. Fuzzy evaluation of ecological vulnerability based on the SRP-SES method and analysis of multiple decision-making attitudes based on OWA operators: A case of Fujian Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110432.
- [20] 李加林, 张旖芯, 张海涛, 等. 基于“潜力-弹性-稳定性”模型的温州市生态韧性时空变化及影响因素研究[J]. *生态学报*, 2024, 44(8):3253-3267.
Li Jialin, Zhang Yixin, Zhang Haitao, et al. The research of spatio-temporal characteristics and influence factors of Wenzhou ecological resilience based on the potential-elastic-stability model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8):3253-3267.
- [21] 张傲翔, 苗成林, 陈峥妍. 黄河流域城市生态韧性、社会网络及其影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(1): 130-142.
Zhang Aoxiang, Miao Chenglin, Chen Zhengyan. Urban ecological resilience, social networks and its influencing factors in the Yellow River basin [J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(1):130-142.
- [22] 吕添贵, 陈安莹, 付舒斐, 等. 农业绿色转型中国耕地系统韧性时空演化特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2025, 45(6):2891-2904.
Lü Tianguì, Chen Anying, Fu Shufei, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing mechanism of resilience of China's cultivated land system under agricultural green transformation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(6):2891-2904.
- [23] 李启珍, 胡希军, 韦宝婧, 等. 长沙市绿色空间与城市扩张耦合关系研究[J]. *经济地理*, 2022, 42(11):87-94.
Li Qizhen, Hu Xijun, Wei Baojing, et al. Coupling relationship between green space and urban expansion in Changsha [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(11): 87-94.
- [24] Lin Zhenzhi, Wen Fushuan, Huang Jiansheng, et al. Evaluation of black-start schemes employing entropy weight-based decision-making theory [J]. *Journal of Energy Engineering*, 2010, 136(2):42-49.
- [25] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. *经济地理*, 2022, 42(8):51-61.
Wang Songmao, Niu Jinlan. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. *Economic Geography*, 2022, 42(8):51-61.
- [26] Peng Jian, Liu Yanxu, Wu Jiansheng, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143:56-68.
- [27] 张紫微, 张紫怡, 张立亭. 自然-社会经济因素驱动下江西省生境质量的时空演变与主控因子[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(1):303-313.
Zhang Ziwei, Zhang Ziyi, Zhang Liting. Spatio-temporal evolution and main natural socio-economic factors affecting habitat quality in Jiangxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1):303-313.
- [28] Anselin L. A local indicator of multivariate spatial association: Extending geary's c [J]. *Geographical Analysis*, 2019, 51(2):133-150.
- [29] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1):107-127.
- [30] Wang Jinfeng, Zhang Tonglin, Fu Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67:250-256.