

2000—2020年安徽省生境质量时空演变及其影响因素

张茜¹, 於冉^{1,2}, 储昭君¹, 王成¹

(1.安徽农业大学 经济管理学院, 安徽 合肥 230036; 2.安徽农业大学 国土资源研究所, 安徽 合肥 230036)

摘要: [目的] 厘清安徽省生境质量的时空演变特征及其影响因素的空间作用机制, 为提高研究区生态治理能力以及可持续发展能力提供科学依据。[方法] 借助 InVEST 模型分析安徽省 2000—2020 年生境质量的时空格局演变特征, 并以网格为分析单元, 利用多尺度地理加权回归 (MGWR) 模型分析自然、社会经济、景观格局等层面因素对生境质量的空间作用机制。[结果] ① 2000—2020 年安徽省的优势景观始终为耕地, 区域内的景观转变主要发生在耕地、林地与建设用地之间, 其中建设用地景观要素扩张最为明显。人类活动干扰程度的增大导致安徽省景观格局朝着破碎化、复杂化趋势演变。② 2000—2020 年间安徽省生境质量均值下降 0.016, 整体上呈现轻微退化趋势, 区域内生境质量以较差 (0.2~0.4) 等级为主, 两期数据占比均超过 40%。安徽省生境质量存在明显的空间差异特征, 在空间格局上呈现着“南高北低”的态势。③ 根据 MGWR 模型回归结果, 降雨和归一化植被指数对安徽省生境质量存在显著的正向影响, 其两期回归系数的正值比例均达 80% 以上, 并随着时间推移进一步扩大, 在空间格局上皖南的回归系数整体大于皖北; 人口密度与单位面积 GDP 对于安徽省生境质量存在明显的负面影响, 两期回归系数的负值比例均达 90% 以上, 在空间格局上皖北的回归系数整体大于皖南; 最大斑块指数与均匀度指数对安徽省生境质量存在正负双向影响, 随着安徽省景观格局的破碎化与复杂化发展, 其回归系数的负值比例也进一步扩大。[结论] 安徽省生境质量在空间格局上呈现一定规律, 在此基础上结合影响因素分析结果制定差异化的保护政策, 因地制宜治理生态环境, 以提高安徽省可持续发展能力, 实现人与自然和谐共生的发展目标。

关键词: 景观格局; 生境质量; InVEST 模型; 多尺度地理加权回归模型; 安徽省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0416-10

中图分类号: X826

文献参数: 张茜, 於冉, 储昭君, 等. 2000—2020 年安徽省生境质量时空演变及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 416-425. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.041; Zhang Qian, Yu Ran, Chu Zhaojun, et al. Temporal and spatial evolution of habitat quality and its influencing factors in Anhui Province during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 416-425.

Temporal and Spatial Evolution of Habitat Quality and Its Influencing Factors in Anhui Province During 2000—2020

Zhang Qian¹, Yu Ran^{1,2}, Chu Zhaojun¹, Wang Cheng¹

(1. School of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei,

Anhui 230036, China; 2. Institute of Land Resources, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal evolution characteristics of habitat quality and the spatial mechanism of influencing factors in Anhui Province were analyzed in order to provide a basis for improving the ecological management ability and sustainable development ability of the study area. [Methods] The InVEST model was used to analyze the spatial and temporal pattern evolution of habitat quality in Anhui Province from 2000 to 2020. A multi-scale geographical weighted regression (MGWR) model was used to analyze the spatial mechanisms of natural, socio-economic, landscape, and other factors on habitat quality. [Results] ① Cultivated land was always the dominant landscape in Anhui Province from 2000 to 2020, and landscape transformation in the region mainly occurred between cultivated land, forest land, and construction

收稿日期: 2023-10-13

修回日期: 2024-02-06

资助项目: 安徽省高校哲学社会科学重点研究项目“基于城镇—农业—生态协调的皖江流域国土空间开发生态风险识别及管控路径研究” (2023AH050969)

第一作者: 张茜 (2001—), 女 (汉族), 安徽省六安市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与规划。Email: zhangqian0886@qq.com。

通信作者: 於冉 (1984—), 男 (汉族), 安徽巢湖人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用与规划、土地利用碳排放、土地整治方面研究。Email: yuran@ahau.edu.cn。

land. The expansion of the landscape elements of construction land was the most obvious. With the increase of disturbance degree of human activities, the landscape pattern of Anhui Province was evolving towards fragmentation and complexity. ② From 2000 to 2020, the average value of habitat quality in Anhui Province decreased by 0.016, showing a slight degradation trend on the whole. The habitat quality in the region was mainly poor (0.2~0.4), and the two periods accounted for more than 40% of the data. There were obvious spatial differences in the habitat quality of Anhui Province, showing a spatial pattern of “higher in the south and lower in the north”. ③ According to the regression results of the MGWR model, rainfall and normalized vegetation index had significant positive effects on the habitat quality of Anhui Province, and the positive proportion of the regression coefficients in the two periods was greater than 80%, and further expanded with time. In terms of the spatial pattern, the regression coefficient of Southern Anhui Province was larger than that of Northern Anhui Province. Population density and GDP per unit area had significant negative effects on habitat quality in Anhui Province. The negative ratio of regression coefficients in both periods was greater than 90%, and the regression coefficient in Northern Anhui Province was larger than in Southern Anhui Province. The maximum patch index and the evenness index had positive and negative bidirectional effects on the habitat quality in Anhui Province. With the development of fragmentation and complexity of the landscape pattern in Anhui Province, the negative proportion of the regression coefficient further expanded. [Conclusion] The spatial pattern of habitat quality in Anhui Province presented a certain pattern. On this basis, combined with the analysis results of influencing factors, differentiated protection policies should be formulated to manage the ecological environment according to local conditions in order to improve the sustainable development ability of Anhui Province and to achieve the goal of harmonious coexistence between man and nature.

Keywords: landscape pattern; habitat quality; InVEST model; multi-scale geographical weighted regression model; Anhui Province

生境质量作为生态系统服务的重要指标之一,也是检验区域内生态文明建设成效的重要指标之一,是指在特定时间以及空间范围内,从生态层次上反映生态环境对人类生存以及社会经济可持续发展的适宜度^[1-3]。研究生境质量时空差异及其影响机制,对区域生态环境保护、恢复以及可持续发展具有重要的现实意义^[4-5]。随着理论基础与研究方法的完善与成熟,评价生境质量模型逐渐增多,比较有代表性的模型有 SolVES, MIMES, ARIES, InVEST 等,其中 InVEST 模型能够高效模拟各种土地利用情况下生态系统服务功能的时空变化特征,该模型的操作基于 ArcGIS 软件,现已开发了多个生态系统服务功能模块,与其他模型相比,InVEST 模型在评估精度和应用成本方面更具优势^[6-10]。近年来,国内外学者结合 InVEST 模型与线性回归模型、地理加权回归模型等从不同视角、不同尺度对生境质量的影响因素及其空间作用机制展开研究。韩宇等^[11]结合 InVEST 模型和地理加权回归模型探究土地利用变化与生境质量之间的关系与响应,结果表明林地、草地和水域总体对生境质量产生正面影响,耕地和建设用地与生境质量基本上呈负相关。白立敏等^[12]利用地理加权回归模型探索长春市生境质量对城镇化的时空响应,结果

表明坡度及高程等自然因素基本塑造了长春市生境质量整体分布格局,而人口密度、国内生产总值、夜间灯光指数等城镇化要素与生境质量总体呈负相关关系。综上所述,InVEST 模型已成为计算生境质量的主要方法之一^[13],大多数学者结合 InVEST 模型与地理加权回归模型从土地利用,人类活动响应,自然环境等层面选取影响因素展开生境质量的驱动力研究^[14-16],但探索景观格局对生境质量空间作用机制的研究较少,且已有研究表明,生境质量的影响因素在空间作用机制上存在明显的空间异质性^[17-18],但在传统的地理加权回归模型中,所有自变量的最优带宽值相同,事实上不同的影响因素其空间作用尺度也是不同的,多尺度地理加权回归(MGWR)模型在弥补以上传统回归模型不足的同时,拥有更高的拟合优度^[19],故 MGWR 模型更适用于解释不同影响因素对生境质量的空间作用机制。

自 2018 年安徽省全省域被正式纳入长三角地区,其经济发展与城镇化进程变得更加迅速,这必然会导致建设用地的肆意扩张以及生态用地的破坏,生境质量也会随之下降。基于此,本文以安徽省为例,运用 InVEST 模型评价不同时期生境质量的时空分布特征,并运用多尺度地理加权回归(MGWR)模型

分析自然、社会经济、景观格局 3 方面因素对安徽省生境质量的空间作用机制,以期为促进安徽省生态环境保护与社会可持续发展提供支撑和依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

安徽省地理位置处于东经 114°54′—119°37′,北纬 29°41′—34°38′,土地面积 $1.40 \times 10^5 \text{ km}^2$,下辖 16 个地级市。安徽省平原、丘陵、山地等类型齐全,皖南皖北地势差异较大,可将该省分为淮河平原区、江淮台地丘陵区、皖西丘陵山地区、沿江平原区、皖南丘陵山地 5 个地貌区。安徽省作为长三角的后花园,处于全国经济发展的战略地位以及国内几大经济板块的接壤地带,其经济发展潜力强大,截至 2022 年底,安

徽省常住人口达 6 127 万人,生产总值达 45 045 亿元。但在安徽省的城镇化进程中,其景观格局变化剧烈,作为生境质量威胁源的建设用地挤压生态用地以及耕地快速扩张,导致安徽省的生态环境功能退化较为严重。在“党的二十大”所提出的“人与自然和谐共生”政策背景下,如何提高生态治理能力以及可持续发展能力成为安徽省未来发展进程中的关注热点。

1.2 研究数据来源

本研究涉及的数据主要为栅格数据,分为土地利用数据、社会经济数据、自然环境数据 3 类,具体来源如表 1 所示。为保证模型的正常运行且最大程度地保留数据,借助 ArcGIS 10.8 软件创建 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ 渔网,以网格为单元分析各影响因素对安徽省生境质量的空间作用机制。

表 1 数据来源

Table 1 Research data sources

数据名称	格式	年份	分辨率	数据来源
土地利用数据	tif	2000,2020	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
人口密度	tif	2000,2020	1 km	worldpop 网站(https://www.worldpop.org/)
单位面积 GDP	tif	2000,2020	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
年平均降雨量	tif	2000,2020	1 km	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
归一化植被指数	tif	2000,2020	1 km	美国地质勘探局(http://www.usgs.gov/)

2 研究方法

2.1 InVEST 模型生境质量评估

InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块结合不同土地利用类型对威胁因子的敏感度和外部威胁强度,通过计算生境退化程度,得到生境质量指数。根据吴楠等人研究^[20-24],本文选取人类活动干扰程度较大的耕地、农村居民点、其他建设用地作为生境质量的威胁因子,并设置各威胁因子的权重(表 2)、最大影响距离以及衰减指数(表 3)。其计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (1)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数; H_j 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境适宜性; D_{xj} 为景观 j 中栅格 x 受到的干扰程度; k 为半饱和常数; Z 为归一化常数,一般取经验值 2.5。

表 2 安徽省生境质量威胁因子及其最大影响距离和权重

Table 2 Threat factors of habitat quality in Anhui Province and their maximum impact distances and weights

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰退类型
耕地	4	0.6	线性
农村居民点	8	0.7	指数类型
城镇用地	10	1	指数类型
其他建设用地	5	0.8	指数类型

表 3 安徽省土地利用类型对威胁因子的敏感系数

Table 3 Sensitivity coefficients of land use types to threat factors in Anhui Province

地类	生境适宜度	耕地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地
水田	0.4	0.3	0.7	0.5	0.2\
旱地	0.3	0.5	0.6	0.5	0.2
有林地	1.0	0.5	0.8	0.8	0.8
灌木林	0.9	0.3	0.7	0.6	0.4
疏林地	0.8	0.6	0.9	0.8	0.7
其他林地	0.8	0.6	0.9	0.8	0.7
高覆盖草地	0.8	0.4	0.7	0.6	0.3
中覆盖草地	0.7	0.5	0.7	0.7	0.4
低覆盖草地	0.6	0.5	0.7	0.6	0.5
河渠	0.9	0.5	0.9	0.7	0.6
湖泊	0.9	0.5	0.9	0.7	0.6
水库坑塘	0.8	0.6	0.9	0.7	0.7
滩地	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6
城镇用地	0	0	0	0	0
农村居民点	0	0	0	0	0
其他建设用地	0	0	0	0	0
裸土地	0	0	0	0	0
裸岩石质地	0	0	0	0	0

2.2 多尺度地理加权回归(MGWR)模型

为弥补全局回归模型在空间异质性以及空间非平稳性上的不足,Fothering Ham 提出了地理加权回

归(GWR)模型,但由于该模型对于不同解释变量的带宽恒定设置,限制了空间非平稳性关系的变化^[25],继而在 2017 年 Fothering Ham^[26] 提出多尺度地理加权回归(MGWR)方法,2019 年有学者^[27-28]对 MGWR 进行补充完善,使得该方法可以普遍适用于实证研究。

生境质量受自然、社会等多方面因素的影响,且不同的因素在不同的地理位置上,对生境的作用方式以及作用强度存在明显的差异性,故 MGWR 模型适用于生境质量的驱动力分析。其计算公式为:

$$y_i = \sum_{j=0}^k \beta_{b_{w_j}}(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon \quad (2)$$

式中: y_i 为因变量; x_{ij} 表示解释变量; $\beta_{b_{w_j}}$ 表示用于校准第 j 项条件关系的带宽,带宽为 b_w 的第 j 个局部回归系数; (u_i, v_i) 为第 i 个样点的空间地理位置; ϵ 为模型的截距和误差项。

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年安徽省景观格局变化分析

本文在借助前人研究的基础上^[29-30],破碎度指标选取最大斑块指数(LPI)和分离度指数(DIVISION)、景观形状指标选取边缘密度指数(ED)、景观多样性指标选取香农多样性指数(SHDI)和香农均匀性指数(SHEI)。运用 Fragstats 4.2 软件中的移动窗

口法对安徽省景观指数进行可视化。从各景观类型来看(表 4),耕地的 LPI 值始终占据主导地位,说明耕地一直是安徽省的优势景观,各景观类型的 LPI 值大小排序为:耕地>林地>水域>草地>建设用地,2000—2020 年建设用地 LPI 值显著增长,景观要素不断扩张,侵占耕地景观面积使其 LPI 值下降,除建设用地外和水域外,其他景观类型 LPI 值均有所下降。于 ED 而言,各景观类型的 ED 值排序为:耕地>建设用地>林地>草地>水域,20 a 间各景观类型的 ED 值均有所增长,说明人类活动对各景观类型的影响逐渐增大,导致景观异质性明显。于 DIVISION 而言,耕地分离度最低,其次为林地说明耕地和林地的聚集化、连片化较好,各景观类型的 DIVISION 值大小排序为:建设用地=草地>水域>林地>耕地。从整体景观水平来看(表 5),在破碎度指标中 LPI 值逐步下降,DIVISION 值有所增加,说明人类活动对优势景观的影响逐渐增强,景观分散度、破碎度增强;在景观形状指数上 ED 值逐步提升,说明安徽省景观形状复杂度增加,景观异质性明显;在景观多样性指标中 SHDI, SHEI 均有所提升,说明安徽省景观类型逐渐丰富且均匀化分布。综上所述,2000—2020 年安徽省各景观类型呈均匀化分布,人类活动强度逐渐增加导致安徽省景观格局朝着破碎化、分散化发展。

表 4 2000—2020 年安徽省各景观类型指数变化

Table 4 Changes of landscape types index in Anhui Province from 2000 to 2020

地类	LPI		ED		DIVISION	
	2000 年	2020 年	2000 年	2020 年	2000 年	2020 年
耕地	24.313 7	23.054 0	19.881 6	20.063 9	0.919 7	0.927 1
林地	10.839 4	10.438 5	8.585 1	8.667 3	0.986 9	0.987 8
草地	0.330 7	0.330 4	3.392 4	3.424 1	1	1
水域	1.296 4	1.323 4	2.447 8	2.484 7	0.999 8	0.999 8
建设用地	0.072 7	0.452 5	10.798 5	11.359 1	1	1

表 5 2000—2020 年安徽省整体景观格局指数

Table 5 Overall landscape pattern index of Anhui Province from 2000 to 2020

年份	破碎度指数		景观形状指数	景观多样性指数	
	LPI	DIVISION	ED	SHDI	SHEI
2000 年	24.313 7	0.906 4	22.555 4	1.183 6	0.660 6
2020 年	23.054	0.914 6	23.011 9	1.227 7	0.685 2

3.2 2000—2020 年安徽省生境质量时空格局变化分析

根据 InVEST 模型生境质量模块运行结果,结合 ArcGIS 软件,得到 2000—2020 年安徽省生境质量空间分布特征(图 1),为直观反映安徽省生境质量的变化情况,采用相等间隔法将安徽省两期生境质量运行结果分为:差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)、中等(0.4~

0.6)、良(0.6~0.8)、优(0.8~1)5 个等级,并对每个等级的面积比例进行统计(表 6)。

从空间格局角度来看(图 1),安徽省生境质量南北差异较大,皖北生境质量绝大多数处于较低水平,例如亳州市、阜阳市、淮北市等生境质量指数处于 0~0.2 区间,其原因是皖北作为农业主产区、粮食调出地,是“中原粮仓”,故其景观类型主要为耕地,只有

少数的林地、草地和水域呈零星分布状态;皖南生境质量大部分处于较高水平,例如宣城市、池州市、黄山市等生境质量指数处于 0.6~0.8 区间,皖南景观类型丰富,大部分区域以林地为主,部分区域还有集中连片的原始森林,且受地势影响,城镇用地扩张空间有限,故生境适宜度很高。总体来说,南方生境质量明显高于北方,且随着时间推移,北方生境质量恶化现象加重。

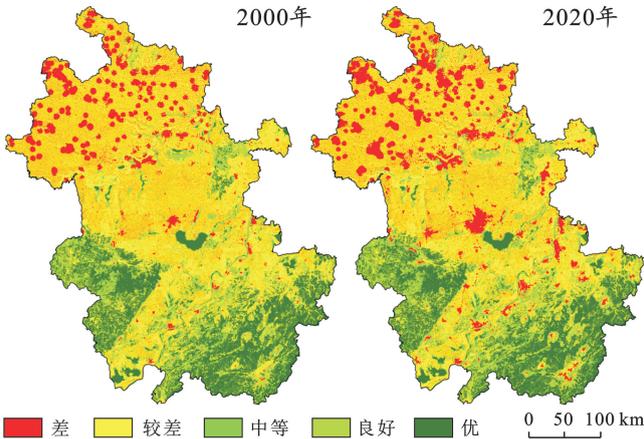


图 1 安徽省 2000 和 2020 生境质量空间分布
Fig.1 Spatial distribution of habitat quality in Anhui Province from 2000 to 2020

从时间格局角度来看,安徽省 2000 年生境质量均值为 0.442,2020 年生境质量均值为 0.426,由于安徽省的景观类型主要为耕地以及林地,相对比较稳定,故整体生境质量变化不大,呈现出轻微下降趋势。根据表 6 可知,20 a 间安徽省生境质量以较差等级为主,占总面积的 40% 以上,差(0~0.2)等级比例逐期增加,20 a 间增长率为 2.97%,中等、良好、优 3 个等级所占比例均有所减少,说明安徽省生境质量存在恶化趋势。

表 6 2000—2020 年安徽省生境质量等级面积统计
Table 6 Habitat quality grade area statistics in Anhui Province from 2000 to 2020

等级	生境质量评分	比例 %	
		2000 年	2020 年
差等	0~0.2	17.67	20.64
较差	0.2~0.4	42.92	41.47
中等	0.4~0.6	8.95	8.94
良好	0.6~0.8	12.05	11.34
优等	0.8~1	18.36	17.57

3.3 2000—2020 年安徽省生境质量演变影响因素分析

本文采用 6 km×6 km 渔网,选取年均降雨量 (PRCP)、归一化植被指数 (NDVI) 来探究自然因素对

生境质量的影响;选取人口密度 (POP)、单位面积 GDP 来探究社会经济因素对生境质量的影响;选取最大斑块指数 (LPI)、均匀度指数 (SHEI) 来探究景观格局指数对生境质量的影响。首先利用 SPSS 软件对 6 个变量与生境质量进行相关性以及共线性检验,2000 年与 2020 年两期的相关性系数均通过 0.01 的显著性水平检验(图 2),且 6 个变量的方差膨胀因子均小于 7.5,可见各变量之间不存在共线性。其次运用 GWR 软件与 MGWR 软件计算相关指标(表 7),2000 年与 2020 年 GWR 模型拟合优度分别为 0.734、0.738, MGWR 模型拟合优度分别达到 0.865 和 0.870,均高于 GWR 模型,说明 MGWR 模型在拟合效果上更优。相较于经典的 GWR 模型而言, MGWR 考虑了各变量间差异化的异质性尺度,允许每个解释变量都可以在不同的空间尺度上运行,可以反映出不同变量对生境质量作用尺度的差异。变量带宽代表了各变量在空间上的作用尺度,带宽越大则表明变量作用效果的空间异质性越小,反之其空间异质性就越大。由表可知, GWR 带宽均为 56,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。自然因素层面上,2000 年与 2020 年降雨和 NDVI 作用尺度均为 43,说明安徽省生境质量对降雨以及 NDVI 的响应较为敏感;社会经济因素层面上,2000 年与 2020 年人口作用尺度分别为 45 和 43, GDP 作用尺度分别为 1010 和 921,说明人口对安徽省生境质量的作用尺度更小,存在显著的空间异质性;景观格局指数层面上,2000 年与 2020 年 LPI 作用尺度分别为 724 和 489, SHEI 作用尺度分别为 46 和 44,远高于 LPI 的作用尺度,说明其空间异质性明显。综上所述, MGWR 在拥有更大拟合优度的同时,变量带宽的选值也更加丰富和科学,基于此 MGWR 模型更加适合分析各变量对安徽省生境质量的影响。

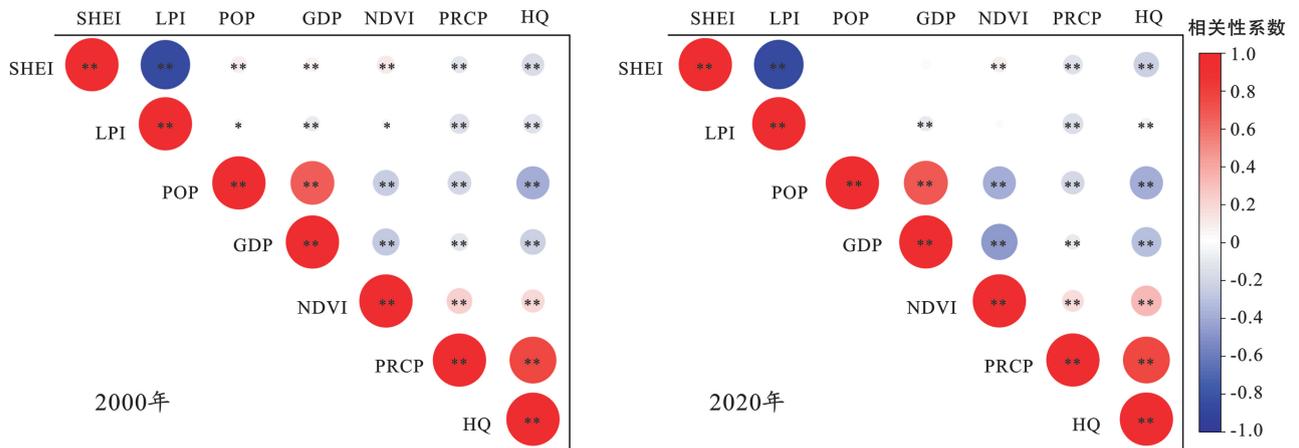
表 7 GWR 和 MGWR 模型变量带宽比较
Table 7 Comparison of GWR and MGWR model variable bandwidths

变量	GWR		MGWR	
	2000 年	2020 年	2000 年	2020 年
常数项	56	56	43	43
人口	56	56	45	43
GDP	56	56	1 010	921
降雨	56	56	43	43
NDVI	56	56	43	43
LPI	56	56	724	489
SHEI	56	56	46	44

在自然因素层面上,年均降雨量和 NDVI 对安徽省生境质量存在显著的正相关关系(图 3),2000 年安

徽省年均降雨量回归系数的正值比例为 85.21%，其中回归系数高值区主要分布在安徽省南部，例如安庆市、黄山市、宣城市、池州市等，这些城市年平均降雨量处于安徽省较高水平，且生境质量较高，故回归系数较高；降雨回归系数负值区主要分布在巢湖市、六安市北部，淮南市南部，滁州市东部、马鞍山市东部，这些区域的土地利用类型以林地或湖泊为主，生境质量较高，但年平均降雨量在安徽省 16 个地级市中处于落后水平，故而回归系数呈现负相关关系。2020 年安徽省年均降雨量的正向影响进一步扩大，正值比例达到 89.95%，其中变化较大区域为巢湖市，宣城市，黄山市，池州市，安庆市，这些区域的年平均降雨量与 2000 年相比均有所增长且增长率较高，故回归系数由 1~1.5 区间向大于 1.5 区间转变；而合肥

市中心城区的负值比例有所增加，因为合肥市 2020 年平均降雨量位于安徽省内中等水平，但由于中心城区建设用地的快速扩张导致合肥市生境质量恶化严重，故该区域的降雨量与生境质量呈现负相关关系。2000 年安徽省 NDVI 回归系数的正值比例达 64.29%，主要分布在皖西与皖南的山区，区域内有大片集中的原始林，生境适宜度较高。2020 年 NDVI 回归系数的正值比例显著增加至 79.66%，根据前人研究，2000—2020 年安徽省植被覆盖总体上呈好转态势^[31]，其中皖南和皖西植被 NDVI 上升趋势最为明显，上升斜率分别为 0.004 4, 0.003 8/a^[32]，本研究结果显示安徽省 NDVI 的回归系数增大，皖南与皖西区域的回归系数在此 20 a 间显著增加，这与前人研究结果相一致^[33]。



注：*，** 分别表示 $p \leq 0.05$ 和 $p \leq 0.01$ 水平显著相关。SHEI 为香农均匀性指数；LPI 为最大斑块指数；POP 为人口密度；GDP 为单位面积国民生产总值；NDVI 为归一化植被指数；PRCP 为年均降雨量；HQ 为生境质量。

图 2 安徽省 2000 和 2020 年生境质量与影响因素的相关关系

Fig.2 Correlation between habitat quality and influencing factors in Anhui Province in 2000 and 2020

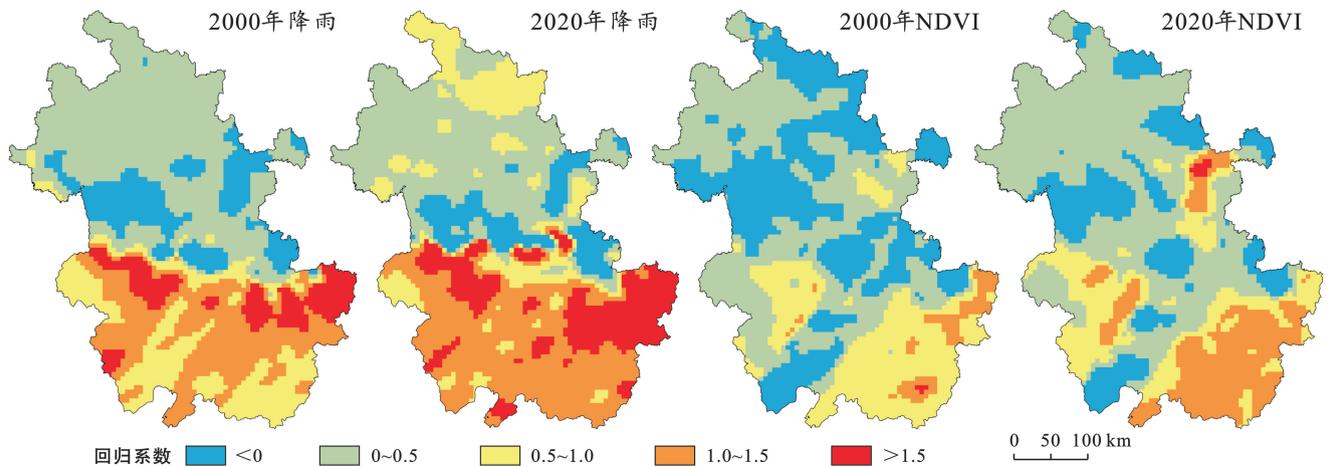


图 3 安徽省 2000 和 2020 年生境质量与自然因素回归系数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of regression coefficients between habitat quality and natural factors in Anhui Province in 2000 and 2020

在社会经济方面，单位面积 GDP 与人口密度对安徽省生境质量存在显著的负相关关系（图 4）。2000 年安徽省 GDP 回归系数的负值比例为 91.49%，

其中回归系数小于 -0.8 所占比例 24.24%，主要分布在巢湖市，黄山市，池州市东部，宣城市南部，六安市南部以及安庆市西北部，由于这些区域的主要土地利

用类型为林地、草地或者水域,故而人口较少,GDP 较低而生境质量较高,导致负相关系数较大。2020 年安徽省 GDP 对生境质量的负向影响进一步扩大,负值比例达到 96.97%,与 2000 年相比,安徽省长江流域附近回归系数变化较大,主要是 $-0.2\sim 0$ 区间向 $-0.6\sim -0.2$ 区间转变,这是由于 2000—2020 期间该区域内建设用地快速扩张随之 GDP 也有所增长,生境质量对 GDP 的提升较为敏感,故负相关系数变大。2000 年与 2020 年两期人口与生境质量的关系在空

间分布上与 GDP 较为相似,高负值区主要分布在安徽省南部,其土地利用类型主要为林地,人口较为稀少,生境质量较高;20 a 间,回归系数主要是 $-0.2\sim 0$ 区间向 $-0.6\sim -0.2$ 区间转变,主要分布在安徽省北部,以及 $-0.6\sim -0.2$ 区间向小于 -0.8 区间转变,主要分布在安徽省南部长江流域附近。在此期间,安徽省城镇化率由 2000 年的 28% 增长至 2020 年的 56%,城市之间人口的流动以及人类活动对安徽省生境质量产生着深刻的负向影响。

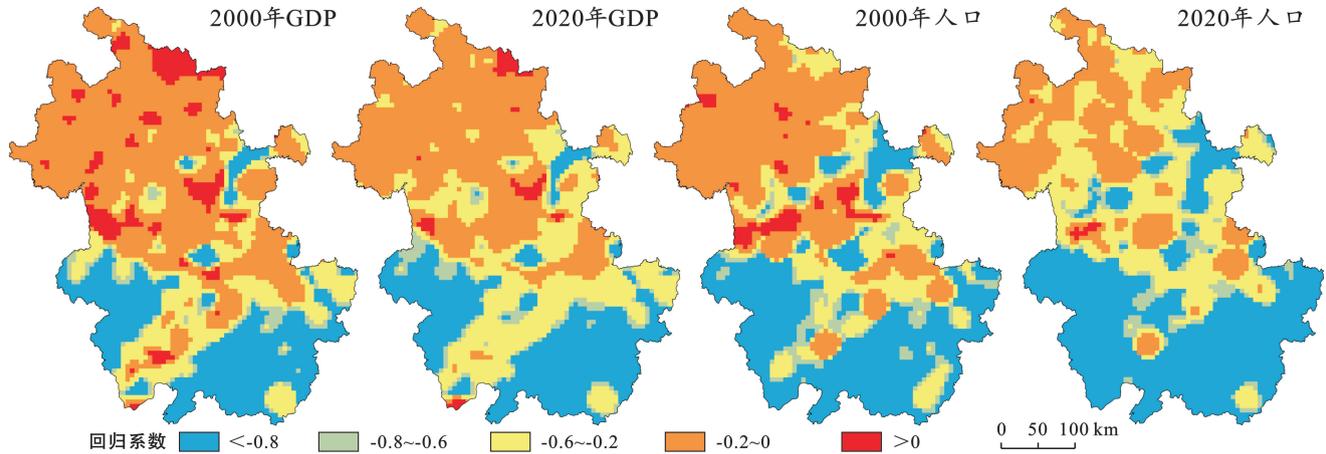


图 4 安徽省 2000 和 2020 年生境质量与社会经济因素回归系数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of regression coefficients between habitat quality and socio-economic factors in Anhui Province in 2000 and 2020

在景观格局指数方面,2000—2020 年 LPI 与 SHEI 对安徽省不同区域的生境质量存在正负双向影响(图 5)。2000 年 LPI 回归系数的正值比例为 59.51%,主要分布在安徽省东南部以及西部的山区,区域内优势景观为集中连片的林地,生境适宜度高。2020 年 LPI 与生境质量之间的空间分布关系和 2000 年相比较为相似,其中 LPI 的正向回归系数以长江流域为代表进一步扩大,该区域内建设用地的增加导致

景观破碎程度加深,LPI 值减小,生境质量也随之降低。2000 年与 2020 年 SHEI 的回归系数在空间分布上基本保持一致,负向回归系数主要分布在拥有大片林地、土地利用类型比较单一的安徽省南部以及经济较为发达、SHEI 值较高但生境水平较低的安徽省中部,2000 年 SHEI 回归系数负值比例为 68.21%,2020 年回归系数负值比例为 69.55%,说明安徽省生境质量与均匀度指数之间存在较为显著的负相关关系。

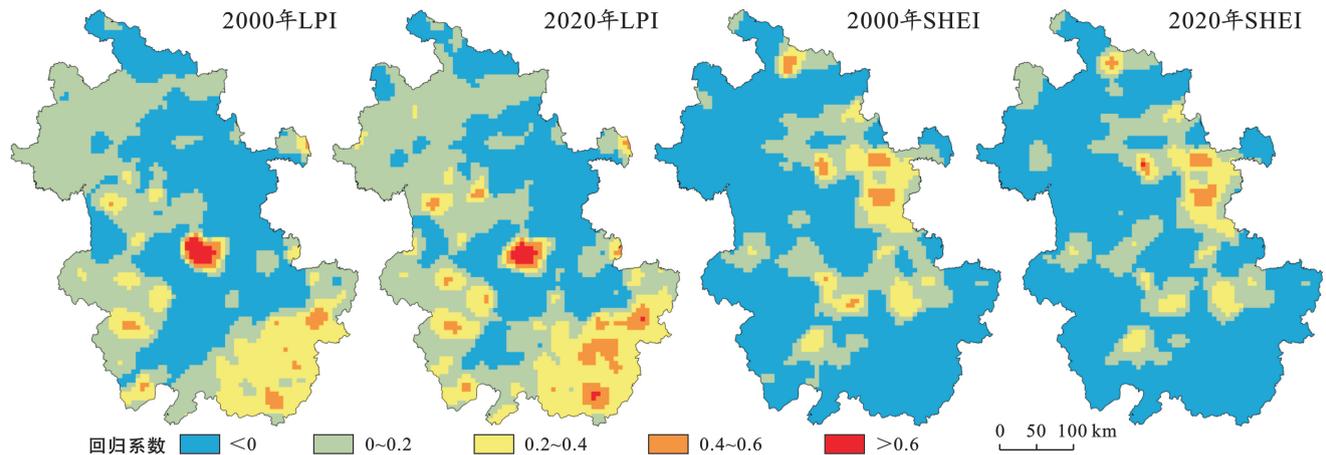


图 5 安徽省 2000 和 2020 年生境质量与景观格局指数回归系数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of regression coefficients of habitat quality and landscape pattern index in Anhui Province in 2000 and 2020

4 讨论与结论

4.1 结论

(1) 2000—2020 年,安徽省耕地的最大斑块指数始终保持最高,是区域内的优势景观,在此期间安徽省景观转变主要发生在耕地、林地、建设用地之间,其中建设用地景观要素扩张最为明显。随着城镇化进程加快,人类活动对各景观类型的干扰度也随之增加,导致安徽省 20 a 间除建设用地外和水域外,其他景观类型的最大斑块指数均有所下降,且各景观类型的分离度、复杂度增加,导致安徽省景观格局朝着破碎化发展。

(2) 2000—2020 年安徽省生境质量均值由 0.442 下降至 0.426,生境质量整体上呈轻微退化趋势,期间内安徽省生境质量以较差(0.2~0.4)等级为主,2000 年与 2020 年所占比例分别为 42.92%和 41.47%。安徽省生境质量在空间上的差异性较强,南北差异较大,呈现出“南高北低”的态势,低质量区主要分布在皖北平原区,以亳州市、阜阳市等为代表,生境质量以差(0~0.2)等级为主;高质量区分布在皖南、皖西山地丘陵区,以黄山市、安庆市等为代表,其生境质量以良(0.6~0.8)等级为主。

(3) 在自然环境因素层面上,年平均降雨量与归一化植被指数对大部分地区的生境质量有着显著的正面影响,两期回归系数均达 80%以上,且随着时间推移,两者对生境质量的正向影响进一步扩大,在空间格局上皖南的回归系数整体大于皖北。在社会经济因素层面上,单位面积 GDP 与人口密度对安徽省生境质量有着显著的负面影响,对生态系统的干扰性较强,且随着社会经济的发展以及城镇化水平的提高,其负面影响也随之扩大至 95%以上,在空间格局上皖北的回归系数整体大于皖南。在景观格局指数层面上,最大斑块指数与均匀度指数对于不同地区生境质量存在正负双向影响,2000—2020 年其回归系数总体变化不大,随着安徽省景观格局的破碎化与复杂化发展,其回归系数的负值比例也进一步扩大。

4.2 讨论

基于安徽省生境质量时空演变及其影响因素分析,为促进安徽省生态系统的安全性与稳定性、实现安徽省区域可持续发展战略,本文立足于不同区域提出以下差异化发展建议:①皖西与皖南丘陵山地区拥有集中成片的原始林,其生境质量始终处于较高水平等级,对安徽省生态安全具有关键性作用,是重要的生态安全屏障。因此,可以采取自然恢复与人工治理相结合的手段,禁止区域内建设用地肆意扩张、乱

砍滥伐等人类干扰活动,对于生态脆弱区实行封山育林,退耕还林,退耕还草等政策,保证山区林地的集中连片化,提高区域内的生物多样性,维持生态系统平衡。②皖中地区的经济发展在安徽省处于重要地位,其建设用地的蔓延对区域内的生境质量造成严重威胁,应严格界定城镇开发边界,通过城市更新等手段提高土地利用效率,加强蓝绿网等生态基础设施建设,并为建设用地与生态用地之间提供缓冲区,防止建设用地扩张进一步威胁生态用地。③皖北地区是安徽省粮食生产的主力军,耕地始终是区域内的优势景观,应遏制耕地破碎化的趋势,促使耕地朝着集中连片化发展。同时在保证耕地保有量的前提下,推进退耕还林,退耕还草等工程的实施,以促进区域内生境质量的提升。

生境质量分析是一项复杂的研究任务,因此本文在很多方面还有待改进。①本文在威胁源设置方面,主要是基于土地利用类型的面状威胁源,未来将主要公路,污染物排放等纳入考虑,进一步丰富威胁源,从而更加科学地讨论区域内生境质量。②本文在生境质量驱动力分析时,虽然从自然,社会经济,景观格局 3 个方面选取了影响因素,但因素的选择仍具有一定的局限性,结合人口、经济、生态、社会政策等因素分析安徽省生境耦合变化机制进行探索是本文的下一步工作。

参考文献 (References)

- [1] 王琦琨,武玮,杨雪琪,等.陕西省生境质量时空演变及驱动机制分析[J].干旱区研究,2022,39(5):1684-1694.
Wang Qikun, Wu Wei, Yang Xueqi, et al. Spatial-temporal changes and driving factors of habitat quality in Shaanxi Province during the past 20 years [J]. Arid Zone Research, 2022,39(5):1684-1694.
- [2] 陈实,金云翔,黄银兰.长三角中心区生境质量时空变化及其影响机制[J].生态学杂志,2023,42(5):1175-1185.
Chen Shi, Jin Yunxiang, Huang Yinlan. Spatio-temporal variations of habitat quality and its underlying mechanism in the central region of Yangtze River delta [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023,42(5):1175-1185.
- [3] 李胜鹏,柳建玲,林津,等.基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J].应用生态学报,2020,31(12):4080-4090.
Li Shengpeng, Liu Jianling, Lin Jin, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(12):4080-4090.
- [4] 钟莉娜,王军.基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质

- 量的影响[J].农业工程学报,2017,33(1):250-255.
- Zhong Lina, Wang Jun. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(1):250-255.
- [5] Riedler B, Lang S. A spatially explicit patch model of habitat quality, integrating spatio-structural indicators [J]. Ecological Indicators, 2018,94:128-141.
- [6] 张金茜,李红瑛,曹二佳,等.多尺度流域生态脆弱性评价及其空间关联性:以甘肃白龙江流域为例[J].应用生态学报,2018,29(9):2897-2906.
- Zhang Jinxi, Li Hongying, Cao Erjia, et al. Assessment of ecological vulnerability in multi-scale and its spatial correlation: A case study of Bailongjiang Watershed in Gansu Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(9):2897-2906.
- [7] 苏敬,芮茵艺,朱沁园,等.基于 InVEST 模型的 1985—2020 年忻州市生境质量演变及地形效应[J].生态与农村环境学报,2023,39(12): 1525-1533.
- Su Jing, Rui Hanyi, Zhu Qinyuan, et al. Temporal and spatial evolution of habitat quality and its topographic gradient effect in Xinzhou City based on InVEST model from 1985 to 2020 [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(12):1525-1533.
- [8] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009,7(1): 4-11.
- [9] Mushet D M, Neau J L, Euliss N H. Modeling effects of conservation grassland losses on amphibian habitat [J]. Biological Conservation, 2014,174:93-100.
- [10] Sherrouse B C, Semmens D J, Clement J M. An application of social values for ecosystem services (SolVES) to three national forests in Colorado and Wyoming [J]. Ecological Indicators, 2014,36:68-79.
- [11] 张徐,李云霞,吕春娟,等.基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展[J].生态科学,2022,41(1): 237-242.
- Zhang Xu, Li Yunxia, Lyu Chunjuan, et al. Research progress on application of ecosystem service functions based on InVEST model [J]. Ecological Science, 2022, 41(1):237-242.
- [12] 韩宇,毛逸飞,杨伶,等.洞庭湖流域生境质量对 LUCC 的动态响应[J].中南林业科技大学学报,2023,43(6): 148-157.
- Han Yu, Mao Yifei, Yang Ling, et al. Dynamic responses of habitat quality to LUCC in the Dongting Lake Basin [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023,43(6):148-157.
- [13] 白立敏,冯兴华,孙瑞丰,等.生境质量对城镇化的时空响应:以长春市为例[J].应用生态学报,2020,31(4): 1267-1277.
- Bai Limin, Feng Xinghua, Sun Ruifeng, et al. Spatial and temporal responses of habitat quality to urbanization: A case study of Changchun City, Jilin Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4):1267-1277.
- [14] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S A, et al. InVEST 3.2.0 user's Guide: Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs [M]. Stanford: the Natural Capital Project, 2015.
- [15] 陈妍,乔飞,江磊.基于 In VEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究:以北京为例[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(3): 553-562.
- Chen Yan, Qiao Fei, Jiang Lei. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: A case study in Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016,52 (3):553-562.
- [16] 戴云哲,李江风,杨建新.长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应[J].地理科学进展,2018,37(10):1340-1351.
- Dai Yunzhe, Li Jiangfeng, Yang Jianxin. Spatiotemporal responses of habitat quality to urban sprawl in the Changsha metropolitan area [J]. Progress in Geography, 2018,37(10):1340-1351.
- [17] 周婷,陈万旭,李江风,等.神农架林区人类活动与生境质量的空间关系研究[J].生态学报,2021,41(15): 6134-6145.
- Ting Zhou. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia forest region from 1995 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41 (15):6134-6145.
- [18] 李双成,蔡运龙.地理尺度转换若干问题的初步探讨[J].地理研究,2005,24(1): 11-18.
- Li Shuangcheng, Cai Yunlong. Some scaling issues of geography [J]. Geographical Research, 2005,24(1): 11-18.
- [19] 沈体雁,于瀚辰,周麟,等.北京市二手住宅价格影响机制:基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J].经济地理,2020,40(3): 75-83.
- Shen Tiyan, Yu Hanchen, Zhou Lin, et al. On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: Scale law of spatial heterogeneity [J]. Economic Geography, 2020, 40(3):75-83.
- [20] 刘永婷,杨钊,徐光来,等.基于 MGWR 模型的皖江城

- 市带生境质量对城镇化的响应研究[J].地理科学, 2023,43(2):280-290.
- Liu Yongting, Yang Zhao, Xu Guanglai, et al. Impacts of urbanization on habitat quality using MGWR models in Wanjiang City Belt [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023,43(2):280-290.
- [21] 吴楠,陈红枫,冯朝阳,等.基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征[J].长江流域资源与环境, 2020,29(5):1119-1127.
- Wu Nan, Chen Hongfeng, Feng Chaoyang, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality based on land cover change in Anhui Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(5):1119-1127.
- [22] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J].生态学报, 2020,40(9):2895-2906.
- Huang Muyi, Yue Wenze, Feng Shaoru, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain Area of West Anhui Province based on InVEST model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(9):2895-2906.
- [23] 程爱国,程鹏,吴楠.基于 InVEST 模型的区域生境质量对土地覆被变化的响应:以合肥市为例[J].安徽农学通报, 2020,26(18):60-66.
- Cheng Aiguo, Cheng Peng, Wu Nan. Response of regional habitat quality to land cover change based on InVEST model: A case study of Hefei City [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020,26(18):60-66.
- [24] 王耕,王佳雯.丹东沿海地区土地利用变化对生境质量的影响研究[J].生态环境学报, 2021,30(3):621-630.
- Wang Geng, Wang Jiawen. Study on the impact of land use change on habitat quality in Dandong coastal area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(3):621-630.
- [25] 夏盈,张莹莹,厉恩华,等.江汉平原四湖流域生境质量时空演化及预测[J].长江流域资源与环境, 2022,31(7):1616-1626.
- Xia Ying, Zhang Yingying, Li Enhua, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of habitat quality in four lakes basin of Jianghan Plain [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(7):1616-1626.
- [26] Fothering H, Yang W B, Kang W. Multiscale geographically weighted regression(MGWR) [J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017,107(6):1247-1265.
- [27] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 1996,28(4):281-298.
- [28] Yu Hanchen, Fotheringham A S, Li Ziqi, et al. Inference in multiscale geographically weighted regression [J]. Geographical Analysis, 2020,52(1):87-106.
- [29] 王培涵,查瑞波,杜书滢,等.大型三线城市住宅价格的影响因素及尺度研究[J].福建师范大学学报(自然科学版), 2021,37(4):99-106.
- Wang Peihan, Zha Ruibo, Du Shuying, et al. Research on influencing factors and scale of housing price in large third tier cities [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2021,37(4):99-106.
- [30] 褚琳,黄翀,刘庆生,等.2000-2010 年辽宁省海岸带景观格局与生境质量变化研究[J].资源科学, 2015,37(10):1962-1972.
- Chu Lin, Huang Chong, Liu Qingsheng, et al. Changes of coastal zone landscape spatial patterns and ecological quality in Liaoning Province from 2000 to 2010 [J]. Resources Science, 2015,37(10):1962-1972.
- [31] 常玉旻,高阳,谢臻,等.京津冀地区生境质量与景观格局演变及关联性[J].中国环境科学, 2021,41(2):848-859.
- Chang Yuyang, Gao Yang, Xie Zhen, et al. Spatiotemporal evolution and spatial correlation of habitat quality and landscape pattern over Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. China Environmental Science, 2021,41(2):848-859.
- [32] 谷正楠,张震,胡克宏,等.基于结构方程模型的安徽省归一化植被指数变化及影响因素分析[J].科学技术与工程, 2022,22(28):12259-12267.
- Gu Zhengnan, Zhang Zhen, Hu Kehong, et al. Analysis on the normalized difference vegetation index change and influence factors in Anhui Province based on structural equation model [J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(28):12259-12267.
- [33] 吴楠,陈凝,程鹏,等.安徽省各生态分区的 NDVI 年际变化特征及归因分析[J].长江流域资源与环境, 2023,32(6):1200-1207.
- Wu Nan, Chen Ning, Cheng Peng, et al. Analysis on characteristics and attribution of NDVI interannual change in different ecological divisions in Anhui Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(6):1200-1207.