

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.025.

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 Qihang, Xu Guanglai, Liu Yongting, 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.

# 基于 InVEST 和 MGWR 模型的安徽省 生境质量评估及驱动

郑启航<sup>1,2</sup>, 徐光来<sup>1,2</sup>, 刘永婷<sup>1</sup>, 杨强强<sup>3</sup>, 池建宇<sup>1,2</sup>, 孙久星<sup>1,2</sup>, 张婷<sup>1</sup>

(1.安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241003;

2.安徽省江淮流域地表过程与区域响应重点实验室, 安徽 芜湖 241003; 3.宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021)

**摘要:** [目的] 评估安徽省生境质量并研究其驱动机制, 以为安徽省生态环境管理和社会经济可持续高质量发展提供理论参考和科学依据。[方法] 以安徽省为研究区, 基于 InVEST 模型对 2000 年、2010 年、2020 年生境质量进行评估, 并运用热点分析和 MGWR 模型对影响生境质量空间分布格局的自然—社会经济因子进行分析。[结果] (1) 2000—2020 年安徽省生境质量整体呈现下降趋势, 下降率为 3.01%, 且生境质量较差区分布面积最广。(2) 生境质量的空间分布格局呈现“以山地丘陵地区为主的南部和西部高, 以耕地和建筑用地为主的北部和中部低”态势, 且具有明显的空间集聚性。(3) 坡度、NDVI、建筑用地比例和土地垦殖率是影响安徽省生境质量空间分布的关键因子, 平均回归系数分别为 0.138, 0.084, -0.213, -0.557。坡度对生境质量具有正向效应, NDVI 对生境质量的影响以正向效应为主, 三期正向效应影响面积比例均达到 80% 以上, 建筑用地比例和土地垦殖率对生境质量的负向效应随时间变化分别增强和减弱。[结论] 建筑用地比例和土地垦殖率会使生境质量降低, 未来应加强土地利用的管理和注重城镇扩张规模。

**关键词:** 生境质量; MGWR 模型; InVEST 模型; 驱动机制

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0373-10

## Assessment and Driving of Habitat Quality in Anhui Province Based on InVEST and MGWR Models

Zheng Qihang<sup>1,2</sup>, Xu Guanglai<sup>1,2</sup>, Liu Yongting<sup>1</sup>,

Yang Qiangqiang<sup>3</sup>, Chi Jianyu<sup>1,2</sup>, Sun Jiuxing<sup>1,2</sup>, Zhang Ting<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003,

China; 2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu, Anhui 241003,

China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to evaluate the habitat quality in Anhui Province, to explore its driving mechanism, and to provide a theoretical reference and scientific basis for ecological environment management and the sustainable and high-quality development of social economy in Anhui Province. [Methods] In this study, Anhui Province was used as the study area to evaluate habitat quality in 2000, 2010 and 2020 based on the InVEST model. The hot spot analysis and MGWR model were used to analyze the natural and socioeconomic impacts on habitat quality in Anhui Province. [Results] The average habitat quality of Anhui Province showed a downward trend from 2000 to 2020, with a decline rate of 3.01%, and the area of poor habitat quality most widely distributed. The spatial distribution pattern of habitat quality

收稿日期: 2023-07-10

修回日期: 2023-08-03

资助项目: 国家自然科学基金青年项目(41301029); 安徽省自然科学基金(2308085MD113)

第一作者: 郑启航(2000—), 女, 重庆永川人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统服务。E-mail: 1366201477@qq.com

通信作者: 徐光来(1978—), 男, 安徽无为, 博士, 副教授, 主要研究方向为水文学与水资源。E-mail: guanglaixu@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

was high level in the south and west of mountainous and hilly areas and low level in the north and central part dominated by arable land and building land. Slope, NDVI, construction land ratio and land reclamation rate were the key factors affecting the spatial distribution of habitat quality in Anhui Province, and the average regression coefficients were 0.138, 0.084, -0.213 and -0.557, respectively. Slope had positive effects on habitat quality, NDVI had positive effects on habitat quality in most regions, the positive proportion of the area in the three phases reached more than 80%, and the negative effects of the proportion of building land and land reclamation rate on habitat quality increased and weakened with time, respectively. [Conclusion] The proportion of building land and land reclamation rate can decrease the habitat quality, so the management of land use and the scale of urban expansion should be strengthened in the future.

**Keywords:** habitat quality; MGWR model; InVEST model; driving factor

生境质量是指生态系统在一定的时间和空间提供适合于个体或种群生存和发展的能力,是衡量生态系统服务功能的重要指标<sup>[1]</sup>,对于生物多样性维护、生态系统服务供需平衡、生态安全格局构建等研究具有重要意义<sup>[2-4]</sup>。

当前进行生境质量评价主要是通过野外调查构建评价体系和基于遥感影像结合模型评价等方法。通过野外实地调查获取有关生境质量的参数来构建评价体系的方法,时间和人力成本较高,多适用于小尺度的地理单元<sup>[5]</sup>。基于遥感数据和空间数学建模的模型评价方法具有获取数据高效、结果表达可视化强、可进行长时间尺度评价等优点<sup>[6-7]</sup>,近年来 InVEST 模型因其 Habitat Quality 模块可以快速评估土地利用变化和不同威胁源对生物多样性的影响,使其被广泛运用,如岳文泽等<sup>[7]</sup>利用 InVEST 模型对浙江省生境质量进行估算以及驱动机制研究。基于空间尺度视角,生境质量评估主要围绕自然区<sup>[8]</sup>、流域<sup>[9]</sup>、城市群<sup>[10]</sup>、都市圈<sup>[11]</sup>、省域等<sup>[7]</sup>,而对于省域尺度的研究主要是依据县域或乡镇等行政区划,根据格网尺度的分析相对较少。并且对于驱动机制研究,主要是通过地理探测器<sup>[10]</sup>,只能揭示影响因子与生境质量的相关程度,很难进行对空间异质性的驱动因子研究,且对于此方面的研究较少。而多尺度地理加权回归(MGWR)模型对空间分异驱动机制的探究提供了可能,能探究各影响因子在空间上对生境质量的作用尺度以及作用效果的异质性,如 Yang 等<sup>[12]</sup>通过 MGWR 模型探究黄河下游区域不同空间尺度下建设用地扩张与景观格局的关系。

基于此,本研究以安徽省为例开展研究,基于土地利用等数据,运用 InVEST 模型对生境质量进行评估,通过 MGWR 模型探究影响生境质量空间异质性的关键自然和社会经济驱动因子,结果以期对安徽省生态环境管理和社会经济可持续高质量发展提供理论参考。

## 1 研究区概况

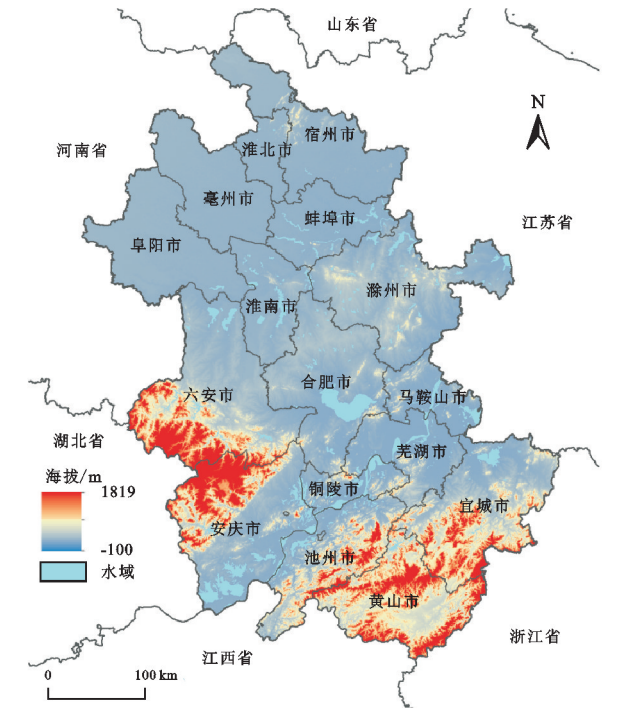
安徽省位于中国长三角地区(29°41'—34°38'N, 114°54'—119°37'E),地处长江、淮河中下游,下辖 16 个地级市、104 个区县,占地面积约 14.01 万 km<sup>2</sup>(图 1)。土地利用类型主要是耕地,其次是林地和建设用地,地貌类型以平原和山地丘陵为主,气候以淮河为分界线,淮河以北为暖温带半湿润季风气候,淮河以南为亚热带湿润季风气候,降水集中在夏季,水热条件充足,且承担着长江中下游生态带和长三角地区生态屏障功能,生态地位极其重要。截至 2020 年底,安徽省区域总产值为 38 680.63 亿元,常住人口约 6 105 万人<sup>[13]</sup>。自 2014 年安徽省首次纳入长三角城市群以来,土地利用方式快速变化,城镇建设用地快速且大量增加,人类活动加大对自然环境的干扰,导致生境质量发生变化,使得在推动“绿色循环发展、构建生态文明”的进程中,对生态环境的治理提出了更高挑战。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据获取与处理

土地利用数据(30 m 分辨率)来源于中国国家基础地理信息中心生产的 GlobeLand30 (<http://globeand30.org>),该数据集总体分类精度大于 83% (2010 年和 2020 年),共包括 10 个一级类型,根据研究区实际情况,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、湿地、水体、建设用地、裸地 7 类。高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m,坡度数据则基于高程数据通过 ArcGIS 10.8 中的 Slope 工具计算。NDVI 数据是通过 GEE 平台获取的 250 m 的 MODIS 数据。人口密度数据(2000 年和 2010 年)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),2020 年人口密度数据源自 LandScan 人口密度数据集(<https://landscan.ornl.gov/>),分辨率为 1 km。气温和降水

数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>) 的 1 km 分辨率逐月气温和降水数据集。夜间灯光数据来源于 DMSP\_OLS 数据集 (2000 年和 2010 年) 和 VIIRS2020 年度数据 (<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)4318 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区位置  
Fig. 1 Location of study area

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST 模型 本研究采用 InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块基于土地利用数据和威胁源数据对生境质量进行评估,得分在 0~1<sup>[14]</sup>。它反映了人类活动对生态环境的干扰破坏强度,得分越接近 1,人类活动程度越小,生态环境受到人类干扰的破坏就越弱,其生境质量和生物多样性就越高,反之,则越低<sup>[15]</sup>。公式如下:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^Y \left( \frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) \times r_y \times i_{rxy} \times \beta_x \times S_{jr}$$

式中: $D_{xj}$  为第  $j$  种土地利用类型  $x$  栅格单元上的生境退化度指数; $r$  为威胁源个数; $y$  为威胁源  $r$  中的栅格; $\omega_r$  为不同威胁源的权重; $r_y$  为栅格  $y$  的胁迫值; $\beta_x$  为生境抗干扰水平; $S_{jr}$  为不同生境对不同威胁因子的相对敏感程度; $i_{rxy}$  为栅格  $y$  中的威胁源  $r$  中的栅格  $x$  的影响。

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

式中: $Q_{xj}$  为第  $j$  种土地利用类型  $x$  栅格单元的生境质

量指数; $H_j$  为第  $j$  种土地利用类型的生境适宜度; $k$  为半饱和系数,通常为最高栅格单元退化度的一半,本研究将该值设定为 0.16; $z$  为归一化常数,通常取 2.5<sup>[16]</sup>。

本研究参考 InVEST 模型手册和相关研究<sup>[7,10,16]</sup>,结合研究区的实际情况确定生境质量模块的相关主要参数,如表 1 和表 2 所示。

表 1 威胁因子的权重赋值和最大影响距离  
Table 1 Weights and maximum influence distance of threat factors

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰退模式
耕地	4	0.6	线性
建筑用地	8	0.4	指数
裸地	6	0.5	线性

表 2 不同土地利用类型生境适宜度及对威胁因子的敏感性  
Table 2 Habitat suitability of different land use types and sensitivity to threat factors

土地利用类型	生境适宜度	威胁因子敏感度		
		耕地	建筑用地	裸地
耕地	0.3	0	0.8	0.4
林地	1	0.6	0.75	0.2
草地	0.8	0.8	0.6	0.6
湿地	0.7	0.55	0.7	0.55
水体	0.7	0.5	0.4	0.2
建筑用地	0	0	0	0.1
裸地	0.6	0.6	0.4	0

2.2.2 生境质量空间异质性 本研究采用 Moran's  $I$  指数判断安徽省生境质量的空间分布是否存在自相关性,即空间上是否出现集聚。再进一步通过 Getis-Ord  $G_i^*$  指数揭示局部空间聚类分布特征<sup>[17]</sup>,即揭示局部空间生境质量的异质性,以识别生境质量的热点(高值)和冷点(低值)在空间上发生集聚的区域,以便于后续进行驱动因子分析。

2.2.3 多尺度地理加权回归(MGWR)模型 在进行驱动因子分析前,利用 SPSS 软件对选择的影响因子与生境质量之间的相关性进行判别与检验,再通过普通最小二乘法(OLS 模型)进行关键因子的选择。

多尺度地理加权回归(MGWR)方法属于局部回归模型的一种,且它是对地理加权回归(GWR)方法的优化。MGWR 可允许每个变量有各自特定的带宽(空间尺度),即每个自变量可使用各自最优带宽下进行回归。不同自变量的带宽可反映其影响过程的空间作用尺度(变量带宽越小,则作用尺度越小,说明变量对空间异质性的作用效果越大),因此带宽能更好地体现不同变量对空间异质性的影响,更接近真实的空间过程模拟,使得回归的结果更准确<sup>[18]</sup>。本文采用了最为常用的二次核函数和修正的赤池信息准则(AICc)确定带宽<sup>[19]</sup>。MGWR 模型的计算公式如下:



$$Y_i = \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \beta_0(u_i, v_i) + \epsilon_i$$

式中:  $Y_i$  表示生境质量;  $x_{ij}$  表示自然或社会经济因子;  $k$  是参与分析的空间单位总数;  $\epsilon_i$  表示随机误差项;  $(u_i, v_i)$  表示样本点的空间坐标。  $\beta_0(u_i, v_i)$  表示  $i$  地点截距;  $\beta_{bwj}(u_i, v_i)$  是  $i$  处  $j$  个变量的局部回归系数<sup>[20-21]</sup>, 回归系数的绝对值越大, 对生境质量的作用也越强<sup>[22]</sup>。

根据相关文献<sup>[10,23]</sup> 和研究区实际自然—社会发展背景, 选择 9 个代表性因子, 包括高程 ( $X_1$ )、坡度 ( $X_2$ )、年降水量 ( $X_3$ )、年均气温 ( $X_4$ )、NDVI ( $X_5$ ) 5 个自然因子和人口密度 ( $X_6$ )、夜间灯光 ( $X_7$ )、建筑用地比例 ( $X_8$ )、土地垦殖率 ( $X_9$ ) 4 个社会经济因子。通过 ArcGIS 10.8 渔网工具进行  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  的网格化采样, 共采集 5 924 个网格单元(含边界未铺满网格)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生境质量时空分布变化

根据 InVEST 模型运行结果, 安徽省 2000—

2020 年生境质量总体呈下降趋势, 生境质量均值从 0.454 降至 0.440, 下降率为 3.01%, 而且呈现出明显的空间分异特征, 生境质量呈现出“南部—西部高, 北部—中部低”的分布格局。

为进一步了解不同生境质量区域的变化, 基于  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  格网尺度, 参考前人的研究在 ArcGIS 10.8 中使用等间隔法将生境质量划分为 5 个等级及对应的区域<sup>[7,23]</sup> (表 3 和图 2)。生境质量较差区的面积分布最广, 面积占比超过 50%, 但随时间变化呈现减少趋势, 主要分布于人口密度高, 以耕地和建筑用地为主的皖北和皖中地区。生境质量优质区和较好区的面积占比呈现先增加后降低的轻微波动变化, 主要分布在皖南和皖西山地区丘陵地带, 还有少部分零星分散在湖泊、河流附近。生境质量劣质区分布最少且较为分散, 但随着时间变化, 面积占比大幅度增加, 至 2020 年生境质量劣质区的面积为  $5\,460.16 \text{ km}^2$ , 占总面积的 3.9%, 主要分布于各地区的工业园区、经济开发区和人口密集的市区中心。生境质量一般区的面积占比呈现先增加后降低的变化, 主要分布于生境质量优质区和较好区外围区域。

表 3 2000—2020 年安徽省各生境质量区域面积及占比变化

Table 3 Changes in the area and proportion of habitat quality in Anhui Province from 2000 to 2020

生境质量区域	等级	2000 年		2010 年		2020 年	
		面积/ $\text{km}^2$	占比/%	面积/ $\text{km}^2$	占比/%	面积/ $\text{km}^2$	占比/%
生境质量劣质区	差(0~0.20)	780.61	0.56	2136.62	1.52	5460.16	3.89
生境质量较差区	较差(0.20~0.40)	86628.01	61.80	84640.06	60.38	83943.36	59.58
生境质量一般区	一般(0.40~0.60)	14110.97	10.07	14895.08	10.63	13398.46	9.56
生境质量较好区	较好(0.60~0.80)	13457.9	9.60	13060.58	9.32	12803.64	9.13
生境质量优质区	好(0.80~1.00)	25208.26	17.98	25453.41	18.16	24580.12	17.53

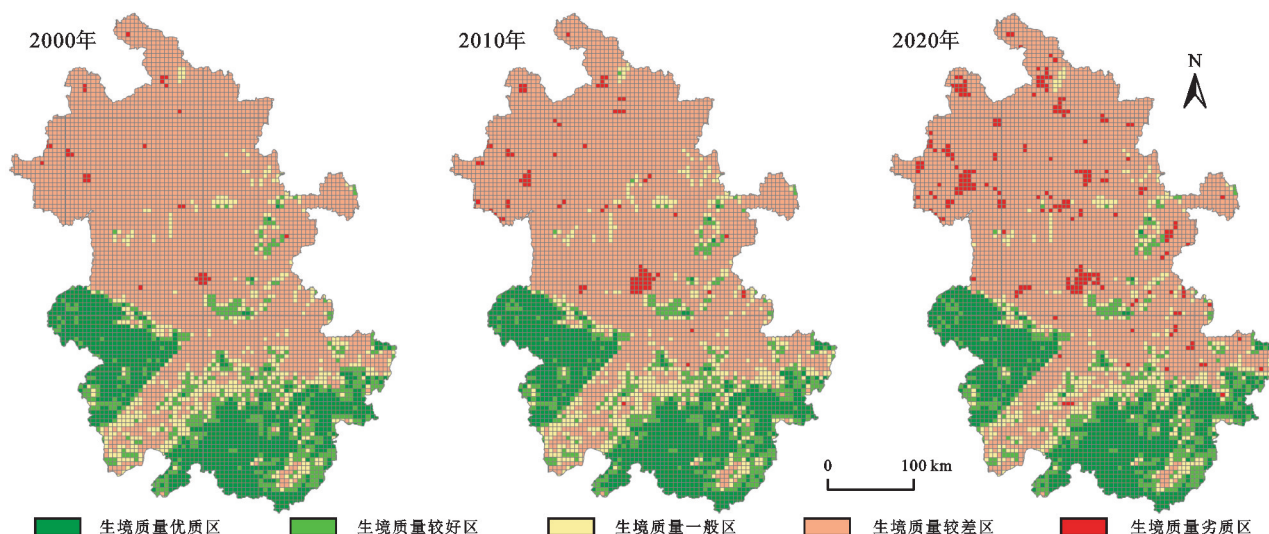


图 2 2000—2020 年安徽省生境质量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of habitat quality in Anhui Province from 2000 to 2020

根据图 3 可知, 2000—2010 年各生境质量区未发生转移变化的保留面积比例在 90% 以上, 生境质量优质区

相对保持稳定, 保留面积占比约 98.9%, 生境质量一般区发生转移变化的面积相对最多, 9.5% 的生境质量一般区



的生境质量发生变化。生境质量发生衰退的面积占比约 13.6%,但仍有区域呈现生境质量提升,其区域面积比例约 11.9%。2010—2020 年的生境质量变化与前十年相比,发生了一定的转变。生境质量优质区虽然保留面积占比最大,但相对于前十年减少了 1 848.36 km<sup>2</sup>。20.8%的生境质量一般区向生境质量较差区转移,10.8%

的生境质量较好区生境质量下降,但 10.8%的生境质量劣质区生态保护受其重视,加强对生态环境的保护,使得生境质量有所提升,转变为生境质量较差区。整体而言,随着社会经济和城镇化的快速发展,各生境质量区呈现由高生境质量区域衰退至较低生境质量区域的态势,具有潜在的生境衰退风险。

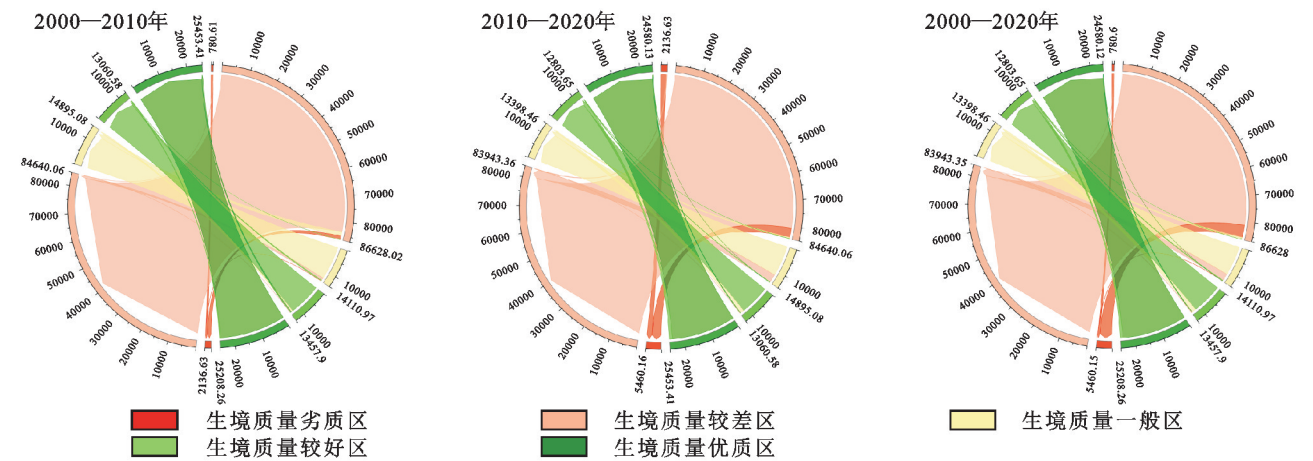


图 3 2000—2020 年安徽省各生境质量区域面积转移

Fig. 3 Transfer of habitat quality in Anhui Province from 2000 to 2020

3.2 生境质量空间分异特征

根据 ArcGIS 10.8 的运算结果,3 个年份生境质量的 Moran's *I* 指数分别为 0.909,0.906,0.905,*p* 值均小于 0.01 且 *z*-score 均大于 96,这表明安徽省生境质量具有显著的空间集聚特征。图 4 反映了安徽省生境质量的冷热点集聚情况,热点区域(即高值聚集

区)主要分布于皖南和皖西丘陵山地,随时间变化空间分布格局变化不明显;冷点区域(即低值聚集区)主要分布于皖北、淮南市、六安北部和合肥北部,且随着时间变化冷点区域更为破碎化,但 95%置信区间以上的冷点区域呈现增加并向城镇经济发展中心集聚的趋势。

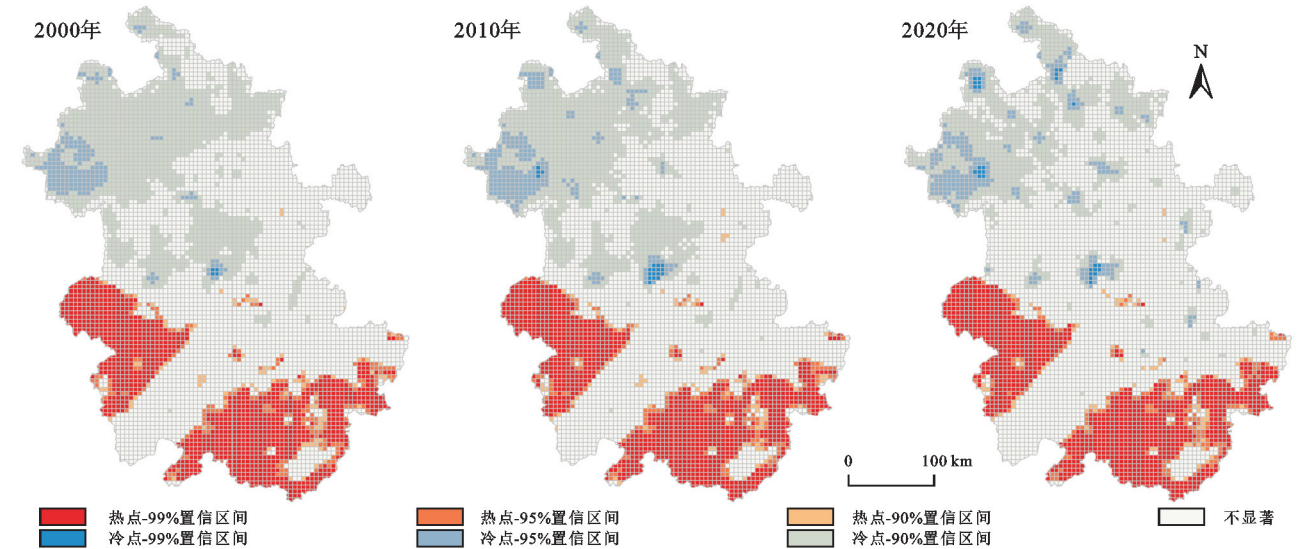


图 4 2000—2020 年安徽省生境质量的热点分析

Fig. 4 Hot spot analysis of habitat quality in Anhui Province from 2000 to 2020

3.3 生境质量驱动因子分析

3.3.1 关键因子选择 根据图 5 可知,生境质量与各影响因素在 3 个时期的相关系数均通过 0.01 的显著性检验,与 *X*<sub>2</sub>(坡度)、*X*<sub>6</sub>(人口密度)和 *X*<sub>8</sub>(建筑用地比例)在 3 个时期的相关系数均达到 0.75 以上,

且生境质量与自然因子呈现显著正相关关系,与社会经济因子呈现显著负相关关系。根据 OLS 模型的运算结果,影响 3 个时期生境质量的关键因子为坡度、NDVI、建筑用地比例和土地垦殖率。

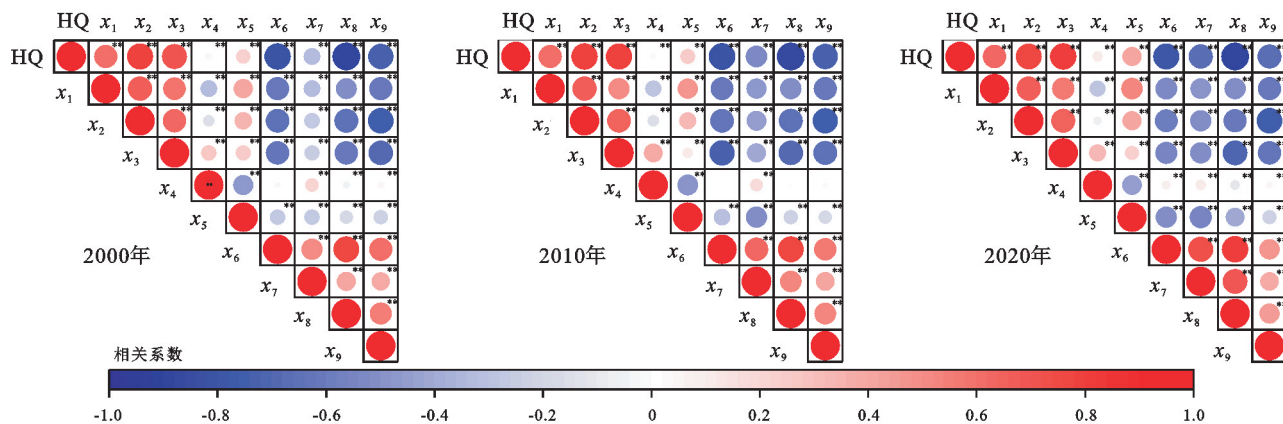


图5 2000—2020年安徽省生境质量与影响因子的相关分析

**Fig. 5** Correlation analysis of habitat quality and driving factors in Anhui Province from 2000 to 2020

3.3.2 基于 MGWR 模型的关键因子分析 根据 MGWR 的运行结果,3 个时期拟合的  $R^2$  分别 0.995, 0.996, 0.995, 且 3 个时期的局部决定系数(Local  $R^2$ ) 大于 0.85 的单元占比超过 89.2%, 表明本文所选择的影响因素对安徽省生境质量的空间分布格局具有较好的综合解释力。

为进一步体现关键因子对生境质量空间分布特征的影响,对 MGWR 模型的各个回归系数进行了 0.05 的显著性水平检验。根据表 4,坡度、NDVI、建筑用地比例和土地垦殖率的平均回归系数分别为 0.138, 0.084, -0.213, -0.557。各关键因子的综合影响强度排序为 NDVI < 坡度 < 建筑用地比例 < 土地垦殖率。

根据表 4,坡度对生境质量的带宽分别为 69,68,84,占总样本的比例相对较小,作用尺度小,存在显著的空间异质性。坡度对生境质量起正向效应,表明生境质量随着坡度的增加而增强,且正向效应强度随时间变化逐渐增强。根据图 6,高值区主要位于长江沿岸地区、合肥市区以及宣城东北部,低值区主要分布于皖南和皖西山地丘陵地带。坡度影响较大的区域主要为经济发展相对较高、人口密集的城镇

中心,主要是因为坡度越大,对城镇发展和农业生产的限制越大。

NDVI 在 3 个时期的带宽分别为 45, 52, 43, 对生境质量的作用尺度很小, 且 NDVI 对生境质量具有双向效应, 但以正向效应为主。2000 年 NDVI 对生境质量负向影响的面积比例为 17.9%, 至 2020 年降低为 13.1%。NDVI 负向影响的地区主要分布于淮河附近的湖泊河流以及巢湖, 至 2020 年合肥市的负向效应范围扩大; NDVI 正向影响高值区主要位于皖西山地丘陵、滁州、池州和宣城等地区。

建筑用地比例的带宽分别为 939,52,267,对生境质量呈现负向效应,即生境质量随建筑用地比例的增加而下降,且随时间变化负向效应呈现增强趋势。根据图 7,负向效应最强的区域主要分布于皖南,负向效应较弱的区域主要分布于皖北和合肥。

土地垦殖率的带宽在所有因子中最小,三期均为43,表明其对生境质量的空间异质性影响最显著。主要具有负向效应,但随着时间变化负向效应呈现减弱趋势。土地垦殖率正向影响的区域分布较少,负向效应最强的地区主要分布于皖南和皖西山地丘陵地区,负向效应影响较低的地区主要分布于皖北。

表 4 MGWR 模型各变量带宽及回归系数均值

Table 4 Bandwidth and the mean regression coefficients of MGWR

变量	2000 年		2010 年		2020 年	
	带宽	回归系数均值	带宽	回归系数均值	带宽	回归系数均值
坡度	69	0.136	68	0.130	84	0.148
NDVI	45	0.077	52	0.078	43	0.098
建筑用地比例	939	-0.161	52	-0.223	267	-0.256
土地垦殖率	43	-0.578	43	-0.567	43	-0.527

## 4 讨论

生境质量反映了区域本底环境以及土地利用情况,对于区域可持续的高质量发展和生态安全格局建

具有重要意义<sup>[3,10]</sup>。生境质量的空间分布很大程度上受土地利用的影响。随着城市的快速扩张,特别是皖北、合肥、滁州和长江沿岸城市的建筑用地显著增加,导致安徽省生境质量整体呈现下降趋势<sup>[16]</sup>,具



有生境退化的风险。皖南和皖西山地丘陵地区以林地和草地为主,人类活动干扰弱,对生境环境的破坏小,使该区域成为生境质量较高的热点区域;生境质量较差区主要分布于以耕地和建筑用地为主的皖北和皖中地区,且随着大量耕地被建筑用地挤占,导致生境质量劣质区以及 95%置信区间以上的冷点区域增加并呈现向城镇经济发展中心集聚的趋势,这与黄木易<sup>[24]</sup>、刘永婷<sup>[25]</sup>和吴楠<sup>[23]</sup>等的研究较为吻合。

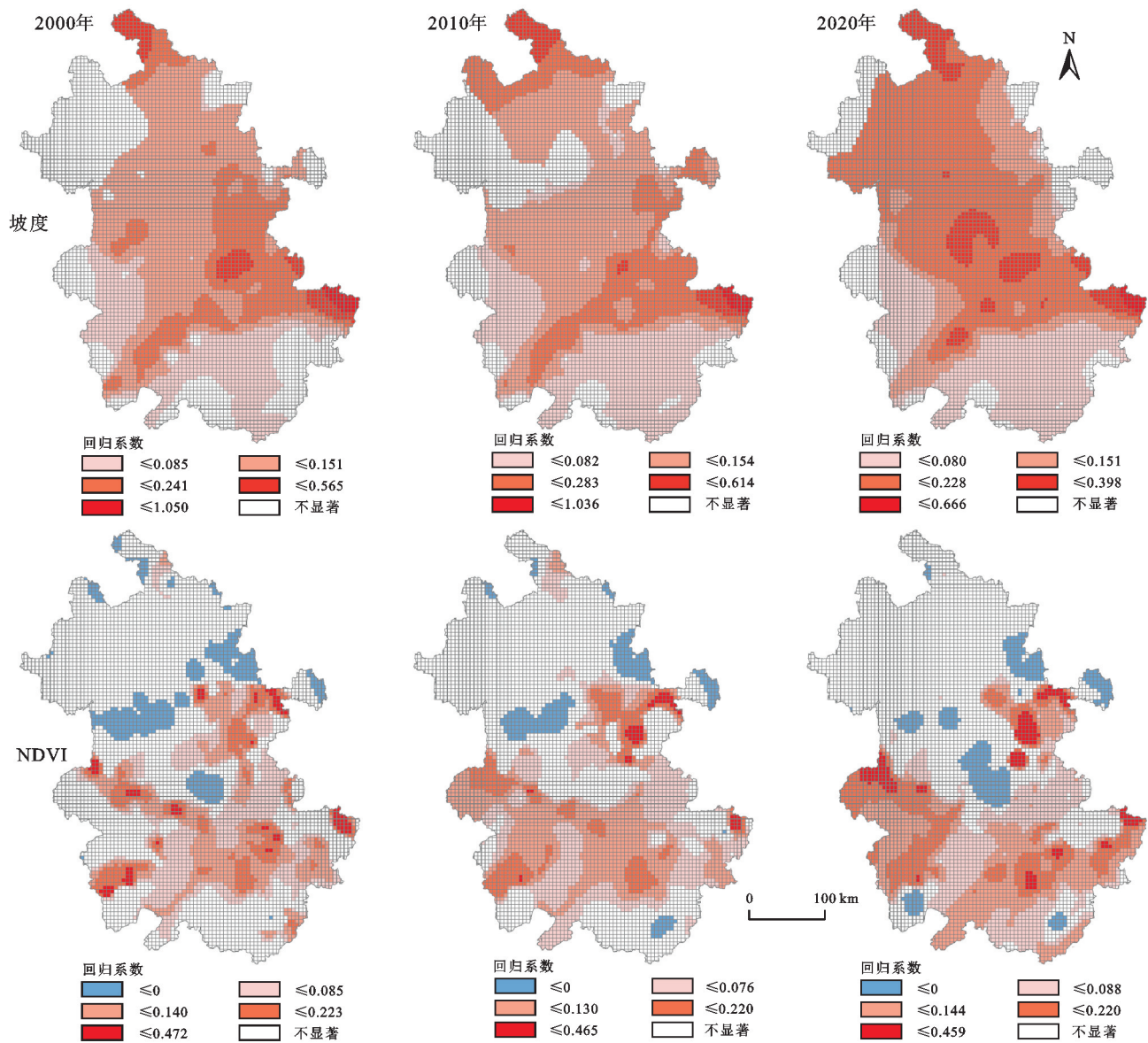


图 6 生境质量与坡度和 NDVI 的回归系数

Fig. 6 MGWR regression results of slope and NDVI

自然因子和社会经济因子对生境质量空间异质性的驱动机制不同,自然因子主要呈现正效应,社会经济因子主要呈现负效应。坡度、NDVI、建筑用地比例和土地垦殖率的带宽相对较小,对生境质量具有显著的空间异质性。其中,坡度与生境质量呈现正效应,因为坡度越大越不利于交通和人类居住,从而限制人口分布和社会经济的发展<sup>[24]</sup>,使得生境质量相对较高,因此皖北和各城镇经济中心受坡度的正向效应高于皖南和皖西山地丘陵地带。NDVI 与生境质量呈现正向效应,植被增加,生态环境得到改善,且由于“退耕还林”工程和生态保护措施的实施,使得 NDVI 与生境质量间的正相关关系也在增强。但由于湖泊河流的影响,使得部分地区的 NDVI 值表现为负值<sup>[26]</sup>,且合肥市区在城市扩张的同时也加强对生态环境的保护,公园和休闲绿地的面积增加,导致 NDVI 有所增强,但其分布较为破碎,连通性较差,并受到建筑用地密集紧凑的影响,使绿地对生境质量的改善效果微弱,呈现轻微负效应<sup>[27-28]</sup>。随着城镇化进程加快,人类活动主要通过土地利用方式的变化来间接加强社会经济对生境质量的影响,即通过建筑用地比例和土地垦殖率,其与生境质量呈现负向效应,但影响程度随时间变化有所差异。由于“退耕还林”工程施行,以及促进经济快速发展的工业园区、经济开发区



等不断出现导致大量耕地被挤占<sup>[15,23]</sup>,建筑用地比例增加,从而使得土地垦殖率与生境质量的相关性减弱,且建筑用地比例和土地垦殖率对生境质量的负向效应随时间变化而分别增强和减弱。由于皖南和皖

西丘陵山地地区植被覆盖度高,以林地和草地为主,建筑用地和耕地增加会导致植被覆盖降低,从而使得生境质量下降,因此该区域受建筑用地比例和土地垦殖率的负向影响更强。

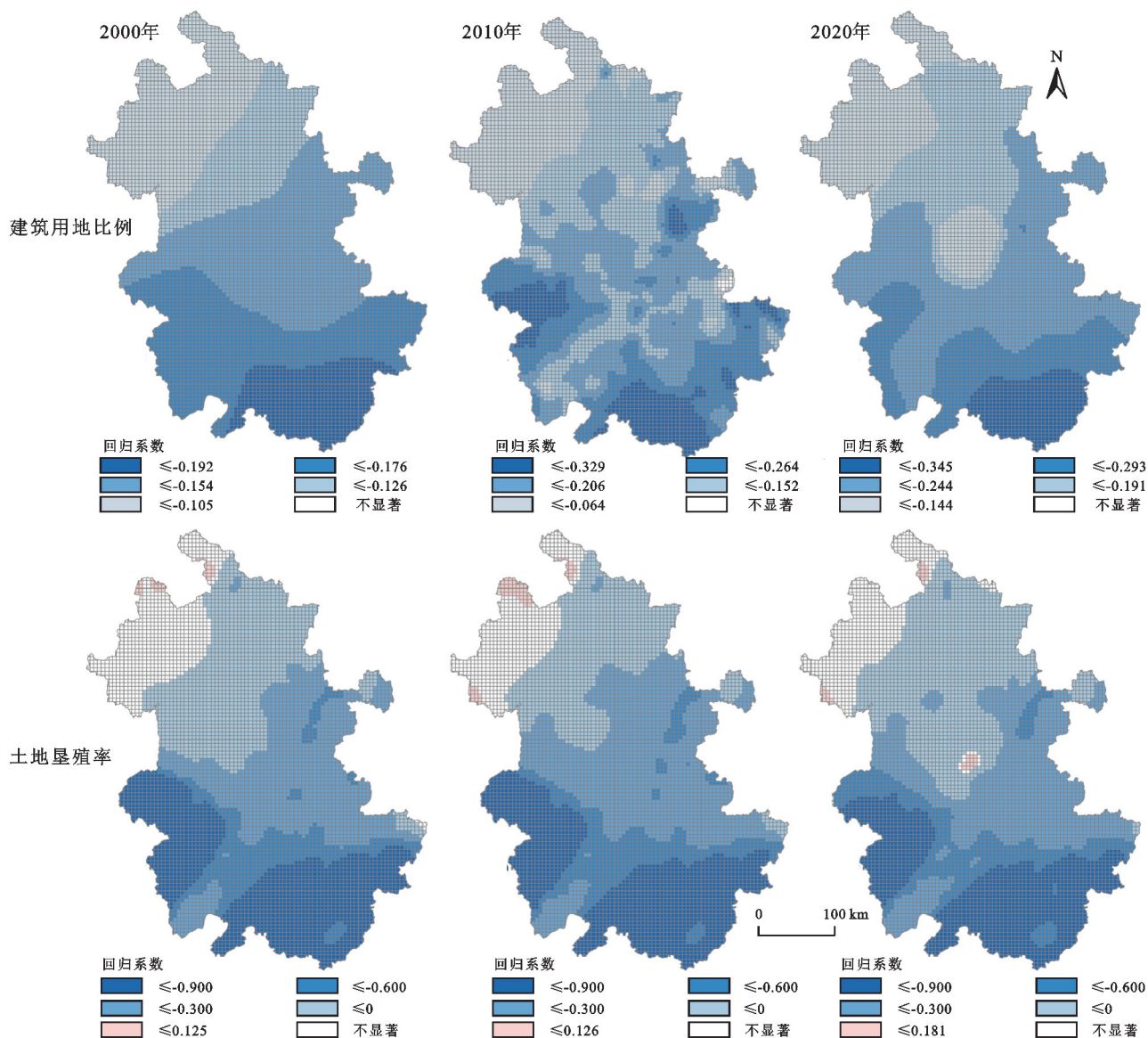


图 7 生境质量与建筑用地比例和土地垦殖率的回归系数

Fig. 7 MGWR regression results the proportion of building land and land reclamation rate

综上所述,像地形、气象因素等自然因子在短时间内很难发生变化,因此需要重点关注人类活动对社会经济产生的影响。以林地和草地为主的生境质量区域需加强对林地、草地的保护,加大对自然保护区的建设,限制城市蔓延的范围,建立城镇发展缓冲带,特别是皖西丘陵山地地带生境质量较好区边缘过渡至生境质量较差区的生境质量一般区在减少,使得该地区面临生境退化的风险增大,受到的威胁加重。以及城镇地区在社会经济快速发展的同时,政府也需加强对土地资源的合理利用,落实生态环境保护政策,合理规划城市建设用地,建立生态保育区,构建城市绿色发展空间,实现绿色高质量发展。

本文还存在一些不足有待进一步研究。采用土地利用类型这单一威胁源胁迫作用的简单累加进行生境质量估算具有一定的局限性。未来需进一步扩展威胁源的选择,采用多威胁源综合评估,例如暴雨、高温热浪等极端天气、水质恶化等威胁源的影响。对于驱动因子的选择,本文只选择了自然和社会经济因子,但随着城镇化的发展,生境破碎化日益严重,因此未来还需探讨景观格局与生境质量间的响应关系。

## 5 结论

(1) 2000—2020 年安徽省生境质量整体呈现下降趋势,下降率为 3.01%,生境质量较差区分布最广,

且各生境质量区呈现由高生境质量区域衰退至较低生境质量区域的态势,有生境退化风险。

(2) 生境质量的空间分布具有明显的空间异质性,呈现“南部和西部高,北部和中部低”的格局,且冷热点区域显著集聚。高生境质量区主要分布于皖南和皖西丘陵山地地区,以及湖泊河流附近,低生境质量区主要分布于以耕地和建筑用地为主的皖北和皖中地区。

(3) 基于 MGWR 模型分析表明,坡度、NDVI、建筑用地比例和土地垦殖率是影响安徽省生境质量空间分布的关键因子。坡度对生境质量具有正向效应,NDVI 对生境质量的影响以正向效应为主,且随时间变化呈现增强趋势;建筑用地比例和土地垦殖率对生境质量具有负向效应,且建筑用地比例和土地垦殖率分别随时间变化呈现增强和减弱趋势。

#### 参考文献(References):

- [1] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J].地理学报,2020,75(1):160-178.  
Zhang X R, Zhou J, Li M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(1):160-178.
- [2] Yang Y W, Tian Y C, Zhang Q, et al. Impact of current and future land use change on biodiversity in Nanliu River Basin, Beibu Gulf of South China[J]. Ecological Indicators, 2022,141:109093.
- [3] 夏楚瑜,国洪,赵晶,等.京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应[J].生态学报,2023,43(7):2756-2769.  
Xia C Y, Guo H, Zhao J, et al. Dynamic responses of ecosystem services to urbanization at multi-spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(7):2756-2769.
- [4] 周璟,王宏卫,谈波,等.开都河流域生态安全格局构建与生态修复分区识别[J].生态学报,2022,42(24):10127-10137.  
Zhou J, Wang H W, Tan B, et al. Construction of ecological security pattern and identification of ecological rehabilitation zones in Kaidu River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(24):10127-10137.
- [5] 王娟,张华兵,李玉凤,等.盐城黄海湿地丹顶鹤越冬生境质量评估与管理对策研究[J].湿地科学,2022,20(3):334-340.  
Wang J, Zhang H B, Li Y F, et al. Assessment on overwintering habitat quality of Red-crowned Cranes in Yellow Sea Wetlands in Yancheng and its management strategies[J]. Wetland Science, 2022,20(3):334-340.
- [6] 马月伟,潘健峰,蔡思青,等.生态系统服务社会价值与生态价值的权衡与协同关系:以普达措国家公园为例[J].地理科学,2022,42(7):1283-1294.  
Ma Y W, Pan J F, Cai S Q, et al. Trade-offs and synergies between social value and ecological value of ecosystem services: A case study of the Potatso National Park[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022,42(7):1283-1294.
- [7] 岳文泽,夏皓轩,吴桐,等.浙江省生境质量时空演变与生态红线评估[J].生态学报,2022,42(15):6406-6417.  
Yue W Z, Xia H X, Wu T, et al. Spatio-temporal evolution of habitat quality and ecological red line assessment in Zhejiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(15):6406-6417.
- [8] 刘春芳,王川,刘立程.三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制:以榆中县为例[J].地理研究,2018,37(2):419-432.  
Liu C F, Wang C, Liu L C. Spatio-temporal variation on habitat quality and its mechanism within the transitional area of the Three Natural Zones: A case study in Yuzhong county[J]. Geographical Research, 2018,37(2):419-432.
- [9] 陈慧敏,赵宇,付晓,等.西辽河上游生境质量时空演变特征与影响机制[J].生态学报,2023,43(3):948-961.  
Chen H M, Zhao Y, Fu X, et al. Characteristics of spatio-temporal evolution and influence mechanism of habitat quality in the upper reaches of the West Liaohe River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(3):948-961.
- [10] 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].生态学报,2023,42(5):1175-1185.  
Chen S, Jin Y X, Huang Y L. 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.
- [11] 路亚方,李红波.2000—2020 年基于土地利用变化的生境质量时空动态演变:以武汉城市圈为例[J].水土保持研究,2022,29(6):391-398.  
Lu Y F, Li H B. Temporal and spatial dynamic evolution of habitat quality based on land use change from 2000 to 2020-Taking Wuhan Metropolitan Region as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):391-398.
- [12] Yang D, Zhang P Y, Jiang L, et al. Spatial change and scale dependence of built-up land expansion and landscape pattern evolution: Case study of affected area of the lower Yellow River[J]. Ecological Indicators, 2022,141:109123.
- [13] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队.2021 年安徽统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2021.  
Anhui Provincial Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Anhui. Anhui Statistical Yearbook in 2021[M]. Beijing: China Statistics

- Press, 2021.
- [14] 叶文丽, 王银, 吴孔森, 等. 黄土高原农户生计转型及其生态效应: 以陕西省佳县为例[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2323-2335.
- Ye W L, Wang Y, Wu K S, et al. Farmer's livelihood transition and ecological effects on Loess Plateau: A case study of Jiaxian County, Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2323-2335.
- [15] 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 L M, Feng X H, Sun R F, et al. Spatial and temporal responses of habitat quality to urbanization: A case study of Changchun City, Jinlin Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1267-1277.
- [16] Yang Q Q, Zhang P, Qiu X C, et al. Spatial-temporal variations and trade-offs of ecosystem services in Anhui Province, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(1): 855.
- [17] 刘永婷, 杨钊, 徐光来, 等. 基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析: 以皖南国际旅游文化示范区为例[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5200-5210.
- Liu Y T, Yang Z, Xu G L, et al. Correlation between ecosystem services value and human activity intensity based on the four-quadrant model: A case study in the international tourism and culture demonstration area, the South Anhui Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(13): 5200-5210.
- [18] Fotheringham A S, Yang W, Kang W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(6): 1247-1265.
- [19] 张琦, 曹蔚宁, 延书宁. 旅游发展对城乡收入差距影响的空间异质性: 基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2022, 22(5): 112-123.
- Zhang Q, Cao W N, Yan S N. Spatial heterogeneity of the impact of tourism development on urban-rural income gap in China: Based on Multi-scale Geographically Weighted Regression Model(MGWR)[J]. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2022, 22(5): 112-123.
- [20] Hu J Y, Zhang J X, Li Y Q. Exploring the spatial and temporal driving mechanisms of landscape patterns on habitat quality in a city undergoing rapid urbanization based on GTWR and MGWR: The case of Nanjing, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109333.
- [21] Yang H H, Yu J, Xu W Z, et al. Long-time series ecological environment quality monitoring and cause analysis in the Dianchi Lake Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110084.
- [22] Yang Y J, Li H Y. Monitoring spatiotemporal characteristics of land-use carbon emissions and their driving mechanisms in the Yellow River Delta: A grid-scale analysis[J]. *Environmental Research*, 2022, 214(6): 114151.
- [23] 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 N, Chen H F, Feng C Y, 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.
- [24] 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 M Y, Yue W Z, Feng S R, 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.
- [25] 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 Y T, Yang Z, Xu G L, et al. Impacts of urbanization on habitat quality using MGWR models in Wanjiajiang City Belt[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(2): 280-290.
- [26] 陈永国, 刘维军, 荣月静, 等. 基于土地利用与植被覆盖度的大通北川河源区自然保护区生境质量评估[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 332-337, 393.
- Chen Y G, Liu W J, Rong Y J, et al. Assessment on habitat quality of Datong Beichuan River Source Area Nature Reserve based on land use and vegetation coverage[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 332-337, 393.
- [27] Zhou T Y, Liu H M, Gou P, et al. Conflict or Coordination? measuring the relationships between urbanization and vegetation cover in China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109993.
- [28] 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 Q Z, Hu X J, Wei B J, et al. Coupling relationship between green space and urban expansion in Changsha[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(11): 87-94.