

DOI: 10.20103/j.stxb.202307181532

汤良, 胡希军, 罗紫薇, 韦宝婧, 王烨梓, 张亚丽, 邵润钰, 陈存友. 生态脆弱性与城镇化水平时空耦合及其交互影响因素——以湖南省为例. 生态学报, 2024, 44(11): 4662-4677.

Tang L., Hu X. J., Luo Z. W., Wei B. J., Wang Y. Z., Zhang Y. L., Shao R. Y., Chen C. Y. Spatiotemporal coupling of ecological vulnerability and urbanization level and their interactive influencing factors: a case study of Hunan Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4662-4677.

生态脆弱性与城镇化水平时空耦合及其交互影响因素 ——以湖南省为例

汤 良^{1,3,4}, 胡希军^{1,3,4,*}, 罗紫薇⁵, 韦宝婧^{1,2,3,4}, 王烨梓^{1,3,4}, 张亚丽^{1,3,4}, 邵润钰^{1,3,4}, 陈存友^{1,3,4}

1 中南林业科技大学风景园林学院, 长沙 410004

2 自然资源部洞庭湖流域生态保护修复工程技术创新中心, 长沙 410007

3 湖南省自然保护地风景资源大数据工程技术研究中心, 长沙 410004

4 中南林业科技大学城乡景观生态研究所, 长沙 410004

5 西北农林科技大学风景园林艺术学院, 杨凌 712100

摘要: 协调生态建设与城镇化是实现区域可持续发展的保证, 对科学引导城镇化并实现高质量发展具有重大意义。为探究我国中部地区生态环境脆弱程度与城镇化水平整体进程之间的关系, 以湖南省为例, 各县区为评价单元, 基于生态敏感性-生态恢复力-生态压力度模型构建生态脆弱性评价指标体系, 通过人口-经济-社会-空间模型构建城镇化水平评价指标体系, 通过耦合协调度模型多维度测算湖南省 2000—2020 年生态脆弱性和城镇化水平的空间耦合关系, 并运用双变量空间自相关、时空地理加权回归模型探究其交互影响效应。结果表明: (1) 研究期间, 湖南省生态脆弱程度呈先加重后减轻的趋势, 以长株潭为核心重度脆弱区, 向南北方向扩散, 形成南北地区脆弱程度高、中西部生态脆弱程度低的格局; (2) 城镇化水平差异较大, 总体呈现上升的趋势, 高水平城镇化区域从 2000 年以各地级市行政中心向外发散的散点式布局, 到 2020 形成以长株潭为核心高值区, 东部整体较高, 西部偏低的空间分布格局; (3) 湖南省严重失调区县明显减少, 基本协调区县明显增加的趋势, 且城镇化水平是制约湖南省生态环境与城镇化均衡高质量发展的主要因素。 (4) 交互作用结果表明, 城镇化发展导致地区生态脆弱程度加深, 而地区生态状况又反向制约城镇化水平可持续、高质量发展。研究表明, 湖南省需着力推进生态环境建设和城镇化水平的健康发展, 缓解城镇化发展和生态环境的矛盾, 以期实现区域城镇化与生态协同发展。

关键词: 生态脆弱性; 城镇化水平; 耦合协调度模型; 交互影响因素; CRITIC 赋权法; 湖南省

Spatiotemporal coupling of ecological vulnerability and urbanization level and their interactive influencing factors: a case study of Hunan Province

TANG Liang^{1,3,4}, HU Xijun^{1,3,4,*}, LUO Ziwei⁵, WEI Baojing^{1,2,3,4}, WANG Yezi^{1,3,4}, ZHANG Yali^{1,3,4}, SHAO Runyu^{1,3,4}, CHEN Cunyou^{1,3,4}

1 College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Technology Innovation Center for Ecological Conservation and Restoration in Dongting Lake Basin, Ministry of Natural Resources, Changsha 410007, China

3 Hunan Big Data Engineering Technology Research Center of Natural Protected Areas Landscape Resources, Changsha 410004, China

4 Institute of Urban and Rural Landscape Ecology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

基金项目: 自然资源部洞庭湖流域生态保护修复工程技术创新中心开放课题基金 (C2023013); 国家林业和草原局重点学科 (林人发[2016]21号); 湖南省“双一流”培育学科 (湘教通[2018]469号); 广西南宁青秀山风景园林国家长期科研基地 (林科发[2021]96号)

收稿日期: 2023-07-18; **网络出版日期:** 2024-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 120795043@qq.com

5 College of Landscape Architecture and Art, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: The coordination of ecological construction and urbanization is a guarantee of sustainable regional development and is of great significance in guiding urbanization scientifically and achieving high-quality development. It holds significant importance in scientifically guiding urbanization and achieving high-quality development. To investigate the correlation between ecological vulnerability and urbanization process in central region of China, with a focus on Hunan Province, each county was assessed as the evaluation unit. An ecological vulnerability evaluation index system was developed using the ecological sensitivity-ecological resilience-ecological pressure model (SRP). Additionally, an urbanization level evaluation index system was constructed based on the population-economy-society-space model (PESS). The study investigated the spatial coupling relationship between ecological vulnerability and urbanization level in Hunan Province from 2000 to 2020 using the coupling coordination degree model (CCDM) for multidimensional assessment. Additionally, the study sought to investigate the interactive effects of these factors through the application of models such as bivariate spatial autocorrelation and geographically and temporally weighted regression (GTWR). We observed the following: (1) During the course of the study, it was observed that the ecological vulnerability in Hunan Province exhibited a trend of initially worsening and subsequently improving. The area around Changsha-Zhuzhou-Xiangtan was identified as a heavily vulnerable region, with the vulnerability spreading in a north-south direction. This resulted in a pattern where the northern and southern regions displayed high ecological vulnerability, while the central and western areas showed lower levels of ecological fragility. (2) The level of urbanization in Hunan Province varied significantly, and the general trend was increasing. The high-level urbanization areas had transitioned from a scattered layout emanating from the administrative centers of prefecture-level cities in 2000 to a high-value cluster with the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration as the core in 2020. The area exhibited an overall higher in the eastern part and lower in the western part distribution pattern. (3) There had been a noticeable decrease in severely imbalanced counties, with a clear increased trend towards a reduction in the number of counties experiencing significant imbalances in Hunan Province. Furthermore, the level of urbanization was identified as a primary factor constraining the high-quality, balanced development of the ecological environment and urbanization in Hunan Province. (4) The results of the interaction indicated that urbanization development led to an increased level of regional ecological vulnerability, while the ecological conditions in the region in turn constrained the sustainable and high-quality development of urbanization. Studies suggested that in Hunan Province, efforts should be focused on promoting the healthy development of ecological environment construction and urbanization level, alleviating the contradiction between urbanization development and ecological environment, with a view to realizing the synergistic development of regional urbanization and ecology.

Key Words: ecological vulnerability; urbanization level; coupled and coordination model; interaction factors; CRITIC weighting method; Hunan Province

2020年,我国脱贫攻坚战取得了全面胜利,经济快速发展促使城镇化进程不断加快^[1]。城镇化发展对经济结构调整、资源优化配置等方面有重要的积极作用,但在此过程中,建设用地的不断挤压周边生态用地,对植被覆盖产生显著影响,大气、土壤、水体污染等生态环境问题逐渐显现^[2],从而导致地区生态脆弱性程度加深^[3-4],一定程度上生态脆弱性缓解和城镇化进程形成相互制约的关系^[5-6],这是自然因素和人类短期经济行为共同作用的结果^[7]。因此,定量分析生态脆弱性与城镇化水平的耦合协调情况及交互作用关系,对优化区域可持续发展规划具有重大意义。

近年来,学者对区域城镇化发展与生态环境保护的关系做了大量研究^[8]。在研究尺度上,包括全国区域尺度^[9]、省域^[10]、县域^[11]、流域^[12]和典型生态区^[13]等,如韩燕等^[14]以甘肃省为对象,分析各地级市城镇化与生态环境耦合协调度的时空演变与影响因素。在研究框架上,生态脆弱性评价主要以“暴露度-敏感性-适应

力”(VSD)^[15]、“压力度-敏感度-恢复力”(SRP)^[16]等框架进行指标因子选取,如金丽娟等^[10]通过 SRP 模型对四川省生态脆弱性进行评价。而城镇化水平大多基于“人口-经济”^[17]、“人口-经济-空间-社会”^[18]、“经济-社会-生态-城乡协调”^[19]等体系进行评价,如尹上岗等^[20]从“人口-土地-经济-社会-生态”构建指标体系,探究长三角生态城镇化时空演化特征及驱动机制。在研究方法上,目前学者大多采用层次分析法(AHP)-熵权法^[21]、空间主成分分析^[22]等方法对各指标的贡献程度进行测算,熵权法更注重指标内部浮动影响而无法考虑指标之间的横向影响,主成分分析法解释指标含义带有模糊性^[23]。CRITIC 赋权法是熵权法的改进方法,其指标权重是原始数据中蕴含的信息流计算得到,考虑了指标间的冲突性与差异性,目前已被众多学者广泛运用,如武帅等^[24]运用 CRITIC 赋权法对京津冀地区开展生态脆弱性及生态安全评价。针对生态和城镇化关联程度的研究方法主要涉及耦合协调度^[25]、协同度^[23]等数理统计模型;对于生态环境与城镇化之间的相互作用关系,主要运用 GTWR^[2]、莫兰指数^[26]等方法进行探讨。在研究视角上,已有学者从生态系统服务^[27]、生态系统健康^[28]、生态环境质量^[29]和生态韧性^[19]等角度为切入点探究城镇化与生态的相互关系,如夏楚瑜等^[30]以京津冀地区为研究对象,分析城镇化与生态系统服务的变化及二者相关关系;郭力娜等^[31]运用耦合协调度、地理探测器对辽宁省城镇化与生态环境质量指数的耦合协调度及影响因子进行探讨。综上所述,已有研究从多方法、多视角对城镇化与生态环境进行分析,但从生态脆弱性的视角探讨城镇化与生态环境关系的研究较少,且缺少对城镇化进程与生态脆弱性之间交互作用的定量研究。

湖南省地处长江中下游,在长江经济带起到承前启后的重要作用。2000 年以来,湖南省城镇化发展逐步加快,由于不合理的开发利用土地资源等人为因素,局部地区生态脆弱性程度加剧,研究生态脆弱性与城镇化水平之间的关系,对协调生态与城镇化均衡发展有一定的必要性。在此背景下,以湖南省为研究区、各县区为研究单元,通过 AHP-CRITIC 赋权法构建生态脆弱性和城镇化水平测度体系,分别从各县区、区域经济圈和省域三个层面对两个评价系统的耦合关系开展深入研究,并探求二者交互作用机制,以期对湖南省生态环境与城镇化可持续发展提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖南省位于我国中南地区,东经 108°47′—114°15′,北纬 24°38′—30°08′之间(图 1)。全省土地面积 21.18×10⁴ km²,辖 14 个地州市、122 个县区,总体呈西高东低、南高北低、朝东北开口的不对称的马蹄形盆地,半高山、低山、丘陵、岗地、平原交错分布^[32]。截至 2020 年,全省生产总值达 41781.5 亿元,城镇化率 56.02%,在此过程中,城镇化水平提高一定程度上导致生态环境逐渐恶化,生态脆弱性程度也不断加深^[33]。

1.2 数据来源及处理

所需数据包括研究生态脆弱性的自然地理数据和研究城镇化水平的社会经济统计数据(表 1)。其中数据处理包括:(1)年均温、年降水:通过 ArcGIS 10.6 将逐月气温、降水数据 nc 格式读取,进行年度降水量合成和年均温计算;(2)植被覆盖度:基于 Landsat5 TM、Landsat8 OLI-TIRS 数据计算得到归一化植被指数(NDVI),采用像元二分模型^[34]估算植被覆盖度;(3)土壤侵蚀强度:基于修正后的土壤侵蚀模型 RUSLE^[35-36]计算获得;(4)生境质量指数^[37]:基于土地利用数据,通过 InVEST 3.12 模型中 Habitat Quality 模块计算获得;(5)土地利用程度^[38]:参考已有研究的分级标准,通过对土地利用进行赋值,将未利用地赋值为 1,林地、草地和水域赋值为 2,耕地赋值为 3,建设用地赋值为 4,进行采样计算,具体计算公式如下^[39]:

$$I_x = \sum_{i=1}^n A_i \times S_i / S \quad (1)$$

式中, I_x 表示第 x 个格网的土地利用程度综合指数; A_i 为第 i 级土地利用程度分级指数; S_i 为第 i 级土地利用面积; S 为该格网内土地总面积; n 为土地利用程度分级数。

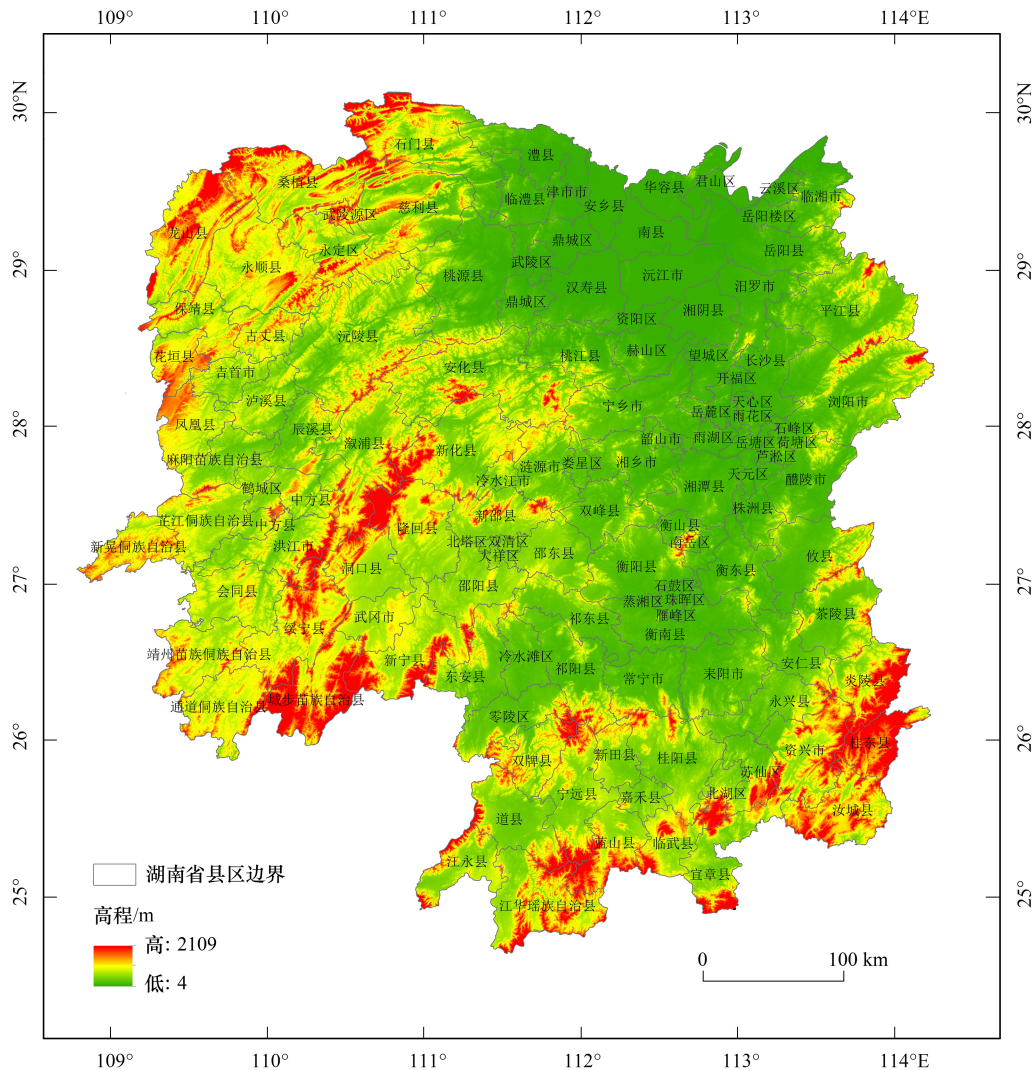


图1 湖南省行政区划与高程

Fig.1 Administrative division and elevation of Hunan Province

2 研究方法

2.1 指标选取与指标体系构建

2.1.1 生态脆弱性评价指标体系

生态环境脆弱性是相对的概念,是自然因素和人为因素共同作用的结果^[40]。遵循科学性、数据可获取性等原则,参考现有研究成果^[41—42],选取 SRP 模型作为准则层,选取高程、年均温等 12 个指标对湖南省生态脆弱性进行评价。参考《全国生态功能区(2015 年)》(修编版),根据体系构建反映区域最主要生态问题的原则,对湖南省生态敏感性评价主要侧重于水土流失敏感性,从地形、气候、地表三个层面选取 6 个指标进行表征,分别是高程和地形起伏度、年均温和年均降水量、土地利用强度和土壤侵蚀强度。生态恢复力反映系统面对外界环境变化和干扰自我恢复的能力^[43],从土壤、植被和水文三个层面选取 4 个指标进行表征。土壤选择有机碳含量,植被选择生境质量指数和植被覆盖度,生境质量是生态系统正常运作的基础,植被覆盖度量化植被的茂密程度;水文选择河网密度,密度越大的区域受地表水补给越多,地下水越容易汇集,供水条件和生态恢复能力越强^[44]。生态压力度反映系统受外界干扰压力的大小,从人口压力、经济压力两个层面选取人口密度和夜间灯光数据。

表 1 数据来源情况

Table 1 Data sources

数据类型 Data type	数据名称 Name of the data	数据来源 Source of data	精度/m Precision
自然地理数据 Physical geography data	高程数据	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)	30
	年均温、年降水	由逐月气温、降水数据合成,来源于国家气象科学数据共享服务平台 (http://data.cma.cn/)	1000
	植被覆盖度	由 Landsat5 TM、Landsat8 OLI-TIRS 数据计算得到归一化植被指数,再计算得到植被覆盖度,Landsat 遥感影像源于美国地质探测局 (https://earthexplorer.usgs.gov/)	30
	土壤侵蚀强度	土壤质地栅格数据源于国家地球科学数据中心 (http://www.geodata.cn/),通过 RUSLE 模型计算得到土壤侵蚀强度	500
	土地利用程度	通过土地利用数据赋值计算获得,土地利用数据源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)	30
	土壤有机碳含量	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)	90
	河网密度、路网密度	由河网、路网数据计算获得,数据源于 Open Map Street (https://www.openstreetmap.org)	1000
社会经济数据 Socioeconomic data	夜间灯光数据	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)	500
	人口、经济等数据	湖南省统计局网站 (http://tjj.hunan.gov.cn/hntj/index.html)	

基于 SPSS 分析软件,把每个指标因子作为因变量,其余指标因子为自变量进行回归分析,将方差膨胀因子(VIF)大于 10 的指标剔除,结果表明,地形起伏度和高程、土壤侵蚀强度和土地利用程度存在严重共线性,考虑到地形起伏度由高程数据计算得到、土壤侵蚀强度由多因子叠加计算获得,因此将地形起伏度、土壤侵蚀强度予以剔除,得到湖南省生态脆弱性评价体系(表 2)。

2.1.2 城镇化水平评价指标体系

表 2 湖南省生态脆弱性评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of ecological vulnerability and economic development level in Hunan Province

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标因子 Indicator factor
生态脆弱性 Ecological vulnerability	敏感性	高程
		年均温
		年均降水
		土地利用程度
		土壤有机碳含量
	恢复力	植被覆盖度
		河网密度
		生境质量
	压力度	人口密度
		夜间灯光数据

城镇化进程作为地区发展水平的参考和表征,是一个复杂的动态过程,伴随着人口、产业、社会、空间、生态等多维因素的变迁^[45]。结合湖南省城镇化发展实际情况,参考已有研究^[46–47],基于 PESS 模型选择城镇化率、人均 GDP 等 12 个指标因子构建城镇化评价体系,人口是城镇化发展的基础,选择人口密度、城镇人口密度和城镇化率进行表征;经济是城镇化发展的核心内容,选择人均 GDP、地区生产总值、规模以上工业营业收入和二三产业占比四个指标;社会城镇化选择社会消费品零售总额、中小学教育阶段师生比和每万人拥有医疗机构床位数;空间城镇化是城镇化发展的重要内容,土地利用结构的变化、交通设施发展水平能比较直观地反映城镇化建设水平,因此选择建设用地占比和路网密度进行表征。其中人口密度和城镇人口密度存在严重共线性,人口密度指标予以剔除,得到以下指标构建湖南省城镇化水平评价体系(表 3)。

2.2 综合评价指数计算

2.2.1 指标标准化

考虑在实际运算过程中,原始数据之间存在数量级差异,因此采用 Min-Max 标准化法对数据进行标准化

处理^[48]。

2.2.2 CRITIC 赋权法

CRITIC 赋权法具有很强的数理依据,计算过程包括标准差、相关系数、指标信息量和客观权重四个步骤,具体计算公式如下^[28]:

(1) 生态脆弱性和城镇化指标标准差计算:

$$E_j = \sqrt{\frac{1}{m} \times \sum_{i=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, m 为指标数量, X_{ij} 为原始数据指标标准化数值; E_j 为第 j 个指标的标准差。

(2) 相关系数计算:

$$R_{ij} = \text{cov}(X_i, X_j) / (E_i, E_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, R_{ij} 是第 i 个指标与第 j 个指标之间的相关系数, X_i, X_j 分别是标准化矩阵 X 的第 i, j 列。

(3) 指标信息量(S_j)计算:

$$S_j = E_j \sum_{i=1}^n 1 - R_{ij} \quad (4)$$

(4) 客观权重(W_i)计算:

$$W_i = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^n S_j} \quad (5)$$

2.2.3 主客观综合赋权法

本文客观赋权选用 CRITIC 赋权法,主观赋权选用 AHP 法。AHP 法主要根据专家知识和现有研究成果^[12]进行权重确定,弥补各指标横向比较的重要性,为使权重更客观、科学,本文将两种赋权法相结合,公式如下^[49]:

$$W_{ij} = \alpha W_i + (1 - \alpha) W_j \quad (6)$$

式中, W_{ij} 、 W_i 、 W_j 分别表示综合、主观和客观权重值,为保证计算结果客观性, α 取 0.5 进行计算。最终各指标综合权重如表 4 所示。

2.2.4 生态脆弱性指数

对标准化后的值和指标对应的权重计算得到生态脆弱性评价价值,以此反映生态脆弱程度及其空间布局特征,计算公式为^[50]:

$$\text{EVI} = \sum_{i=1}^m X_i^* \times W_i \quad (7)$$

式中, EVI 为生态脆弱性指数; X_i^* 为第 i 个评价指标标准化后的值; W_i 为生态脆弱性水平指标的综合权重; m 为指标数量。 EVI 值越大,表示该地区生态脆弱程度越高,反之表示生态脆弱程度越低。

2.2.5 城镇化水平指数

参照前人研究^[51],根据城镇化指标标准化的值与其相对应的权重进行计算,得到各县区的城镇化水平综合指数(P)及空间格局特征,计算公式为^[52]:

$$P = \sum_{i=1}^m X_c^* \times W_c \quad (8)$$

式中, P 为城镇化指数; X_c^* 为第 i 个评价指标标准化后的得分值; W_c 为综合权重; m 为指标数量。 P 值越大,表示城镇化水平越高,反之表示该地区城镇化水平越低。

表 3 湖南省城镇化水平评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of urbanization level in Hunan

Province			
目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标因子 Indicator factor	
城镇化水平 Urbanization level	人口城镇化	城镇化率	
		城镇人口密度	
		人均 GDP	
	经济城镇化	二三产业占比	
		地区生产总值	
		规模以上工业营业收入	
		社会城镇化	中小学教育阶段师生比
			每万人拥有医疗机构床位数
			社会消费品零售总额
	空间城镇化	路网密度	
		建设用地所占比重	

表 4 不同时期指标权重
Table 4 Index weights in different periods

子系统 Subsystem	指标 Index	各时期指标综合权重 Comprehensive weight of indicators in each period				
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
生态脆弱性 Ecological vulnerability	高程	0.1010	0.1162	0.1184	0.1023	0.1111
	年均温	0.1056	0.1142	0.1118	0.0956	0.1094
	年均降水	0.0828	0.0949	0.0935	0.0834	0.0942
	土地利用程度	0.1406	0.1544	0.1528	0.1583	0.1405
	土壤有机碳含量	0.0808	0.0694	0.0700	0.0760	0.0829
	植被覆盖度	0.0997	0.0825	0.0833	0.0956	0.0826
	河网密度	0.1043	0.0854	0.0921	0.0999	0.0926
	生境质量	0.0964	0.0871	0.0798	0.0878	0.0753
	人口密度	0.1070	0.1087	0.1057	0.1000	0.1075
	夜间灯光数据	0.0819	0.0870	0.0927	0.1012	0.1039
城镇化水平 Urbanization level	城镇化率	0.1547	0.1510	0.1413	0.1420	0.1284
	城镇人口密度	0.0996	0.1452	0.1427	0.1320	0.1123
	人均 GDP	0.0731	0.0651	0.0878	0.0946	0.0745
	二三产业占比	0.0867	0.0963	0.0714	0.0768	0.0929
	地区生产总值	0.0799	0.0757	0.0799	0.0625	0.0709
	规模以上工业营业收入	0.0932	0.0880	0.1047	0.0837	0.0819
	中小学教育阶段师生比	0.0769	0.0691	0.0648	0.0857	0.1141
	每万人拥有医疗机构床位数	0.0748	0.0673	0.0626	0.0603	0.0796
	社会消费品零售总额	0.0640	0.0624	0.0953	0.0889	0.0876
	路网密度	0.1227	0.1050	0.1143	0.0936	0.0776
	建设用所占比重	0.0745	0.0748	0.0754	0.0798	0.0802

2.3 耦合协调度模型

耦合是指两个或两个以上的要素相互作用和影响的过程^[53],反映系统从无序到有序的发展趋势。本文使用耦合协调度模型分析生态脆弱性和城镇化相互作用关系,该模型已广泛应用于区域生态环境与城镇化相互关系的研究中,计算公式为^[54]:

$$C = \left[\frac{EVI \times P}{(a \times EVI + b \times P)^n} \right]^{\frac{1}{n}} \tag{9}$$

$$T = a \times EVI + b \times P \tag{10}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{11}$$

式中,C 为耦合度,取值范围为[0,1],C 越大,表明耦合度越高;a、b 为待定系数,本文认为生态环境改善和城镇化水平提高同等重要,因此令 a=b=0.5^[55];n 为子系统数量,本次评价只有生态脆弱性(EVI)和城镇化水平(P),因此 n=2;D 为耦合协调度,D 越大,耦合协调度越高。借鉴已有研究成果^[56],将耦合协调度划分为严重失调、濒临失调、基本协调和极度协调 4 类。根据同步协调和滞后失调两大特点,结合两大评价体系(EVI、P)的系统得分,将耦合协调度分为 12 小类(表 5)。

2.4 双变量空间自相关模型

空间自相关包括全局空间自相关和局部空间自相关^[57]。全局空间自相关可以探究整个研究区域变量之间的相关性,而双变量全局空间自相关则可以揭示研究区域内不同变量之间的空间关联性和显著性,本文通过双变量 Moran's I 分析湖南省生态脆弱性与城镇化水平之间的空间关联性及交互作用关系,I 取值区间为[-1,1],I 小于 0、大于 0、等于 0 分别表示空间自相关为负、空间自相关为正、无空间自相关,Moran's I 绝对值

越高,表明空间自相关性越强。计算公式如下^[58]:

$$I_{ep} = \frac{n \sum_{e=1}^n n \sum_{p=1}^n W_{ep} \left(\frac{x_{es} - \bar{x}_e}{\sigma_e} \right) \left(\frac{x_{ps} - \bar{x}_p}{\sigma_p} \right)}{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ep}} \quad (12)$$

式中, I_{ep} 表示单位面积生态脆弱性和城镇化水平的双变量全局自相关系数, n 为研究单位数量; W_{ep} 为空间权重矩阵; x_{es} 、 x_{ps} 为第*i*个评价单元单位面积生态脆弱性指数和城镇化指数; σ_s 、 σ_p 为方差。

表 5 生态脆弱性与经济发展水平耦合协调度分类和判别标准

Table 5 Classification and criteria for coordination degree of coupling between ecological vulnerability and economic development level

耦合协调类型 Connection coordination type	耦合协调度数值 <i>D</i> The value of the coupling coordination	生态与城镇化水平发展判别依据 Basis for judging the development of ecology and urbanization level	耦合协调差异类型 Coupling coordination difference type
严重失调 Severe disorder	$0 \leq D < 0.4$	$EVI-P > 0.1$ $-0.1 \leq EVI-P \leq 0.1$ $EVI-P < -0.1$	失调衰退城镇化滞后型 严重失调同步滞后型 严重失调生态滞后型
濒临失调 On the verge of disorder	$0.4 \leq D < 0.6$	$EVI-P > 1$ $-0.1 \leq EVI-P \leq 1$ $EVI-P < 1$	濒临失调城镇化滞后型 濒临失调共损型 濒临失调生态滞后型
基本协调 Basic coordination	$0.6 \leq D < 0.8$	$EVI-P > 1$ $-0.1 \leq EVI-P \leq 1$ $EVI-P < 1$	基本协调城镇化滞后型 基本协调同步发展型 基本协调生态滞后型
极度协调 Extremely coordinated	$0.8 \leq D \leq 1$	$EVI-P > 1$ $-0.1 \leq EVI-P \leq 0.1$ $EVI-P < 1$	极度协调城镇化滞后型 极度协调同步发展型 极度协调生态滞后型

EVI: 为生态脆弱性指数; *P* 为城镇化指数

2.5 时空地理加权回归模型

GTWR 模型能很好地反映不同区域的时空异质性,优势在于更直观地显示每个样本区域内变量在任意时间节点的地理统计关系,从而有效地反映变量在时空上的演化关系。本文使用 GTWR 模型反映生态脆弱性与城镇化的交互影响在时空演化上的局部效应和时空特征,计算公式为^[59]:

$$y_i = \beta_o(u_i, v_i, t_i) + \sum_k (u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (13)$$

式中, $i(i=1,2,\dots,n)$ 表示样本点; (u_i, v_i, t_i) 是样本点*i*的时空坐标; u_i 和 v_i 是*i*点的经度和纬度数据,表征地区间的空间距离; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第*i*个样本点第*k*个自变量的回归系数; ε_i 为第*i*个样本点的随机误差。

3 结果与分析

3.1 生态脆弱性与城镇化水平时空变化特征

3.1.1 生态脆弱性时空变化特征

为更直观识别湖南省各期生态脆弱性变化,利用 ArcGIS 等间距分类法,分为微度(0—0.2)、轻度(0.2—0.4)、中度(0.4—0.6)、重度(0.6—0.8)和极度脆弱(0.8—1)五个等级。20年间各生态脆弱程度面积比例如图2所示。2000—2005年,各脆弱性程度无明显变化;2005—2010年,轻度、中度脆弱区面积减少,重度和极度脆弱区面积增加,说明此时环境恶化,且重度脆弱面积占比最高;2010—2020年,重度和极度脆弱区面积减少,2020年轻度脆弱面积占比最高,说明2010年以后湖南省生态环境得到改善。

湖南省生态脆弱性空间格局如图3所示,总体呈“东高西低、北高南低”的格局分布。2000—2005年,空间分布上无明显变化;2005—2010年,北部洞庭湖区、中部长株潭和南部湘南地区的衡阳及周边县区由重度

脆弱向极度脆弱转化;2010 年以后,由于生态补偿机制和政策引导,区域生态脆弱程度得到改善;到 2020 年,脆弱程度较低和低值区要分布于湘西片区及湘南的永州、郴州部分县区,该地区植被覆盖度高,是国家重点生态功能区,中度脆弱区主要分布在湘西片区的东部和环长株潭城市群周边县区,高值区域仍分布于长株潭中心区和环洞庭湖区的常德、岳阳中心城区,湘南地区的衡阳市也有零散分布。

3.1.2 城镇化水平时空变化特征

通过城镇化水平公式计算,得到湖南省各县区的城镇化水平综合指数,通过 ArcGIS 等间距分类将湖南省 122 个县区城镇化水平指数分为低水平(0—0.2)、较低水平(0.2—0.4)、中等水平(0.4—0.6)、较高水平(0.6—0.8)和高水平(0.8—1)五种类型,结果如图 4 所示。整体上,湖南省城镇化水平处于稳步增长的状态。2000—2005 年低水平城镇化县区向较低水平转化,2005—2015 年浮动不明显,但总体呈现向高水平趋势发展,中等水平城镇化县区增加较多;2015—2020 年受脱贫攻坚政策支持,大量城镇化低水平县区向较低和中等水平发展,城镇化高水平发展的县区个数明显增多,说明此时较多县区走向城镇化高质量发展阶段。

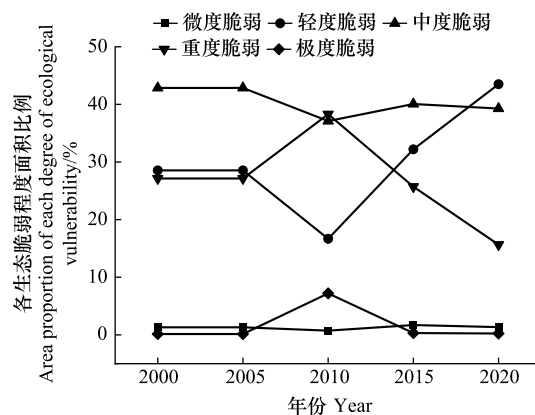


图 2 湖南省各生态脆弱性等级面积比例

Fig.2 The proportion of ecological vulnerability levels in Hunan Province

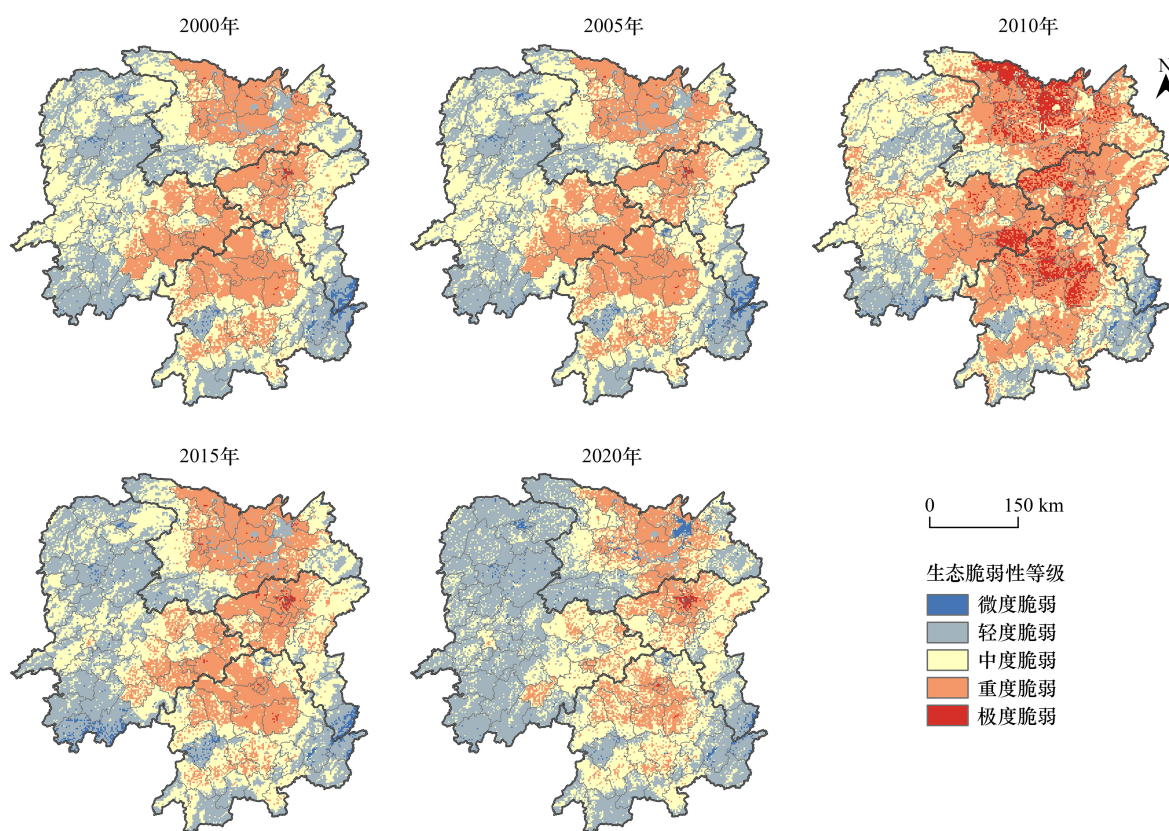


图 3 湖南省生态脆弱性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecological vulnerability in Hunan Province

如图 5 所示,湖南省城镇化水平差异较大,从 2000 年以各地级市行政中心为高值区的散点式布局,到 2020 年发展为以长株潭城市群为核心高值区,东部高,西部低的空间格局。长株潭城市群中心区域自 2000 年开始,城镇化都处于较高水平,为核心高值区;洞庭湖和湘南城市群城镇化发展次之,分别以岳阳、常德和衡阳主城区为中心向周边县区辐射,发展势头强劲,为发展快速区;湘西城市群除娄底受省会城市辐射,发展相对较好,其他大部分区域处于较低或低水平城镇化阶段,为发展滞后区。因地处武陵山片区,受地形、交通等因素限制,湘西地区自我发展能力有限,且缺少周边发展较好城市辐射,城镇化进程滞缓。

3.2 生态脆弱性与城镇化水平耦合协调度分析

为解析湖南省生态脆弱性与城镇化水平的关联特征,采用耦合协调度模型进行生态环境与城镇化水平的耦合协调度(D)分类和分析,结合湖南省生态环境状况与城镇化发展情况,共得出 8 类耦合协调类型(图 6)。2000—2020 年,严重失调类型县区基本消失、濒临失调区域持续减少,基本协调区域持续增多,整体耦合协调度从 2000 年 0.49 发展为 2020 年 0.57,表明生态环境与城镇化发展之间的冲突逐渐减小,但整体上,湖南省仍处于濒临失调的状态,20 年间濒临失调城镇化滞后县区数量一直超过 60%,说明城镇化水平是制约其协同发展的主要因素。

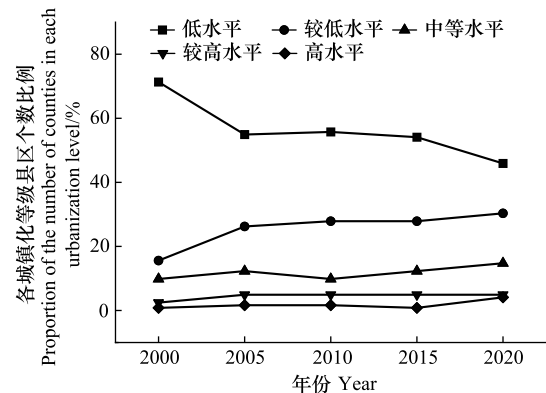


图 4 湖南省各城镇化等级县区个数比例

Fig.4 Proportion of counties and districts at each urbanization level in Hunan Province

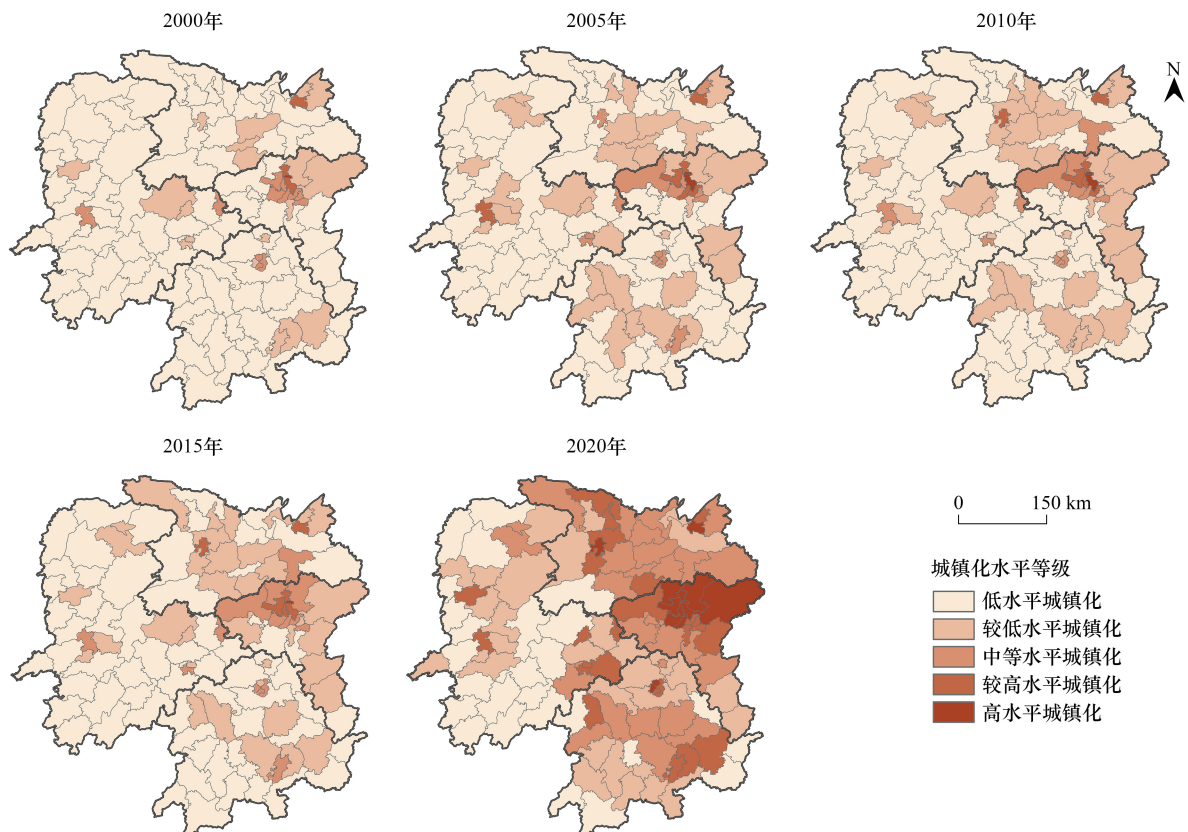


图 5 湖南省城镇化水平空间分布

Fig.5 Spatial distribution of urbanization level in Hunan Province

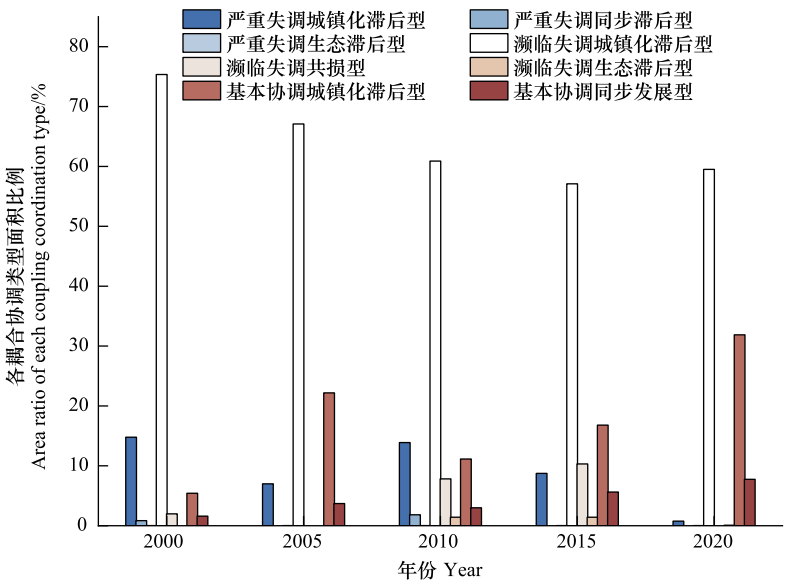


图 6 湖南省各耦合协调类型县区个数比例

Fig.6 Proportion of counties and districts of each coupling coordination type in Hunan Province

如图 7 所示,湖南省耦合协调度呈现以长株潭中心城区为高值区,向四周发散的空间格局,东部和北部耦合协调指数较高,西部、南部指数较低。同步滞后区主要分布于湘西和湘南边缘,该类县区生态本底优势不明

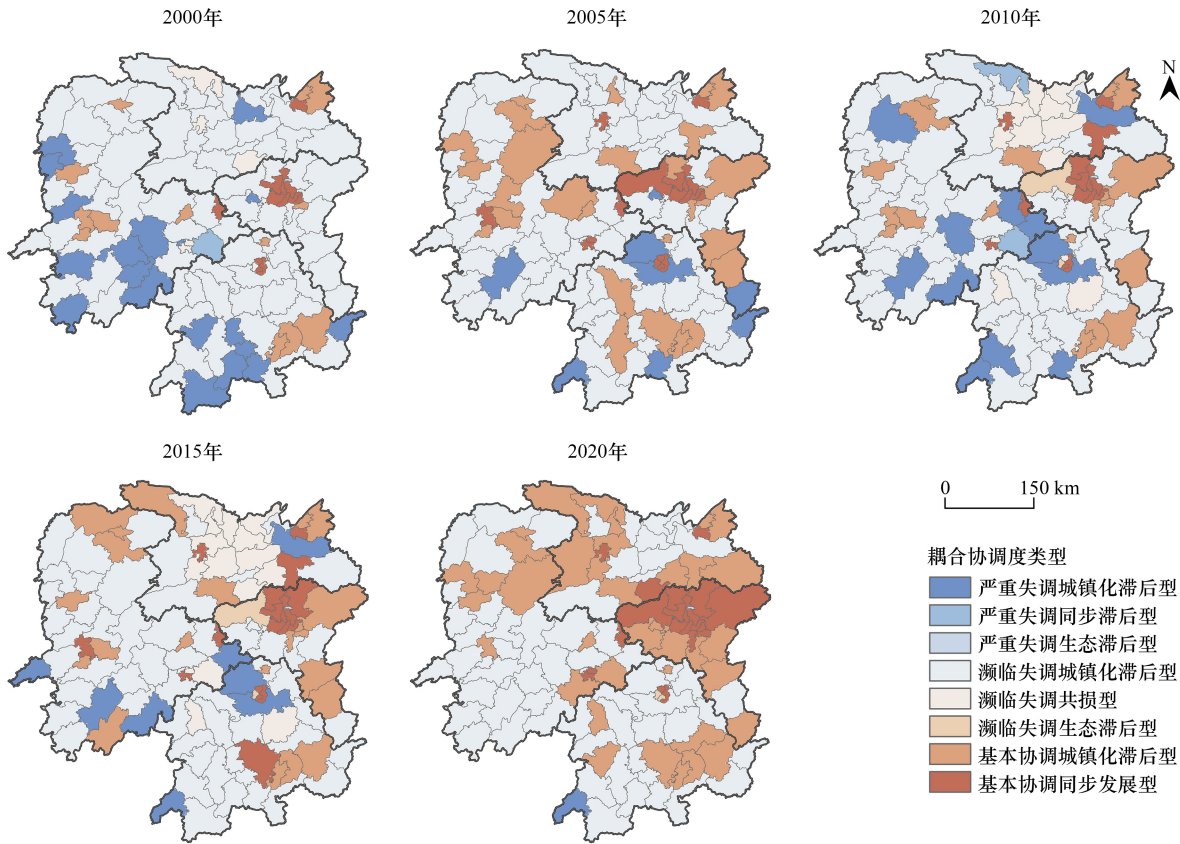


图 7 湖南省耦合协调度类型空间分布

Fig.7 Spatial distribution of coupling coordination types in Hunan Province

显,且城镇化始终处于相对落后状态,形成生态环境与城镇化相互制约的结果;经济滞后区 2000 年各地级市均有分布,随着经济水平的提高,2020 年以连片集中分布于湘西和湘南城市群,该片区生态基底保护较好,但经济发展相对较慢;生态脆弱区存在较少,脆弱程度较明显的是长沙部分县区,在发展过程中破坏了生态系统的完整性,导致生态脆弱程度严重;协调发展县区数量逐年增加,形成以“长株潭城市群为中心,环洞庭湖连片分布”的格局。

3.3 生态脆弱性与城镇化水平交互影响分析

通过 GeoDa 软件进行空间自相关分析,从整体水平探讨湖南省 2000—2020 年生态脆弱性和城镇化水平的空间关联特征与交互作用,研究结果(表 6)表明,湖南省生态脆弱性与城镇化水平空间相关程度较大,呈现先减少后增大的趋势。

表 6 湖南省 Moran's I 变量表

Table 6 Moran's index variable table of Hunan Province

研究区 Research area	统计变量 Statistical variables	不同时期生态脆弱性与城镇化关系统计变量 Statistical variables of the relationship between ecological vulnerability and urbanization in different periods				
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
湖南省 Hunan Province	Moran's I	0.4232	0.3606	0.3658	0.4618	0.5379
	显著性水平(P)	8.7983	7.7811	7.8500	9.5466	10.6779
	临界值(Z)	0.01 级别,相关性显著				

3.3.1 各因子作用强度分析

结合城镇化水平评价体系,从人口、经济、社会 and 空间四个维度对生态脆弱性进行双变量空间自相关分析,由图 8 知,20 年间城镇化进程对生态脆弱性的作用始终是正向的。人口、经济和社会因素前 10 年对生态脆弱性作用程度较大,后 10 年呈下降趋势;空间因素作用强度一直增加,且增加趋势十分明显,2005 年以后,空间城镇化对生态脆弱性的作用占主导地位,在人口增长、经济发展和社会保障等众多因素推动下,对生态系统脆弱程度的影响以空间扩张需求的形式表现,建设用地不断扩张,一定程度上破坏了生态平衡,造成生态脆弱性程度加剧。

结合生态脆弱性评价体系,从生态敏感性、适应力和压力度三个层面探讨对城镇化水平的影响程度(图 9)。生态敏感性指标对城镇化的影响程度不明显,始终在 -0.2 — 0.2 之间波动;生态适应力与城镇化发展关联性较强,且呈现明显的负相关,区域生态环境承载力的维持及生态修复需要资金的投入,同时还需对城镇

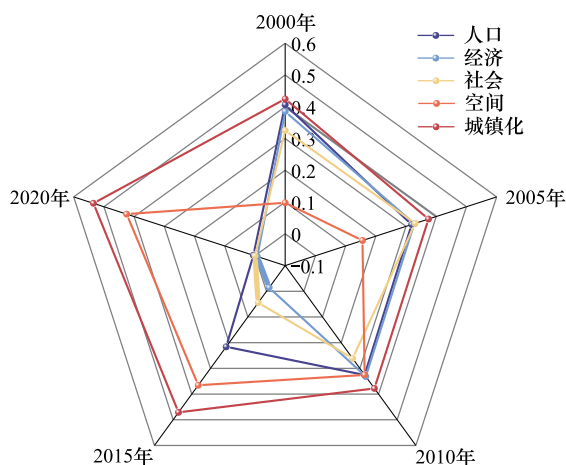


图 8 城镇化因子作用强度分析

Fig.8 Analysis of the intensity of urbanization factors

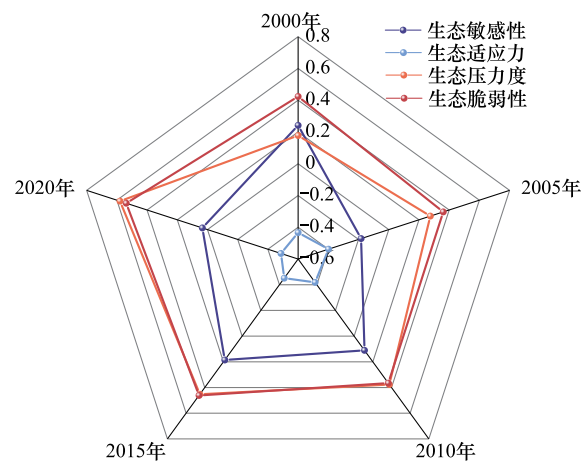


图 9 生态脆弱性因子作用强度分析

Fig.9 Analysis of the intensity of ecological vulnerability factors

发展用地扩张的控制,以上对城镇化发展起到一定程度的抑制作用。生态压力对城镇化水平始终保持着正相关的作用强度,且作用程度不断加强。生态压力主要体现在人口、经济等方面,人口不断集聚导致对建设用地的需求不断增大,飞速发展的城镇化给生态环境带来巨大压力。

3.3.2 生态脆弱性与城镇化水平作用强度空间异质性分析

通过 GTWR 模型分析生态脆弱性与城镇化交互作用的空间关系,城镇化发展对生态脆弱性的作用强度空间分布特征如图 10 所示。从空间分布来看,城镇化发展加剧生态脆弱性程度的地区主要集中于长株潭、洞庭湖城市群,该地区城镇化发展对当地生态环境造成较大压力;城镇化与生态环境良性发展的区域主要是湘西北部张家界、湘西自治州和湘南地区的永州、郴州南部,该区域以旅游业为主要依托,良好的生态资源禀赋带来的经济发展效益较高,但从数值上来看,城镇化与对生态环境的良性互动程度越来越低,说明该区域城镇化发展过程仍然对生态环境造成一定程度的破坏。

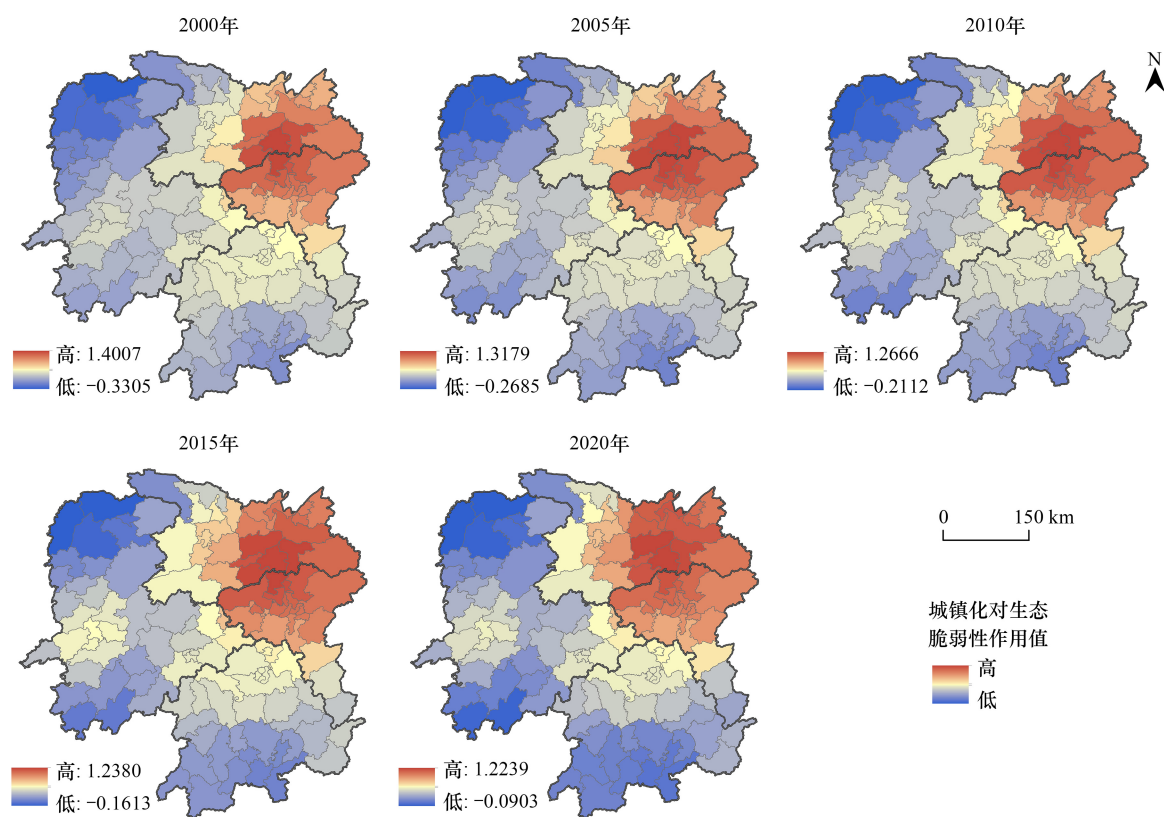


图 10 城镇化对生态脆弱性作用程度空间分布

Fig.10 Spatial distribution of the effect of urbanization on ecological vulnerability

生态脆弱性对城镇化的作用程度空间分布特征如图 11 所示,总体来看,研究区内大部分地区呈现明显的正向作用,说明整体上,湖南省生态脆弱程度缓解对城镇化进程起到一定的制约作用。正向作用高值区散点分布于湘中地区的新宁、安化和东安等县,东部地区作用程度普遍较高,且范围呈现增大的趋势,说明该区域城镇化进程对地区生态造成了不同程度的破坏,形成生态脆弱程度缓解会制约城镇化进程的循环;生态脆弱性对城镇化的负向作用主要是湘西北部,该区域生态环境仍保持较高的承载力,生态脆弱程度加剧会制约地区旅游业发展,从而对城镇化进程起到制约作用。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 城镇化发展和生态脆弱性之间的关系与交互作用具有多样性与复杂性,急速的城镇化发展给生态环

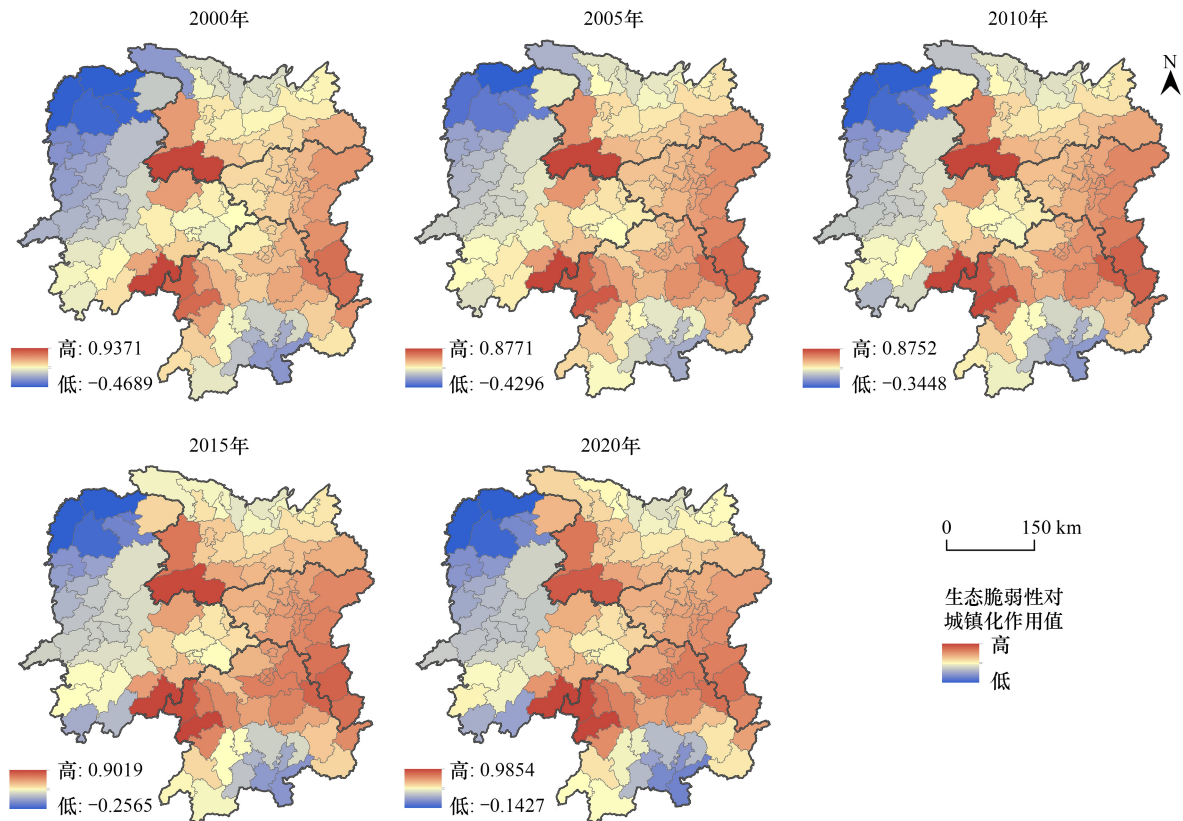


图 11 生态脆弱性对城镇化作用的作用程度空间分布特征

Fig.11 Spatial distribution characteristics of the role of ecological vulnerability on urbanization

境保护带来压力,而区域生态恶化又会反向制约城镇化可持续、高质量发展,这与前人研究结果相近^[2],以往研究主要从生态系统服务功能、生态质量等方面探讨与城镇化发展的正向互动效应,本文从区域城镇化发展对生态系统脆弱性的影响视角进行深入讨论,表明在发展的过程中,要加速推进城镇化水平由规模化发展到高质量发展的转型,同时明确生态保护红线,着力加强生态治理,确保生态系统的稳定性和完整性。

(2)在研究方法上,本文通过 AHP-CRITIC 赋权法建立生态脆弱性和城镇化水平评价体系,对指标因子进行多重共线性分析,目的是为更好的确定指标因子及其贡献程度,使评价体系更加客观合理;同时通过 Moran's I /GTWR 模型对生态脆弱性和城镇化及其子系统对两者的冲突和交互作用进行时空动态分析,未来在生态脆弱性评价方面可引入“压力-状态-响应-管理”模型 (PSRM),将政府政策和公众行为纳入评价体系,更加全面地反映生态脆弱性状况,同时还可从其他影响因素为切入点,进一步剖析湖南省城镇化与生态脆弱性时空耦合及交互作用的驱动机制。

(3)生态环境保护与城镇化协同发展是实现区域可持续发展的重要保证,基于本研究成果,对推动湖南省生态和城镇化水平高质量发展,提出以下建议:

①生态环境是决定湖南省可持续发展的关键,因此严守生态底线,严格限制城市建设用地的无序扩张,加速提升生态脆弱区的生态修复和资源环境监测,加速贯穿洞庭湖区、长株潭和湘南地区的纵向生态廊道和生态网络的构建,以提升高度脆弱区生态涵养功能。

②以长株潭城市群为核心增长极,充分带动其他三个板块协同发展。以长株潭为依托,湘南地区向南紧密对接粤港澳大湾区,洞庭湖板块向北全面融入长江经济带,湘西地区向西积极对接成渝经济圈,促进四大板块生态与城镇化水平协同发展,推进“三纵五横四网一中心”的新格局。

③城镇化发展滞后区应当在充分保证当地生态环境的前提下,建立“特色经济发展,生态优化”的双向内

生机制,利用区域优势提高城镇化水平;生态高度脆弱区需充分考虑生态环境保护的战略意义,加强生态治理,缓解人口、经济压力,通过完善生态机制来促进地区生态的恢复。

4.2 结论

城镇化快速发展的过程中,地区生态环境会受到一定程度的威胁。本文基于 AHP-CRITIC 赋权综合评价法、耦合协调度模型、双变量 Moran's I 和 GTWR 模型等多种数理模型,以县区为评价单元对湖南省的生态脆弱性与城镇化水平进行评价,并对其进行耦合协调关系、交互影响及空间异质性进行了分析,结果表明:

(1) 湖南省生态脆弱程度呈先加重后减缓的趋势,以长株潭城市群为重度脆弱核心区,向南北向扩散,形成南北部脆弱程度高,西部脆弱程度低的空间格局。从时间演化来看,东部长株潭核心区一直是重度脆弱区,南北部脆弱性呈现先增加后降低的趋势,西部地区生态状况一直较好;

(2) 湖南省城镇化水平差异较大,总体上,高水平城镇化区域从以各地级市行政中心向外发散的散点式布局,过渡到以岳阳、常德、衡阳等城市群中心区域为新的水平城镇化增长极,最后形成以长株潭城市群为核心高值区,整体东部较高,西部偏低的空间分布格局;

(3) 2000—2020 年,湖南省严重失调县区数量明显减少、基本协调县区数量明显增加,表明湖南省生态与城镇化的冲突一直在降低,但截至 2020 年,湖南省仍有超过 60% 濒临失调城镇化滞后型县区,说明城镇化发展是制衡生态与城镇化均衡发展的主要因素;

(4) 双变量 Moran's I 和 GTWR 模型表明,湖南省生态脆弱性与城镇化水平具有较强的相互作用。城镇化对生态脆弱性存在较强的正向作用,而生态脆弱程度缓解一定程度上会制约城镇化发展。人口增长、建设用地的扩张不同程度地加深了地区生态脆弱程度,而生态脆弱程度加剧会阻碍城镇化高质量发展,在双向制约的影响下城镇化可持续发展面临威胁。

参考文献 (References):

- [1] 洪名勇, 娄磊, 龚丽娟. 中国特色贫困治理: 制度基础与理论诠释. 山东大学学报: 哲学社会科学版, 2022(2): 23-37.
- [2] 梅予健, 贺清云, 欧阳晓, 王坤. 长株潭城市群城镇化水平与生态质量的冲突与交互作用. 生态学报, 2023, 43(11): 4527-4538.
- [3] 张学玲, 余文波, 蔡海生, 郭晓敏. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述. 生态学报, 2018, 38(16): 5970-5981.
- [4] 王贝贝, 丁明军, 管琪卉, 艾嘉会. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价. 生态学报, 2019, 39(15): 5460-5472.
- [5] 屈志强, 沈婷婷, 徐胜利, 刘洋, 韩国栋. 生态脆弱性评价概述. 草原与草业, 2020, 32(3): 1-4, 42.
- [6] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, Kupriyanov A. Eco-environmental quality assessment based on pressure-state-response framework by remote sensing and GIS. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021, 23: 100530.
- [7] He L, Shen J, Zhang Y. Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management. Journal of Environmental Management, 2018, 206: 1115-1125.
- [8] 宋永永, 薛东前, 马蓓蓓, 杨凯悦, 米文宝. 黄土高原城镇化过程及其生态环境响应格局. 经济地理, 2020, 40(6): 174-184.
- [9] 曹诗颂, 王艳慧, 段福洲, 赵文吉, 王志恒, 房娜. 中国贫困地区生态环境脆弱性与经济贫困的耦合关系——基于连片特困区 714 个贫困县的实证分析. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2614-2622.
- [10] 金丽娟, 许泉立. 基于 SRP 模型的四川省生态脆弱性评价. 生态科学, 2022, 41(2): 156-165.
- [11] 张霞, 周忠发, 朱昌丽, 马国璇, 陈全. 喀斯特山区生态脆弱性与经济贫困的耦合关系——以贵州省荔波县为例. 水土保持通报, 2020, 40(5): 227-233.
- [12] 王跃, 刘家福, 周林鹏, 任春颖, 张柏. 基于 AHP-SPCA 熵权模型的松花江流域生态脆弱性时空演变及预测. 水土保持通报, 2023, 43(2): 212-219, 360.
- [13] 朱翔, 王晖, 吴宜进, 卫思雨, 余洋. 基于 Google Earth Engine 的长江中游城市群城镇化与生态环境耦合协调研究. 长江流域资源与环境, 2022, 31(12): 2706-2717.
- [14] 韩燕, 张玉婷. 甘肃省城镇化与生态环境耦合协调度. 水土保持研究, 2021, 28(3): 256-263.
- [15] 李江南, 丑洁明, 赵卫星, 李莞梦, 徐源, 孙铭扬, 杨帆. 1991—2019 年中国农业生态系统旱涝脆弱性评估. 气候与环境研究, 2022, 27(1): 19-32.
- [16] Jiang B H, Chen W, Dai X A, Xu M, Liu L F, Sakai T, Li S L. Change of the spatial and temporal pattern of ecological vulnerability: a case study on Cheng-Yu urban agglomeration, Southwest China. Ecological Indicators, 2023, 149: 110161.
- [17] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 谢金燕, 苏坤. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [18] 吴佳琪, 程琳琳, 武宪雯. 山东省城镇化水平与资源环境承载力协调发展的时空分异. 济南大学学报: 自然科学版, 2023, 37(2): 137-145.
- [19] 杨亮洁, 张小鸿, 潘竞虎, 杨永春. 成渝城市群城镇化与生态环境耦合协调及交互影响. 应用生态学报, 2021, 32(3): 993-1004.

- [20] 尹上岗, 杨山, 李在军. 长三角地区生态城镇化空间格局及影响因素. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1494-1506.
- [21] 王昭, 刘建红, 李同昇, 阮征, 武凤奇. 秦巴特困区生态脆弱性与经济贫困的耦合关系——以陕西省山阳县为例. 生态学报, 2019, 39(11): 3908-3917.
- [22] 王鹏, 赵微, 柯新利. 基于 SRP 模型的潜江市生态脆弱性评价及时空演变. 水土保持研究, 2021, 28(5): 347-354.
- [23] 苟凯歌, 蒋辉, 刘兆阳. 2000—2017 年中国农村水资源贫困与经济贫困的耦合协调状态及其影响因素. 水土保持通报, 2021, 41(5): 255-263.
- [24] 武帅, 田冰, 顾世杰, 胡引翠. 基于 PSRM 模型的京津冀地区生态脆弱性时空演变. 环境科学, 2023, 44(10): 5630-5640.
- [25] Wang X L, Zhang S R, Zhao X, Shi S H, Xu L. Exploring the relationship between the eco-environmental quality and urbanization by utilizing sentinel and landsat data: a case study of the Yellow River Basin. Remote Sensing, 2023, 15(3): 743.
- [26] Ouyang X, Tang L S, Wei X, Li Y H. Spatial interaction between urbanization and ecosystem services in Chinese urban agglomerations. Land Use Policy, 2021, 109: 105587.
- [27] 张中浩, 聂甜甜, 高阳, 孙诗萌, 高峻. 长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究. 长江流域资源与环境, 2022, 31(5): 1086-1100.
- [28] 周玲燕, 李维杰, 王勇, 卞鸿雁, 王秋红, 刘岩, 袁贞贞. 重庆市城镇化与生态系统健康的时空耦合特征. 水土保持通报, 2023, 43(2): 397-408.
- [29] 黄莘绒, 管卫华, 陈明星, 胡昊宇. 长三角城市群城镇化与生态环境质量优化研究. 地理科学, 2021, 41(1): 64-73.
- [30] 夏楚瑜, 国洪, 赵晶, 薛飞, 王楚玥, 周珺, 孙彤, 李淞, 张念慈. 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. 生态学报, 2023, 43(7): 2756-2769.
- [31] 郭力娜, 王刚, 姜广辉, 赵艳霞, 訾丰娇, 叶林, 刘洪义. 2005—2019 年辽宁省城镇化与生态环境质量耦合协调时空分异及影响因子研究. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1123-1133.
- [32] 田一聪, 田明, 李鹏, 吴致蕾. 西藏自治区城镇化与生态系统服务协调发展研究. 地理科学进展, 2023, 42(10): 1947-1960.
- [33] 闫宇星, 杨园园, 王永生, 严建武. 近 40 年京津冀地区生境质量变化趋势与归因分析. 遥感技术与应用, 2023, 38(2): 251-263.
- [34] 吴昌广, 周志翔, 肖文发, 王鹏程, 汪涛, 黄子杰. 基于 MODIS NDVI 的三峡库区植被覆盖度动态监测. 林业科学, 2012, 48(1): 22-28.
- [35] 谢怡凡, 姚顺波, 丁振民, 侯孟阳, 邓元杰, 刘广全. 退耕还林和地理特征对土壤侵蚀的关联影响——以陕西省 107 个县区为例. 生态学报, 2022, 42(1): 301-312.
- [36] 陈峰, 李红波. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇南山区土壤侵蚀时空演变——以云南省元阳县为例. 应用生态学报, 2021, 32(2): 629-637.
- [37] Xu D, Yang F, Yu L, Zhou Y Y, Li H X, Ma J J, Huang J C, Wei J, Xu Y, Zhang C, Cheng J. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128948.
- [38] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. 自然资源学报, 1997, (2): 10-16.
- [39] 梁明, 聂拼, 陆胤昊, 孙晓娟. 淮南市土地利用程度变化过程的时空演化特征. 农业工程学报, 2019, 35(22): 99-106.
- [40] 王毅, 武江民, 苗含笑, 高燕. 甘肃省生态脆弱性与经济综合水平耦合协调度空间格局及影响因素. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 808-816.
- [41] 张学渊, 魏伟, 周亮, 郭泽星, 李振亚, 张静, 颀斌斌. 西北干旱区生态脆弱性时空演变分析. 生态学报, 2021, 41(12): 4707-4719.
- [42] 常溢华, 蔡海生. 基于 SRP 模型的多尺度生态脆弱性动态评价——以江西省鄱阳县为例. 江西农业大学学报, 2022, 44(1): 245-260.
- [43] 薛飞, 张念慈, 夏楚瑜, 张健, 王楚玥, 李淞, 周珺. 城市生态韧性水平空间评估及其驱动力——以北京市通州区为例. 生态学报, 2023, 43(16): 6810-6823.
- [44] 王熙, 李建松, 刘权毅, 张建新, 唐心悦. 基于 SRP 模型的新安江流域生态脆弱性评价. 水生态学杂志, 2024, 45(2): 1-9.
- [45] 梁龙武, 王振波, 方创琳, 孙湛. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局. 生态学报, 2019, 39(4): 1212-1225.
- [46] 王柯文, 马海涛. 天山北坡经济带城镇化与资源环境系统的关系研究进展——基于文献计量分析. 生态学报, 2023, 43(18): 7807-7819.
- [47] 刘润佳, 把多勋. 中国省会城市紧凑度与城镇化水平关系. 自然资源学报, 2020, 35(3): 586-600.
- [48] 罗紫薇, 胡希军, 汤佳, 韦宝婧. 基于熵值-TOPSIS 模型的湖南省水资源安全空间评价及障碍因子诊断. 水资源与水工程学报, 2022, 33(6): 35-45.
- [49] 陈星霖. 广西农业生态脆弱性评价及区划研究. 中国农业资源与区划, 2020, 41(3): 212-219.
- [50] 李芮芝, 胡希军, 杜心宇, 雷雨菁, 张伟. 基于 SRP 模型的南雄丹霞梧桐自然保护区生态脆弱性评价. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 152-160.
- [51] Kang P, Chen W P, Hou Y, Li Y Z. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Science of the Total Environment, 2018, 636: 1442-1454.
- [52] 李汝资, 黄晓玲, 刘耀彬. 2010—2020 年中国城镇化的时空分异及影响因素. 地理学报, 2023, 78(4): 777-791.
- [53] 周正柱, 王俊龙. 长江经济带城镇化与生态环境耦合协调关联性研究. 城市问题, 2020, (4): 21-32.
- [54] 裴潇, 袁帅, 罗森. 长江经济带绿色发展与数字经济时空耦合及障碍因子研究. 长江流域资源与环境, 2023, 32(10): 2045-2059.
- [55] 王子羿. 重庆市生态脆弱性与经济贫困关联性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [56] Tang P L, Huang J J, Zhou H, Fang C L, Zhan Y J, Huang W. Local and telecoupling coordination degree model of urbanization and the eco-environment based on RS and GIS: a case study in the Wuhan urban agglomeration. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103405.
- [57] 葛世帅, 曾刚, 杨阳, 胡浩. 黄河经济带生态文明建设与城市化耦合关系及空间特征研究. 自然资源学报, 2021, 36(1): 87-102.
- [58] Zhang Y L, Hu X J, Wei B J, Zhang X, Tang L, Chen C Y, Wang Y Z, Yang X J. Spatiotemporal exploration of ecosystem service value, landscape ecological risk, and their interactive relationship in Hunan Province, Central-South China, over the past 30 years. Ecological Indicators, 2023, 156: 111066.
- [59] 钱志权, 韩佳银. 长三角城市群新型城镇化与低碳发展耦合过程与机理. 长江流域资源与环境, 2023, 32(11): 2285-2297.