

DOI: 10.5846/stxb202202260448

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.

Mei Y J, He Q Y, Ouyang X, Wang K. Conflict and interaction between urbanization level and ecological quality in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4527-4538.

长株潭城市群城镇化水平与生态质量的冲突与交互作用

梅予健¹, 贺清云^{1,*}, 欧阳晓², 王 坤¹

¹ 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081

² 湖南财政经济学院湖南省经济地理研究所, 长沙 410205

摘要:城镇化的快速发展给生态质量提升带来挑战, 如何解决城镇化发展与生态质量提升之间的冲突是实现区域可持续发展的关键。通过构建城镇化与生态质量评价指标体系, 运用耦合协调度模型 (CCDM) 和时空地理加权回归模型 (GTWR) 揭示 2000—2020 年长株潭城市群城镇化与生态质量的冲突程度, 并对其交互作用的时空异质性进行测度。结果表明: (1) 研究期间, 长株潭城市群城镇化水平呈上升趋势, 表现出中心地区高于四周的特征; 生态质量呈现先降低后上升的趋势, 并表现出四周高中心低的特征。 (2) 长株潭城市群城镇化水平与生态质量之间的冲突程度逐渐降低, 经历了从城市化滞后到生态质量滞后的转变, 并在空间上表现出由中部高四周低向北高南低过渡的特征。 (3) 城镇化水平与生态质量之间的交互作用表现出明显的阶段性特征, 城镇化水平与生态质量的负向作用主要分布在中部发达地区, 而正向作用主要分布在经济欠发达的四周区域。其中, 人口和空间城镇化导致生态不断恶化, 而生态功能的减弱以及结构的破碎化制约了城镇化的发展。

关键词:城镇化水平; 生态质量; 冲突; 交互作用; 长株潭城市群

Conflict and interaction between urbanization level and ecological quality in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

MEI Yujian¹, HE Qingyun^{1,*}, OUYANG Xiao², WANG Kun¹

¹ School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

² Hunan Institute of Economic Geography, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China

Abstract: The rapid development of urbanization brings challenges to the improvement of ecological quality. Solving the conflict between urbanization development and ecological quality improvement is the key to realize regional sustainable development. By constructing the evaluation index system of urbanization and ecological quality, this paper uses the coupling coordination degree model (CCDM) and geographically and temporally weighted regression model (GTWR) to reveal the degree of conflict and measure the spatio-temporal heterogeneity of the interaction between urbanization and ecological quality in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration from 2000 to 2020. The results showed as follows: (1) During the study period, the urbanization level of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration presented an upward trend, showing the characteristics that the central region was higher than the surrounding areas. The ecological quality indicated a trend of decreasing first and then increasing, and showed the characteristics of high in the surrounding area and low in the center. (2) The conflict degree between urbanization level and ecological quality of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration was gradually reduced, which had experienced the transformation from urbanization lag to

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (18ZDA040)

收稿日期: 2022-02-26; 网络出版日期: 2023-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 763540137@qq.com

ecological quality lag, and showed the characteristics of transition from high in the center and low in the surrounding area to low in the north and high in the south. (3) The interaction between urbanization level and ecological quality showed obvious stage characteristics. The negative effect of urbanization level and ecological quality was mainly distributed in the central developed areas, and the positive effect was mainly distributed in the surrounding areas of underdeveloped economy. Among them, the urbanization of population and space aggravated the deterioration of the natural ecosystem, while the reduction of ecological function and the fragmentation of structure also restricted the development of urbanization.

Key Words: urbanization level; ecological quality; conflict; interaction; Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

改革开放以来,中国经济发展迅速。2010年,中国国内生产总值(GDP)超过日本,成为世界第二大经济体^[1]。经济的快速发展推进了城镇化水平的显著提升,我国城镇化率从1978年的17.92%提高到2020年的63.89%^[2]。城镇化水平的不断提升一方面反映出我国城市进入高速发展阶段,对人口集聚、产业结构转型、基础设施完善发挥积极作用^[3];另一方面,建设用地的无序扩张,能源的过度消耗和资源的无节制开采,导致植被覆盖率降低^[4]、碳排放^[5]、空气污染^[6-7]、生态系统退化^[8]等一系列环境污染和生态问题,破坏了城镇与周边环境的生态平衡,给资源环境承载力带来巨大挑战。因此,研究城镇化发展与生态质量的关系,并探讨相互作用和演化规律,对于推进区域可持续发展具有重大意义。

健康的生态系统为城镇化发展提供产品和服务,而高质量的城镇化也为生态质量提升提供资金保障和技术支持^[9-10]。近年来,许多学者关注城镇化与生态质量的关系,并做出大量研究。在研究视角方面,城镇化水平大多是基于人口、经济、空间和社会城镇化水平进行评价^[11-12],而生态质量大多基于土地覆被变化或构建环境污染指标进行评价^[13-14];研究方法上,相关学者主要利用耦合协调度^[15]、协同度^[16]、脉冲响应^[17]等数理统计模型或相关性分析^[18]、回归分析^[19]等空间计量模型探究城镇化水平与生态质量之间的关系,发现城镇化与生态质量之间存在负相关^[20]、正相关^[21]及阶段性影响^[22]等多种关系;研究尺度上,不同学者从国家^[23]、省^[24]、市县^[25-26]等不同尺度对城镇化水平与生态质量的关系进行研究。这些实证研究为进一步定性和定量研究城镇化与生态质量的关系做出巨大贡献。生态质量是指在人类活动的干扰下,生态系统保持其结构和功能完整性,保障生态系统服务可持续供给的能力^[27]。但以往研究中使用的生态环境指标与人为因素直接或间接相关,很少有研究关注城镇化发展与生态系统组成部分即结构、功能或服务之间的关系,无法反映生态系统的本质,这不利于清晰探索城镇化水平与生态质量的冲突程度。同时,现有的研究大多只探讨了城镇化与生态质量单向或单变量联系,缺乏对双向作用的研究,并且很少考虑到城镇化与生态质量交互作用的时空异质性。

长株潭城市群是长江中游城市群的重要组成部分,具有极为重要的战略地位。本研究结合耦合协调模型(CCDM)和时空地理回权回归模型(GTWR)模型,对2000—2020年长株潭城市群城镇化与生态质量之间的冲突程度和交互作用进行了测度,旨在解决以下问题:(1)量化长株潭城市群城镇化与生态质量的综合发展水平;(2)分析城镇化与生态质量的冲突程度;(3)揭示城镇化与生态质量交互作用的时空异质性。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

长株潭城市群位于中国湖南省中东部,包括长沙、株洲、湘潭三市,是湖南省经济发展的核心增长极,也是承接东部地区产业转移,推动中部地区崛起,带动西部地区产业发展的重要引擎。本文参照相关规划和研究结果,选取长株潭都市区作为研究样本区(图1),其中包括长沙市岳麓区、芙蓉区、天心区、开福区、雨花区、望城区和长沙县;株洲市天元区、荷塘区、芦淞区、石峰区和渌口区;湘潭市岳塘区、雨湖区、湘潭县^[28-29]。长株潭都市区的行政区划面积约为8629 km²,人口约为1575.08万人,已基本形成一小时通勤圈的城镇空间形态,一体化程度较高。湖南省“十四五”规划指出加快推进长株潭一体化发展,建设长株潭现代化都市圈。

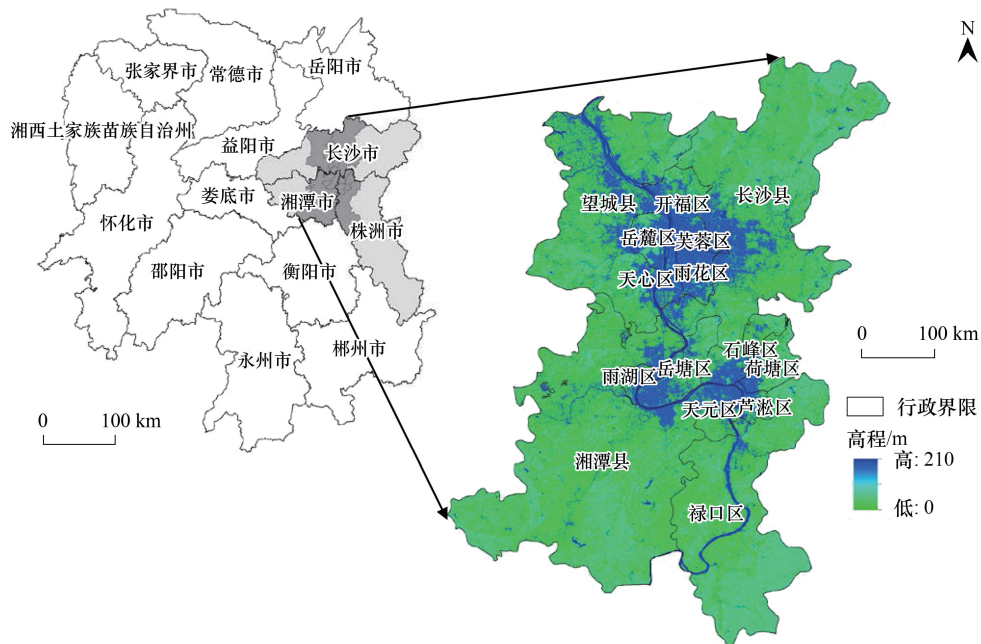


图1 研究区域
Fig.1 Study area

1.2 数据来源

城镇化水平指标数据均来自《湖南省统计年鉴》以及长沙市、株洲市、湘潭市各市的统计年鉴。针对个别数据缺失情况,本文采用线性插值法进行补充完善。2000—2020 年土地利用数据(30 m×30 m)、降水数据以及归一化植被指数来自中国资源与环境科学数据中心;数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云平台;土壤数据(1 km×1 km)来自世界和谐土壤数据库;PM_{2.5} 数据来自加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组。

2 研究方法

2.1 综合评价指标构建

科学构建指标体系是分析城镇化与生态质量互动关系的前提。本文通过参考相关研究的评价指标体系^[30—31],并结合研究区的实际情况,按照数据的可得性以及研究的科学性原则,对指标进行筛选和测量,构建了评价指标体系(表1)。在城镇化水平测度方面,构建了包括人口、经济、社会、空间四个维度共9个指标的城镇化水平评价体系。其中,人口是城镇化发展的前提和基础,经济高质量发展是城镇化的目标,社会服务推动居民生活品质的提升,而空间城镇化是城镇化过程中基础设施建设的体现。

生态系统为人类生存和发展提供产品和服务,本文从生态系统结构、功能以及压力三个维度出发,选取8个指标对生态质量进行评价。

(1) 生态结构体现了生态系统各组分的稳定性和复杂性,是发挥生态服务功能的基础。利用生态空间占比和景观格局指数即景观连接度和景观异质性衡量生态结构。景观连接度包括整个景观的连接度和重要生态斑块如林地、草地和水域的连接度。其中,整个景观的连接度用景观破碎化指数(FN_1)和景观蔓延度指数(CONT)表示,重要生态斑块的连接度利用破碎化指数(FN)和凝聚力指数(COHE)表示。景观异质性采用香农多样性指数(SHDI)和平均斑块分维指数(MPFD)表征。利用 Fragstats 4.2 软件对景观格局进行分析,得到上述各时期景观格局指数(EO),参考相关文献^[32],将其权重赋值。具体公式如下:

$$EO = (0.25 \times FN_1 + 0.1 \times CONT) + (0.07 \times FN_2 + 0.01 \times COHE_1 + 0.07 \times FN_3 + 0.01 \times COHE_2 + 0.07 \times FN_4 + 0.01 \times COHE_3) + (0.25 \times SHDI + 0.1 \times MPFD) \quad (1)$$

式中, EO 为生态空间组织, FN_2 、 FN_3 、 FN_4 和 $COHE_1$ 、 $COHE_2$ 、 $COHE_3$ 分别是林地、草地、水域的破碎化指数和凝聚力指数。

表 1 综合评价指标构建

Table 1 Construction of comprehensive evaluation index

系统 Systems	维度 Dimensions	指标 Indicators	单位 Units	属性 Attributes
城镇化水平 Level of urbanization	人口	人口密度	人/km ²	+
		城市人口比例	%	+
	经济	人均国内生产总值(GDP)	元	+
		第二、三产业占 GDP 比重	%	+
		固定资产投资	万元	+
		每万人拥有医生数	人	+
	社会	每万人拥有教职工数	人	+
		建设用地所占比重	%	+
	空间	路网密度	km/km ²	+
		生态空间所占比重	%	+
生态质量 Ecological quality	结构	生态空间组织	/	+
		生境质量	/	+
	功能	固碳量	t/hm ²	+
		文化服务	/	+
		土壤侵蚀度	t km ⁻² a ⁻²	-
		PM2.5	μg/m ³	-
	压力	人为干扰度	/	-

2) 生态功能代表生态系统为人类提供产品和服务的能力, 本文从生境质量、固碳量、文化服务三个方面对其量化。其中, 生境质量是生态环境为生物生存繁衍提供适宜条件的能力, 也是维持生物多样性、提升人类福祉的关键。利用 InVEST 模型, 结合研究区实际情况, 选取耕地、建设用地两类威胁源, 结合相关文献^[33], 设定不同胁迫因子的权重、最大胁迫距离及各类土地对不同胁迫因子的敏感程度。计算公式如下:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \tag{2}$$

式中, D_{xj} 是 j 栅格的生境退化度, R 是胁迫因子, W_r 是胁迫因子的权重, S_{jr} 为土地类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性, Y_r 为胁迫因子栅格个数; r_y 为威胁因子值, i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫因子值对土地栅格 x 的胁迫程度, β_x 是栅格 x 的可达性。

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K_z} \right) \tag{3}$$

式中, Q_{xj} 为土地类型 j 中栅格 x 的生境质量, H_j 为土地类型 j 的生境适宜度, K_z 为半饱和系数。

固碳量是反映生态质量的重要指标之一。提高植被固碳能力可以有效调节全球气候, 推进国家碳达峰和碳中和的目标实现。本文利用 InVEST 模型进行固碳量估算, 由于枯枝落叶等死亡有机质碳储量数据缺失, 因此综合考虑地上、地下、土壤三个碳库。计算公式如下:

$$C_T = C_{above} + C_{below} + C_{soil} \tag{4}$$

式中: C_T 表示总碳储量; C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 分别表示地上、地下、土壤有机碳库储量。

文化服务, 如提供娱乐场所或与绿色空间进行身体或心理互动等, 是人类通过生态空间获取认知发展、娱乐休憩以及审美体验等非物质服务。鉴于数据的可得性, 文化服务功能是参照谢高地等专家的研究结果确定的^[34]。

3) 生态压力体现了在人为干预的情况下生态系统面临的威胁, 本文选取 PM2.5、人为干扰指数以及土壤侵蚀三个指标评估。其中人为干扰指数通过查阅相关文献^[35], 并将不同土地利用类型的人为干扰程度进行

赋值得出。土壤侵蚀度通过 RUSLE 模型得到。公式如下所示:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (5)$$

式中, A 为土壤侵蚀模数; R 是降水因子; K 是土壤可蚀性因子; LS 分别为坡度和坡长因子; C 是植被覆盖与管理因子, P 是水土保持因子。上述各因子的计算公式均参考相关文献^[36]。

2.2 耦合协调度模型

分别对城镇化水平和生态质量两个系统进行综合评价,并利用耦合协调度模型分析城镇化水平与生态质量的协调程度。运用熵值法评价城镇化水平和生态质量两个系统的综合指标,由于各个指标的属性不同,首先需要对指标数据进行无量纲化处理。公式如下:

$$\text{正向指标:} \quad x_{ij}^+ = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (6)$$

$$\text{负向指标:} \quad x_{ij}^- = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (7)$$

其中, x_{ij}^+ 、 x_{ij}^- 和 x_{ij} 分别是第 i 年正向指标 j 和负向指标 j 的标准化值和实际值。接着,计算各指标比重。公式如下:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (8)$$

计算各指标的熵值 e_j 和权重 W_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \times \sum_{i=1}^n p_{ij} \times \ln(p_{ij}) \quad (9)$$

$$W_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (10)$$

得到城镇化子系统和生态环境子系统的综合得分。

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^+ (x_{ij}^-) \times W_j \quad (11)$$

然后,计算城镇化与生态质量的协调程度。

$$C_{it} = \left[\frac{S_u \times S_e}{\left(\frac{S_u + S_e}{2} \right)^2} \right]^2 \quad (12)$$

式中, C_{it} 是城镇化与生态质量的协调程度, S_u 、 S_e 分别是城镇化水平和生态质量两个子系统的综合得分。

最后计算城镇化水平与生态质量的耦合协调程度。

$$D_{it} = \sqrt{C_{it} \times (\alpha S_u + \beta S_e)} \quad (13)$$

在公式中, D_{it} 表示城镇化水平与生态质量的耦合协调程度。 α 和 β 都是待确定的两个指标的权重。考虑到生态环境在我国政策中的重要作用,本文选择了等权重,即 $\alpha = \beta = 0.5$ 。本文将研究区域的耦合协调程度分为高度协调区、中等协调区、基本协调区、中等冲突区、严重冲突区(表 2)。

2.3 GTWR 模型

GTWR 模型在反映不同区域的影响因子相互作用的时空异质性方面具有明显的优势,可以更直观地显示任意时间节点各样本区域变量的地理统计关系^[37]。具体公式如下:

$$y_{it} = \alpha_0(m_i, n_i, s_i) + \sum_{i=1}^k \alpha_i(m_i, n_i, s_i) x_{it} + \varphi_{it} \quad (14)$$

式中: y_{it} 为 t 时期 i 区城镇化水平综合指数(生态质量综合指数), x_{it} 为 t 期 i 区的生态质量综合指数(城镇化水平综合指数), m_i, n_i, s_i 是 i 区的地理位置, φ_{it} 为 t 期 i 区的随机因子。

表 2 耦合协调度分类标准

Table 2 Classification criteria of coupling coordination degree

等级 Levels	分类 Classifications	功能 Functions	类型 Types	等级 Levels	分类 Classifications	功能 Functions	类型 Types
$0.8 < D_{ii} \leq 1$	高度协调区	$S_u < S_e$	经济滞后	$0.2 < D_{ii} \leq 0.4$	中等冲突区	$S_u < S_e$	经济滞后
		$S_u \approx S_e$	经济生态平衡			$S_u \approx S_e$	经济生态平衡
		$S_u > S_e$	生态风险			$S_u > S_e$	生态风险
$0.6 < D_{ii} \leq 0.8$	中等协调区	$S_u < S_e$	经济滞后	$0 < D_{ii} \leq 0.2$	严重冲突区	$S_u < S_e$	经济滞后
		$S_u \approx S_e$	经济生态平衡			$S_u \approx S_e$	经济生态平衡
		$S_u > S_e$	生态风险			$S_u > S_e$	生态风险
$0.4 < D_{ii} \leq 0.6$	基本协调区	$S_u < S_e$	经济滞后				
		$S_u \approx S_e$	经济生态平衡				
		$S_u > S_e$	生态风险				

D_{ii} 为城镇化水平与生态质量的耦合协调程度; S_u 、 S_e 分别是城镇化水平和生态质量的综合得分

3 研究结果

3.1 长株潭城市群综合发展指数

在城镇化发展水平方面(图2),长株潭城市群城镇化综合水平整体上呈逐步上升趋势,从2000年城镇化综合水平仅有0.146到2020年城镇化综合水平达到0.448。城镇化主要驱动因素由人口、空间等规模扩张转变为经济、社会等质量提升。从空间上看,本文根据城镇化发展基础和发展速度将研究区域城镇化水平分为四类。第一类是发展带动区,包括芙蓉区、岳麓区、雨花区、天心区和雨湖区。这些区域发展基础较好,并在发展过程中享受各种政策利好,城镇化发展速度较快,带动着长株潭城市群的发展;第二类是快速发展区,包括开福区、望城区、长沙县、芦淞区和天元区。这些区域的城镇化基础处于一般或中下水平,但受空间外溢性等因素影响,城镇化进程加快。第三类是稳定发展区,主要包括石峰区、岳塘区、荷塘区,这些区域城镇化基础一般,在发展速度上保持稳步发展,因此在研究期前后城镇化水平始终保持中等水平。第四类是滞后发展区,主要包括湘潭县、浏口区,这两个区域城镇化基础较差,自我发展能力有限,且距市中心较远,发展机遇较少,发展速度较慢。

在生态质量方面(图2),长株潭城市群生态质量整体上波动较大,而且空间差异明显。从时序上看,生态质量从2000年呈下降趋势,到2010年达到最低点0.51,之后受生态政策影响又逐渐回升。从空间上看,望城

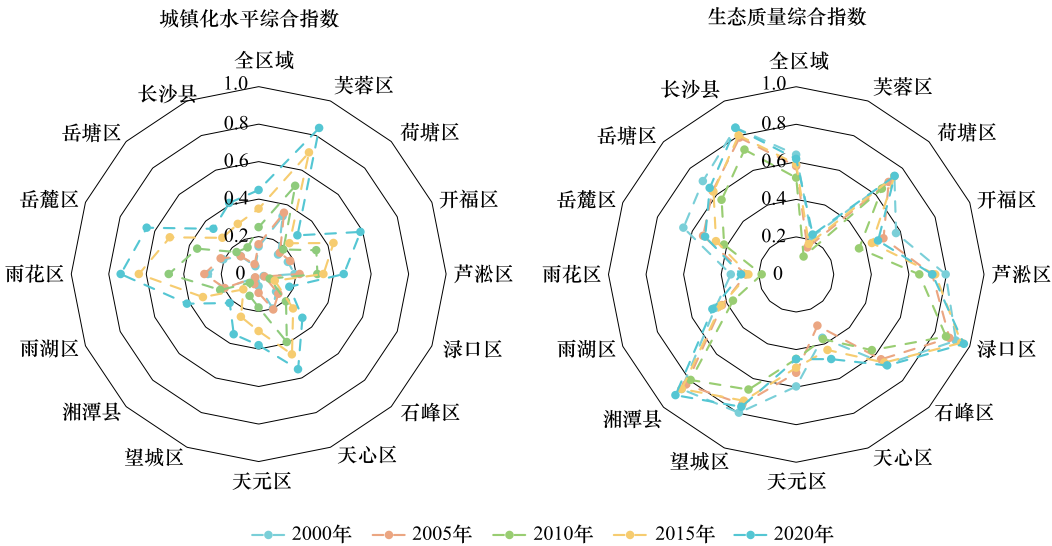


图 2 长株潭城市群城镇化水平与生态质量综合发展指数

Fig.2 Comprehensive development index of urbanization level and ecological quality in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

区、长沙县、荷塘区、禄口区以及湘潭县等城镇化水平较低地区生态质量相对较高,而芙蓉区、开福区、天心区和雨花区等中心地区的生态质量相对较低。伴随着社会经济的发展,建设用地过度挤压生态用地,导致生态系统结构的破碎化和复杂化,增加了自然景观损失程度;同时,人口和产业集聚不仅增加了对生态资源和服务功能的需求,导致生态系统功能的过度损耗,而且环境污染、生态退化等问题增加了生态系统的压力。目前,生态结构的逐渐破碎、生态功能的过度损耗以及生态系统压力的日益增加等问题严重制约着生态质量的提升,影响区域的健康发展。

3.2 城镇化水平与生态质量的冲突程度

3.2.1 耦合协调度的时间趋势

如图3所示,研究期间该区域耦合协调度保持稳定增长,由2000年的0.33上升到2020年0.62,表明长株

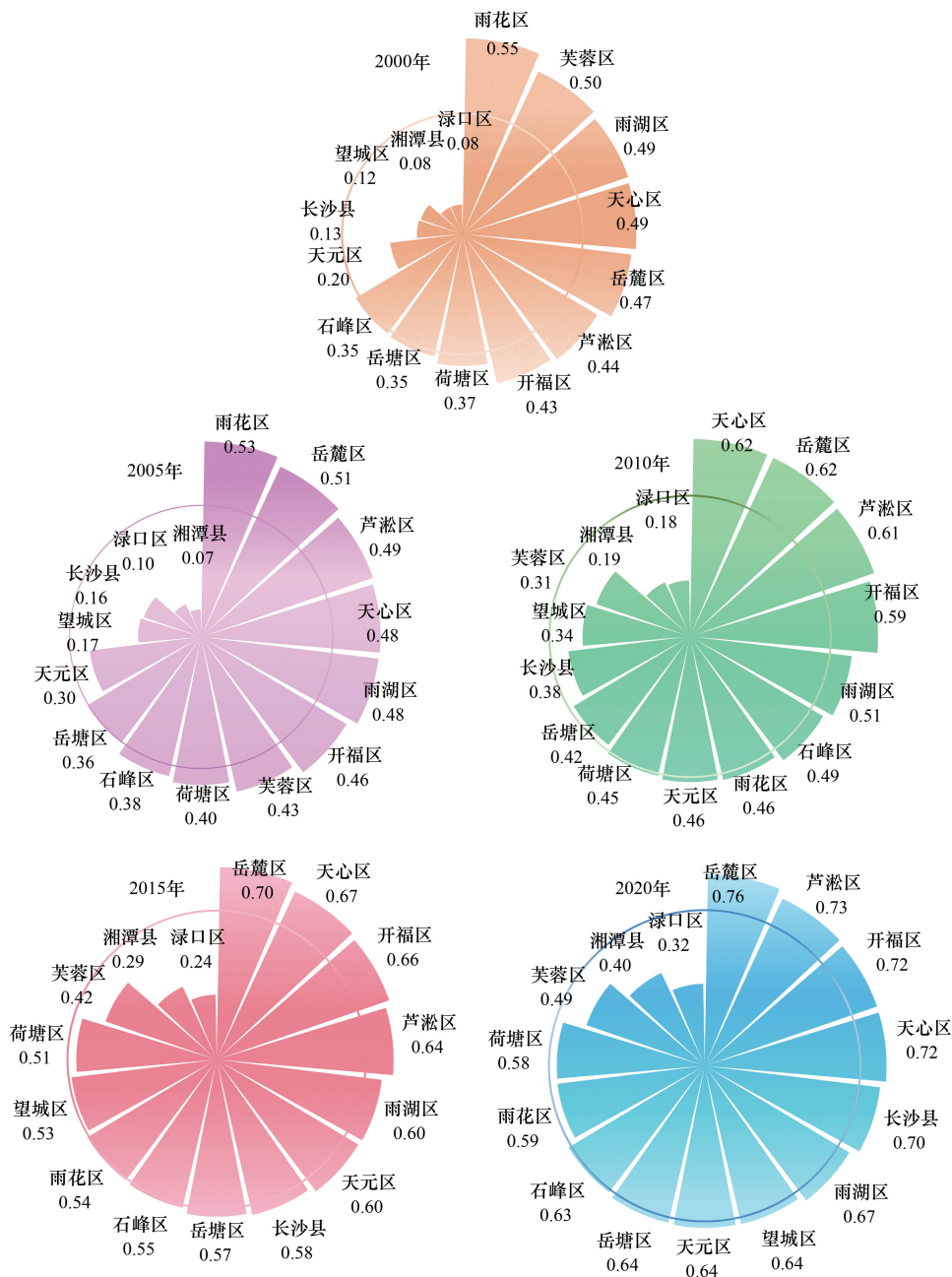


图3 2000—2020年长株潭城市群耦合协调度

Fig.3 Coupling coordination degree of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration from 2000 to 2020

潭城市群城镇化发展与生态质量之间的冲突逐渐减小。根据表 2 耦合协调程度等级划分发现,研究区域总体上处于中等冲突区和基本协调区,并逐渐向中等协调区过渡,分别处于三个阶段。第一阶段是冲突阶段(2000—2005 年),这一时期耦合协调度在 0.33—0.35 之间,期间生态质量较高而城镇化水平较低,两者的发展处于脱钩状态;第二阶段是过渡阶段(2005—2015 年),耦合协调度由 0.35 提升到 0.53,城镇化水平的提高使得协调程度提升,区域由冲突向基本协调方向发展。第三个阶段是协调阶段(2015—2020 年),这一时期耦合协调度继续提高,并突破了 0.6,城镇化快速发展,生态质量有所保障,区域进入中等协调阶段。虽然 2000—2020 年城镇化与生态质量之间的冲突逐渐减小并向协调方向发展,但两个子系统之间的耦合协调度未达到高度协调阶段,说明城镇化与生态质量之间的耦合协调度仍有较大提升空间。

3.2.2 耦合协调度的空间特征

如图 4 所示,长株潭城市群协调耦合度呈现由中部高四周低向北高南低过渡的特征,即高值区主要位于

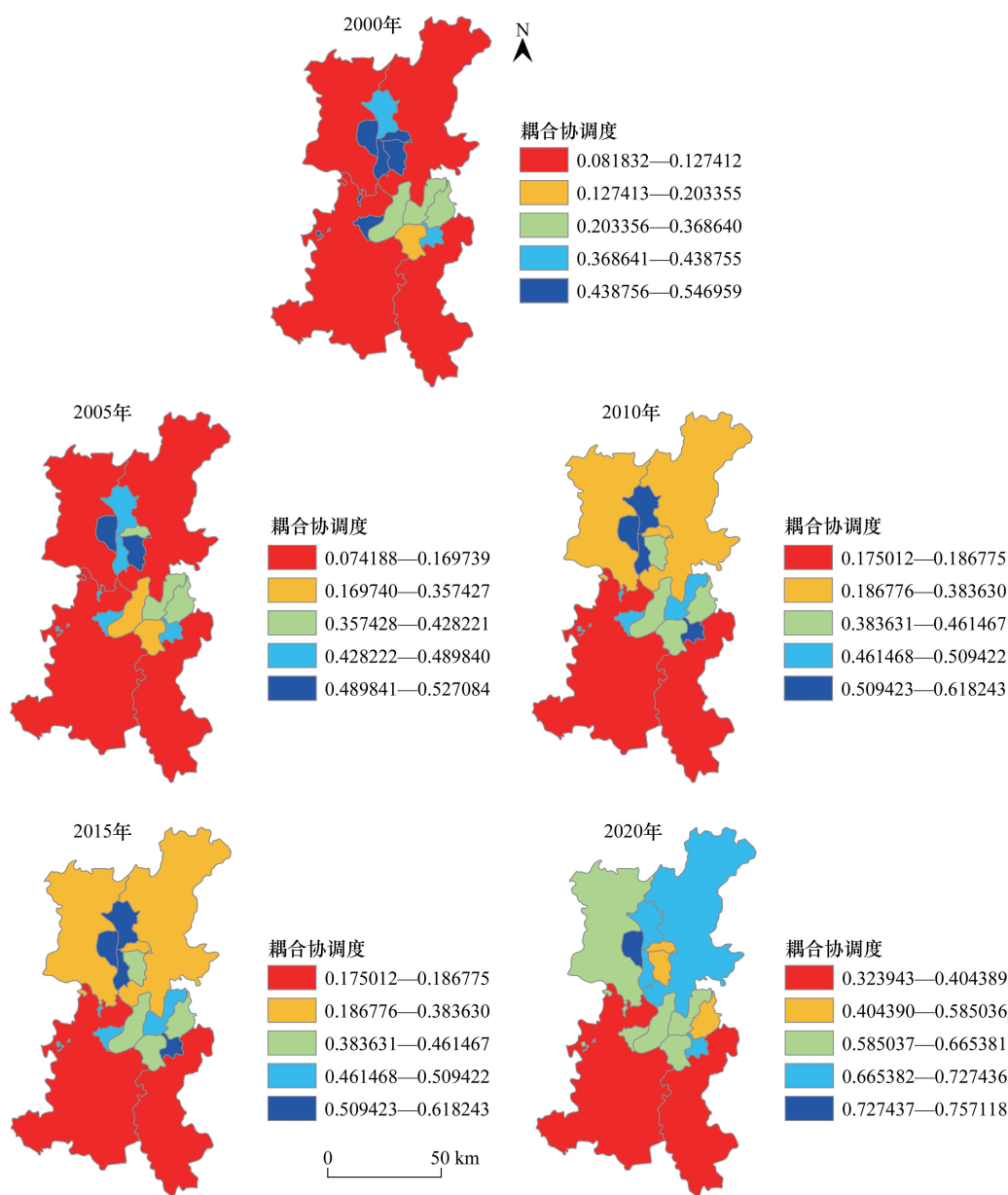


图 4 2000—2020 年长株潭城市群耦合协调度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of coupling coordination degree of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration from 2000 to 2020

经济较发达地区,低值区主要位于经济水平较低区域。本文根据各区域的城镇化水平和生态质量,将研究区分为四大类,即发展协调区、生态风险区、经济滞后区和双压区域。发展协调区主要包括开福区和岳麓区,这两个区域通过产业结构升级、绿色生产、生态补偿等生态保护措施提高城市质量,在促进生态保护和城市高质量发展方面发挥着主导作用。生态风险区主要包括芙蓉区、雨花区、天心区,这些区域城镇化水平高,然而经济快速发展消耗了较多的自然资源,建设用地无序扩张也在一定程度上破坏了生态系统的完整性,导致生态恶化。经济滞后区主要指禄口区、湘潭县、望城区、长沙县、荷塘区以及芦淞区,这些区域生态质量较高,然而经济发展较慢,城镇化水平较低。双压区主要指天元区、石峰区、岳塘区、雨湖区,这些区域依靠产业转移和资源产出取得一定的经济发展,但经济水平不高,而且高污染、高排放产业的转移也加剧了这些地区的环境恶化。

3.3 城镇化水平与生态质量的交互作用研究

3.3.1 城镇化水平作用时空变化

本文应用 GTWR 模型探讨了 2000—2020 年城镇化与生态质量的交互作用。具体的模型参数如表 3 所示,可以看出模型有很高的解释度,能够有效地解释城镇化水平与生态质量之间的关系。

表 3 时空地理加权回归 (GTWR) 模型计算结果和参数

Table 3 Calculation results and parameters of GTWR model

因变量 Dependent variables	拟合优度 R^2	带宽 Bandwidth	标准差 Sigma	赤池信息准则 AICc	时空距离比 Spatio temporal distance ratio	残差平方和 Residual squares
城镇化水平 Level of urbanization	0.9812	0.1133	0.02494	-121.902	0.3731	0.284401
生态质量 Ecological quality	0.9826	0.1175	0.02835	-116.812	0.4418	0.339443

GTWR: 时空地理加权回归模型 Geographically and temporally weighted regression model

由图 5 可知,城镇化对生态质量的作用以消极为主,人口集聚、经济增长、建设用地的无序扩张导致了生

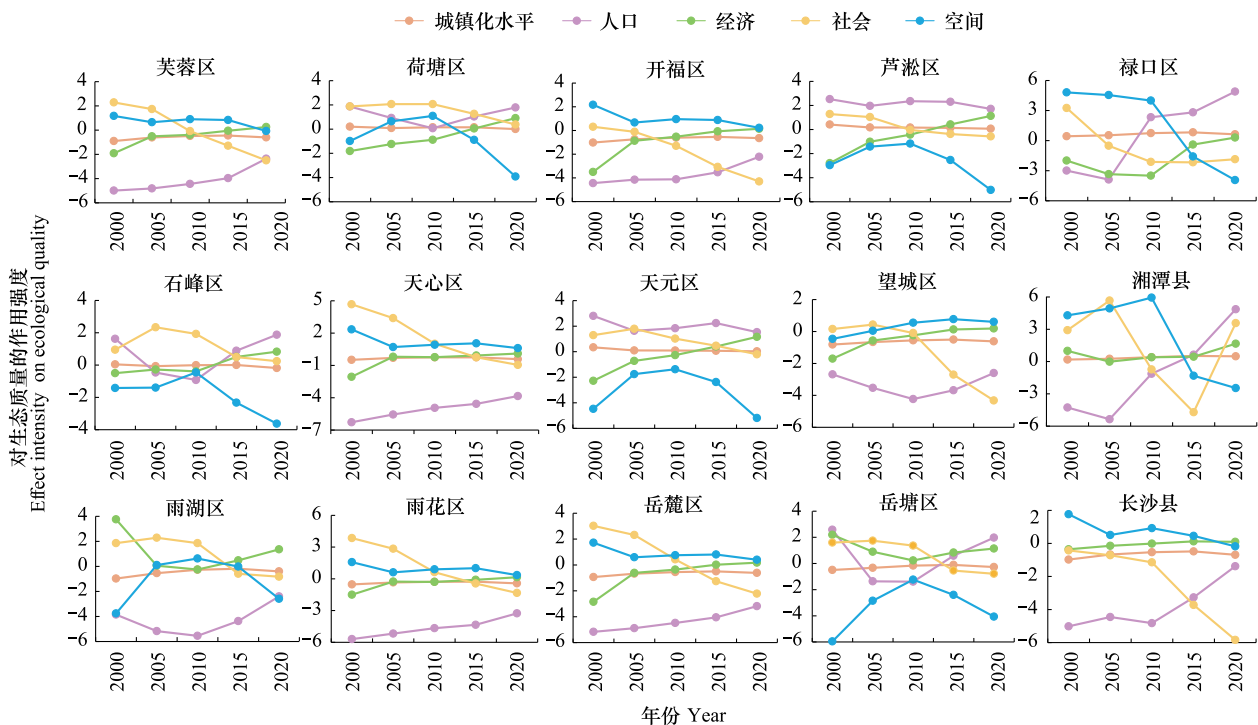


图 5 2000—2020 年城镇化及其子系统对生态质量的作用强度

Fig.5 Effect intensity of urbanization and its sub-systems on ecological quality from 2000 to 2020

态结构不稳定、生态功能下降,生态系统面临巨大的压力。从作用强度看,2000—2020 年,大部分区域城镇化发展的负面作用在一定程度上有所降低,这与当地生态保护政策的推进有关。从空间分布来看,各区县城镇化及其子系统对生态质量影响差异较大。其中,芙蓉区、开福区、天心区、望城区等经济水平较高区域城镇化水平的提升对生态质量的影响均为负面,石峰区由正面影响变为负面影响,表明这些地区的城镇化发展模式不利于生态质量提升。荷塘区、芦淞区、渌口区、天元区、湘潭县的城镇化水平对生态质量的影响均为正面,但作用强度较小,而且不断降低。这是因为这些区域的生态基础好,而城镇化发展较慢,因此城镇化水平对生态质量的影响不明显。

对研究区城镇化子系统进行研究发现,大部分区域如芙蓉区、开福区、天心区、雨湖区、雨花区、岳麓区的人口子系统对生态质量的负面影响由强变弱,而芦淞区、天元区等区域人口对生态质量的积极作用降低。这主要与就业环境有关,伴随着大中城市产业结构的转型升级,部分人口随着劳动密集型产业一起向周围小城市转移。经济子系统对生态质量的影响呈现出由消极向积极作用发展的趋势,这主要受新城建设、高质量发展等发展理念影响。社会子系统对生态质量的影响呈现出由积极向消极作用发展的趋势。这是因为随着人口的增加与收入的提高,对医疗、教育等服务设施的需求和质量要求提升,在一定程度上增加了建设用地面积。空间子系统对生态质量的负面影响加强,一方面人们对建设用地的需求逐渐增加,在一定程度上破坏了生态系统的平衡。另一方面,交通等基础设施的发展逐渐突破地形的限制,导致景观分离度增加。

3.3.2 生态质量作用时空变化

由图 6 可以看出,大部分地区生态环境对城镇化发展的作用基本一致,在研究期间均为负作用,作用强度不断加大,说明这些地区生态环境质量的提升制约了城镇化进程。少数地区如荷塘区、芦淞区、天元区生态质量对城镇化的影响由积极向消极转变,这是因为随着人类干扰程度的加大,区域生态环境承载力逐渐减弱。渌口区和湘潭县的变化趋势相对一致,生态质量对城镇化的影响经历了“负向-正向-负向”的演化过程。这是因为早期该区域生态质量较高,城镇化水平较低,随着经济的发展,城镇化水平有了一定提升,生态环境仍保持较高的承载力,但随着经济进一步发展,城镇化水平继续提高,生态质量逐渐下降。

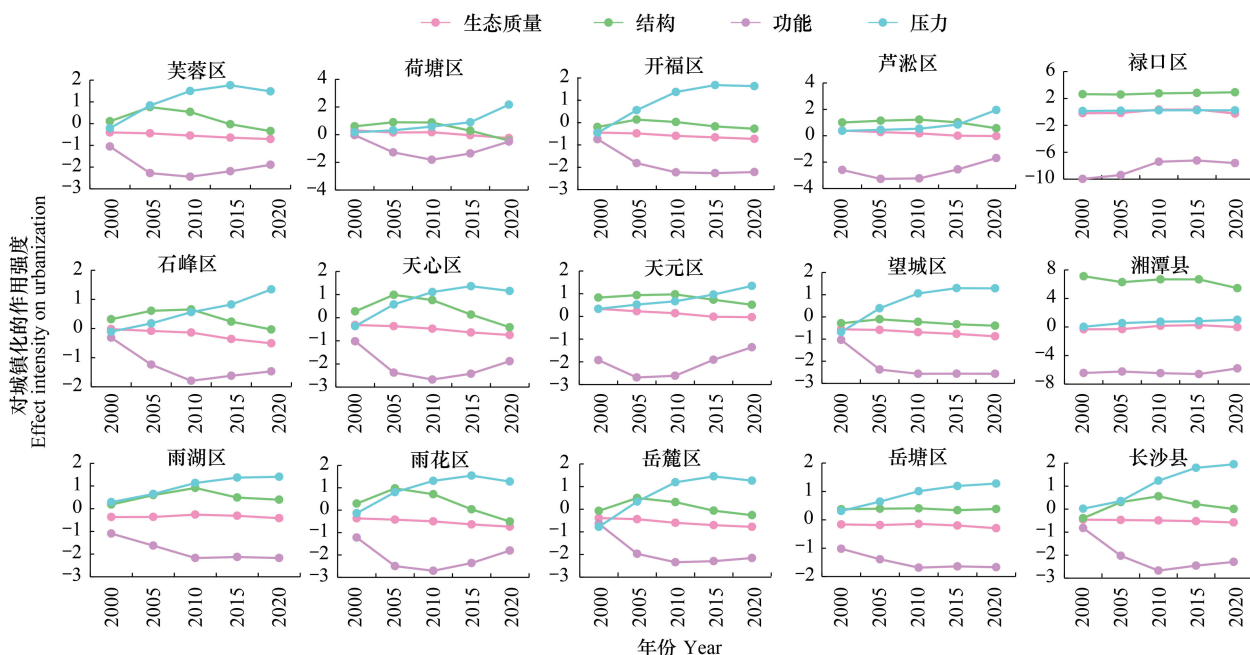


图 6 2000—2020 年不同区域生态质量及其子系统对城镇化的作用强度

Fig.6 Effect intensity of ecological quality and its subsystems on urbanization in different regions from 2000 to 2020

对生态质量子系统进行研究发现,在生态结构方面,除了禄口区,其余地区生态系统结构对城镇化的正向影响由强变弱,并表现出负向影响的趋势。这是由于建设用地的无序扩张加剧了景观斑块的破碎化,导致生态系统结构不稳定,进而制约了城市化的可持续发展。而禄口区人类活动对生态空间结构干扰相对较少,因此保持着弱正相关。在生态功能方面,各区县生态功能均制约着城镇化的发展,作用强度表现为先增加后减少。生态系统为居民生产与生活提供的产品和服务有限,人口过度集聚以及城市无序扩张导致生态功能减弱,限制了城镇化的发展。在生态压力方面,各区域生态压力与城镇化始终保持着正相关,而且作用程度不断加强,表明当前城镇化水平的提高给生态系统带来巨大压力。随着城镇化水平的提升,生态破坏问题日益突出,环境污染问题日益严重,这些问题加剧了生态压力,而反过来又会制约城镇化的发展。

4 讨论与结论

4.1 讨论

快速城镇化在推进经济社会发展的同时,给生态环境造成威胁。本文构建了城镇化和生态质量指标体系,并在此基础上结合 CCDM 和 GTWR 模型对 2000—2020 年长株潭城市群城镇化和生态质量之间的冲突和交互作用进行了分析。

城镇化与生态质量的关系是一个错综复杂的动态系统。本文从人口、经济、社会、空间四个维度对城镇化水平进行评价,指标体系更为全面、深入。在生态质量评价方面,综合考虑生态系统结构、功能以及压力,克服了以往研究中忽视生态系统结构和功能的缺点,更能反映出生态系统的本质。研究发现城镇化发展主要驱动因素由人口增长和城市扩张向经济增长和社会发展转变,生态质量提升受生态结构破碎、生态功能减弱以及生态压力增加限制,城镇化水平与生态质量的冲突呈现出城市化滞后到生态质量滞后的转变。因此,长株潭城市群要注重推动城镇化发展由规模向质量转变。同时,应加强生态治理,通过完善生态补偿机制促进生态恢复。

GTWR 模型能突出城镇化与生态质量交互作用的时空异质性,有利于深入分析城镇化与生态质量及其子系统间的制约因素。研究表明城镇化与生态质量交互作用较强,城镇化的发展不利于生态质量的提升,而这又反过来制约着城镇化发展。人口集聚和经济发展在推进城镇化进程的同时,加大了对自然资源和生态服务的需求,导致生态破坏和环境污染;城市无序扩张以及基础设施建设导致景观破碎化,造成生态系统结构不稳定和破碎化,生态压力加大。而生态质量下降也会通过环境承载力降低、生态脆弱性加剧限制城镇化发展。在城镇化进程中,一方面要促进产业结构转型升级,提高资源利用效率。另一方面,政府应进行合理的空间规划,进一步完善生态廊道建设,基础设施建设应尽量避免开生态用地,推进生态系统的完整性和稳定性。

4.2 结论

(1) 2000—2020 年,长株潭城市群城镇化水平呈逐渐上升趋势,中心地区城镇化水平明显高于四周,城镇化发展由人口增长和城市扩张驱动向经济增长和社会发展驱动转变;生态质量呈现先降低后上升的趋势,并表现出四周高中心低的特征,生态结构破碎、生态功能损耗、生态压力加大等问题制约着生态质量提升。

(2) 研究期间,长株潭城市群城镇化水平与生态质量之间的冲突程度逐渐降低,从基本协调阶段发展到中等协调阶段,经历了从城市化滞后到生态质量滞后的转变。同时,空间特征呈现由中部高四周低向北高南低布局过渡的趋势。

(3) GTWR 模型表明,城镇化水平与生态质量之间的相互作用表现出明显的阶段性和波动性。城镇化水平与生态质量的负互动效应倾向于集中在中部发达地区,而正互动效应倾向于分布在经济欠发达的四周县域。其中,人口集聚和城市空间扩张导致生态质量不断下降,反过来,生态系统结构的破碎化和服务功能的减弱限制了城镇的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Shi T, Yang S Y, Zhang W, Zhou Q. Coupling coordination degree measurement and spatiotemporal heterogeneity between economic development

- and ecological environment—Empirical evidence from tropical and subtropical regions of China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118739.
- [2] 柯小玲, 闵园园, 郭海湘, 史薇. 新型城镇化与城市生态环境的时空耦合分析: 以湖北省为例. *环境科学与技术*, 2021, 44(10): 213-222.
- [3] 金丹, 孔雪松. 湖北省城镇化发展质量评价与空间关联性分析. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(10): 2146-2155.
- [4] 李龙, 吴大放, 王芳, 刘艳艳, 刘毅华, 钱乐祥. 中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究——以佛山市为例. *生态学报*, 2020, 40(24): 9023-9036.
- [5] 王睿, 张赫, 强文丽, 李凡, 彭竞仪. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素. *地理科学进展*, 2021, 40(12): 1999-2010.
- [6] 刘华军, 杜广杰. 中国城市大气污染的空间格局与分布动态演进——基于 161 个城市 AQI 及 6 种分项污染物的实证. *经济地理*, 2016, 36(10): 33-38.
- [7] 郭雯雯, 陈永金, 刘阁, 宋开山, 陶宝先. 2016—2019 年长江中游城市群空气质量时空变化特征及影响因素分析. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 2034-2044.
- [8] 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.
- [9] 赵旭, 汤峰, 张蓬涛, 胡波洋, 徐磊. 基于 CLUE-S 模型的县域生产-生活-生态空间冲突动态模拟及特征分析. *生态学报*, 2019, 39(16): 5897-5908.
- [10] 魏伟, 缪江波, 夏俊楠, 武静. 湖北省长江经济带沿岸地区“三区空间”演化特征及机制分析(2010—2017). *经济地理*, 2020, 40(2): 132-142.
- [11] Peng S L, Jin Y. Study on the coupling and coordination relationship between urbanization and ecological environment in the Yangtze River economic belt of China. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 562: 012110.
- [12] 冯雨雪, 李广东. 青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析. *地理学报*, 2020, 75(7): 1386-1405.
- [13] 王志杰, 代磊. 黔中喀斯特山地城市土地利用/覆被变化及其生态效应评价——以贵阳市花溪区为例. *生态学报*, 2021, 41(9): 3429-3440.
- [14] 黄萃绒, 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.
- [15] Arikien M, Zhang F, Chan N W, Kung H T. Coupling coordination analysis and spatio-temporal heterogeneity between urbanization and eco-environment along the Silk Road Economic Belt in China. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107014.
- [16] 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.
- [17] 郭海红, 张在旭. 新型城镇化与生态环境响应度的区域差异研究. *宁夏社会科学*, 2018, (6): 86-96.
- [18] 刘海龙, 丁娅楠, 王跃飞, 王炜桥, 郭晓佳. 山西省城镇化与生态系统服务时空相关性及其空间效应分析. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 124-134.
- [19] 王飞, 叶长盛, 华吉庆, 李欣. 南昌市城镇空间扩展与景观生态风险的耦合关系. *生态学报*, 2019, 39(4): 1248-1262.
- [20] Scherner F, Horta P A, de Oliveira E C, Simonassi J C, Hall-Spencer J M, Chow F, Nunes J M C, Pereira S M B. Coastal urbanization leads to remarkable seaweed species loss and community shifts along the SW Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 76(1/2): 106-115.
- [21] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Yan H M, Zhang F, Wei X Q. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: a case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [22] Sun M Y, Li X H, Yang R J, Zhang Y, Zhang L, Song Z W, Liu Q, Zhao D. Comprehensive partitions and different strategies based on ecological security and economic development in Guizhou Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 122794.
- [23] 杨仪青. 新型城镇化进程中的我国生态文明建设路径探析. *生态经济*, 2017, 33(10): 221-225.
- [24] 姜亚俊, 慈福义, 史佳璐, 唐永超. 山东省新型城镇化与生态环境耦合协调发展研究. *生态经济*, 2021, 37(5): 106-112.
- [25] 刘巧婧, 王莉红. 城市化与生态环境耦合协调关系研究——以杭州市为例. *环境科学学报*, 2018, 38(10): 4214-4222.
- [26] 荣慧芳, 陶卓民, 刘琪, 许源, 程海峰. 皖南地区旅游产业-城镇化-生态环境耦合协调的时空演变. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 280-285.
- [27] Li W J, Wang Y, Xie S Y, Cheng X. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing municipality, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148311.
- [28] 贺艳华, 周国华. 长株潭城镇密集区范围的界定. *热带地理*, 2007, 27(6): 521-525, 547-547.
- [29] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市化与生态系统服务的空间交互关系研究——以长株潭城市群为例. *生态学报*, 2019, 39(20): 7502-7513.
- [30] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析. *地理学报*, 2009, 64(4): 387-398.
- [31] 黄冬梅, 刘小玉, 郑庆昌, 刘骏. 多中心格局对城镇化与生态环境耦合协调发展的影响研究——以福建省两大都市区为例. *生态学报*, 2020, 40(21): 7886-7896.
- [32] Pan Z Z, He J H, Liu D F, Wang J W. Predicting the joint effects of future climate and land use change on ecosystem health in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt, China. *Applied Geography*, 2020, 124: 102293.
- [33] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2429-2440.
- [34] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [35] 唐雨蒙, 邹滨, 许珊, 陈璟雯, 李明. 近 40 年长株潭生态景观的人为干扰过程分析. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(11): 74-79.
- [36] 朱青, 周自翔, 刘婷, 白继洲. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究——以延河流域为例. *生态学报*, 2021, 41(7): 2557-2570.
- [37] 王海军, 张彬, 刘耀林, 刘艳芳, 徐姗, 邓羽, 赵雲泰, 陈宇琛, 洪松. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析. *地理学报*, 2018, 73(6): 1076-1092.