

DOI: 10.20103/j.stxb.202302160262

何志远, 杨振凯, 丁志伟, 王世鹏, 李晗. 2010—2020 年中国市域城镇化与生态环境协调状态的空间分异及影响因素. 生态学报, 2024, 44(12): 5040-5058.

He Z Y, Yang Z K, Ding Z W, Wang S P, Li H. Spatial differentiation and influencing factors of the coupling coordination degree of urbanization and eco-environment in China at city-level from 2010 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5040-5058.

2010—2020 年中国市域城镇化与生态环境协调状态的空间分异及影响因素

何志远^{1,2,3,4}, 杨振凯^{1,2,3,4}, 丁志伟^{1,2,3,4,*}, 王世鹏^{1,2,3,4}, 李 晗^{1,2,3,4}

1 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

2 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

3 河南大学区域发展与规划研究中心, 开封 475004

4 河南大学环境与规划国家级实验教学示范中心, 开封 475004

摘要: 城镇化与生态环境协调平衡是提升城市品质的重要举措, 也是推进新型城市建设的内在要求。基于构建的城镇化与生态环境系统综合评价指标体系, 引入耦合协调模型对 2010—2020 年中国市域城镇化与生态环境系统的耦合协调度进行测度并分析其影响因素。结果表明: (1) 从空间分布格局来看, 城镇化发展水平整体呈现京津冀、长三角、珠三角地区领先, 成渝、中部地区中等, 西南、西北地区相对落后的分布特征; 生态环境建设水平呈现出“南高北低, 多点开花”的分布特征。(2) 从空间关联格局来看, 城镇化发展水平和生态环境建设水平皆呈现明显的集聚现象, 且以 HH、LL 区分布为主。其中城镇化发展水平显著 LL 区主要在西部地区集中分布, 大范围低值集聚态势明显, 反映出该地区城镇化有待进一步发展; 生态环境建设水平显著 HH 区主要在东南地区集中分布, 显著 LL 区主要在西部和东北地区, 反映出广大西部和北方地区的生态环境欠佳。(3) 从耦合协调度来看, 两大系统之间的磨合作用持续向好, 轻度失调及以下协调发展类型的城市数量不断下降, 整体迈入转型发展阶段。在空间分布上东部沿海地区整体的耦合协调度水平高于内陆地区。从城镇化与生态环境耦合协调关系看, 在研究期总体上呈均衡发展状态, 但是有向生态环境滞后型发展趋势。在空间分布上呈南-北差异化格局, 2020 年生态环境滞后型南北方城市之比为 4:6。(4) 从影响因素看, 城镇化状态、城市和谐状态、城市总体生态状况、城市对生态环境治理投入程度、城市绿色低碳建设程度以及水资源利用情况这几个方面均有重要解释作用。

关键词: 城镇化; 生态环境; 耦合协调; 时空分异; 中国

Spatial differentiation and influencing factors of the coupling coordination degree of urbanization and eco-environment in China at city-level from 2010 to 2020

HE Zhiyuan^{1,2,3,4}, YANG Zhenkai^{1,2,3,4}, DING Zhiwei^{1,2,3,4,*}, WANG Shipeng^{1,2,3,4}, LI Han^{1,2,3,4}

1 The College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Reaches of the Yellow River, Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475004, China

3 Research Center of Regional Development and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

4 National Demonstration Center for Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Coordination and balance between urbanization and eco-environment is an important measure to improve the quality of cities and an inherent requirement to promote the construction of new cities. Based on the comprehensive

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42271213, 42301237); 河南省研究生教育改革与质量提升工程项目 (YJS2024SZ26)

收稿日期: 2023-02-16; **采用日期:** 2024-04-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dingzhiwei1216@163.com

限于数据的可获取性, 本研究尚未统计到中国港澳台地区数据。

evaluation index system of urbanization and ecological environment system, the coupling coordination model was introduced to measure the coupling coordination degree of urbanization and eco-environment system in China's municipal area from 2010 to 2020 and analyzed its influencing factors. The results show that: (1) From the spatial distribution pattern, the development level of urbanization as a whole has a lead in the distribution characteristics for Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta regions, medium in Chengdu-Chongqing and central regions, and relatively backward in southwestern and northwestern regions; and the level of ecological environment construction presents the distribution characteristics of "high in the south, low in the north, and blossoming in many points". (2) From the viewpoint of spatial correlation pattern, the urbanization development level and eco-environment construction level both show obviously clustering phenomenon, and the distribution is dominated by High-high and Low-low districts. Among them, the significant LL zone of urbanization development level is mainly concentrated in the western region, and the wide range of low-value agglomeration is obvious, reflecting that the urbanization of the region needs to be further developed; the significant HH zone of eco-environment construction level is mainly concentrated in the southeastern region, and the significant LL zone is mainly located in the western and northeastern regions, reflecting that the ecological environment in the western and northern regions is not good enough. (3) From the coupling and coordination degree, the grinding effect between the two systems continues to be good, the number of cities with mild or lower levels of dysregulation and coordination development types is constantly decreasing. The whole has stepped into the stage of transformation and development. In terms of spatial distribution, the coupling coordination degree in the eastern coastal region is higher than that in the inland region. From the perspective of the coupling and coordination relationship between urbanization and ecological environment, there is a general balance in the development of these two processes during the study period. However, there is an emerging trend towards lagging ecological environments, with varying spatial distribution from south to north. By 2020, the ratio of cities experiencing ecological environment lag in the south and north was 4:6. (4) In terms of influencing factors, the urbanization rate, the urbanization status, urban harmony status, overall urban ecological condition, the level of investment in urban eco-environment governance, the level of green and low-carbon construction in cities, and water resource utilization all play an important role in explaining the situation.

Key Words: urbanization; ecological environment; coupling coordination; spatio-temporal differentiation; China

伴随着新型城镇化的推进,资源节约、生态优先、绿色发展、区域协调等成为区域经济可持续发展的重要保障,也有力推进了社会主义现代化强国的建设。然而,受生态基底、区域环境条件、交通区位优势等方面的影响,城镇化与生态环境的耦合关系不同地区的差异很大,甚至很多地区产生了资源吃紧、生态改变而束缚经济转型、城镇化高质量推进的现象^[1]。为提升城镇化与生态环境的协调关系,党的十八大报告中把生态文明建设纳入到国家发展和建设的“五位一体”总体布局中,国家对绿水青山的保护更加重视。党的十九大报告中又提出了人与自然和谐共生,且给予了更多的篇幅、更重的分量和更高的目标,进一步凸显生态环境保护的重要性和必要性。党的二十大报告进一步指出,必须牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,站在人与自然和谐共生的高度谋划发展。因此,基于人与自然和谐共生的视角,研究中国市域尺度下城镇化和生态环境耦合协调发展问题,对于促进总体的政治、经济、社会、文化的高质量发展、生态文明建设,以及区域经济社会的可持续发展具有重要的现实意义。

国外关于城镇化与生态环境耦合协调研究最早可追溯至工业革命后期,主要是针对工业革命的负面影响和解决城市疏散问题,例如 1898 年英国城市规划学家霍华德提出了“田园城市”以解决城市发展的布局和环境问题^[2]。至 20 世纪中期,在“田园城市”理论的影响下,知名学者陆续出版了一些颇具代表性的著作,比如《人类社区,城市 and 人类生态学》《城市文化》和《人类聚居学》,为后续人地协调研究奠定理论基础。进入 20 世纪后期,环境库兹涅茨曲线被提出之后^[3],很多学者针对城市生态环境展开专题研究并以此来解释城镇

化对城市生态环境的影响^[4-6]。21 世纪以来,随着研究的不断深入,国外学者开始综合考虑城镇化对城市生态环境多维度的影响,以及两者的相互作用机制研究^[7-9],使得城镇化与生态环境系统协调发展研究进入升华阶段。由于国内城镇化进程开始较晚,在 20 世纪后期伴随着首次生态经济座谈会的召开,才标志着国内关于城镇化与生态环境系统的关系的研究正式开始,且逐步与国外研究接轨。在 20 世纪后期国内学者主要是进行一些理论研究工作^[10],比如“社会-经济-自然”复合生态系统理论思想和可持续发展理念的落实^[11],从而为后期的研究夯实理论基础和带来方向指引。进入 21 世纪,国内关于城镇化与生态环境系统的协调发展研究大规模开展,研究深度和广度得以不断加深,在理论研究方面主要集中于两者相互作用的内涵、机制、演变规律和协调发展的政策建议方面^[12-15]。在理论研究深化的同时,实证研究在这一时期也陆续开展,首先在研究区域方面,众多学者从国家、省域、流域和城市群等对中国城镇化与生态环境系统现状与协调发展水平进行测度以及时空演变机制分析^[16-21],且研究对象日趋细化;其次在研究方法方面,多数学者采用熵值法、层次分析法和主成分分析法,以及“ESDA”对研究区域的城镇化与生态环境系统水平进行综合评价分析^[22-23];最后在耦合协调模型方面,学者在传统耦合协调模型的基础上对模型改进并进行典型区的时空特征研究,比如动态耦合协调模型、结构方程模型和 PVAR 模型^[24-26]。总体而言,以往学者多数以一个省或者一个区域内的几个城市为研究对象进行城镇化与生态环境系统的耦合协调发展研究,对于以全国为范围的中观尺度下的研究略显不足。基于此,本研究基于 2010—2020 年中国市域面板数据,以中国 297 个市(含州、盟、省辖市)作为基本研究单元,运用空间自相关、冷热点等方法分析中国市域城镇化发展水平与中国市域生态环境建设水平的空间分布和集聚特征,接着分别构建城镇化系统和生态环境系统综合评价指标体系并纳入耦合协调度模型测度全国市域尺度下的城镇化与生态环境耦合度,对其影响机理进行深入分析,以期为推动我国城镇化、工业化、绿色化协调发展等提供理论支撑与现实参考。

1 指标体系与研究方法

1.1 指标体系

城镇化与生态环境作为两个独立且多维的系统,两者相互影响、相互作用,共同推动城市的发展进步。在对城镇化和生态环境进行评价时,除了考虑到指标体系的综合性外,还要关注两者耦合协调的内在机理,以客观、合理的指标体系准确的反映其耦合协调发展状态^[27]。因此,本研究从美丽中国、人地和谐理念的出发,在遵循科学性、代表性和一致性等原则的基础上,参考相关研究成果,比如常用的 PESS 模型(人口城镇化-经济城镇化-社会城镇化-空间城镇化)模型和 PSR 模型(生态环境压力-生态环境状态-生态环境响应)^[22-28],构建了综合评价指标体系(表 1,表 2)。在城镇化方面,从人口向城市聚集、空间开发建设、产业转型升级、地方财政平衡、城市人口支撑五个维度构建指标体系反映城镇化发展状态水平;从刑事犯罪、婚姻质量、农村人民生活、医疗保险五个维度构建指标体系反映城镇化发展和谐水平;从城镇与农村的收入、消费、生活、医疗、教育的差异性五个维度构建指标体系反映城镇化发展公平水平。在生态环境方面,从高质、林密、水清、园多、天蓝五个维度构建指标体系反映生态环境建设美丽水平;从绿地面积、绿色经济、绿色出行、绿色消费、绿色投资五个维度构建指标体系反映生态环境建设绿色水平;从废物利用、污水处理、垃圾无害化、工业废水、空气污染五个维度构建指标体系反映生态环境建设治理水平。

1.2 研究区域与数据来源

考虑到数据的可获取性及在时间序列上的一致性,以及研究单元的统一和数据的可获取性,共选择 297 个市(含州、盟、省辖市)作为研究单元,分析 2010 年、2020 年两个时间节点下中国市域层面下的城镇化与生态环境耦合协调状况。城镇化系统数据来源于 2011、2021 年的《中国城市统计年鉴》、各省区统计年鉴、各地市统计公报。生态环境系统数据来源于 2011、2021 年《中国城市建设统计年鉴》,以及相应年份的省水资源公报和城市生态环境质量公报,其中,生态环境质量指标数据是由 2010、2020 年中国高分辨率生态环境质量数据^[29]的各研究单元矢量数据提取的平均值,来源于国家地球系统科学数据中心。另外,对于缺失数据,主

要以邻近年份补充,或者按照增长率法类推。

表 1 城镇化系统综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of urbanization system

准则层 Criteria layer	系统层 System layer	指标层 Index layer	指标属性 Indicator attribute
城镇化系统 Urbanization system	状态	城镇化率/%	正
		建成区面积比重/%	正
		第二、三产业产值之比/%	正
		地方一般公共预算收支比/%	正
		常住人口与户籍人口之比/%	负
		刑事犯罪占比/%	负
	和谐	离婚、结婚对数之比/%	负
		农村最低生活保障占比/%	负
		每千人卫生技术人员数/人	正
		城乡居民医疗保险人数占比/%	正
		城乡收入比/%	负
		城乡消费比/%	负
	公平	城乡恩格尔系数比/%	负
		城乡医疗卫生机构比/%	负
		城乡义务教育专任教师比/%	负

表 2 生态环境系统综合评价指标体系

Table 2 Comprehensive evaluation index system of ecological environment system

准则层 Criteria layer	系统层 System layer	指标层 Index layer	指标属性 Indicator attribute
生态环境系统 Eco-environment system	美丽	生态环境质量	正
		森林覆盖率/%	正
		地表水水质优良率/%	正
		万人拥有公园个数/个	正
		城市空气质量优良天数比例/%	正
		绿地面积/hm ²	正
	绿色	万元 GDP 用水量/m ³	负
		万人拥有出租车数量(辆)市辖区	正
		人均二氧化碳排放量/t	负
		园林绿化投资占比/%	正
		一般工业固体废物综合利用率/%	正
		污水处理厂集中处理率/%	正
	治理	生活垃圾无害化处理率/%	正
		单位 GDP 工业废水排放量/t	负
		单位 GDP 工业烟(粉)尘排放量/t	负

1.3 研究方法

1.3.1 极差标准化

极差标准化是消除众多指标之间存在的单位和属性不一致影响的一种方便快捷的数据处理方法,最终结果是把所有指标数据全部转换到[0,1]的区间内。基于此,本研究将选用极差标准化作为指标数据的无量纲化处理方法^[30],计算公式如下:

$$\text{正向指标} \quad X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$\text{逆向指标} \quad X_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个研究单元第 j 项指标的标准化后的值, m 为指标个数, x_{ij} 为第 i 个研究单元第 j 项指标的原始数据, $\max x_{ij}$ 为第 j 项指标的最大值, $\min x_{ij}$ 为第 j 项指标的最小值。

1.3.2 熵权综合评价法

熵权综合评价法是基于各项指标的数据计算出指标权重和综合得分的综合评价方法,在分析尺度细化下的大样本数据分析具有优势,也能看出各指标对整体指标体系的影响程度,因此本研究将选用熵权综合评价法来计算城镇化和生态环境的综合得分^[30-31],计算公式如下:

$$\text{城镇化系统} \quad f(x) = \sum_{j=1}^m W_j \times X_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

$$\text{生态环境系统} \quad g(y) = \sum_{k=1}^n W_k \times Y_k \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, $f(x)$ 为各城市城镇化系统的综合得分, $g(y)$ 为各城市生态环境系统的综合得分, W_j 和 W_k 分别为两系统各指标权重,其中城镇化系统的计算公式为 $W_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$), g_j 为第 j 项指标的差异系数, X_j 为各项指标的标准化值, m 为指标个数,同理可得生态环境系统各指标权重。

1.3.3 城镇化与生态环境耦合协调模型

(1) 耦合度模型

耦合度起源于物理学,是用来判断不同系统之间相互影响、相互作用程度的强弱,以及不同时期不同系统之间的相互关系,因其适用性强和具有一定的科学性,被众多学者用来测算城镇化系统与生态环境系统之间的耦合度^[32-35]。基于此,本研究选择耦合度模型来计算全国市域尺度下的城镇化与生态环境耦合度。其计算公式如下:

$$C = \left[\frac{f(x) \times g(y)}{[(f(x) + g(y))/2]^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中, C 为城镇化与生态环境的耦合度,且 C 所处区间为 0—1, $f(x)$ 为城镇化系统的综合得分, $g(y)$ 为生态环境系统的综合得分。

(2) 协调度模型

耦合度虽然可以测算城镇化系统与生态环境系统之间相互作用程度,但是无法衡量两个系统之间总体的耦合协调发展水平。因此,需要通过借助综合协调指数来进一步计算两系统之间的协调发展水平^[32-35],其计算公式如下:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

$$T = a \times f(x) + b \times g(y) \quad (7)$$

式中, D 为城镇化与生态环境的耦合协调度,且 D 所处区间为 0—1, C 为城镇化与生态环境的耦合度, $f(x)$ 为城镇化系统的综合得分, $g(y)$ 为生态环境系统的综合得分; T 为综合协调指数; a 、 b 为各系统的相对重要程度系数。基于当前发展背景和已有研究成果,本研究认为城镇化系统与生态环境系统同等重要,所以分别取值为 0.5。

1.3.4 城镇化与生态环境耦合与协调类型划分

为了准确、科学判断不同时期全国市域尺度下各地市的耦合协调发展状态,本研究基于已有研究成果^[36-43],综合考虑研究区域的现实条件,将城镇化与生态环境耦合协调度类型划细分为 5 大类、10 个小类和 30 个子系统相互关系类别(表 3)。

1.3.5 空间分类与冷热点分析

根据 ArcGIS 中的 Jenks 分类方法进行分类,将类似得分的区域化为一类,从而更清楚地分析空间格局特

征。探索性数据分析中的冷热点集聚分析可以在空间格局分析的基础上,进一步识别类似单元在空间上的集聚状态^[44],因此选择此方法与空间分类相结合来共同揭示耦合协调度的空间格局与集聚特征。

表 3 城镇化与生态环境系统耦合与协调发展类型划分原则

Table 3 Principle of type division of coupling and coordinated development between urbanization and ecological environment system

综合类别 Comprehensive class	耦合协调度(D) Degree of coupling coordination	耦合协调类型 Types of coupling coordination	子系统相互关系 The interrelationship between subsystems	子类别 Subsystem class
协调发展 Coordinated development	$0.9 < D \leq 1.0$	优质协调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
	$0.8 < D \leq 0.9$	良好协调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
	$0.7 < D \leq 0.8$	中级协调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
	$0.6 < D \leq 0.7$	初级协调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
转型发展 Transformational development	$0.5 < D \leq 0.6$	勉强协调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
	$0.4 < D \leq 0.5$	濒临失调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
失调发展 Dysregulation development	$0.3 < D \leq 0.4$	轻度失调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
	$0.2 < D \leq 0.3$	中度失调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
	$0.1 < D \leq 0.2$	严重失调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后
	$0 < D \leq 0.1$	极度失调	$f(x) - g(y) > 0.1$	生态环境滞后
			$ f(x) - g(y) \leq 0.1$	均衡发展
			$f(x) - g(y) < -0.1$	城镇化滞后

1.3.6 空间自相关分析

空间自相关分析是一种用于研究空间数据集中变量之间空间关联程度的方法^[45],其能够考虑数据中的地理位置信息,充分利用空间结构的信息,对于那些地理位置对变量值影响显著的数据集来说尤为重要。Global Moran's I 统计量是常用的统计指标,计算公式如下^[46-47]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (8)$$

式中, n 为研究单元个数; w_{ij} 为空间权重; x_i 和 x_j 为第 i 、 j 个空间单元的观测值; S^2 为方差; $\bar{x}$ 为平均值。Moran's I 的取值范围在 -1 — 1 之间,当 Moran's $I > 0$,表明要素在空间上集聚;当 Moran's $I < 0$,表明要素在空间

上离散;当 Moran's $I=0$,表明要素随机分布。

1.3.7 主成分分析

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是一种用于降维和提取数据集主要特征的统计方法。它通过线性变换将原始变量转换为新的一组互相不相关的变量,这些新变量称为主成分。这种方法可以有效实现数据降维、去除变量间的线性相关性并提取主要特征,公式如下^[48]:

$$\Sigma = \frac{1}{n-1} (x - \bar{x})^T (x - \bar{x}) \quad (9)$$

式中, x 是数据矩阵,每一行代表一个样本,每一列代表一个变量; $\bar{x}$ 是变量的均值向量; n 是样本数。

$$\sum v_i = \lambda_i v_i \quad (10)$$

式中, λ_i 是第 i 个特征值; v_i 是 λ_i 相关联的特征向量。

$$Z = XW \quad (11)$$

式中, W 包含选定的特征向量。

2 空间格局分析

2.1 子系统水平的空间分异格局

根据搜集的各项指标数据利用熵权综合评价法分别计算出城镇化与生态环境系统的综合得分,使用 Jenks Natural Breaks 分类方法分为五级,从而深入分析城镇化与生态环境综合发展水平的时空演变规律,结果见图 1、图 2。

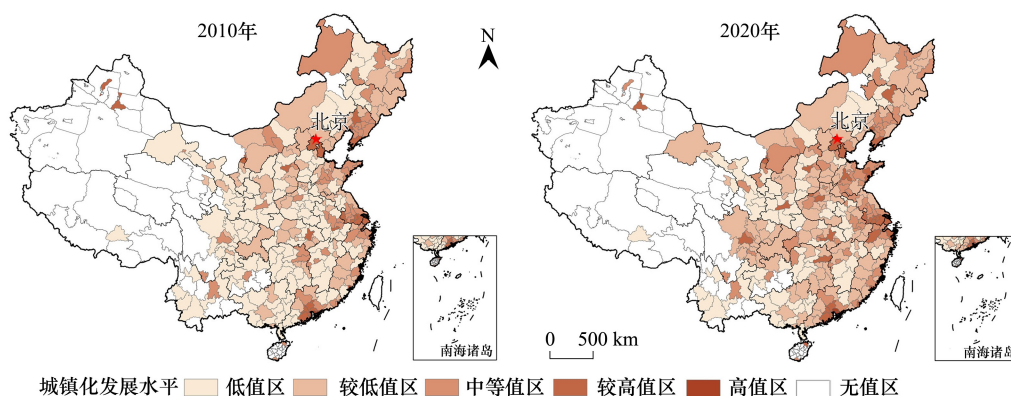


图 1 中国市域城镇化发展水平的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of urbanization development in China at City-level

2.1.1 城镇化系统

由图 1 可知,中国市域城镇化发展水平整体呈现“东强西弱”“多点开花”的空间分布特征,且研究期出现了低水平区向高水平区转移态势,高值区、较高值区、中等值区、较低值区、低值区比例由 2010 年的 1%、8%、18%、27%、46%,演变至 2020 年的 1%、11%、24%、39%、25%。就高值区而言,深圳市以一贯的城镇化的高质量发展姿态在全国地市中稳居领先地位。较高值区主要分布于沿海的京津冀地区、长三角地区、珠三角地区,且有明显的集聚现象。同时经过 10 年的发展,较高值区呈现由沿海向内陆扩散趋势,但由于中西部地区的郑州、长沙、成都、西安等省会城市为主,因此中西部尚未形成范围性的城镇化高质量发展片区。中等值区的分布范围在不断拓展,2020 年在河北、河南、湖北、山东、江苏、安徽、浙江七省呈现小范围的面状扩增。而相较于中东部地区,西南、西北地区则变化不大,以贵阳、昆明、兰州、银川省会城市为主呈点状增长式独立分布。东北地区虽然也有大范围的分布,但是只在辽东半岛形成了小范围的集聚区,黑龙江、吉林两省则未发展串联

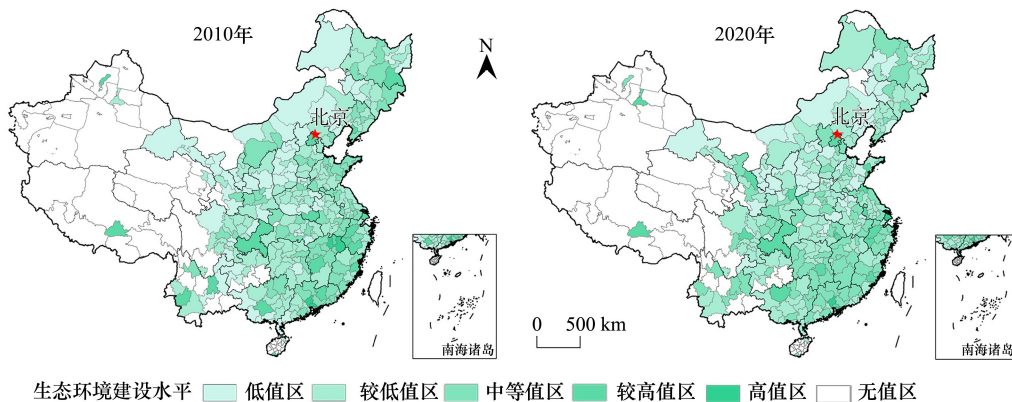


图 2 中国市域生态环境建设水平的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological environment construction in China at City-level

成城镇化高质量发展带。较低值区的范围进一步扩大并成为第一大占比区,空间分布呈现大规模、大范围集聚现象,其主要围绕省会城市并与周边地区形成串联区。此外,低值区在河南-山西-陕西交界区、黑龙江-吉林两省交界处、四川-重庆-贵州交界区、浙江-福建两省交界区等地区分布明显。低值区比例出现收缩,但还是有一定规模,空间分布主要以西北、西南地区为主,其中西北地区在山西、陕西、宁夏、甘肃四省形成了大范围的集聚区,西南地区在云南、贵州、广西、湖南也存在大范围的集聚区。值得一提的是,2010—2020 年随着低值区比例的下降,较低、中等、较高值区比例在普遍上升,且呈现出以中西部省会城市为核心并以圈层的形式逐渐向外扩散的趋势。例如以郑州市为代表的内陆经济强市快速崛起,并逐渐发展成为中国经济社会发展的中坚力量,这得益于现代化基础设施的完善和经济发展水平的不断提升。

2.1.2 生态环境系统

由图 2 可知,中国市域生态环境建设水平整体呈现“南强北弱”“多点开花”的空间分布特征,且研究期出现了低水平区向高水平区转移态势,高值区、较高值区、中等值区、较低值区、低值区比例由 2010 年的 1%、7%、25%、45%、22%,演变至 2020 年的 1%、6%、29%、45%、19%。就高值区而言,呈现出明显南-北差异化空间格局,即高值区大面积分布于南方地区且主要集聚在珠三角、长三角地区。较高值区比例变化不大,空间分布同样以南方地区为主,北方、南方分布占比为 1:4。其中,北方地区是以北京、乌海、营口等城市呈点状独立分布;南方地区则是以浙江、江西、湖北、江苏省内两三城市集聚分布为主,其余则是以云贵川、两广地区的城市呈散点状独立分布。中等值区比例增大,空间分布上北方地区范围有所扩大,但是由于南方地区具有水、森林、山等生态环境资源禀赋优势,北方、南方分布占比还是具有一定差距,基本上达到 1:3 的状态。在北方,东北地区分布于小兴安岭至长白山山脉地带,自南向北由黑龙江省黑河市蔓延到辽宁省大连市;华北平原地区的河北、山东、河南三省省内的小范围集聚分布区;西北同样是以陕西、甘肃省内两三城市小范围集聚区为主。在南方主要分布于长江中下游地区、珠江流域地区、武夷山脉地带,其中在 2020 年以广东、湖南、江西三省交界地区为中心形成了一个辐射到福建、广西部分地市的大范围集聚区。对于较低值区,北方地区分布范围空前扩大,主要分布于东北长白山山脉边缘地区、华北平原、陕西省、甘肃省和江苏省,且出现大范围集聚。但是南方地区分布范围也在进一步扩张,双方占比几乎达到 1:1 的状态,也再一次证实了“南强北弱”的空间分布特征。同时,在湖南、湖北交界地区,贵州、四川交界地区,两广地区呈现大范围的集聚分布。低值区主要分布于位于华北平原、东北平原和黄土高原地带,部分位于西北大漠地区的甘肃、宁夏等地,在南方地区则鲜有分布。不难看出,一方面我国东北平原、华北平原、黄土高原地区水资源并不充沛,另一方面受内陆热量和水分限制,使得绿化覆盖在整体层面不高,由此造成生态环境建设水平未达到预期。值得一提的是,受城镇化进程的加快、局部区域经济开发力度的增强和城乡关系的快速转换,城乡建设对生态环境的胁迫程度和影响力

度不断增强,低值区比例近 10 年下降幅度不高,较低值区比例保持不变。同时,较高值区比例有所下降,出现了生态环境高水平城市下滑、转移或者转化状态。

2.2 子系统水平的空间关联格局

根据 2010、2020 年城镇化与生态环境系统的综合得分,运用全局自相关和局部自相关方法绘制 2010、2020 年中国市域的局部空间 LISA 集聚图,从而深入分析城镇化与生态环境综合发展水平的空间集聚特征,结果见图 3、图 4。同时,中国市域城镇化发展水平的 Moran's I 值分别为 0.137 和 0.127,生态环境建设水平的 Moran's I 值分别为 0.126 和 0.110,这表明中国市域城镇化与生态环境综合发展水平存在较为明显的空间集聚现象。

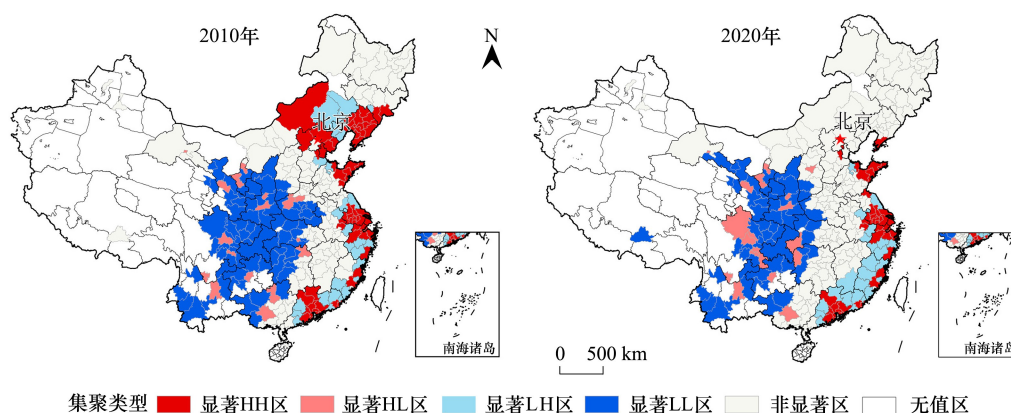


图3 中国市域城镇化发展水平的 LISA 集聚图

Fig.3 LISA agglomeration maps of urbanization development in China at City-level

HH: 高高 high-high; HL: 高低 high-low; LH: 低高 low-high; LL: 低低 low-low; LISA: 空间关联的局部指标 Local indicators of spatial association

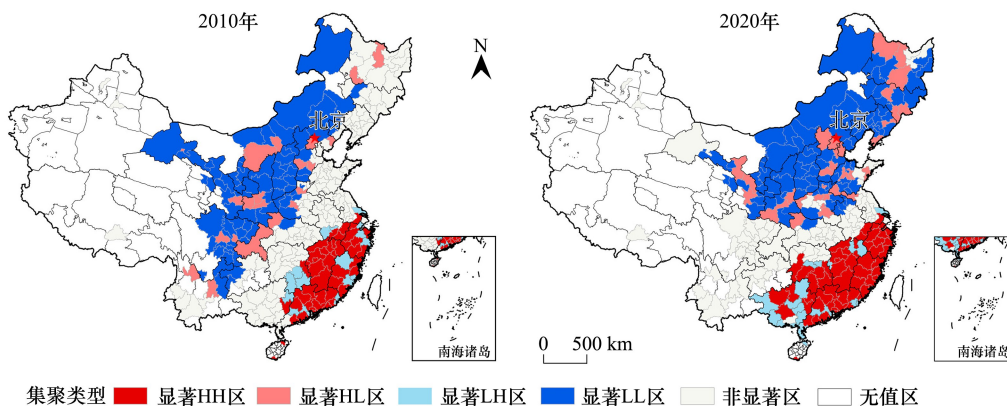


图4 中国市域生态环境建设水平的 LISA 集聚图

Fig.4 LISA agglomeration maps of ecological environment construction in China at City-level

2.2.1 城镇化系统

由图 3 可知,城镇化建设水平空间关联格局总体上呈现显著 HH 区至显著 LL 区自东部沿海向西部内陆延伸的阶梯状空间分布格局。具体而言,显著 HH 区集中分布于沿海地区,且向东南收缩趋势显著,2010 年城市数量为 57 个,占比为 19%,空间分布整体上呈现沿东部海岸线由辽东半岛至珠三角地区间断性凸现的格局,局部则集中分布于辽宁半岛、京津冀核心区、山东半岛、长三角地区、福建沿海、珠三角地区;至 2020 年,其空间分布在渤海湾地区由北向南从辽东半岛收缩至山东半岛一线,其余地区除江苏北部沿海地区略有增加外,空间分布保持不变;城市数量减少至 35 个,占比达 12%;这些地区由于具有优越的地理位置、良好的产业

基础与矿产资源优势等条件,使其城镇化发展处于高水平,同时也产生了高值聚集的现象。显著 HL 区空间分布范围最小、城市数量最少,2010 年城市数量为 18 个,其主要在云贵川、陕甘宁、豫湘鄂地区的显著 LL 区边缘散落分布,且呈现向中南地区转移趋势;至 2020 年,其空间分布主要转移至四川腹地、重庆周边地区,整体的城市数量变化并不明显,已达 19 个。显著 LH 区沿东部海岸线与显著 HH 区之间穿插分布并填补了部分空缺,发展趋势同显著 HH 区一致沿海岸线向南收缩。2010 年显著 LH 区城市数量为 24 个,主要分布在辽东、山东、江苏、浙江、福建、广东等地且各省内小范围集聚分布现象明显;至 2020 年,其空间分布主要在辽东地区出现大范围的收缩,回退到山东半岛一线,其余地区除在江西、福建、广东三省交界地带出现小范围增加外,整体空间分布基本没有变化,城市数量也没有变化。显著 LL 区空间分布范围最广、城市数量最多并占据主导地位,2010 年城市数量为 78 个,占比达 26%,空间上在西北、西南、中部地区大面积的集中连片分布;至 2020 年,其空间分布在中东部地区从安徽地区退回到南阳-益阳一线,整体的分布范围有所减少,城市数量上也减少至 58 个,占比为 20%。不难发现,这些地区受制于产业基础薄弱、工业化进程缓慢和城乡发展不均衡等因素,城镇化建设处于低水平,同时也产生了低值聚集的现象。

2.2.2 生态环境系统

由图 4 可知,生态环境建设水平空间关联格局总体上呈现显著 HH 区至显著 LL 区自东南沿海向西北内陆延伸的阶梯状空间分布格局。具体而言,显著 HH 区主要分布于东南地区,且向西南扩张趋势显著,2010 年城市数量为 47 个,占比为 16%,空间上在沿海地区整体呈现由长三角至珠三角的连续分布带,局部则串联江苏-浙江-福建-广东-广西五省,内陆绵延到江西、湖南地区;至 2020 年,其空间分布延伸至湖南、贵州、广西交界一带,浙江、福建地区已全覆盖,城市数量上也增长至 58 个,占比达 20%。由于这些地区由于资源环境本底良好、环境保护政策措施齐全和公众环保意识强,因而其生态环境建设处于高水平,同时也产生了高值聚集的现象。显著 HL 区集中分布于西北、西南地区,且向华北、东北地区转移扩散趋势显著,2010 年城市数量为 23 个,空间上主要分布在陕西-甘肃交界地区、湖南-重庆-四川地区集聚片区,部分在云南、河南、河北、内蒙古、黑龙江地区零星散落分布;至 2020 年,其空间分布在西南地区完全消失,京津冀、东北、山东半岛地区则出现大面积的分布,甘肃西部地区也有一定的分布,但是整体的城市数量增幅不大。显著 LH 区空间分布范围最小、城市数量最少,2010 年城市数量为 13 个,其主要在江苏、浙江、福建、广东、广西地区的显著 HH 区周边散落分布,且呈现向西南地区转移扩散趋势;至 2020 年,其空间分布在浙江、福建地区已经不再出现,主要扩散至江西、广西、海南地区,整体的城市数量已达 18 个。显著 LL 区空间分布范围最广、城市数量最多且占据主导地位,2010 年城市数量为 77 个,占比达 26%,空间上在中北、西北、中南地区大面积的集中连片分布,涵盖内蒙古、河北、河南、山西、陕西、甘肃、宁夏、四川八省区且向华北、东北地区转移扩张;至 2020 年,其空间分布在西南地区已经消失,向东延伸至山东地区且成规模集聚分布,向北延伸至东北地区且形成并联内蒙古与东三省的大面积集聚分布区,城市数量上也增长至 95 个,占比达 32%。不难发现,这些地区受制于自然资源匮乏、工业快速发展、城市化进程过快等因素,生态环境建设处于低水平,同时也产生了低值聚集的现象。

2.3 耦合协调度的空间格局

根据耦合协调模型分别计算出各年份的耦合协调度值,空间分布结果见图 5。

由图 5 可知,2010—2020 年耦合协调度演变呈现出稳步提升的态势,总体上经历了由轻度失调向濒临失调的演变。从空间上看,东部沿海地区整体的耦合协调度水平普遍高于内陆地区,且至 2020 年已演变至南方地区普遍高于北方地区的空间格局,总体呈“南强北弱”的空间分布特征。具体而言,良好协调区只有一个城市深圳“上榜”,其以高质量的城镇化发展水平和高品质的生态环境造就了其高水平的耦合协调发展状态。中级协调区以长三角、珠三角地区核心城市为主,分别是上海、广州、东莞。这些城市在快速城镇化的过程中,以产业转型升级、护林造林、节能减排等措施增强了城市生态环境保护力度,同时以自然资源本底的支撑,使两者保持一个好的协调发展状态。初级协调区主要有北京、南京、厦门、珠海等城市,可以看出快速城镇化的背景下给城市生态环境系统带了一定的压力,但是整体上还处于较好的协调发展的状态。勉强协调区以南方

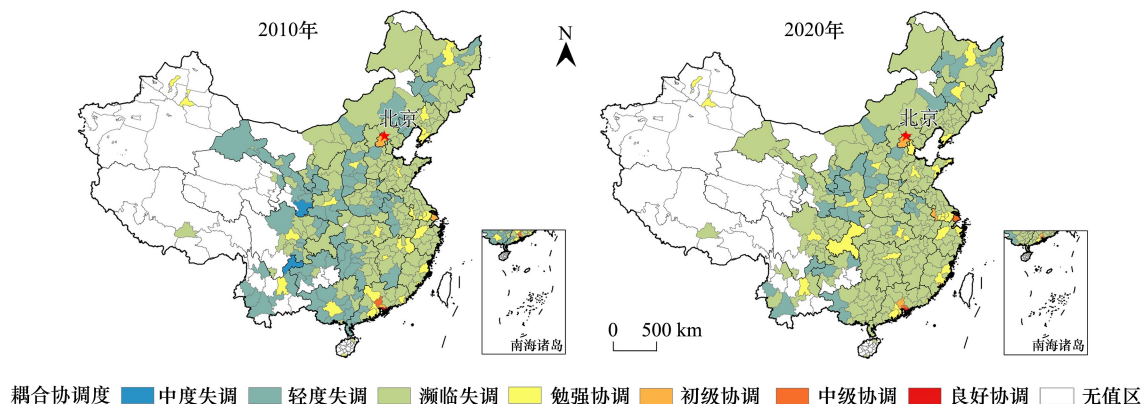


图5 中国市域城镇化和生态环境耦合协调度的时空演变

Fig.5 Spatial and temporal evolution of the coordination of urbanization and ecological environment coupling in China at City-level

城市为主,北方城市有扩大的趋势但是并不明显。其中,南方地区集中分布于长三角、珠三角地区以及长江流域中游地区省份的省会城市。北方地区主要集中于东北三省、新疆地区,近期河南、山东两省表现出以省会城市为主的零星分布。濒临失调区城市数量最多、分布范围最广,南方地区在2020年已演变为长江中下游地区、两广地区、福建-浙江一带大范围的集中连片分布。北方地区则由东北三省已经蔓延至内蒙古、京津冀、山西、河南等地区。轻度失调区集中分布于西南、西北地区,同时在中部的河南、安徽地区也有一定规模的分布。至2020年分布范围已大幅收缩,其中西南地区和中部河南、安徽地区已寥寥无几;西北地区虽然已经收缩,但是以陕西省为中心的周边省份还存在大范围的分布。值得一提的是,中国市域城镇化与生态环境系协调发展水平在新型城镇化建设的引领下,在生态文明建设和“两山理论”的持续影响下,两者的耦合协调水平持续向好。

2.4 相互作用关系的空间格局

根据耦合与协调发展类型划分原则(表2)划定耦合协调相互关系,结果见图6。

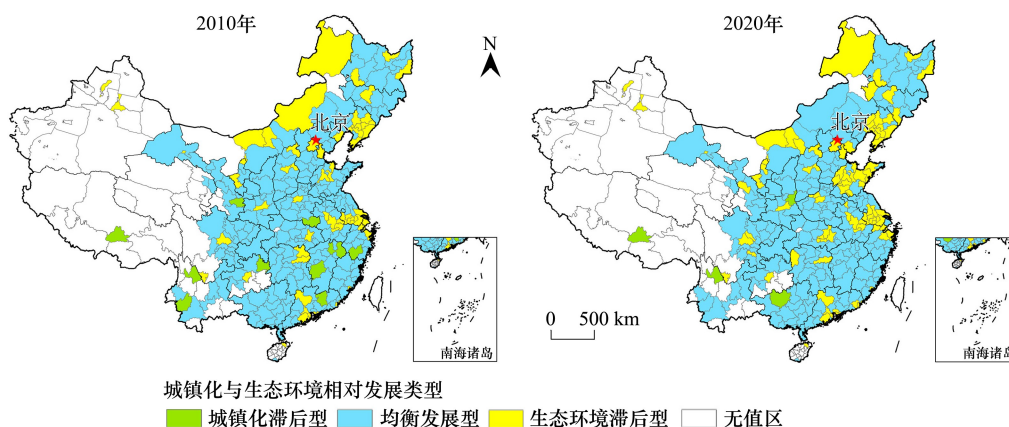


图6 中国市域城镇化和生态环境相互关系的时空演变

Fig.6 Spatial and temporal evolution of the relationship between urbanization and ecological environment in China at City-level

由图6可知,中国市域城镇化和生态环境相互关系在研究期总体上呈均衡发展状态,但是有向生态环境滞后型转移趋势,且空间上的南-北差异化空间分布格局显著。具体而言,2010年城镇化滞后型、均衡发展型、生态环境滞后型占比分别为3.37%、75.76%、20.88%,至2020年城镇化滞后型、均衡发展型、生态环境滞后型占比为1.35%、68.35%、30.30%,可以看出,研究期初两者相对发展关系以均衡发展型为主、生态环境滞后型为辅,之后十年时间里城镇化滞后型、均衡发展型比例下降,而生态环境滞后型比例则小幅上升,呈“多

点开花”状空间分布格局在全国上下凸现。从空间分布看,北方地区分布面积远超南方地区,其中在辽东半岛、山东半岛、长三角地区有大规模集聚,其余则散落分布于全国各地以直辖市、省会城市为主。从近期耦合协调状况看,国内部分经济发达城市两大系统之间的相互作用关系开始“紧张”起来,甚至一些经济社会快速发展的地市在达到均衡发展之后又转化成了生态环境滞后型,因此,在今后的建设过程中,国家在重视城市均衡发展的同时,要特别留意城镇化水平高值区的生态环境问题,以实现高品质的现代化建设和城乡协同发展。均衡发展型的城市在研究初期南北方空间分布相对均衡,北方地区除辽东半岛与内蒙古地区边境城市,其余地区则围绕直辖市、省会城市形成大范围的集聚分布格局。相比之下,南方地区在被生态环境滞后型和城镇化滞后型裹挟中形成大范围的连绵分布格局,无论是新型城镇化质量还是生态建设的内在提升均需要进一步改进。

2.5 冷热点空间集聚格局

运用 Arc GIS10.2 软件优化热点分析计算出耦合协调度值的 G_i 指数,并用自然断裂点法把 G_i 指数划分为热点区、次热点区、冷点区、次冷点区和无显著区五类,结果见图 7。

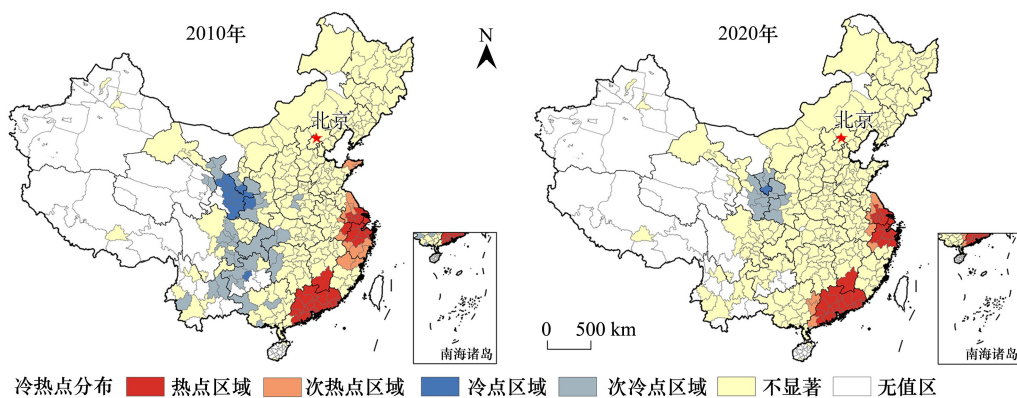


图 7 中国市域城镇化与生态环境的耦合协调度冷热点空间格局

Fig.7 Spatial pattern of cold and hot spots in the coupling and coordination degree of urbanization and ecological environment in China at City-level

由图 7 可知,耦合协调度热度呈东部沿海与西部内陆的“V”型对立状空间分布格局。就热点区域而言,空间分布集中分布于长三角和珠三角地区。2010 年热点城市共有 34 个,占比为 11%,空间上在沿海地区形成了东部南通至台州覆盖江浙沪地区和南部自赣州至阳江覆盖广东地区的两条空间分布带;2020 年整体空间分布与城市数量变化不明显,仅增加一个江苏省泰州市。就次热点区域而言,城市主要分布东部热点区域南北两侧,在热点区域西侧安徽省也有少量分布,空间上自长三角热点区域向北延伸到江苏省腹地,向南延伸到福建北部一带,山东半岛也有少量分布。2020 年,东部长三角地区分布范围有所收缩,而在南部两广地区出现新增,整体的分布范围和城市数量有所下降,占比由 4.6% 下降到 3.6%。就冷点、次冷点区域而言,在数量上由 45 个下降到 13 个,在空间上呈现自西南向西北收缩的趋势,在西南地区空间分布主要以贵州省为中心形成辐射整个西南地区的空间集聚区,在西北地区空间分布则是以陕、甘、宁三省交界地区为中心形成辐射三省的大范围空间集聚区。2020 年冷点、次冷点区域向西北地区收缩,只存在以陕、甘、宁三省交界地区为中心分布三省地市的集聚片区。

3 影响因素分析

3.1 对数据标准化处理及因子分析适用性检验

本研究使用 SPSS26 软件,将原始数据进行标准化处理,得到新的数据,然后通过 KMO 检验法和 Bartlett 球体检验法进行因子分析的适用性检验。其中城镇化影响因素 KMO 值等于 0.745,生态环境影响因素 KMO

值等于 0.621,说明指标间存在一定的相关性。Bartlett 球体检验结果分别为 3441.886、839.590,Sig 值均为 0.000,即各个指标是相关的,两项结果检验都表明了数据适用因子分析法。

3.2 城镇化因子分析

一般情况下,因子提取的方法为按照因子的特征值大于 1 提取公因子。如表 4 所示,特征值大于 1 的因子有 5 个,其特征值之和占总特征值的比重为 65.242%,即累积方差贡献率为 65.242%,能够对原有变量进行较好的解释与说明。因此,可以提取前 5 个因子作为主成分进行分析。

表 4 城镇化影响因素方差解释率

Table 4 Variance interpretation rate of factors influencing urbanization

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extracting the sum of squared loads			旋转载荷平方和 Sum of squared rotational loads		
	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积% Accumulate	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积% Accumulate	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积% Accumulate
1	4.265	28.431	28.431	4.265	28.431	28.431	3.909	26.057	26.057
2	1.970	13.135	41.566	1.970	13.135	41.566	1.952	13.014	39.071
3	1.306	8.708	50.274	1.306	8.708	50.274	1.334	8.895	47.966
4	1.207	8.044	58.317	1.207	8.044	58.317	1.316	8.774	56.740
5	1.039	6.924	65.242	1.039	6.924	65.242	1.275	8.501	65.242

为了能够对因子含义进行更好的解释,需要进行因子旋转,采用的方法是最大方差法,得到了如表 5 所示的旋转后的因子载荷矩阵。

表 5 旋转后的因子载荷矩阵

Table 5 Factor loading coefficient after rotation

	指标 Index	成分 Component				
		1	2	3	4	5
X_1	城镇化率/%	0.844	-0.145	0.142	0.114	0.199
X_2	建成区面积比重/%	0.798	-0.092	0.179	-0.133	0.083
X_3	第二、三产业产值之比/%	0.148	0.052	0.828	-0.214	-0.146
X_4	地方一般公共预算收支比/%	0.729	-0.110	-0.178	-0.139	0.083
X_5	常住人口与户籍人口之比/%	0.577	-0.031	-0.059	-0.137	0.079
X_6	刑事犯罪占比/%	0.385	0.031	0.018	-0.602	0.196
X_7	离婚、结婚对数之比/%	-0.031	-0.095	-0.054	-0.056	0.879
X_8	农村最低生活保障占比/%	-0.505	0.437	-0.151	0.111	-0.154
X_9	每千人卫生技术人员数/人	0.183	0.244	0.101	0.709	0.344
X_{10}	城乡居民医疗保险人数占比/%	0.506	-0.072	-0.065	0.245	-0.037
X_{11}	城乡收入比/%	-0.231	0.877	-0.064	0.046	-0.030
X_{12}	城乡消费比/%	-0.063	0.903	-0.030	0.068	0.076
X_{13}	城乡恩格尔系数比/%	-0.179	-0.198	0.582	0.272	0.061
X_{14}	城乡医疗卫生机构比/%	0.538	0.090	-0.224	0.415	-0.020
X_{15}	城乡义务教育专任教师比/%	0.231	0.097	-0.026	0.090	0.479

由表 5 可知,旋转后因子载荷矩阵第 1 因子占比较高的有 X_1 、 X_2 、 X_4 ,即城镇化率、地方一般公共预算收支、建成区面积比重,说明这三个方面的影响较大,并结合第 3 因子中相关性较大的(第二、三产业产值之比),共同反映城镇化状态。从现实情况看,城镇化水平的提升需要有效的城市规划和管理,以优化土地使用和资源配置,减少对生态环境的破坏和压力。同时城镇化水平的提升伴随着合理的公共服务设施建设和运营管理有助于提高居民的生活质量和环境质量,并促进城镇化与生态环境系统向良性耦合协调方向演进。地方

一般公共预算收支比的增加可以提供更多的财政资源用于城镇化建设和发展,从而推动城镇化的进程,并提供更多的财政资源用于资源配置和生态环境保护以实现城镇化与生态环境的耦合协调。建成区面积比重的提升虽然可以提高城市居民的生活质量以提高城镇化水平,但如果不合理地开发和利用建成区,可能导致环境污染、交通拥堵、社会矛盾等问题,进而影响居民的生活质量的提升和城镇化与生态环境的耦合协调。第二产业通常会产生大量的污染物排放和资源消耗,对生态环境造成不利影响,而第三产业相对较少产生污染,对生态环境的负面影响较小。当第三产业产值占比较大时,说明科技型、服务型产业的增多并减少对生态环境的压力,进而以较少的资源损耗实现城镇化与生态环境系统的耦合协调水平。第 2 因子中相关性较强的是 X_{11} (城乡收入比)和 X_{12} (城乡消费比),这反映城乡协同发展对区域城镇化水平提升和生态环境基质修复的重要影响。第 4 因子中影响最大的是 X_6 (刑事犯罪占比)和 X_9 (每千人卫生技术人员数),并结合第 5 因子中相关性较强的 X_7 (离婚比),均能在一定程度上反映出城市和谐状态。社会和谐推动着社会进步和法治观念的融入,可以吸引更多农民进入城市工作和生活,进而推动城市市民化进程的加快和生活环境的宜居宜业。同时,在城市和谐状态下,城市管理者 and 居民更加重视环境保护和可持续发展,推动城市绿色发展、资源节约利用、生态环境保护措施的实施,这将有助于降低城市的环境负荷和生态破坏,提高城镇化与生态环境系统的耦合协调水平。

3.3 生态环境因子分析

如表 6 所示,在生态环境上,特征值大于 1 的因子有 6 个,其累积方差贡献率为 62.866%,因此提取前 6 个因子作为主成分进行分析。

表 6 生态环境影响因素方差解释率

Table 6 Variance interpretation rate of ecological environment

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extracting the sum of squared loads			旋转载荷平方和 Sum of squared rotational loads		
	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积% Accumulate	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积% Accumulate	总计 Total	方差百分比 Variance percentage	累积% Accumulate
1	2.639	17.592	17.592	2.639	17.592	17.592	2.361	15.738	15.738
2	1.978	13.185	30.778	1.978	13.185	30.778	1.891	12.608	28.346
3	1.601	10.673	41.451	1.601	10.673	41.451	1.656	11.043	39.389
4	1.146	7.640	49.091	1.146	7.640	49.091	1.258	8.386	47.775
5	1.065	7.097	56.187	1.065	7.097	56.187	1.193	7.951	55.726
6	1.002	6.678	62.866	1.002	6.678	62.866	1.071	7.139	62.866

同样对其进行因子旋转,如表 7 所示。

由表 7 可知,旋转后因子载荷矩阵第 1 因子占比较高的有 X_{16} 、 X_{17} 、 X_{20} ,即生态环境状况质量、森林覆盖率、城市空气质量优良天数比例,综合起来反映出城市总体生态状况。良好的生态环境状况是城市吸引人口和促进城镇化的重要因素之一。一般而言,城市总体生态状况较好的地区,往往拥有较优质的空气和水质、较少的环境污染和危害物质和宜人的生活空间,这将吸引农村剩余劳动力等人口向城市迁移,推动城镇化进程,进而在演进的过程中提升城镇化与生态环境系统耦合协调水平。第 2 因子中相关性较强的是 X_{24} (园林绿化投资占比)、 X_{29} (单位 GDP 工业废水排放量)和 X_{30} (单位 GDP 工业烟(粉)尘排放量),并结合第 4 因子中相关性较强的 X_{28} (生活垃圾无害化处理率),四者共同反映出城市对生态环境治理投入程度。城市对生态环境治理的投入程度直接影响城市治理能力和环境管理水平。一般而言,投入较多生态环境治理的城市通常会将生态环境保护与可持续发展融入城市规划和建设过程中,采取生态先行的原则,进而在绿色化理念进行各类生产活动。在这样的发展理念驱动下,不仅有助于减少生态环境破坏,而且有助于增强城市的生态适应能力和抗灾韧性,并提高城镇化与生态环境系统的耦合协调水平。第 3 因子中代表城市环境治理水平的 X_{18} (万人拥有公园个数)、 X_{21} (万人拥有出租车数量(辆))和 X_{23} (绿地面积)相关性最大,这体现了城市的绿色低碳建设

水平。城市的绿色低碳建设活动,不仅可以提升绿地覆盖率和扩大生态建设空间,而且可以通过减少能源消耗和碳排放以降低城市对环境的负荷,有助于减少环境污染与生态破坏和促进可持续发展与资源利用效率。而第 5 因子中的 X_{19} (人均二氧化碳排放量)相关性最大,其意味着单位人口的能源消费量大,对环境的压力也相对高。从发展现实可知,过高的人均二氧化碳排放量会导致环境污染和资源消耗,加剧生态环境系统的压力。第 6 因子中的 X_{22} (万元 GDP 用水量)相关性显著,这反映的是水资源利用情况。水资源利用量过高会导致水资源供需失衡、水污染风险增加和水资源利用效率低下,对城市供水和农业灌溉带来不利影响,进而导致城镇化与生态环境系统的耦合协调水平下降。

表 7 旋转后的因子载荷矩阵
Table 7 Factor loading coefficient after rotation

指标 Index		成分 Component					
		1	2	3	4	5	
X_{16}	生态环境质量	0.886	-0.209	-0.136	0.073	0.011	0.070
X_{17}	森林覆盖率/%	0.883	-0.084	-0.044	-0.024	0.018	-0.065
X_{18}	地表水水质优良率/%	-0.037	0.156	0.662	-0.163	0.247	0.014
X_{19}	万人拥有公园个数/个	0.109	-0.038	-0.037	0.016	0.873	-0.009
X_{20}	城市空气质量优良天数比例/%	0.677	0.078	0.170	-0.215	0.377	0.008
X_{21}	绿地面积/hm ²	-0.079	-0.057	0.717	0.144	-0.277	0.026
X_{22}	万元 GDP 用水量/m ³	0.076	0.053	0.096	-0.065	-0.020	0.909
X_{23}	万人拥有出租车数量(辆)市辖区	-0.111	-0.231	0.642	0.084	-0.150	0.099
X_{24}	人均二氧化碳排放量/t	-0.297	0.759	0.093	-0.013	0.072	-0.069
X_{25}	园林绿化投资占比/%	-0.245	0.002	-0.442	0.001	-0.214	0.044
X_{26}	一般工业固体废物综合利用率/%	-0.078	-0.474	-0.002	0.590	0.246	0.239
X_{27}	污水处理厂集中处理率/%	-0.364	-0.065	-0.030	0.093	0.009	0.385
X_{28}	生活垃圾无害化处理率/%	-0.072	0.082	0.061	0.786	-0.092	-0.081
X_{29}	单位 GDP 工业废水排放量/t	0.133	0.669	-0.067	0.367	0.030	0.028
X_{30}	单位 GDP 工业烟(粉)尘排放量/t	-0.067	0.700	-0.140	-0.197	-0.077	0.074

3.4 综合分析

由以上分析可知,城镇化与生态环境系统耦合协调水平受到城镇化影响因素和生态环境影响因素两方面的综合作用(图 8)。其综合作用因子主要包括城镇化状态、城市和谐状态、城市总体生态状况、城市对生态环境治理投入程度、城市绿色低碳建设程度以及水资源利用情况。城镇化率的提高带来合理的公共服务设施建设和运营管理,从而促进城镇化与生态环境系统的耦合协调,地方一般公共预算收支比的增加推动城镇化的进程,并提供更多的财政资源用于生态环境保护以实现城镇化与生态环境的协调发展。建成区面积比重的增加可以提高城镇化水平,然而也可能导致环境问题,影响居民的生活质量和城镇化与生态环境的协调。第二产业通常会导致大量的污染和资源消耗,相反大力发展第三产业会减少污染和降低对环境的影响,因而当第三产业的比重提升时会减轻环境负担,提高城镇化与环境的耦合协调水平。稳定和谐的社会环境可以推动城镇化的进程,同时在城市和谐的情况下,也有助于降低城市的环境负担和生态破坏,提高城镇化与生态环境的耦合协调水平。城市总体生态状况良好、城市对生态环境治理投入充足且合理、城市绿色低碳建设程度较高时有助于提高城镇化与生态环境系统的耦合协调水平,这是因为政府通过保护和改善城市生态环境,提高生态系统的稳定性和多样性,提升城市的内在抵抗力和外在的承载力,城镇化与生态环境系统的协调性可以得到有效提升。最后,高效的水资源利用率,有利于提高城镇化与生态环境系统的耦合协调水平。单位 GDP 用水量大的城市亟需转变发展方式,因为水资源的低效利用易对生态环境造成一定的压力,进而导致水资源的过度开采、水污染加剧等问题,对生态系统的平衡和健康造成负面影响,从而降低城镇化与生态环境系统的耦合协调水平。

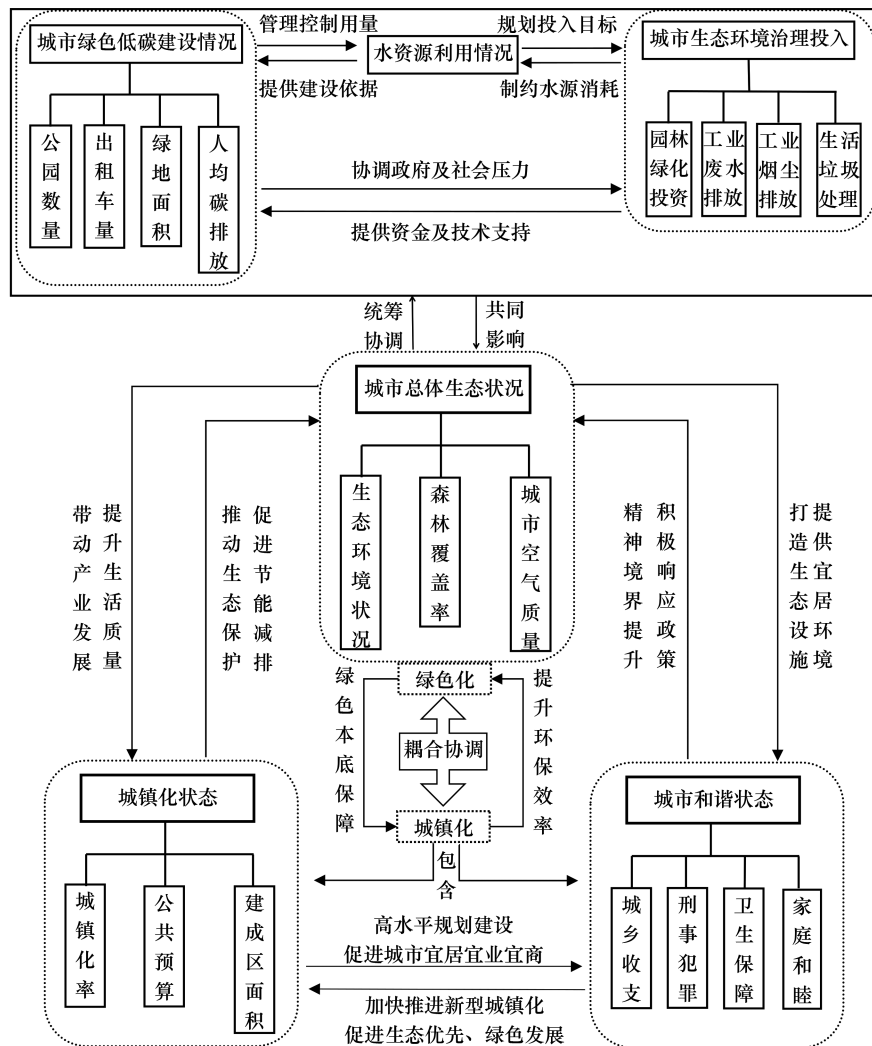


图 8 影响因素的交织耦合图

Fig.8 Interleaved coupling diagram of influencing factors

4 结论

4.1 结论

基于构建的城镇化与生态环境系统综合评价指标体系,运用耦合协调模型与冷热点分析法从市域层面对中国 2010—2020 年城镇化与生态环境系统的耦合协调发展水平进行测度,对高低值区空间集聚特征进行剖析,并且从城镇化与生态环境系统综合评价的六个维度出发对其时空格局演变进行影响因素分析。结果表明:

(1)从城镇化发展水平看,在空间上呈现“东强西弱”“多点开花”的空间格局,2020 年中等值区及以上等级东西部城市之比为 3:1,且研究期出现了低水平区向高水平区转移态势,低值区比例下降 21%,较低值区比例上升 12%,中等值区比例上升 6%。从空间关联格局看,显著 HH 区集中分布于沿海地区,显著 LL 区在西北、西南、中部地区大面积的集中连片分布,显著 HL 区在显著 LL 区边缘散落分布,显著 LH 区沿东部海岸线与显著 HH 区穿插分布。

(2)从生态环境建设水平看,在空间上呈现“南强北弱”“多点开花”的空间分布特征,2020 年中等值区及以上等级南北方城市之比为 2.5:1,且研究期出现了低水平区向高水平区转移态势,低值区比例下降 3%,较低

值区比例保持不变,中等值区比例上升4%。从空间关联格局看,显著HH区主要分布于东南地区,显著LL区主要在中北、西北、中南地区大面积的集中连片分布,显著HL区集中分布于西北、华北、东北地区,显著LH区主要在显著HH区周边散落分布。

(3)从耦合协调度来看,两大系统之间的磨合作用持续向好,轻度失调及以下协调发展类型的城市数量不断下降,整体迈入转型发展阶段。在空间分布上东部沿海地区整体的耦合协调度水平高于内陆地区,处于协调发展阶段的城市有90%位于沿海地区,且2020年已演变至南方地区高于北方地区的空间格局。从城镇化与生态环境耦合协调关系看,在研究期总体上呈均衡发展型状态,但是有向生态环境滞后型发展趋势,2010、2020年均均衡发展型占比为75.76%、68.35%,而生态环境滞后型占比分别为20.88%、30.30%。在空间分布上呈南-北差异化格局,2020年生态环境滞后型南北方城市之比为4:6。

(4)从耦合协调度冷热点空间格局来看,热度总体呈现东部沿海与西部内陆的“V”型对立状空间分布格局,其中热点、次热点区域均分布于沿海长三角、珠三角地区经济发达地市,冷点、次冷点区域主要分布于黄土高原、云贵高原地区且逐渐向黄土高原地区收缩。

(5)从影响因素看,经过主成分分析提取的影响因素,一部分仅对于城镇化进程或生态环境发展产生影响,一部分对于城镇化与生态环境系统耦合协调水平产生综合作用,这部分影响因素主要包括城镇化状态、城市和谐状态、城市总体生态状况、城市对生态环境治理投入程度、城市绿色低碳建设程度以及水资源利用情况。

4.2 讨论

本研究从城镇化状态、和谐、公平三个维度和从生态环境美丽、绿色、治理三个维度出发分别构建了城镇化与生态环境系统综合评价指标体系,并基于统计数据对中国市域尺度下的发展建设水平与耦合协调度进行评价与测度。在城镇化发展水平方面,虽然与已有研究结果一致^[49],即城镇化水平高值区集中在东部沿海经济发达地市且在空间上呈现出由高到低向中西部地区延伸的分布格局,但本研究从市域尺度进一步揭示了我国城镇化发展水平在地域上的不均衡现象,即城镇化高值区主要分布在珠三角、长三角、京津冀地区和中西部地区的省会城市、经济强市和都市圈,省域尺度下城镇化发展水平的连绵态势、梯度过渡格局被打破。在生态环境建设水平方面,与已有研究结果都显示出生态环境建设水平高值区集中分布于东部沿海、中南与西南地区且中北部地区则普遍不高^[49-50],但本研究显示出西部地区生态环境建设水平虽然有绿色基底支撑但大部分地区的规划建设水平依然需要大幅提升。究其原因,中西部较东南沿海地区规划建设水平相对不高,加之地貌类型跨越不同的维度带,使得市域尺度下的中微观特征更加明显,可能导致生态建设水平在综合维度并没有心理预期层面的非常高。在耦合协调度方面,与已有相关研究结果总体一致^[51],即2010—2020年耦合协调度呈现出明显的上升趋势且两大系统之间的关系由拮抗转变为磨合,表明中国城镇化与生态环境建设迈入转型发展阶段。除时间维度外,本研究在空间上发现东、中、西部地区依次递减的阶梯状分布格局明显且南方地区凭借优越的资源环境本底耦合协调度明显高于北方地区。同时,相比较与已有研究^[51],本研究从市域尺度出发评价进一步揭示不同区域的差异性,耦合协调度高值区集中分布于京津冀、长三角、珠三角城市群且以北京、上海、深圳等核心城市表现的更为明显。此外,长三角、珠三角城市群的高水平耦合协调度水平区在分布数量与面积均明显高于京津冀城市群。

此外,本研究还存在一定的不足之处。在构建指标体系方面,首先,受制于指标数据的可获取性,部分指标的综合性和与所在维度的匹配性略有不足,在未来可以进行省域和县域层面的研究时可以进一步的仔细斟酌。其次,本研究对传统的人口、空间、经济、社会城镇化综合评价维度,生态环境压力、状态、生态响应能力综合评价维度重新融合再创建,以进一步提升两系统综合评价的深度,但是也损失一定的针对性,因此构建既能深入评价城镇化与生态环境系统,又具有针对性、分类清晰的指标体系是未来进一步研究的重要方向。在研究方法方面,首先,虽然本研究采用熵权综合评价法进行权重和综合评价的计算这一相对客观的评价方法,但是与现有研究成果相比缺乏相关领域专家学者对各因子的重要性作出的独立判断的一种定性分析方法,因此

采用综合权重的分析评价也是未来进一步深化的方向。同时由于我国地域辽阔、地理自然环境多样,各地市的市情不同且南北方地区气候环境差异化显著,因此并没有给出相应的发展对策,未来可以流域、地域空间界限层面出发进行针对性的分析和对策讨论。

参考文献 (References):

- [1] 陈明星,叶超,陆大道,隋昱文,郭莎莎. 中国特色新型城镇化理论内涵的认知与建构. 地理学报, 2019, 74(4): 633-647.
- [2] 埃比尼泽·霍华德著(Ebenezer Howard). 明日的田园城市. 北京: 商务印书馆, 2000.
- [3] Pasche M. Technical progress, structural change, and the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 2002, 42(3): 381-389.
- [4] Selden T M, Song D Q. Environmental quality and development: is there a kuznets curve for air pollution emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 1994, 27(2): 147-162.
- [5] Stokey N L. Are there limits to growth? *International Economic Review*, 1998, 39(1): 1.
- [6] Jaeger W. A theoretical basis for the environmental inverted U curve and implications for international trade[D]. Massachusetts, USA: Williams College. 1998.
- [7] Bai X M, Surveyer A, Elmqvist T, Gatzweiler F W, Güneralp B, Parnell S, Prieur-Richard A H, Shrivastava P, Siri J G, Stafford-Smith M, Toussaint J P, Webb R. Defining and advancing a systems approach for sustainable cities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2016, 23: 69-78.
- [8] Fischer J, Gardner T A, Bennett E M, Balvanera P, Biggs R, Carpenter S, Daw T, Folke C, Hill R, Hughes T P, Luthé T, Maass M, Meacham M, Norström A V, Peterson G, Queiroz C, Seppelt R, Spierenburg M, Tenhunen J. Advancing sustainability through mainstreaming a social-ecological systems perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 14: 144-149.
- [9] Harper C L, Snowden M. *Environment and Society: Human Perspectives on Environmental Issues*. Sixth edition. New York, NY: Routledge, 2017.
- [10] 陈晓红,周宏浩. 城市化与生态环境关系研究热点与前沿的图谱分析. 地理科学进展, 2018, 37(9): 1171-1185.
- [11] 马世骏,王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.
- [12] 黄金川,方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, 2003, 22(2): 211-220.
- [13] 刘耀彬. 区域城市化与生态环境耦合特征及机制——以江苏省为例. 经济地理, 2006, 26(3): 456-462.
- [14] 陈晓红,万鲁河,周嘉. 城市化与生态环境协调发展的调控机制研究. 经济地理, 2011, 31(3): 489-492, 499.
- [15] 赵安周,李英俊,卫海燕,陈晓红. 西安市城市化与城市生态环境耦合协调发展研究. 水土保持研究, 2012, 19(6): 152-156.
- [16] 刘艳艳,王少剑. 珠三角地区城市化与生态环境的交互胁迫关系及耦合协调度. 人文地理, 2015, 30(3): 64-71.
- [17] 张荣天,焦华富. 中国省际城镇化与生态环境的耦合协调与优化探讨. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 12-17.
- [18] 崔木花. 中原城市群9市城镇化与生态环境耦合协调关系. 经济地理, 2015, 35(7): 72-78.
- [19] 孙黄平,黄震方,徐冬冬,施雪莹,刘欢,谭林胶,葛军莲. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制. 经济地理, 2017, 37(2): 163-170, 186.
- [20] 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.
- [21] 赵建吉,刘岩,朱亚坤,秦胜利,王艳华,苗长虹. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素. 资源科学, 2020, 42(1): 159-171.
- [22] 熊曦,肖俊. 武陵山片区城镇化与生态环境耦合协调度时空分异——以六个中心城市为例. 生态学报, 2021, 41(15): 5973-5987.
- [23] 初楠臣,张平宇,吴相利,李鹤,杨奇峰. 俄罗斯东部城镇化与生态环境协调发展的时空演变特征. 生态学报, 2021, 41(24): 9717-9728.
- [24] 任祁荣,于恩逸. 甘肃省生态环境与社会经济系统协调发展的耦合分析. 生态学报, 2021, 41(8): 2944-2953.
- [25] 冯霞,刘新平. 江苏省城镇化与生态环境系统耦合协同发展的路径选择. 干旱区地理, 2016, 39(2): 420-427.
- [26] 王雅俊. 中国西部地区工业化、城镇化与产业生态化的关系——基于PVAR模型的分析. 资源与生态学报(英文版), 2021, 12(1): 68-79.
- [27] 宓泽锋,曾刚,尚勇敏,陈思雨,朱菲菲. 中国省域生态文明建设评价方法及空间格局演变. 经济地理, 2016, 36(4): 15-21.
- [28] 邓宗兵,宗树伟,苏聪文,陈征. 长江经济带生态文明建设与新型城镇化耦合协调发展及动力因素研究. 经济地理, 2019, 39(10): 78-86.
- [29] 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.
- [30] 王富喜,毛爱华,李赫龙,贾明璐. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析. 地理科学, 2013, 33(11): 1323-1329.
- [31] 张改素,魏建飞,丁志伟. 中国镇域工业化和城镇化综合水平的空间格局特征及其影响因素. 地理研究, 2020, 39(3): 627-650.
- [32] 肖圣,多玲花,邹自力. 城镇化与水生态环境耦合协调时空演变及驱动因素——以长江中下游城市群为例. 上海国土资源, 2022, 43

(3): 61-68.

- [33] Fan Y P, Fang C L, Zhang Q. Coupling coordinated development between social economy and ecological environment in Chinese provincial capital cities-assessment and policy implications. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 289-298.
- [34] 冯俊华, 张路路. 陕西省新型城镇化与生态环境协调度研究. *生态学报*, 2022, 42(11): 4617-4629.
- [35] 杨立, 黄涛珍. 基于耦合协调度模型的生态文明与新型城镇化作用机理及关系研究. *生态经济*, 2019, 35(12): 60-66.
- [36] 毕国华, 杨庆媛, 刘苏. 中国省域生态文明建设与城市化的耦合协调发展. *经济地理*, 2017, 37(1): 50-58.
- [37] 方宁, 张茜, 杨东旭, 杨芳. 湖南省生态文明建设与城镇化时空演变及耦合协调研究. *地域研究与开发*, 2020, 39(6): 59-64.
- [38] 孙钰, 姜宁宁, 崔寅. 京津冀生态文明与城市化协调发展的时序与空间演变. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(2): 138-147.
- [39] 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.
- [40] 祁鹏卫, 张贤. 重庆市县域生态文明建设与城镇化耦合协调分析. *生态经济*, 2022, 38(9): 221-227.
- [41] 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.
- [42] 康艳青, 刘羽晴, 朱永明. 沿黄城市生态保护与高质量发展的耦合协调性分析与预测. *生态经济*, 2022, 38(10): 190-197.
- [43] 熊建新, 王鑫滨, 赵迪, 刘亚华, 王静, 刘璐. 城镇化进程中生态承载力系统耦合时空格局及影响因素——以洞庭湖区为例. *经济地理*, 2022, 42(10): 83-91.
- [44] 刘浩, 马琳, 李国平. 京津冀地区经济发展冷热点格局演化及其影响因素. *地理研究*, 2017, 36(1): 97-108.
- [45] 靳海攀, 胡振华. 湖南省县域人口与经济差异测度研究. *湖南工业大学学报: 社会科学版*, 2020, 25(2): 65-74.
- [46] 危小建, 辛思怡, 张颖艺, 龙英豪, 张茜. 不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例. *生态学报*, 2023, 43(18): 7585-7597.
- [47] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 肖建设, 扎西拉旦, 颜玉倩, 陈国茜, 史飞飞. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [48] 范春苗, 王志泰, 汤娜, 邓国平. 基于形态学空间格局和空间主成分的贵阳市中心城区生态网络构建. *生态学报*, 2022, 42(16): 6620-6632.
- [49] 赵杨, 王京, 潘为华. 中国省域新型城镇化水平与绿色发展水平的区域特征及其影响机制. *经济地理*, 2023, 43(9): 1-9.
- [50] 杨新梅, 黄和平, 周瑞辉. 中国城市绿色发展水平评价及时空演变. *生态学报*, 2023, 43(4): 1353-1365.
- [51] 张国俊, 王珏晗, 吴坤津, 许志桦. 中国三大城市群经济与环境协调度时空特征及影响因素. *地理研究*, 2020, 39(2): 272-288.