北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调关系

王敏 郭广钰

Coupling and coordination relationship between urbanization and eco-environment in Shanghai metropolitan area: empirical analysis based on panel data from 2011 to 2020

Wang Min, Guo Guangyu

引用本文:
王敏, 郭广钰. 上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调关系[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7):101-111. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230216
Wang Min, Guo Guangyu. Coupling and coordination relationship between urbanization and eco-environment in Shanghai metropolitan area: empirical analysis based on panel data from 2011 to 2020[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7):101-111. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230216

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230216

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于GTWR模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应

Spatiotemporal response of ecosystem service value in Jinan metropolitan area to urban expansion based on GTWR model

北京林业大学学报, 2024, 46(1): 104-118. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220489

京津冀地区生态基础设施生境质量产业发展耦合协调性分析与预测

Coupling coordination and prediction analysis of ecological infrastructure, habitat quality and industrial development in the Beijing-Tianjin-Hebei region of northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 96-105. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200346

北京市城镇化地区植物多样性评价

Evaluation on plant diversity in urbanization area of Beijing City

北京林业大学学报, 2022, 44(8): 48-55. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210257

中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析

Coupling and long-term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China

北京林业大学学报, 2022, 44(10): 129-141. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220257

震后生态恢复初期植被土壤的耦合关系研究

Coupling relationship between vegetation and soil in the early stage of ecological restoration after earthquake: a case study of Weizhou Town in Wenchuan County and Hanwang Town in Mianzhu City of Sichuan Province, southwestern China

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 53-63. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200289

基于碳汇和游憩服务协同提升的北京市第二道绿化隔离地区郊野公园环空间布局优化

Spatial layout optimization of country parks in the second green belt of Beijing municipality area based on the coordinated improvement of carbon sequestration and recreational services

北京林业大学学报, 2022, 44(10): 142-154. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220203

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230216

上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调关系
——基于 2011—2020 年面板数据的实证分析

王　敏[1,2]　　郭广钰[1]
（1. 同济大学建筑与城市规划学院景观学系，上海 200092；2. 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室水绿生态智能分实验中心，上海 200092）

摘要:【目的】研究都市圈城镇化与生态环境耦合协调的交互关系，旨在探索区域经济、社会与生态的高质量发展路径，为区域协同规划和可持续发展提供新视角。**【方法】**从“人口–社会–经济–空间”和“规模–压力–治理–效率”8 个维度构建城镇化与生态环境评价指标体系，以上海大都市圈为研究对象，以其涵盖的 9 个城市及上海市 16 个区为基本研究单元，基于 2011—2020 年的面板数据，运用耦合协调度模型，从城市和上海市辖区两个层面，在时间和空间两个维度，定量揭示上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调发展的时空分异特征。**【结果】**(1)2011—2020 年，上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调发展度呈现出从“基本协调”向“优化协调”演进的积极态势，但各地区发展水平和步调不均衡，在空间分布上呈现差异性。(2)城市层面，以上海中心城区、苏州–无锡–南通以及舟山 3 个片区为中心辐射同步发展，呈现多片区发展的空间格局。(3)上海市辖区层面，上海市中心城区耦合协调度水平整体优于上海市郊区，呈两极分化格局。**【结论】**2011—2020 年，上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调度稳步上升，但各地区差异较大，且空间分布不均衡。面对城镇化发展与生态环境建设错位的问题，本研究提出基于系统耦合协调视角的差异化国土空间规划和区域协同发展策略，为都市圈的高质量健康发展提供参考。

关键词：都市圈；协同发展；城镇化；生态环境；耦合协调度
中图分类号：TU984　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)07−0101−11
引文格式：王敏，郭广钰. 上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调关系——基于 2011—2020 年面板数据的实证分析[J]. 北京林业大学学报，2024，46(7)：101−111. Wang Min, Guo Guangyu. Coupling and coordination relationship between urbanization and eco-environment in Shanghai metropolitan area: empirical analysis based on panel data from 2011 to 2020[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 101−111.

Coupling and coordination relationship between urbanization and eco-environment in Shanghai metropolitan area: empirical analysis based on panel data from 2011 to 2020

Wang Min[1,2]　Guo Guangyu[1]
(1. Department of Landscape Architecture, College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Eco-SMART Lab, Key Laboratory of Ecology and Energy-Saving Study of Dense Habitat of Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: [**Objective**] This study on the interaction between metropolitan urbanization and coupling and coordination of ecological environment aims to explore the high-quality development path of regional economy, society and ecology and provide a new perspective for regional collaborative planning and sustainable development. [**Method**] Urbanization and ecological environment evaluation index system was

收稿日期: 2023−09−04　**修回日期:** 2024−04−03
基金项目: 国家自然科学基金项目(52178053)，上海市住房和城乡建设管理委员会 2023 年度重点科研项目(沪建科 2023-Z02-005)。
第一作者: 王敏，副教授，博士生导师。主要研究方向：蓝绿空间生态系统服务、城市绿地与生态规划设计、韧性景观与城市可持续。Email: wmin@tongji.edu.cn　地址：200092 上海市杨浦区四平路 1239 号。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

constructed from the eight dimensions of “population-social-economy-space” and “scale-pressure-governance-efficiency”. With the Shanghai metropolitan area as the research object and 9 cities and 16 districts of Shanghai as the basic research unit, the coupling coordination degree model was applied based on panel data from 2011 to 2020. This paper quantitatively reveals the spatio-temporal differentiation characteristics of the coupling and coordinated development of urbanization and ecological environment in Shanghai metropolitan area from the two dimensions of city and Shanghai jurisdiction. [**Result**] (1) From 2011 to 2020, the degree of coordinated development of coupling urbanization and ecological environment in Shanghai metropolitan area showed a positive trend of evolution from “basic coordination” to “optimized coordination”, but the development level and pace of different regions were uneven, and the spatial distribution showed differences. (2) At the urban level, the three districts of Shanghai Central City, Suzhou-Wuxi-Nantong and Zhoushan were developing simultaneously, showing a spatial pattern of multi-district development. (3) At the jurisdiction level of Shanghai, the coupling coordination degree in the downtown area of Shanghai was better than that in the suburbs of Shanghai, showing a polarization pattern. [**Conclusion**] From 2011 to 2020, the coupling coordination degree of urbanization and ecological environment in Shanghai metropolitan area increased steadily, but there were great differences among different regions and their spatial distribution was unbalanced. In the face of mismatch between urbanization development and ecological environment construction, this study proposes differentiated territorial spatial planning and regional coordinated development strategies based on the perspective of system coupling and coordination, so as to provide references for the high-quality and healthy development of metropolitan areas.

Key words: metropolitan area; synergistic development; urbanization; eco-environment; coupling coordination degree

我国城镇化进程带来经济增长与生活便利的同时，也给城市生态空间带来了挑战。一些大型城市与城市群面临生态资源保护不足、价值转化受阻、生态环境发展滞后，以及区域间生态服务功能差异等问题[1]。为此，国家提出了新型城镇化战略，旨在探索“城镇高质量发展”的城市转型发展新路径。在这个过程中，国土空间规划扮演着关键角色。随着“五级三类”国土空间规划体系的逐步完善，跨行政边界、区域尺度的生态空间体系构建变得尤为重要。这不仅有助于实现“多规合一”，也是推进生态环境保护和新型城镇化发展的重要支撑。城市群与都市圈同时具有城市空间的结构特征和国土空间的尺度规模[2]。都市圈作为中国城镇化的重要空间单元，其空间结构和组织方式对整个国土空间的规划实践和政策制定具有重大影响，是探索和实现城镇高质量发展的重要一环[3]。为实现经济、社会和生态环境的整体优质发展，都市圈需要提升城市发展质量和环境宜居度。因此，有必要从系统耦合协调的视角，对都市圈尺度国土空间规划进行深入研究，提出有效的对策建议。以上海大都市圈为代表的现代化城市群，进行城镇化与生态环境耦合协调发展的研究，有助于探索都市圈跨区域尺度的高质量城市建设和生态空间体系构建的发展路径。

城镇化与生态环境协调优质发展的关键是促进两个系统达到各自功能和整体功能最优，即二者在时间、功能和发展速度上实现良性耦合与协同完善[4]。正视城镇化对生态安全的威胁与城市发展的失衡问题，学者们愈加关注城市生态环境对可持续发展的影响，城镇化与生态环境间的交互耦合研究成为学术前沿，主要包括以下 3 个方面。一是关注城镇化对生态环境的影响，即由城镇化造成的城市生态环境风险升级。如 Alberti 等[5]综述了不同城市模式产生不同生态效应的实证证据；岳邦瑞等[6]提出土地覆被变化影响生态系统服务的形成与供给。二是揭示生态环境对城市发展的制约作用，多侧重城市资源禀赋及生态环境对城镇化的响应研究。如徐海龙等[7]基于 3 种生态安全格局，进行了城市用地空间扩展的多情景模拟；Wu 等[8]指出水资源短缺是制约部分高度城镇化城市的普遍因素。三是探索城镇化与生态环境间的耦合作用关系。理论研究方面，Kijima 等[9]提出城市与生态环境间存在环境库兹涅茨 EKC 倒 U 型曲线及非线性关系。实证研究方面，Shafiei 等[10]证实了城镇化和生态环境间存在 U 型曲线变化关系，邵明等[3]强调了自然和社会经济结构的相互作用对城市群发展的限制。在研究方法上，学者常采用多方法交叉叠合的方式，包括耦合协调模型[7]、系统动力学模型[11]和动态计量分析[12]等。在研究尺度上，涉及城市、城市群或流域等多尺度研究，同时中国国土空间规划逐渐重视跨行政边界的大尺度规划，更多学者从城市群等区域尺度开展研究。如针

对珠三角地区[13]、长江流域地区[14]等多地域进行的耦合协调关系的实证研究。

综上所述，关于城镇化与生态环境关系的研究思路已由单向影响机制转为耦合协调的交互探索；研究方法由基于现状评价的静态定性分析转为多时空维度的定量动态评价；研究对象与尺度更注重多尺度、多要素及多时空维度的交互作用研究。但现有研究仍存在不足。首先，长三角城市群作为研究对象备受关注，而上海大都市圈作为其一体化发展格局的重要部分却受到忽视。其次，以都市圈为对象的研究中，城市尺度的研究较多，而区县尺度的考察分析缺乏。基于此，本文以上海大都市圈“1 + 8”城市群为研究区域，构建城镇化系统与生态环境系统综合评价指标体系，基于 2011—2020 年面板数据，聚焦城市和区县两个空间尺度，运用耦合协调度模型定量分析两系统时空演变特征，旨在揭示 2011—2020 年间上海大都市圈城镇化与生态环境协调发展的基本规律，以期为都市圈未来高质量健康发展提供参考。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究对象

以上海大都市圈为研究对象，范围包括上海、无锡、常州、苏州、南通、宁波、湖州、嘉兴、舟山在内的“1 + 8”市域行政区域。该都市圈地处长三角核心区，陆域总面积达 5.6 万 km^2，以长三角 1/6 的陆域面积承载了长三角 1/3 的人口和约 1/2 的经济总量，呈现空间集约高效的城镇化空间形态。随着长三角一体化的国家战略地位提升，上海大都市圈作为承接我国经济高质量发展的最重要载体之一，是国家新型城镇化的主体区[15]，对城镇化与生态环境的协同优质发展提出了更高的要求。

1.2　数据来源

研究基于上海大都市圈“1 + 8”城市群 2011—2020 年的面板数据，数据来源于《中国环境年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国城市建设年鉴》及各城市及辖区的相关年鉴。鉴于数据的完整性和权威性，对个别缺失及异常数据采用插值法、类比法等方法进行数据补全与修正。

2　研究方法

2.1　指标体系构建

研究以中国学术期刊出版总库（CNKI）为文献来源，检索了 2011—2022 年间的核心期刊和 CSSCI 文献。通过“关键词 = 耦合协调”AND“关键词 = 城镇/城市化”AND“关键词 = 生态环境”的检索式，共找到相关文献 185 篇，剔除综述和无数据文献后，最终得到 163 篇相关文献。

统计发现，城镇化指标系统通常涵盖“人口–社会–经济–空间”4 个维度，包括人口城镇化、经济城镇化、空间城镇化和社会城镇化 4 方面；生态环境指标系统可以从“规模–压力–治理–效率”4 个维度与城镇化指标系统对标，囊括生态规模、环境水平、环境治理、资源效率 4 个方面。考虑到各地区数据统计口径及类型的不同，基于数据的均衡性和可得性，兼顾指标体系数据量的平衡，研究最终在所梳理的 92 个指标中为两系统各选取了研究对象在 10 年内均覆盖的 9 项基础指标作为指标因子，以反映各研究单元城镇化与生态环境系统的综合发展水平，构建上海大都市圈城镇化和生态环境综合评价指标体系（表 1）。其中，人口城镇化包括市域人口密度和每万人拥有登记失业人数，旨在反映人口聚集度和就业机会水平，而每万人拥有登记失业人数作为衡量人口流动和就业机会的指标，间接反映城市对劳动力的吸引容纳能力，以评估人口城镇化的程度；社会城镇化包括每万人拥有医院床位数、每万人拥有中小学生人数、科教支出占一般公共预算支出比重，旨在衡量地区公共服务状况和科教水平；经济城镇化包括人均固定资产投资额、人均地区生产总值、第三产业增加值占地区生产总值比重，旨在从经济可持续性角度衡量城市经济活力和产业结构的发展；空间城镇化包括人均拥有居住面积，旨在对城市的空间布局和资源利用进行评估。生态规模包括建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积，旨在反映城市绿化水平和生态规模，为城市生态平衡提供依据；环境水平包括二氧化硫年日均浓度、可吸入颗粒物年日均浓度、年空气污染指数达优良的百分率，旨在反映城市空气质量状况和主要污染物来源；环境治理包括人均生活垃圾清运量、人均道路清扫面积、单位市域面积环保投入资金，旨在衡量城市卫生状况、清洁度和环境管理水平；资源效率包括市域单位面积 GDP，旨在衡量城市空间集约化利用与自然资源的经济潜力水平，以反映城市土地资源需求、生态足迹以及对自然资源的利用效率。指标设计采用比率或每万人为单位的标准化处理方式，将各地区的指标数据转换为相对统一的尺度，以消除指标上的绝对数值差异；指标权重采用熵值法和 CRITIC 权重法 2 种客观评价方法进行比较和验证后求取平均值确定综合权重，以全面反映各子系统指标数据的特征和规律。

2.2　综合评价模型

基于综合计算的权重和无量纲化后的指标值，根据主成分分析原理建立城镇化和生态环境综合评

表 1 上海大都市圈城镇化与生态环境系统指标体系及指标权重

Tab. 1 Index system and index weights of urbanization and ecological environment system in Shanghai metropolitan area

系统 System	子系统 Subsystem	具体指标 Specific index	属性 Attribute	熵值法 Entropy method	Critic权重 Critic weight	综合权重 Comprehensive weight	参考来源 Reference
城镇化系统 Urbanization system	人口城镇化 Population urbanization	市域人口密度/(人·km^{-2}) Urban population density/(person·km^{-2})	+	0.306 9	0.121 7	0.214 3	[16]
		每万人拥有登记失业人数 Registered unemployment per 10 000 people	−	0.032 1	0.109 6	0.070 9	[17]
		每万人拥有医院床位数 Number of hospital beds per 10 000 people	+	0.144 7	0.087 2	0.116 0	[17]
	社会城镇化 Social urbanization	每万人拥有中小学生人数 Number of primary and secondary school students per 10 000 people	+	0.105 0	0.109 1	0.107 0	[16]
		科教支出占一般公共预算支出比重 Proportion of expenditure on science and education in the general public budget/%	+	0.032 4	0.099 5	0.066 0	[18]
		人均固定资产投资额/元 Per capita investment in fixed assets/CNY	+	0.119 9	0.080 7	0.100 3	[18]
	经济城镇化 Economic urbanization	人均地区生产总值/元 Per capita regional GDP/CNY	+	0.091 8	0.068 5	0.080 2	[16]
		第三产业增加值占地区生产总值比重 Proportion of added value of the tertiary industry to regional GDP/%	+	0.104 6	0.137 6	0.121 0	[19]
	空间城镇化 Spatial urbanization	人均拥有居住面积 Per capita living space/m^2	+	0.062 6	0.186 1	0.124 3	[18]
生态环境系统 Eco-environment system	生态规模 Ecological scale	建成区绿化覆盖率 Green coverage rate of built-up area/m^2	+	0.044 0	0.176 8	0.110 4	[19]
		人均公园绿地面积 Per capita green park area/m^2	+	0.098 4	0.182 5	0.140 4	[19]
	环境水平 Environmental level	二氧化硫年日均浓度 Annual average daily concentration of sulfur dioxide /(μg·m^{-3})	−	0.013 5	0.080 1	0.077 3	[20]
		可吸入颗粒物年日均浓度 Annual average daily concentration of inhalable particulate matter/(μg·m^{-3})	−	0.031 3	0.074 7	0.092 0	[20]
		年空气污染指数达优良的百分率 Percentage of excellent annual air pollution index/%	+	0.035 0	0.091 7	0.207 7	[16]
		人均生活垃圾清运量 Per capita domestic garbage removal volume/t	+	0.055 2	0.099 4	0.077 3	[20]
	环境治理 Environmental governance	人均道路清扫面积 Per capita road clearing area/m^2	+	0.082 4	0.101 6	0.092 0	[21]
		单位市域面积环保投入资金 /(万元·km^{-2}) Environmental protection investment funds per unit city area/(10^4 CNY·km^{-2})	+	0.315 2	0.100 2	0.207 7	[22]
	效率水平 Efficiency level	市域单位面积GDP/(10^{8}元·km^{-2}) GDP per unit area of a city/(10^8 CNY·km^{-2})	+	0.325 0	0.093 0	0.209 0	[18]

价模型。

城镇化综合评价模型：$U_i = \sum_{j=1}^{n}\left(X'_{ij}W_{ij}\right)$ (1)

生态环境综合评价模型：$E_i = \sum_{j=1}^{n}\left(X'_{ij}W_{ij}\right)$ (2)

式中：U_i、E_i为第 i 个地区城镇化、生态环境综合指数，W_{ij}为第 i 个地区第 j 项指标的权重；X'_{ij}为第 i 地区第 j 项指标数值标准化后的值。

2.3 耦合协调度关系模型

耦合度作为物理学概念，描述两个或多个系统间关系的程度，即互相依赖的程度。耦合度值介于 0 到 1 之间，数值越大表示系统间更趋于良性共振耦合和有序发展状态，其具体模型如式(3)；在城镇化与生态环境两系统分析时，模型可表示如式(4)所示。

$$C_n = \left\{\frac{u_1 \cdot u_2 \cdots u_n}{[\prod u_i + u_j]}\right\}^{1/n} \tag{3}$$

$$C = \left\{\frac{U_i E_i}{(U_i + E_i)^2}\right\}^{1/2} \tag{4}$$

式中：C_n 为物理学中的耦合度，n 为耦合度模型子系统个数；C 为城镇化与生态环境之间的耦合度；u_1，u_2，…，u_n 为各系统的综合指数；u_i 为各系统的序参量；u_j 为具体的评估指标；U_i为第 i 个地区的城镇化综合指数，E_i为第 i 个地区的生态环境综合指数。

耦合度虽可以反映两系统间的相互作用强度，但难以衡量二者的协调水平。因此在耦合度模型基础上，进一步构建耦合协调度(D)模型。

$$D = \sqrt{CT},\quad T = \alpha U_i + \beta E_i \tag{5}$$

式中：T 为综合发展指数，α、β是城镇化和生态环境在系统中的权重，由于二者同等重要，取$\alpha = \beta = 0.5$。

参考相关学者研究[13]，根据耦合协调度 D 值大小，将耦合协调类型划分为 3 个类型和 5 个亚类

型。根据U_i和E_i的差异，比较两系统间的相对发展状态，划分为 3 种耦合协调特征，由此共得到 15 种子类型（表 2）。

3　结果与分析

3.1　城镇化综合水平时空演变特征

区域层面，上海大都市圈城市群城镇化质量整体呈上升趋势，城镇化综合指数均值从 2011 年 0.313 上升至 2020 年 0.412（图 1）。城市层面，9 市城镇化综合水平波动式上升，各城市间差异明显，在 2020 年呈现以上海市中心城区、苏州–南通、常州为核心的“多核”空间结构。上海市辖区层面，10 年间 16 个辖区城镇化综合水平缓慢提高，中心城区和郊区分异明显，呈两极分化局面（图 2）。其中，中心城区各辖区城镇化综合指数均值由 0.449 提升至 0.562，城镇化水平较高；郊区各辖区城镇化综合指数均值由 0.195 提升至 0.260，仍处于低水平状态。

2011—2020 年间，上海都市圈内 9 市城镇化综合水平在各阶段发展水平分化较大，大体呈现：上海中心城区 > 都市圈内 9 市 > 上海市郊区。具体来看，9 市增长步调存在差异：2011 年嘉兴（0.346）、南通（0.344）、无锡（0.332）、湖州（0.328）4 市的城镇化综合指数略高，位于上海大都市圈（0.313）之上；随着城市发展的加快，至 2016 年，苏州、常州等市城镇化水平明显提高，各市差异趋小；至 2020 年底，苏州（0.442）、无锡（0.426）、常州（0.450）、南通市（0.457）4 市的城镇化综合指数已经超过了整个都市圈的平均水平（0.412）。上海中心城区与郊区的差异显著：2011—2016 年二者增幅极缓，一是中心城区本身城镇化水平较高，增幅有限；二是上海郊区开发迟缓，致整体发展低下，其中，崇明区城镇化综合指数介于 [0.157，0.163]，城镇化水平最低，且 2011—2014 年间呈现下降趋势，主要原因是人均居住面积的减少。2016—2020 年，随着增幅的逐渐提升，中心

表 2　城镇化与生态环境耦合协调类型划分标准

Tab. 2　Classification criteria for the coupling and coordination of urbanization and ecological environment

类型 Category	耦合协调度 Coupling and coordination degree (D)	亚类型 Subcategory	系统比较 System comparison	子类型 Subtype	
协调发展 Coordinated development	[0.8 ~ 1.0）	优质协调 High-quality coordination（Ⅰ）	$U_i-E_i>0.1$	优质协调－城镇化受阻型 High-quality coordination-hindered urbanization type	Ⅰ-1
			$E_i-U_i>0.1$	优质协调－生态环境受阻型 High-quality coordination-ecological environment obstruction type	Ⅰ-2
			$0\leqslant\lvert E_i-U_i\rvert\leqslant0.1$	优质协调－同步发展型 High-quality coordination-synchronous development type	Ⅰ-3
	[0.7 ~ 0.8）	优化协调 Good coordination（Ⅱ）	$U_i-E_i>0.1$	优化协调－城镇化受阻型 Good coordination-hindered urbanization type	Ⅱ-1
			$E_i-U_i>0.1$	优化协调－生态环境受阻型 Good coordination-ecological environment obstruction type	Ⅱ-2
			$0\leqslant\lvert E_i-U_i\rvert\leqslant0.1$	优化协调－同步发展型 Good coordination-synchronous development type	Ⅱ-3
转型发展 Transformational development	[0.5 ~ 0.7）	基本协调 Basic coordination (Ⅲ)	$U_i-E_i>0.1$	基本协调－城镇化受阻型 Basic coordination-hindered urbanization type	Ⅲ-1
			$E_i-U_i>0.1$	基本协调－生态环境受阻型 Basic coordination-ecological environment obstruction type	Ⅲ-2
			$0\leqslant\lvert E_i-U_i\rvert\leqslant0.1$	基本协调－同步发展型 Basic coordination-synchronous development type	Ⅲ-3
不协调发展 Uncoordinated development	[0.3 ~ 0.5）	轻度失调 Mild imbalance (Ⅳ)	$U_i-E_i>0.1$	轻度失调－城镇化滞后型 Mild imbalance-hindered urbanization type	Ⅳ-1
			$E_i-U_i>0.1$	轻度失调－生态环境受阻型 Mild imbalance-ecological environment obstruction type	Ⅳ-2
			$0\leqslant\lvert E_i-U_i\rvert\leqslant0.1$	轻度失调－同步发展型 Mild imbalance-synchronous development type	Ⅳ-3
	（0.0 ~ 0.3）	严重失调 Severe imbalance（Ⅴ）	$U_i-E_i>0.1$	严重失调－城镇化受阻型 Severe imbalance-hindered urbanization type	Ⅴ-1
			$E_i-U_i>0.1$	严重失调－生态环境受阻型 Severe imbalance-ecological environment obstruction type	Ⅴ-2
			$0\leqslant\lvert E_i-U_i\rvert\leqslant0.1$	严重失调－同步发展型 Severe imbalance-synchronous development type	Ⅴ-3

注：U_i为第i个地区的城镇化综合指数，E_i为第i个地区的生态环境综合指数。Notes: U_i, comprehensive index of urbanization in the ith region. E_i, comprehensive index of ecological environment in the ith region.

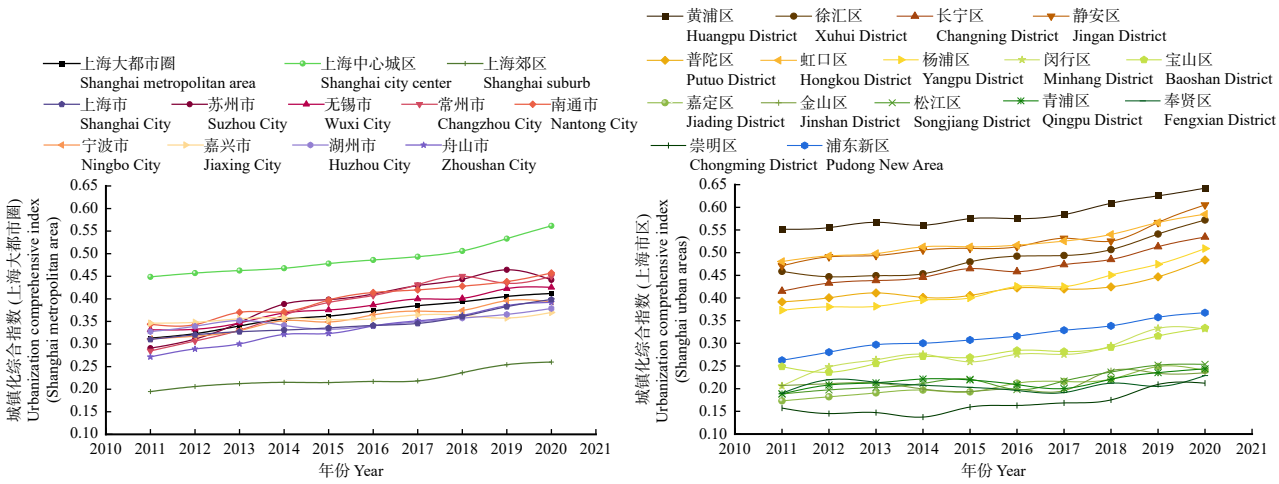


图 1 2011—2020 年上海大都市圈城及上海市各区城镇化水平发展趋势

Fig. 1 Development trend of comprehensive levels of urbanization in Shanghai metropolitan area and various districts in Shanghai during 2011−2020

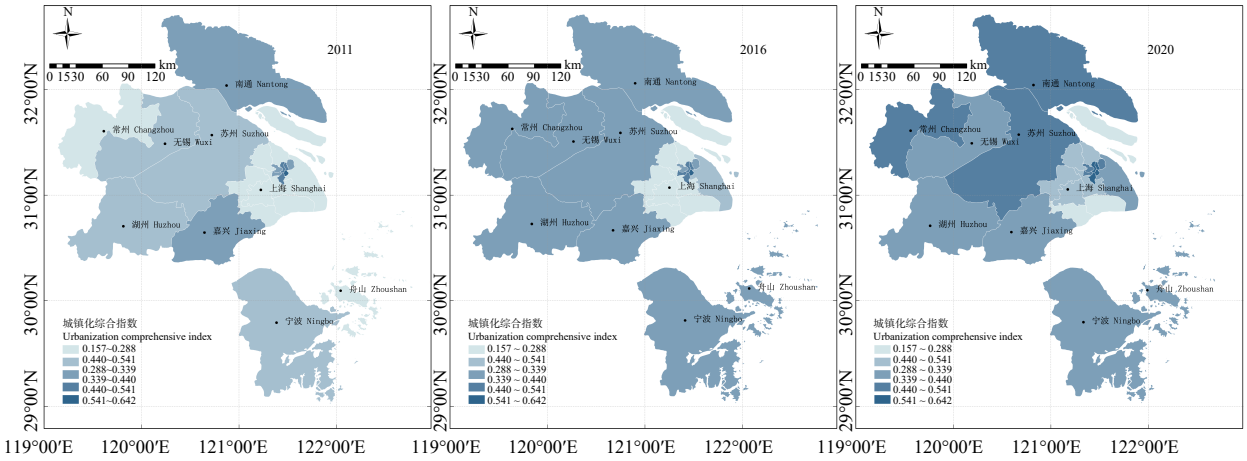


图 2 2011—2020 年上海大都市圈城镇化综合发展水平演变

Fig. 2 Evolution of comprehensive level of urbanization in Shanghai metropolitan area during 2011−2020

城区各辖区城镇化综合指数均值由 0.486 增至 0.562。其中，黄浦区始终处于高值区间，普陀、静安由于政府科教支出资金比例的缩小在个别年份出现小幅降低，其他 4 区保持同步发展状态；郊区各辖区城镇化综合指数均值由 0.217 增至 0.260，始终处于低城镇化水平状态。

3.2 生态环境综合水平时空演变特征

区域层面，上海大都市圈城市群生态环境水平整体呈上升趋势，生态环境综合指数均值从 2011 年 0.256 上升至 2020 年 0.376(图 3)。城市层面，

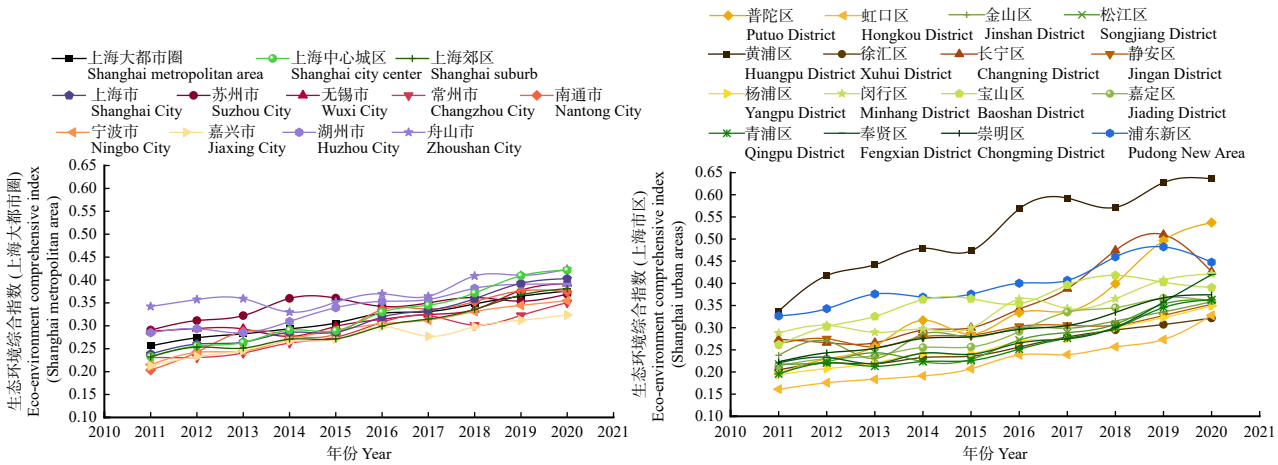


图 3 2011—2020 年上海大都市圈及上海市各区生态环境水平发展趋势

Fig. 3 Development trend of comprehensive levels of eco-environment in Shanghai metropolitan area and various districts in Shanghai during 2011−2020

9 市生态环境综合水平差异逐渐缩小，至 2020 年呈现各地多片区协同发展的格局(图 4)。上海市辖区层面，中心城区和郊区生态环境综合水平大致相同，但郊区由于单位面积环保投入资金较中心城区偏低，与中心城区生态环境指数的差距逐年增加。

2011—2020 年间，上海都市圈内 9 市生态环境综合水平差距逐步缩小。具体来看，2011 年，舟山(0.342)、苏州(0.291)、无锡(0.288)、湖州(0.285) 4 市的生态环境综合水平领先，高于都市圈平均水平(0.256)，南通市(0.203)最低；至 2016 年，湖州(0.353)、舟山(0.370)两市生态环境综合水平居首位，南通市因人均公园绿地面积等指标的提高，生态环境综合水平显著大幅提升，位于都市圈平均水平(0.335)之上；至 2020 年，各城市间差异进一步缩小，仅苏州(0.369)、宁波(0.355)、常州(0.351)、嘉兴(0.324) 4 市较都市圈平均水平(0.376)略低。上海市辖区层面，10 年间各辖区生态环境综合水平波动较大：2011—2016 年间，除崇明、嘉定、虹口、杨浦区保持稳步增长外，其余辖区在不同年份均出现短暂下降，其中，普陀和金山区由于空气质量指标的下降而变化最大；2016—2020 年，徐汇、静安、虹口等区增长较为稳健，其余辖区在个别年份生态环境综合水平均出现下降，分析原因大都由于市域单位面积环保投入资金及人均道路清扫面积的变化引起。

3.3　耦合协调度时空演变特征

3.3.1　耦合协调等级演变特征分析

时间维度上，10 年间，上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调度(D)不断提升，由 0.502 提升至 0.700，耦合协调类型由“转型发展状态”转为“协调发展状态”(图 5)。2011—2016 年间，城市层面，除南通和无锡市在 2014 年由于生态环境综合指数下降及城镇化综合指数提升，耦合程度小幅下降外，各市均呈稳步增长态势。其中，南通市增幅最大，D 值由 0.447 增至 0.605，由轻度失调转为基本协调。苏州、无锡、湖州、舟山市 D 值均高于 9 市平均水平，始终维持在基本协调阶段。至 2016 年，都市圈内 9 市已

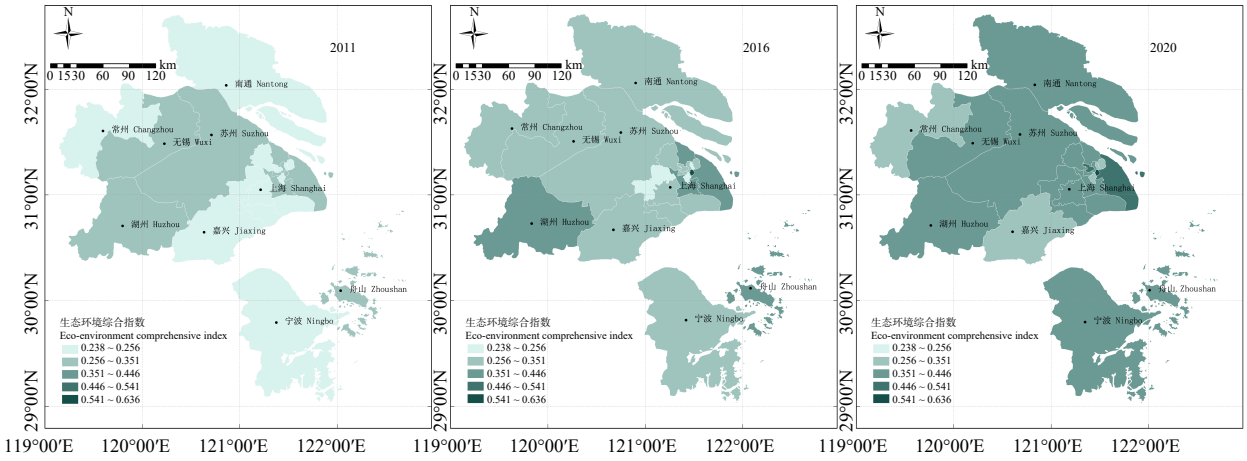


图 4　2011—2020 年上海大都市圈生态环境综合发展水平演变

Fig. 4　Evolution of comprehensive level of eco-environment in Shanghai metropolitan area during 2011−2020

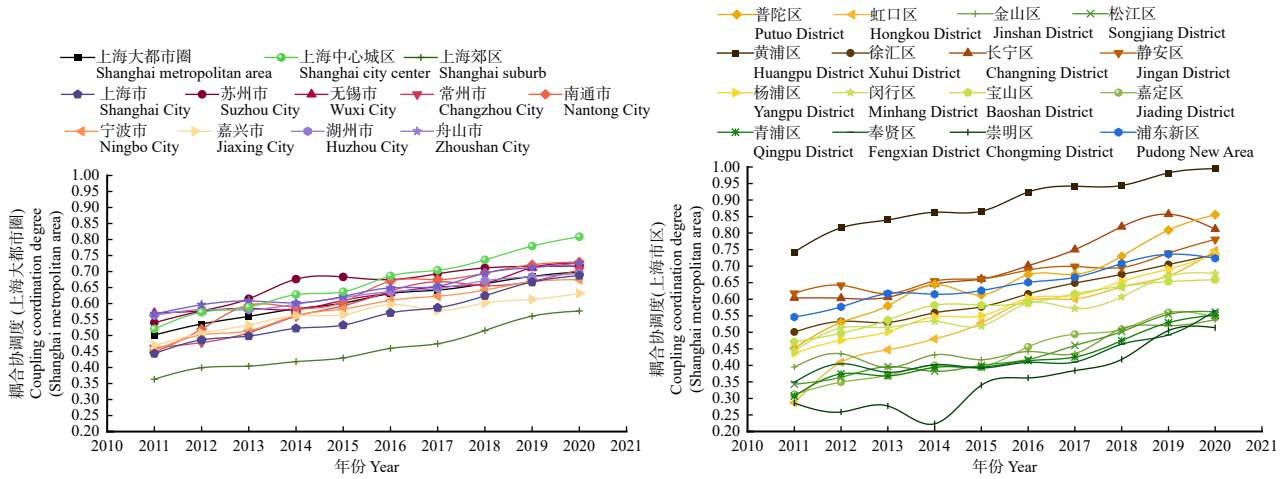


图 5　2011—2020 年上海大都市圈及上海市各区城镇化与生态环境耦合协调度发展趋势

Fig. 5　Development trend of coupling coordination degree between urbanization and eco-environment in Shanghai metropolitan area and various districts in Shanghai during 2011−2020

全部步入基本协调亚类型，耦合协调类型以“转型发展状态”为主。上海市辖区层面，各区耦合协调度波动式提升，崇明区波动最为明显，5 年中 *D* 值呈先下降后提升的趋势，原因是 2011—2014 年间社会和空间城镇化指数的下降，导致城镇化发展相对滞后。至 2016 年底，嘉定、金山、松江、青浦、奉贤、崇明区处于轻度失调状态，其他辖区均为基本协调阶段；黄浦、长宁区最优，分别到达优质协调和优化协调阶段。2016—2020 年间，城市层面宁波、嘉兴、湖州 3 市保持在基本协调阶段，处于转型发展状态，其余城市均步入协调发展状态。上海市内，除长宁区在 2019 年由于生态环境综合指数值下降导致 *D* 值同步下降外，其余各辖区均稳步增长。至 2020 年 16 个辖区全部脱离“不协调发展状态”，其中黄浦、长宁区于 2020 年达到优质协调阶段。

空间维度上，上海大都市圈城镇化与生态环境的耦合协调度呈现出以上海市区、苏州–无锡–南通、舟山 3 个片区为中心辐射同步发展的格局（图 6）。上海郊区耦合协调度提升最为缓慢；苏州–无锡、舟山两个片区周边城市耦合协调度水平提升明显，各市间存在良性同步发展趋势。

3.3.2 耦合协调类型识别及演变路径分析

依据表 2 的耦合协调度等级与类型划分标准，按照城镇化与生态环境综合指数的差异，划分各地区耦合协调类型，得到城镇化与生态环境耦合协调类型演变图（图 7）。总体来看，两系统的耦合协调相对发展状态呈现由“同步发展为主，兼城镇化受阻”向“同步发展为主，兼生态环境受阻” 转变的演变态势。

2011—2014 年，大部分地区处于同步发展型（62.5%），25% 的地区处于城镇化受阻型，仅有 12.5% 地区属于生态环境受阻类型。说明此期间大部分地区生态环境和城市发展的步调一致，但部分地区由于前期大规模的城镇化建设，对生态环境发展的关注不高，形成城镇化建设与生态环境发展的错位。2014—2017 年，同步发展型（62.5%）仍占较大比重，城镇化受阻型（20.8%）占比小幅下降，生态环境受阻型（16.7%）占比略有上升，说明在此期间各地区对生态环境的建设已初见成效，城镇化发展受阻的问题日益解决。2017—2020 年，同步发展型（54.2%）小幅下降，城镇化受阻型（20.8%）占比未变，生态环

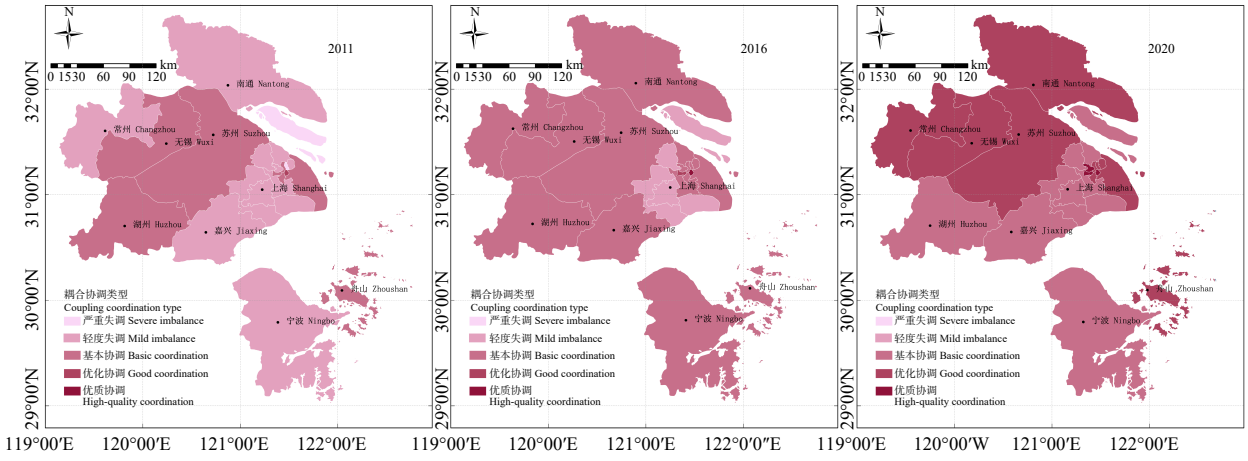


图 6 2011—2020 年上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调度演变格局

Fig. 6 Evolution pattern of coupling coordination degree between urbanization and eco-environment in Shanghai metropolitan area during 2011−2020

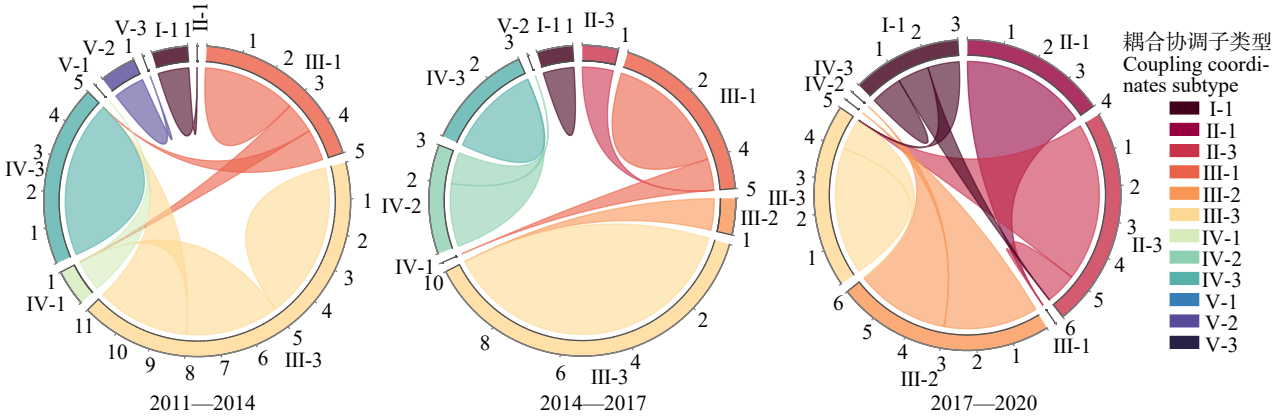


图 7 2011—2020 年上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调度子类型演变

Fig. 7 Coupling coordination subtype evolution of urbanization and eco-environment in Shanghai metropolitan area from 2011 to 2020

境受阻型(25%)进一步上升。可见随着各地区环境保护政策的落实，使生态环境建设的速度更快，但两系统的同步发展状态逐渐被打破，耦合协调类型开始转向生态环境受阻型(表 3)。

4　结论与讨论

4.1　结　论

本研究立足上海大都市圈的国土空间，基于文献爬梳，在城镇化系统和生态环境系统中各遴选 9 项基础指标作为指标因子，构建城镇化与生态环境综合评价体系，涵盖“人口–社会–经济–空间”和“规模–压力–治理–效率”8 个维度。利用 2011—2020 年间上海大都市圈内 9 个城市和上海 16 区的面板数据，运用耦合协调度模型，从城市和上海市辖区两个层面，在时间和空间两个维度，分析对比上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调发展的时空分

表 3　2011—2020 年上海大都市圈及上海市各区城镇化与生态环境耦合协调度测算结果与耦合协调子类型划分

Tab. 3　Calculation results of the coupling coordination between urbanization and ecological environment in the Shanghai metropolitan area and various districts from 2011 to 2020 and division of coupling coordination subtypes

年份 Year	上海大都市圈 Shanghai metropolitan area	苏州市 Suzhou City	无锡市 Wuxi City	常州市 Changzhou City	南通市 Nantong City	宁波市 Ningbo City	嘉兴市 Jiaxing City	湖州市 Huzhou City	舟山市 Zhoushan City	上海市 Shanghai City	黄浦区 Huangpu District	徐汇区 Xuhui District	长宁区 Changning District
2011	0.502	0.540	0.570	0.462	0.447	0.454	0.469	0.563	0.567	0.443	0.743	0.501	0.604
	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-1	Ⅳ-3	Ⅳ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-2	Ⅱ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-1
2012	0.536	0.577	0.577	0.478	0.525	0.502	0.507	0.581	0.596	0.486	0.816	0.533	0.603
	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-2	Ⅰ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-1
2013	0.560	0.615	0.585	0.509	0.595	0.515	0.533	0.587	0.608	0.498	0.845	0.536	0.606
	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-2	Ⅰ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-1
2014	0.583	0.676	0.581	0.563	0.587	0.563	0.562	0.598	0.602	0.522	0.863	0.559	0.646
	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅰ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-1
2015	0.601	0.683	0.613	0.593	0.605	0.583	0.565	0.619	0.622	0.533	0.866	0.577	0.661
	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅰ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-1
2016	0.631	0.675	0.633	0.639	0.670	0.610	0.597	0.637	0.649	0.571	0.924	0.616	0.701
	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅰ-1	Ⅲ-1	Ⅱ-1
2017	0.642	0.693	0.652	0.668	0.675	0.623	0.579	0.647	0.654	0.587	0.942	0.649	0.75
	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅰ-1	Ⅲ-1	Ⅱ-3
2018	0.662	0.711	0.663	0.656	0.695	0.642	0.602	0.671	0.695	0.624	0.944	0.675	0.819
	Ⅲ-2	Ⅱ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅰ-1	Ⅲ-1	Ⅰ-1
2019	0.685	0.716	0.712	0.67	0.721	0.668	0.613	0.684	0.712	0.667	0.982	0.705	0.857
	Ⅲ-2	Ⅱ-1	Ⅱ-3	Ⅲ-1	Ⅱ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅱ-3	Ⅲ-2	Ⅰ-1	Ⅱ-1	Ⅰ-1
2020	0.700	0.717	0.726	0.705	0.730	0.675	0.632	0.694	0.727	0.687	0.995	0.735	0.812
	Ⅱ-2	Ⅱ-3	Ⅱ-3	Ⅱ-3	Ⅱ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅱ-3	Ⅲ-2	Ⅰ-1	Ⅱ-1	Ⅰ-1

年份 Year	静安区 Jing'an District	普陀区 Putuo District	虹口区 Hongkou District	杨浦区 Yangpu District	浦东新区 Pudong New Area	闵行区 Minhang District	宝山区 Baoshan District	嘉定区 Jiading District	金山区 Jinshan District	松江区 Songjiang District	青浦区 Qingpu District	奉贤区 Fengxian District	崇明区 Chongming District
2011	0.618	0.452	0.287	0.437	0.546	0.444	0.471	0.312	0.395	0.343	0.307	0.349	0.286
	Ⅲ-1	Ⅳ-1	Ⅴ-1	Ⅳ-1	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅴ-3
2012	0.642	0.530	0.409	0.476	0.577	0.513	0.497	0.349	0.435	0.364	0.374	0.405	0.259
	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅳ-1	Ⅳ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅴ-3
2013	0.617	0.580	0.447	0.502	0.617	0.515	0.537	0.370	0.393	0.396	0.368	0.379	0.277
	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅳ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅴ-2
2014	0.655	0.645	0.48	0.547	0.615	0.533	0.582	0.4	0.432	0.382	0.394	0.402	0.223
	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅳ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅴ-2
2015	0.662	0.613	0.528	0.55	0.626	0.519	0.582	0.395	0.417	0.417	0.395	0.392	0.343
	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-2
2016	0.688	0.674	0.596	0.603	0.651	0.588	0.589	0.456	0.442	0.418	0.414	0.409	0.362
	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-2	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-2
2017	0.699	0.675	0.601	0.611	0.666	0.572	0.616	0.494	0.436	0.436	0.425	0.418	0.384
	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅳ-2	Ⅳ-2	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-2
2018	0.696	0.730	0.637	0.654	0.708	0.607	0.639	0.509	0.511	0.502	0.475	0.464	0.418
	Ⅲ-1	Ⅱ-3	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅱ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅲ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-3	Ⅳ-2
2019	0.739	0.809	0.671	0.691	0.736	0.671	0.653	0.56	0.52	0.554	0.529	0.492	0.505
	Ⅱ-1	Ⅰ-1	Ⅲ-1	Ⅲ-1	Ⅱ-2	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅲ-2	Ⅲ-2	Ⅲ-2	Ⅳ-2	Ⅲ-2
2020	0.781	0.856	0.747	0.735	0.724	0.678	0.659	0.545	0.538	0.562	0.552	0.565	0.514
	Ⅱ-1	Ⅰ-1	Ⅱ-1	Ⅱ-1	Ⅱ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-3	Ⅲ-2	Ⅲ-2	Ⅲ-2	Ⅲ-2	Ⅲ-2	Ⅲ-2

异特征，揭示上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调关系及其发展趋势。

（1）2011—2020 年，上海大都市圈城镇化–生态环境耦合协调度稳步上升，协调发展等级呈现“基本协调—优化协调”的演进态势。各地区耦合协调发展等级同步增长，但发展水平与步调差异较大。城市层面，常州、南通、苏州、无锡和舟山市协调水平较其余 4 市更高，其中常州、南通两市的增速最快，嘉兴、湖州两市呈低水平缓慢发展。辖区层面，上海市部分中心城区起步较高且增速较快，如黄浦、长宁、普陀区分别在 2012、2018、2019 年率先进入“优质协调阶段”；松江、金山、嘉定区等郊区起步较低，在 2018—2020 年才相继脱离“失调阶段”。

（2）上海大都市圈城镇化–生态环境的动态耦合关系在空间分布上并不均衡，呈现出以上海中心城区、苏州–无锡–南通、舟山 3 个片区为中心辐射同步发展的格局特征。城市层面，嘉兴、宁波耦合协调度水平较低，南通、无锡、舟山等城市则处于较高水平。上海市辖区层面，各辖区之间差异较大，中心城区耦合协调度水平整体优于郊区，呈两极分化格局。

（3）2011—2020 年，上海大都市圈城镇化与生态环境综合水平总体趋于向良性耦合协调发展的状态，但存在城镇化发展与生态环境建设错位的现象。通过两系统相对发展水平的比较，发现二者耦合协调特征的演变趋势呈现由 “同步发展为主，兼城镇化受阻”向“同步发展为主，兼生态环境受阻”转变。

4.2 讨 论

（1）都市圈的高质量发展要求城镇化与生态环境在多维度上达到良性共振的耦合发展状态，根据上海大都市圈内各地区城镇化与生态环境协调水平分析，应在严控生态环境保护与城市发展的底线约束的基础上，针对性地提出平衡生态环境保护与城镇化发展的国土空间规划策略：一是对于金山、奉贤、崇明区等生态环境受阻地区，应秉承生态产业化的国土空间规划策略，关注生态产品价值的稳态转换，发挥生态价值资源禀赋。二是对于徐汇、静安、虹口区等城镇化受阻地区，应秉承生态基础化的国土空间规划策略，改善地区发展战略取向，将生态环境保护置于基础性地位，培育绿色转型发展的新业态模式。三是对于无锡市、闵行、松江区等同步发展型地区，应推进生态现代化的国土空间规划策略，在“生态优先，绿色发展”的规划原则基础上进一步实现生态现代化。

（2）上海大都市圈作为长三角地区高质量一体化发展的功能载体，其发展模式具有跨尺度、多类型的国土空间规划特点，应立足国土空间尺度进行统筹规划，以系统观念提出跨区域尺度的高质量规划发展路径。一是增强上海中心城区等内部核心地区对整个都市圈范围内的辐射带动功能，打破行政边界与自然条件形成的城市壁垒，畅通内部高质量发展渠道，缩小发展差异，推动各地区高质量协同发展。二是深化区域一体的生态建设保护机制和城市协同发展机制。城镇化与生态环境耦合系统是人地关系地域系统的重要一环[23]，人地系统的耦合协调性又是生态安全的重要表现形式[24]。作为实现生态安全的基本载体，都市圈尺度下的生态空间由城市绿地转变为山水林田湖草居的复杂生命共同体[25]。通过多层级—多尺度的生态空间体系构建，建立生态安全格局总体框架，统筹整合山水林田湖草等生态要素和重点生态空间，可以在推进生态环境的综合治理的基础上，同步促进经济社会的发展。

（3）城镇化与生态环境间存在着复杂的耦合协调机制，通过对上海大都市圈城镇化与生态环境交互耦合类型及演变路径的研究，探索两系统的耦合协调发展规律，可以为都市圈未来可持续协调发展提供参考。本研究以国土空间规划和新型城镇化建设为目标，通过耦合协调度模型对上海大都市圈进行城镇化系统与生态环境系统的耦合协调关系研究，不仅能够推进城市建设和生态环境保护的可持续发展，也能为上海大都市圈高质量发展的落地实施提供理论依据。此外，本研究存在一定局限性。对城镇化与生态环境两系统内部要素的交互耦合作用讨论较少，在今后的相关研究中可基于不同类别的要素与城镇化过程的关联度分析，对关键影响要素与驱动机制进一步探索。

参 考 文 献

[1] 邵明, 李方正. 城市生态空间生态系统服务功能权衡协同及管控研究: 以成都东部新城为例 [J]. 风景园林, 2019, 28(7): 114−120.
Shao M, Li F Z. Research on trade-off and synergistic relationship of ecosystem service and space regulation in city ecological space: a case study of Chengdu eastern new city[J]. Landscape Architecture, 2019, 28(7): 114−120.

[2] 邵明, 董宇翔, 林辰松. 基于 GWR 模型的成渝城市群生态系统服务时空演变及驱动因素研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 42(11): 118−129.
Shao M, Dong Y X, Lin C S. Spatio-temporal evolution and driving factors of ecosystem services in Chengdu-Chongqing urban agglomeration of southwestern China based on GWR model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 42(11): 118−129.

[3] 黎智枫, 姚丹燕, 黄永贤, 等. 城市—区域视角下的粤港澳大湾区都市圈空间组织模式 [J]. 规划师, 2022, 38(5): 128−133.
Li Z F, Yao D Y, Huang Y X, et al. Spatial patterns of metropolitan areas in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from city region viewpoint[J]. Planners, 2022, 38(5): 128−133.

[4] 王俊霞, 王晓峰. 基于生态城市的城市化与生态文明建设协调发展评价研究: 以西安市为例 [J]. 资源开发与市场, 2011,

27(8): 709−712.
Wang J X, Wang X F. Research on coordinated development evaluation of urbanization and ecological civilization construction based on eco-city: taking Xi'an as an example[J]. Resource Development & Market, 2011, 27(8): 709−712.
[5] Alberti M. The effects of urban patterns on ecosystem function[J]. International Regional Science Review, 2005, 28(2): 168−192.
[6] 岳邦瑞, 钱芝弘. 生态系统服务权衡与协同机制及其在景观规划中的应用 [J]. 风景园林, 2022, 29(10): 20−25.
Yue B R, Qian Z H. Formation mechanism of trade-offs and synergies between ecosystem services and application in landscape planning[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(10): 20−25.
[7] 徐海龙, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于潜力—约束和 SLEUTH 模型松散耦合的南京城市扩展模拟 [J]. 地理研究, 2017, 36(3): 529−540.
Xu H L, Yin H W, Kong F H, et al. Urban sprawl simulation based on the loose coupling between potential-limitation and SLEUTH model in Nanjing City[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 529−540.
[8] Wu P, Tan M. Challenges for sustainable urbanization: a case study of water shortage and water environment changes in Shandong, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 919−927.
[9] Kijima M, Nishide K, Ohyama A. Economic models for the environmental Kuznets curve: a survey[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2010, 34(7): 1187−1201.
[10] Shafiei S, Salim R A. Non-renewable and renewable energy consumption and CO_2 emissions in OECD countries: a comparative analysis[J]. Energy Policy, 2014, 66: 547−556.
[11] 宋学锋, 刘耀彬. 基于 SD 的江苏省城市化与生态环境耦合发展情景分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2006(3): 124−130.
Song X F, Liu Y B. Scenarios simulation of urbanization and ecological environment coupling in Jiangsu Province by system dynamic model[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006(3): 124−130.
[12] 吕越, 陈忠清. 浙江省城镇化与生态—经济—环境耦合发展与动态计量 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 261−265.
Lü Y, Chen Z Q. Coupling development of urbanization and ecological-economy-environment and dynamic quantity in Zhejiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 261−265.
[13] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究 [J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973−991.
Wang S J, Cui Z T, Lin J J, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973−991.
[14] 马艳. 长江经济带城镇化与生态环境耦合协调效应测度与交互胁迫关系验证 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 275−286.
Ma Y. Examining the coupling degree and interactive stress between urbanization and eco-environment in Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(2): 275−286.
[15] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径 [J]. 地理学报, 2016, 71(4): 531−550.
Fang C L, Zhou C H, Gu C L, et al. Theoretical analysis of interactive coupled effects between urbanization and eco-environment in mega-urban agglomerations[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(4): 531−550.
[16] 任亚文, 曹卫东, 张宇, 等. 长江经济带三大城市群城镇化与生态环境时空耦合特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11): 2586−2600.
Ren Y W, Cao W D, Zhang Y, et al. Temporal and spatial coupling characteristics of urbanization and ecological environment of three major urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11): 2586−2600.
[17] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 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 [J]. 资源科学, 2019, 42(1): 159−171.
Zhao J J, Liu Y, Zhu Y K, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2019, 42(1): 159−171.
[18] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793−810.
Wang S J, Kong W, Ren L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793−810.
[19] 崔木花. 中原城市群 9 市城镇化与生态环境耦合协调关系 [J]. 经济地理, 2015, 35(7): 72−78.
Cui M H. The relationship of coupling coordination between urbanization and ecological environment: a case of urban cluster in the central plains[J]. Economic Geography, 2015, 35(7): 72−78.
[20] 王帅, 潘本锋, 张建辉, 等. 环境空气质量综合指数计算方法比选研究 [J]. 中国环境监测, 2014, 30(6): 46−52.
Wang S, Pan B F, Zhang J H, et al. Comparative study on calculation methods of ambient air quality comprehensive index [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6): 46−52.
[21] 刘立忠, 张承中, 李冶婷. 道路人工清扫扬尘中 PM_(10) 污染影响因素研究 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2005, 35(3): 363−366.
Liu L Z, Zhang C Z, Li Y T. A study on factors of PM_{10} pollution during road sweeping[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(3): 363−366.
[22] 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 [J]. 经济地理, 2017, 37(1): 50−58.
Bi G H, Yang Q Y, Liu S. Coupling coordination development between ecological civilization construction and urbanization in China[J]. Economic Geography, 2017, 37(1): 50−58.
[23] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境"耦合魔方"的基本概念及框架 [J]. 地理学报, 2019, 74(8): 1489−1507.
Liu H M, Fang C L, Li Y H. The basic concept and framework of the "coupling Rubik's Cube" between urbanization and ecological environment[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(8): 1489−1507.
[24] 曹祺文, 赵丹, 王君, 等. 基于系统耦合的首都生态安全格局构建与管控 [J]. 规划师, 2022, 38(9): 61−65.
Cao Q W, Zhao D, Wang J, et al. Construction and control of ecological security pattern in capital based on system coupling[J]. Planners, 2022, 38(9): 61−65.
[25] 邵明, 李方正, 李雄. 基于多源数据的成渝城市群绿色空间生态系统服务功能供需评价 [J]. 风景园林, 2021, 28(1): 60−66.
Shao M, Li F Z, Li X. Evaluation of supply and demand of green space ecosystem service function in Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on multi-source data[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(1): 60−66.

（责任编辑　范　娟
责任编委　李　雄）