高 明,黄祺玥.中国“无废城市”建设系统耦合的分区时空比较与演变特征研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6491-6500.
Gao M, Huang Q Y. Spatial and temporal evolution of the coupling in China’s zero-waste cities construction system [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6491-6500.

中国“无废城市”建设系统耦合的分区时空比较与演变特征研究

高 明[1*],黄祺玥[2] (1.福州大学经济与管理学院,福建 福州 350116；2.福州大学福建绿色发展研究院,福建 福州 350116)

摘要：在构建中国“无废城市”建设系统水平指标体系的基础上,采用熵权法测算中国30个省(区、市)2011~2022年“无废城市”建设系统水平,利用耦合协调度模型研究各子系统协调情况,借助引力模型与社会网络分析探究中国“无废城市”建设系统空间网络特征,最后采用二次指派程序(QAP)考察中国“无废城市”建设系统驱动因素.研究发现:中国“无废城市”建设系统各子系统间耦合协调度不断提高,区域协调度等级为:I类> II类> III类> IV类>V类;中国“无废城市”建设系统各区域空间网络关联水平呈上升趋势,网络关联密度增加,强关联网络数量上升,但处于较低水平且发展不均衡,I类区域网络关联等级高于其他地区,网络关联度始终不变,网络效率将趋于稳定;经济发展水平、城镇化水平、创新能力水平、产业结构协调水平对中国“无废城市”建设系统空间网络产生显著影响;经济发展对I、V类区域驱动更显著,城镇化对II、III类区域驱动更显著.

关键词：“无废城市”；熵权法；耦合协调度；社会网络分析；二次指派程序(QAP)方法
中图分类号：X705 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6491-10

Spatial and temporal evolution of the coupling in China’s zero-waste cities construction system.

GAO Ming[1*], HUANG Qi-yue[2] (1.School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou, 350116, China；2.Fujian Green Development Institute, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6491~6500

Abstract：This study constructs an indicator system for China's "zero-waste cities" construction. It uses the entropy weight method to measure the system's level across 30 provinces (autonomous regions and municipalities) from 2011 to 2022. The coupling coordination model is employed to analyze the development coordination between subsystems, while the gravity model and social network analysis explore the spatial network characteristics of the system. Lastly, the quadratic assignment procedure (QAP) is used to identify the driving factors behind the system. The results show that: the coupling correlation and coordination between subsystems have improved over time, with regional coordination levels in the order of: Class I > Class II > Class III > Class IV > Class V. The spatial network connectivity of each region in China's "zero waste city" construction system shows an upward trend, with increasing network density and more strong connection networks. However, the overall network remains at a low level and is unevenly developed. The network connection level of Class I regions is higher than others, with network efficiency tending towards stability. Economic development, urbanization, innovation capacity, and industrial structure coordination significantly influence the spatial network. Economic development has a greater impact on Class I and Class V regions, whereas urbanization affects Class II and Class III regions more significantly.

Key words: "zero-waste cities"; entropy weight method; coupling coordination degree; social network analysis; quadratic assignment procedure (QAP)

2018年国务院办公厅印发《“无废城市”建设试点工作方案》[1],2021年12月,生态环境部等十八个部门联合印发的《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》提出了扩大试点城市及特殊地区数量的目标,将“无废城市”建设范围拓展至全国.2022年生态环境部等七部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》[2],提出推进固体废弃物领域的协同治理.截至2023年,全国有15个省(市)“无废城市”建设采取全域或次第方式推进,四川、重庆将“无废城市”建设作为成渝双城经济圈建设的“一号工程”,粤港澳等地启动“无废湾区”协同建设[3],跨区域减污降碳整体协同框架不断完善,为构建可持续发展的现代环境治理体系提供重要支撑.随着互联网的进步,城市发展的数字化进程加快,这为实现资源高效利用和环境协同治理创造了条件,在此背景下,加快我国“无废城市”系统协同建设成为新要求.目前中国“无废城市”系统协同建设仍然处在发展阶段,

收稿日期：2025-04-21
基金项目：国家社会科学基金资助项目(22BGL181)
* 责任作者, 教授, gaoming65@163.com

存在“无废城市”系统间衔接力度不够,固体废弃物资源化利用率较低等问题,亟须推进区域与系统间的全方位协同治理.因此,在“无废城市”建设进程中,对中国“无废城市”建设系统的耦合协调、空间网络特性、驱动因素进行科学的衡量与分析,有助于厘清其演变规律,推动“无废城市”建设系统协同优化.

目前,学界在“无废城市”的研究主要集中在路径探索、发展评价、影响因素分析等方面.关于“无废城市”路径探索的研究,高晨琦等[4]、刘頔等[5]分别从“双碳”和“一带一路”视角分析不同情景下“无废城市”路径建设思路.张宏伟等[6]从省域间“无废城市”建设的典型特质出发,为“无废城市”协同建设提供参照.基于不同城市类型,马超等[7]聚焦中国矿产资源型城市,建立多源固体废物协同利用处理体系路径.王小斐等[8]以上海这一国家中心城市为典型案例,提出建立以智慧社区为基本单元的“无废城市”合作路径.在发展评价研究领域,邹权等[9]认为“无废城市”发展评价需要兼顾试点城市的共性与个性,其利用梯度差异赋值的方法,构建量化评价指标体系.Zhang 等[10]、Rao 等[11]丰富了发展评价的测度方法,通过熵权法、灰色关联-TOPSIS 法、多准则决策法对“无废城市”发展水平进行测度.赵曦等[12]则聚焦在工业园区层面,运用多元评分法则系统评估了固废产业集中园区的“无废”建设成效.祁诗月等[13]认为固废管理难易程度应纳入“无废城市”的发展评价中,丰富了评价维度.吴晗婷等[14]以基层单位为研究对象,建立区县级发展评价体系,拓展了不同的评价视角.关于影响因素的研究,多数学者从城市基础支撑能力出发,如温湖炜等[15]构建动态面板模型,分析出经济、污染治理投资、资源依赖性、技术是“无废城市”发展的影响因素.Han 等[16]从经济、技术、资源禀赋和教育四个影响因素出发,指出不同区域“无废城市”发展的影响因素有显著差异.高明等[17]考虑不同城市规模对“无废城市”的影响,发现城市规模的影响呈现三重显著区间效应,并测算出了最佳城市规模.同时,社会层面的影响因素同时也被纳入研究范围,武照亮等[18]基于社区参与的视角,探讨居民参与对社区固废的影响,认为改善社区情境和提高居民认知是关键.

已有研究对“无废城市”的建设发展进行了系统化的研究,但仍存在一些不足:其一,现有文献对“无废城市”的研究多数以省域、城市或区县作为分析单元;少数下沉到社区、园区,未能刻画区域协同关系.其二,鲜有文献从系统耦合层面分析“无废城市”建设体系,不同系统之间耦合程度不同,无法深度探究各系统连接情况,影响了“无废城市”建设系统设计的科学性.基于此,本文划分“源头减量、资源化利用、最终处置、保障系统”4 个子系统,建立“无废城市”建设系统指标体系,划分为 5 大分区测度“无废城市”建设系统的耦合协调情况,运用社会网络分析法、二次指派程序(QAP 分析)揭示网络结构的时空变化特征,探究区域间的空间差异驱动因素,为“无废城市”建设从单点示范走向区域协同提供新的理论视角与政策建议.

1 材料与方法

1.1 中国“无废城市”建设系统水平指标体系构建

表 1 中国“无废城市”建设系统水平评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for the construction level of the“zero-waste cities”system in China

一级指标	二级指标	属性	单位
固体废物源头减量系统	工业固体废物产生强度	负	t/万元
	危险废物产生强度	负	t/万元
	农用塑料薄膜使用量	负	t(万 t)
	生活垃圾清运量	负	万 t
	快递业务量	负	万件
固体废物资源化利用系统	一般工业固体废物综合利用量	正	万 t
	工业危险废物综合利用量	正	万 t
	处理农业废弃物沼气工程	正	万 m^3
	生活垃圾无害化处理率	正	%
固体废物最终处置系统	工业固体废物处置量	正	万 t
	工业危险废物处置量	正	万 t
	公共厕所数量	正	座
	无害化处理厂数量	正	座
保障系统	环境影响评价文件审批数量	正	个
	环境污染治理总投资	正	亿元
	环境监测经费	正	万元
	市容环卫专用车辆设备总数	正	台

依据生态环境部印发的《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》中《“无废城市”建设指标体系(2021 年版)》[19],借鉴国内最新成果的基础上[20],结合“无废城市”建设实际情况,从固体废物源头减量系统、固体废物资源化利用系统、固体废物最终处置系统、保障系统四个子系统出发,构建

“无废城市”建设系统水平的评价指标体系,具体见表 1.由于评价体系中各指标单位不一,本文采用熵值法计算各系统下指标层的权重,其对指标的离散程度进行评价较客观,有较高可信度.根据数据可获得性以及统计口径一致原则,选取 2011—2022 年中国 30 个省(区、市)(不包含中国西藏及港澳台地区)的相关数据,数据来源于《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》,在整理时对缺失值采用插值法进行补充.

1.2　区域划分依据

本文所测算的数据以 30 个省(区、市)(不包含中国西藏及港澳台地区)为基础,考虑区域异质性,综合经济发展水平、产业结构、人口集中度等情况,把全国分为 5 类区域.I 类区域:北京、天津、河北、山东、上海、江苏、浙江、福建、广东;II 类区域:四川、重庆、湖北、河南、山西、陕西;III 类区域:湖南、安徽、辽宁、内蒙古;IV 类区域:江西、贵州、云南、广西;V 类区域:吉林、黑龙江、甘肃、青海、宁夏、新疆、海南.

1.3　耦合协调度模型

1.3.1　耦合度测度　耦合度能反映两个及以上系统间相互影响、彼此作用的强弱程度.本文从“无废城市”建设系统的子系统出发,对源头减量、资源化利用、最终处置、保障体系 4 个子系统,选取适配多元系统的耦合协调度模型进行测算[21],通过数值大小,反映各系统间耦合关系程度.公式为:

$$c=\left(\frac{\prod_{i=1}^{n}U_i}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}U_i\right)^n}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{1}$$

式中:n=4,表示“无废城市”系统中所包含的子系统个数,U_i 为各子系统值,C 为耦合度,分布区间为[0,1].分析采用分段法,基于现有文献研究将 C 划分为 3 个阶段[22]:低水平耦合关联阶段($0<C\leqslant0.4$)、中度耦合关联阶段($0.4<C\leqslant0.8$)、高水平耦合关联阶段($0.8<C\leqslant1$).

1.3.2　耦合协调度模型　耦合度仅能反映“无废城市”建设中各个子系统间相互影响的程度,无法确定“无废城市”建设系统下各子系统协调水平,为衡量“无废城市”建设系统内部具体的运作情况,在此基础之上引入耦合协调度模型.公式为:

$$T=\sum_{i=1}^{n}a_i\cdot U_i,\sum_{i=1}^{n}a_i=1 \tag{2}$$

$$D=\sqrt{C\cdot T} \tag{3}$$

式中:D 为耦合协调度 C 为耦合度;T 为 4 个子系统“无废城市”建设水平的协调指数;a_i 为各子系统的权重,由于四个子系统在“无废城市”建设系统中重要程度相等,本文取相同的权重.基于现有文献[23-24]将耦合协调度 D 分为 4 段:$0<D\leqslant0.2$(低度耦合协调)、$0.2<D\leqslant0.4$(一般耦合协调)、$0.4<D\leqslant0.6$(中高度耦合协调)、$0.6<D\leqslant0.8$(高度耦合协调)$0.8\leqslant D<1.0$(极度耦合协调).

1.4　中国“无废城市”建设系统空间网络构建

1.4.1　修正引力模型　引力模型最初被用于描述两个物理物体之间的引力,其概念后来被扩展应用于地理学、经济学和社会学等领域,多用于分析两个地区之间的互动强度.采用修正后的引力模型[25]式(4),综合考虑经济、人口等多重因素,有效描述区域间“无废城市”建设的互动强度.该模型通过引入修正系数,更精准反映各省份在不同建设水平下的相互作用,全面揭示区域间的空间关联特征.

$$L_{ij}=\frac{C_i}{C_i+C_j}\frac{\sqrt[3]{P_iC_iG_i}\sqrt[3]{P_jC_jG_j}}{\left(\frac{D_{ij}}{g_i-g_j}\right)^2} \tag{4}$$

式中:L_{ij} 表示省份 i 和省份 j 之间的引力强度;C 为“无废城市”建设系统水平,P 代表省份人口数量;G 代表省份地区生产总值;g 表示省份人均地区生产总值;D_{ij} 为 i 省和 j 省之间的地理距离.

1.4.2　时空演化分析　从时间与空间两个角度出发对中国“无废城市”建设系统空间网络的关联情况进行分析.首先,衡量不同时段下各节点网络关联度与关系强度,利用 ArcGIS 软件进行空间关联图的绘制.接着测度整体空间网络的网络密度、网络效率、网络关联度,探究整体空间网络的变化特征.

1.5　中国“无废城市”建设系统空间网络关联驱动因素

1.5.1　指标选取　目前,固废管理全链条中各节点的有效衔接是中国“无废城市”建设系统的发展所面临的难点,需优化其外部环境、提供技术支持、促进系统耦合、因此本文基于“经济发展—技术创新—协同治理”的框架构建中国“无废城市”建设系统空间网络关联的驱动因素(表 2).经济因素是环境

治理过程中协调各主体最主要的外部环境驱动因素[26],借鉴高煜新等[26]的研究,选取人均 GDP、城镇人口占总人口比重进行衡量.技术创新是提高固体废弃物资源化利用的核心,参考罗良清[27]的研究,选取 R&D 经费投入强度作为驱动因素进行考察.中国“无废城市”建设系统内部协调是关键,决定了系统整体结构的“质”与“量”及其是否良性循环,本文从产业结构协同、交通道路建设协同、环境质量协同出发,参考李俊铭等[28]、陆军等[29]的研究,选取产业结构合理化指数、城市建成区绿化覆盖率、公路里程作为驱动因素进行分析.

表 2 中国"无废城市"建设系统空间网络驱动因素定义

Table 2 Definition of spatial network influencing factors in the“zero-waste cities”system construction in China

解释变量	变量定义
经济发展水平(LE)	人均 GDP 取对数
城镇化水平(US)	城镇人口占总人口比重
创新能力水平(LI)	R&D 经费投入强度
产业结构协调水平(IS)	产业结构合理化指数
环境质量协同水平(EQ)	城市建成区绿化覆盖率
道路交通建设水平(TC)	公路里程取对数

1.5.2 模型构建 基于“经济发展—技术创新—协同治理”的框架,中国“无废城市”建设系统空间网络与经济发展水平、城镇化水平、创新能力水平、产业结构协调水平、道路交通建设水平均存在强相关关系,构建中国“无废城市”建设系统空间网络的驱动因素模型,公式如下:

$$SN = f(LE, US, LI, IS, TC) \quad (5)$$

式中:SN 为 2022 年中国“无废城市”建设系统空间关联矩阵,LE、US、LI、IS、TC 分别表示经济发展水平、城镇化水平、创新能力水平、产业结构协调水平、道路交通建设水平.数据均由 2011~2022 年 30 个省(区、市)绝对均值差异构建的差异矩阵,采用二次指派程序(QAP)方法进行分析.

2 中国“无废城市”建设系统比较分析

2.1 复合系统综合比较分析

根据前文的评价体系和数据处理方法得到中国各区域“无废城市”建设子系统水平的评分(表 3).为更直观分析各区域“无废城市”建设系统内部情况,本文以平均值为代表建设水平的整体情况,得到以下分析:

表 3 中国各区域“无废城市”建设子系统水平综合评分

Table 3 The scoring level of“zero-waste cities”construction subsystems in different regions of China

评价体系	区域	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
固体废物源头减量系统	I 类区域	0.83	0.82	0.82	0.82	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79	0.78	0.79
	II 类区域	0.86	0.85	0.85	0.84	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	III 类区域	0.83	0.82	0.81	0.81	0.81	0.80	0.81	0.81	0.80	0.80	0.80	0.80
	IV 类区域	0.90	0.89	0.89	0.89	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
	V 类区域	0.84	0.84	0.84	0.83	0.82	0.82	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
	平均值	0.85	0.85	0.84	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
固体废物资源化利用系统	I 类区域	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.20	0.22	0.24	0.26	0.25	0.27	0.29
	II 类区域	0.11	0.13	0.13	0.15	0.15	0.19	0.20	0.21	0.23	0.23	0.26	0.27
	III 类区域	0.11	0.12	0.11	0.12	0.13	0.19	0.23	0.27	0.26	0.21	0.25	0.26
	IV 类区域	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.12	0.15	0.18	0.21	0.26	0.26	0.31
	V 类区域	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.12	0.14
	平均值	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.16	0.18	0.20	0.21	0.21	0.23	0.25
固体废物最终处置系统	I 类区域	0.11	0.10	0.13	0.14	0.13	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.25	0.27
	II 类区域	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.17	0.20	0.23	0.25	0.22	0.25	0.27
	III 类区域	0.15	0.16	0.14	0.13	0.13	0.19	0.24	0.27	0.29	0.23	0.26	0.28
	IV 类区域	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.11	0.14	0.15	0.15	0.18	0.16	0.17
	V 类区域	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.11	0.12
	平均值	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.14	0.17	0.19	0.20	0.19	0.21	0.22
保障系统	I 类区域	0.26	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20	0.21	0.25	0.26	0.28	0.27	0.28
	II 类区域	0.09	0.10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17
	III 类区域	0.18	0.14	0.15	0.14	0.15	0.12	0.14	0.14	0.14	0.18	0.15	0.16
	IV 类区域	0.10	0.09	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.11	0.13	0.13	0.14	0.14
	V 类区域	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	平均值	0.14	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.17	0.16	0.17

①从各子系统的建设水平看,固体废物源头减量系统的建设水平较其余子系统得分最高,呈小幅波动下降趋势;资源化利用系统建设水平增速最快,最终处置系统与保障系统建设水平总体上升但增幅较缓.可以看出中国“无废城市”建设系统内部源头减量系统的建设情况较好,资源化利用系统建设有待加强,最终处置与保障系统建设动力不足.

②从不同区域的建设水平看,固体废物源头减量建设情况为:IV、V 类区域得分较高;资源化利用建设情况为:I、IV 类区域建设水平较高且始终超过全国平均水平;最终处置建设情况为: I、II、III 类区域水平较高且增速更快;保障系统建设情况为:I 类区域总体建设水平远高于其他三个地区,II 类区域建设水平增速较快.

③从整体上看,各子系统建设水平差异较大,原因可能是中国固体废弃物治理体系缺少良性稳定的产业链,“无废城市”建设过程中固体废弃物治理的上下游链条薄弱,链与链、点与点间衔接不强.I 类区域各系统水平表现较好,原因可能在于I 类区域相较于其他区域资金、技术、要素具备优势,固废资源化产业链更完善,区域城市间交通便利,数字经济发展蓬勃,固废处理能力水平较高.各区域“无废城市”建设系统水平均呈上升趋势,原因可能在于 2018 年出台的《“无废城市”建设试点工作方案》,《关于建立更加有效的区域协调发展新机制的意见》等一系列政策,为中国“无废城市”建设系统的协调发展提供了引导与支持.

2.2　分区耦合协调时空比较分析

为进一步探究“无废城市”建设系统内部运作机理,针对区域异质性问题,本文将分区域展开分析,根据前文的子系统水平综合得分,结合耦合协调度模型,计算得到各区域“无废城市”建设系统的耦合关联度和协调度(表 4),同时用折线图的形式直观呈现耦合关联度的演变情况(图 1).

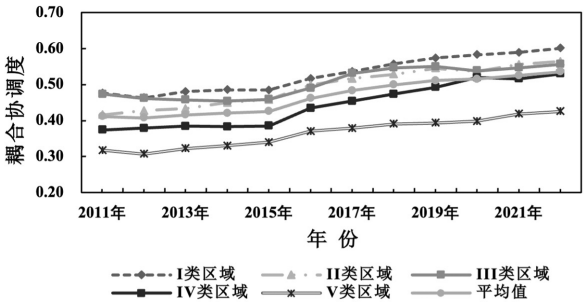


图 1　中国“无废城市”建设系统耦合的分区时空比较

Fig.1　Spatiotemporal comparison of the coupling of “zero-waste cities” construction systems in China

表 4　中国“无废城市”建设系统分区时空比较结果

Table 4　The spatiotemporal comparative results of “zero-waste cities” construction systems in China

评价体系	区域	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
耦合关联度	I 类区域	0.69	0.68	0.72	0.73	0.73	0.78	0.81	0.84	0.86	0.87	0.88	0.89
	II 类区域	0.60	0.62	0.63	0.66	0.68	0.75	0.77	0.79	0.81	0.80	0.82	0.83
	III 类区域	0.71	0.69	0.69	0.69	0.70	0.74	0.80	0.81	0.81	0.81	0.82	0.83
	IV 类区域	0.50	0.51	0.52	0.52	0.52	0.62	0.65	0.69	0.72	0.75	0.75	0.76
	V 类区域	0.41	0.38	0.42	0.44	0.46	0.52	0.54	0.56	0.56	0.57	0.61	0.62
	平均值	0.58	0.58	0.59	0.61	0.62	0.68	0.71	0.73	0.75	0.76	0.77	0.78
耦合协调度	I 类区域	0.48	0.46	0.48	0.49	0.48	0.52	0.54	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60
	II 类区域	0.42	0.43	0.43	0.45	0.46	0.50	0.52	0.53	0.55	0.54	0.56	0.56
	III 类区域	0.47	0.46	0.46	0.45	0.46	0.49	0.53	0.55	0.55	0.54	0.55	0.56
	IV 类区域	0.37	0.38	0.38	0.38	0.39	0.43	0.45	0.47	0.49	0.52	0.52	0.53
	V 类区域	0.32	0.31	0.32	0.33	0.34	0.37	0.38	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43
	平均值	0.41	0.41	0.42	0.42	0.43	0.46	0.48	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54

根据上述数据分析可得:

①时间维度上:所有区域“无废城市”建设系统达到“中度耦合关联阶段”及以上(表 5),证明中国“无废城市”建设系统协调度较好,各区域系统耦合关联度基本保持稳步上升,年际间耦合关联度递增,I、III 类区域较早达到“高水平耦合关联阶段”,2019 年 II 类区域也达到“高水平耦合关联阶段”.各区域耦合协调度呈现稳步上升趋势(图 1),III 类区域 2012 到 2015 年间处于停滞状态且有小幅下降,原因可能是地区仍然面临着固体废物排放强度大,历史堆存量大,资源化利用不足等问题[30],“源头减量”系统与“废物资源化利用”系统衔接不畅,

随着建设深入推进,各系统间协调度得到提升,系统建设成效逐渐显现.II、IV 类区域在 2018 年后增速提高,原因可能为成渝地区双城经济圈建设促进了地区的经济一体化,不仅在“保障系统”上注入了强心剂,也加速提高了“无废城市”建设系统整体的耦合协调度[31].

表 5 中国“无废城市”建设系统耦合关联阶段和协调类型

Table 5 Coupling stages and coordination types in the construction of the“zero-waste cities”system in China

区域	年份	耦合状况	耦合类型
I 类区域	2011~2016	中度耦合关联阶段	中高度耦合协调类型
	2017~2020	高水平耦合关联阶段	
	2021~2022		高度耦合协调类型
II 类区域	2011~2017	中度耦合关联阶段	中高度耦合协调类型
	2019~2022	高水平耦合关联阶段	
III 类区域	2011~2016	中度耦合关联阶段	中高度耦合协调类型
	2017~2022	高水平耦合关联阶段	
IV 类区域	2011~2015	中度耦合关联阶段	一般耦合协调类型
	2016~2022		中高度耦合协调类型
V 类区域	2011~2019	中度耦合关联阶段	一般耦合协调类型
	2020~2022		中高度耦合协调类型

②空间维度上:各区域“无废城市”建设系统耦合关联度存在差异,I 类区域耦合关联度最高,II、III 类区域的耦合关联度相近,IV、V 类区域的耦合关联度低于平均水平.各区域耦合协调度都达到中高度耦合协调水平,但同样存在差异,I 类区域高于其他地区,如京津冀、粤港澳大湾区、长三角等地从区域层面推进“无废城市”建设,在城市间、主体间建立起固体废物协同治理的新机制,构建固体废物资源循环利用产业链,优先打造特色“无废行业”,横纵向上优化了四个子系统的协同建设,发挥出了带头作用.V 类区域增速最为缓慢,导致这一现象的原因可能是区域固体废弃物产业链发展要素集成动力不足,市场与技术的激励机制较弱,垃圾收运体系建设不完善等情况[32-33].总体来看,各区域子系统的耦合关联度和协调度的变化趋势基本一致,中国“无废城市”建设系统总体协调度稳步提高,但不同区域仍存在差异.

3 中国"无废城市"建设系统时空演化及驱动因素分析

3.1 空间关联网络演变特征分析

3.1.1 整体网络时空变化趋势 基于修正引力模型,得到 2011 年和 2022 年的中国“无废城市”建设系统空间网络关联强度,为便于观察其时空演化规律,借助 ArcGIS 软件绘制中国“无废城市”建设系统空间关联网络图(图 2),利用自然间断法将引力值分为 4 个等级,其中网络级别数越小代表城市间的网络关系强度越强.一二级属于强关联网络关系.

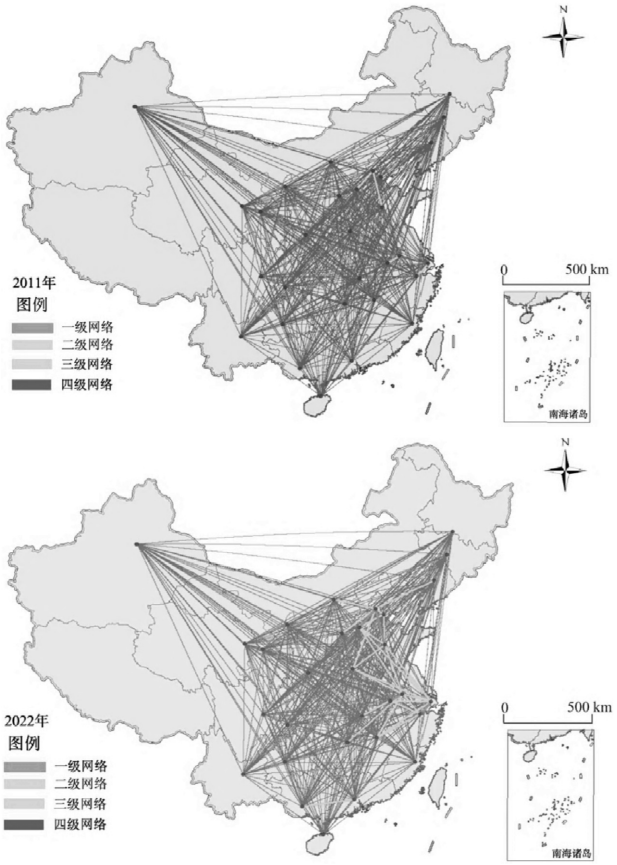


图 2 2011 年和 2022 年中国“无废城市”建设系统空间关联网络

Fig.2 Spatial network of the“zero-waste cities”construction system in China in 2011 and 2022

审图号:GS(2025)2767,底图无修改

如图 2 所示,各省(区、市)存在复杂流向关系,2011~2022 年网络演化有以下特征:第一,省(区、市)间网络等级提升,网络关系线数量明显增加,2011 年“无废城市”建设系统网络不存在一级网络,2022 年“无废城市”建设系统网络已演化出众多二、三级网络,产生了一级网络,并在原有网络线基础上扩展延伸.第二,中国“无废城市”建设系统的网络发展存在不均衡的情况,I、II 类区域网络等级较高,向周边省份辐射的能力更强,截止到 2022 年,V 类区域未产生等级较高的网络.

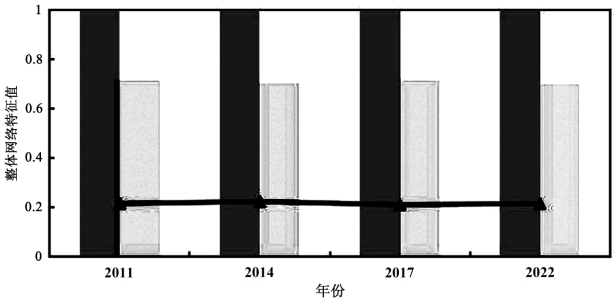


图 3　2011~2022 年中国“无废城市”建设系统主要年份整体网络特征演变趋势

Fig.3　Evolution of the overall network characteristics of the “zero-waste cities” system in China from 2011 to 2022

3.1.2　整体网络特征分析　为探究中国"无废城市"建设系统整体网络特征,采用 Ucinet6 计算网络密度、网络关联度和网络效率,结果如图 3 所示.网络密度上,从 2011 年到 2022 年,中国"无废城市"建设系统的网络密度总体不变且有增长趋势,这表明"无废城市"合作突破地域限制,关联性显现逐步增强,但网络密度整体仍然处于较低水平,各省市之间的协同合作仍未紧密.中国"无废城市"建设系统区域间联动不足,技术交流与资源要素流动受到限制.

网络关联度上,网络关联度始终不变,表明中国"无废城市"建设系统中,所有省市都相互连接,没有省份处于孤立状态.这体现了国家层面的"无废城市"建设系统得到了各省市的广泛响应,省域"无废城市"建设工作深入推进,为中国"无废城市"建设系统网络发展奠定基础.

网络效率上,网络效率从 2011 年的 0.714 逐渐下降到 2014 年的 0.704,在 2017 年回升至 0.716,到 2022 年回落到 0.701.这一变化可能反映出,在中国“无废城市”建设系统过程中网络结构趋于复杂化,信息与资源流通度存在挑战,未来随着数字化进程加快,智慧治废模式发展,跨域固废管理协同机制不断完善,预计中国“无废城市”建设系统的网络效率将保持下降趋势,效率网络趋于稳定.

3.2　QAP 相关性分析

为进一步探究各驱动因素对中国“无废城市”建设系统空间网络发展的影响机制,利用 Ucinet 软件,选择 5000 次随机置换次数,得到全样本期的 QAP 相关分析结果(表 6).经数据分析可知,经济发展水平、城镇化水平、创新能力水平 3 个驱动因素均在 1%水平下显著,产业结构协调水平、道路交通建设水平这一驱动因素在 5%水平下显著,表明这 5 个驱动因素均是中国“无废城市”建设系统空间外溢和空间网络发展的重要动力.

表 6　QAP 相关性分析结果 [1)]

Table 6　Results of QAP correlation analysis

变量	SC	LE	US	LI	IS	EQ	TC
SC	1.000***						
LE	0.469***	1.000***					
US	0.381***	0.793***	1.000***				
LI	0.284***	0.712***	0.733***	1.000***			
IS	0.104**	0.397***	0.366***	0.274**	1.000***		
EQ	0.108*	0.337***	0.221**	0.375**	0.243**	1.000***	
TC	0.161**	0.374***	0.581***	0.529***	0.117	0.102	1.000***

注:1) 所有变量为30×30矩阵:***表示P<0.01,**表示P<0.05,*表示P<0.1

3.3　QAP 回归分析

3.3.1　全样本回归分析　选择 5000 次随机置换次数,进一步对全样本进行 QAP 回归分析,回归结果见表 7.由表 7 的回归结果可知,第一,经济发展水平与城镇化水平分别在 1%与 5%水平下显著为正,表明经济发展和城镇化发展存在差异有利于中国“无废城市”协同建设,资源要素的流动性更强,网络各单元联系更为紧密.

第二,产业结构协调水平、创新能力水平分别在 1%与 5%水平下显著为负,表明产业结构协调水平和创新能力水平差异越小,有助于区域间实现技术交流与共享,越容易产生空间关联,促进中国“无废城市”建设系统协同治理空间关联.产业结构差异越小,“无废城市”建设系统网络关联更密切,产业链各环节通过优势互补,形成完善的全产业链体系,增

强网络抗风险能力,提高系统网络关联水平.

第三,道路交通建设水平未通过显著性检验.表明道路交通建设水平差异不能显著影响“无废城市”建设系统的网络关联强度.其原因可能是交通建设虽然能促进区域间的联系,但对固体废物处理和资源回收利用的直接影响有限,且随着交通基础设施的不断完善,其区域发展的边际效应逐渐递减,导致全样本 QAP 回归分析中未通过显著性检验.

3.3.2 分区回归分析 在全样本分析的基础上,本文将进一步全国划分为五类区域,分别进行 QAP 分析,更深入地揭示区域内部具体的作用机制.分地区来看(表 7),可以看到五类区域内部协调度差异的驱动因素并不相同,I 类区域(0.571, P<0.01)、V 类区域(0.602, P<0.01)内部差异的驱动力主要是经济发展水平,结果表明经济发展水平越高,“无废城市”建设系统协调度越高,其经济水平的普遍提升有助于促进资源合理配置、基础设施完善以及环境治理投入.II 类区域内部差异的主要驱动力主要是城镇化水平(0.713, P<0.05),当城镇化水平有差异时,基础设施共享、区域分工合作,使区域内“无废城市”建设系统的协调性得到提升.对于 III 类区域,不仅城镇化水平为驱动因素(0.325, P<0.05),产业结构协调水平(0.061, P<0.05)、道路交通建设水平(−0.374, P<0.05)也对其内部差异有影响作用.IV 类区域并未看到主要的驱动力量.原因可能是驱动因素在该区域表现较为复杂,存在较强的地区差异,单纯通过变量难以全面解释协调度的差异.

表 7 QAP 回归分析结果

Table 7 Results of QAP regression analysis

变量	总体		I 类区域		II 类区域		III 类区域		IV 类区域		V 类区域	
	标准化回归系数	P 值	标准化回归系数	P 值	标准化回归系数	P 值	标准化回归系数	P 值	标准化回归系数	P 值	标准化回归系数	P 值
截距	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
LE	0.520	0.000	0.571	0.006	−0.008	0.464	−0.530	0.130	2.302	0.079	0.602	0.008
US	0.115	0.044	−0.531	0.068	0.713	0.013	0.325	0.042	−0.680	0.631	−0.277	0.102
LI	−0.130	0.014	0.025	0.451	0.233	0.166	1.197	0.561	−0.680	0.918	−0.088	0.302
IS	−0.106	0.004	0.060	0.335	0.032	0.445	0.061	0.045	0.285	0.875	0.105	0.299
TC	−0.019	0.336	0.400	0.098	−0.033	0.460	−0.374	0.045	1.224	0.746	0.200	0.247

4 结论

4.1 系统综合评价方面,研究期内中国“无废城市”建设系统呈发展态势,各子系统建设水平均有提高,但存在系统间水平不协调的问题,主要表现在中后端发力不足,“固体废物资源化利用系统”、“固体废物最终处置系统”、“保障系统”建设水平相较前端的“固体废物源头减量系统”发展水平低,增速较为缓慢.

4.2 分区耦合协调方面,研究期内中国所有区域的“无废城市”建设系统均达到“中度耦合关联阶段”,2019 年 I、II、III 类区域均达到“高水平耦合关联阶段”.各系统的耦合协调度不断提高,总体协调度情况为:I 类> II 类> III 类> IV 类> V 类,各区域耦合协调关联度和协调度存在较大差异.

4.3 空间关联方面,研究期内中国“无废城市”建设系统网络关联总体呈上升趋势.一、二级网络强关联网络增加,省(区、市)间网络关联线数量明显提高.网络发展呈现不均衡的特征,I、II 类区域强关联网络发展更加迅速,V 类区域尚未出现强关联网络.

4.4 空间特征方面,研究期内中国“无废城市”建设系统网络密度总体不变且有增长趋势,网络关联度始终为不变,不存在独立省份,网络联通性好.网络紧密度仍需进一步提升.

4.5 驱动机制方面,全样本回归结果显示,经济发展水平、城镇化水平、创新能力水平、产业结构协调水平对中国“无废城市”建设系统空间网络空间关联产生显著影响;分区回归分析结果显示,经济发展水平对 I、V 类区域“无废城市”建设系统内部协调度产生显著影响,城镇化水平对 II、III 类区域“无废城市”建设系统内部协调度产生显著影响,同时,产业结构协调水平、道路交通建设水平对 III 类区域内部协调度均有显著影响.

5　政策建议

5.1　加强系统全链条建设,凝聚系统合力效应.从全国治理框架看,应加强固体废弃物处置的全生命周期建设,延伸生产者责任.经济发展水平高的 I 类地区,面临固体废弃物产量大的问题,需控制固体废物源头产量、减少综合利用难度高的项目,优先培育“无废城市”细胞,倡导消费端绿色发展,鼓励居民树立简约适度的绿色生活方式;固体废物资源利用需要政策引导与技术创新,II、III 类区域应加强绿色供应链协同合作,培育绿色企业,推动绿色产业链上下游企业协同发展,依托当地产业基础,打造具有竞争力的绿色品牌和产业集群,通过区域溢出效应辐射周边地区;IV 类、V 类区域要加强系统后端的建设,完善固体废弃物末端处置设施的建设,优化回收路径与方式,搭建更高效的固体废弃物收运处置体系.

5.2　构建区域协同增效机制,数字赋能绿色治理.实现“无废城市”建设系统高质量发展,要在协同机制与数字化两端发力.一方面,本研究发现我国“无废城市”建设系统的网络整体密度不高,各单元联系不紧密,设立京津冀、长三角、珠三角等 I 类地区为核心引领区,通过绿色金融工具,引导金融资源向“无废城市”建设领域倾斜,同时搭建跨区域的绿色技术共享平台,打破技术壁垒,推动资源、技术、资金等要素实现跨区域的流动与优化配置.另一方面,应充分发挥物联网、大数据、区块链等数字技术的支撑作用,以“源头识别-全程监控-智能调度-平台交易”为核心打造全链条数字治理体系,搭建跨域数字治理平台,实现数据实时共享,为企业营造公开透明的数字化市场环境,建立高效透明的动态治理网络.

5.3　优化因地施策路径,培育“无废+”发展新动能.“无废城市”建设系统的内部协调度受多种因素的综合影响,在政策制定过程中,要充分考虑区域的异质性,挖掘“无废+X”的新型动能,对于 I 类地区,可将绿色智能化产业布局作为重点,由绿色“制造”向绿色“创造”转变;V 类地区可探索“生态补短板”向“绿色转型升级”的良性路径.II、III 类区域需要结合自身资源禀赋,走多元融合的发展路径,例如依托区域丰富的旅游资源,打造“无废+旅游”示范项目,在推进绿色景区标准化建设的同时,创新旅游废弃物的收集与资源化利用体系,实现生态保护与经济发展的双赢.

参考文献:

[1] 关于印发《"无废城市"建设试点工作方案》的通知 [EB/OL]. [2018-12-29]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5363069.htm.

[2] 关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. [2022-06-10].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm.

[3] 郭　芳.深入学习贯彻全国生态环境保护大会精神 扎实推进"无废城市"高质量建设 [J]. 环境保护, 2023,51(24):13-17.
Guo F. In-depth study and implementation of the spirit of the National Conference on Ecological Environmental Protection to promote the high-quality construction of "zero-waste city" [J]. Environ. Prot., 2023,51(24):13-17.

[4] 高晨琦,孙英杰,卞荣星,等.碳达峰碳中和视角下中国"无废城市"建设问题及对策 [J]. 环境污染与防治, 2023,45(9):1312-1315,1320.
Gao C Q, Sun Y J, Bian R X, et al. Problems and countermeasures of "zero-waste city" construction in China from the perspective of carbon peak and carbon neutrality [J]. Environ. Pollut. Control, 2023,45(9):1312-1315,1320.

[5] 刘　峘,王永明.绿色"一带一路"视角下"无废城市"建设思路 [J]. 环境工程学报, 2023,17(12):3797-3804.
Liu D, Wang Y M. Research on the construction of "zero-waste city" from the perspective of green "Belt and Road" [J]. Chin. J. Environ. Eng., 2023,17(12):3797-3804.

[6] 张宏伟,王　芳.省域"无废城市"建设探索与建议 [J]. 环境工程学报, 2023,17(12):3805-3810.
Zhang H W, Wang F. Exploration and suggestions on provincial "zero-waste city" construction [J]. Chin. J. Environ. Eng., 2023,17(12):3805-3810.

[7] 马　超,冯印成,赵　康,等.我国矿产资源型城市"无废城市"建设路径探索 [J]. 中国环境科学, 2024,44(9):5077-5084.
Ma C, Feng Y C, Zhao K, et al. Exploring the construction path of "zero-waste city" for mineral-resource-based cities in China [J]. China Environ. Sci., 2024,44(9):5077-5084.

[8] 王小斐,仇保兴,司思源."双碳"目标下智慧社区协同"无废城市"治理模式研究——以上海为例 [J]. 城市发展研究, 2024,31(7):10-14,38.
Wang X F, Qiu B X, Si S Y. Study on the governance model of "zero-waste city" with smart community collaboration under dual-carbon goal: a case study of Shanghai [J]. Urban Dev. Stud., 2024,31(7):10-14,38.

[9] 邹　权,王夏晖."无废指数":"无废城市"建设成效定量评价方法 [J]. 环境保护, 2020,48(8):46-50.
Zou Q, Wang X H. Zero-waste index: a quantitative evaluation method for the effectiveness of "zero-waste city" construction [J]. Environ. Prot., 2020,48(8):46-50.

[10] Zhang P, Xie Y L, Wang Y Y, et al. Water-Energy-Food system in typical cities of the world and China under Zero-waste: commonalities and asynchronous experiences support sustainable development [J]. Ecological indicators, 2021,132.

[11] Rao C J, He Y W, Wang X L.Comprehensive evaluation of non-waste cities based on two-Tuple mixed correlation degree [J]. International journal of fuzzy systems, 2021,23(2):369-391.

[12] 赵　曦,吴姗姗,陆克定."无废城市"固体废物综合处理产业园建设水平评价指标体系 [J]. 环境工程, 2021,39(2):136-140,15.

Zhao X, Wu S S, Lu K D. Development of an evaluation system for assessing construction level of municipal solid waste comprehensive treatment parks for zero-waste cities [J]. Environ. Eng., 2021,39(2): 136-140,15.

[13] 祁诗月,郑睿颖,兰孝峰,等."无废指数"评价方法研究——基于浙江"无废指数"探索实践 [J]. 环境工程学报, 2023,17(12):3774-3787.
Qi S Y, Zheng R Y, Lan X F, et al. Research on the evaluation method of "zero-waste index" based on Zhejiang practice [J]. Chin. J. Environ. Eng., 2023,17(12):3774-3787.

[14] 吴晗婷,胡 俊,黄雨晗,等.我国区县级"无废指数"评价体系探究 [J]. 环境工程学报, 2024,18(8):2357-2366.
Wu H T, Hu J, Huang Y H, et al. Research on the evaluation system of "zero-waste index" at the district level in China [J]. Chin. J. Environ. Eng., 2024,18(8):2357-2366.

[15] 温湖炜,吕 风,曹志凯.中国省域"无废城市"发展水平及影响因素研究 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(5):628-633.
Wen H W, Lü F, Cao Z K. Research on the development level and influencing factors of provincial zero-waste cities in China [J]. Environ. Pollut. Control, 2020,42(5):628-633.

[16] Han Y S, Liu J L, He X. A comprehensive assessment of the performance of China's provincial zero-waste cities and impact factor diagnosis [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022,95.

[17] 高 明,李 欢.城市规模要素对"无废城市"建设水平的影响分析 [J]. 环境工程学报, 2024,18(5):1449-1460.
Gao M, Li H. Impact analysis of urban scale factors on the construction level of "zero-waste city" [J]. Chin. J. Environ. Eng., 2024,18(5):1449-1460.

[18] 武照亮,靳 敏,苏明明,等."无废城市"建设背景下社区参与程度及影响因素分析:基于威海市 634 份居民调查数据 [J]. 环境工程学报, 2022,16(3):765-774.
Wu Z L, Jin M, Su M M, et al. Analysis on community participation and influencing factors under the background of zero-waste city construction: based on 634 resident samples in Weihai [J]. Chin. J. Environ. Eng., 2022,16(3):765-774.

[19] 生态环境部."十四五"时期"无废城市"建设工作方案 [EB/OL]. [2023-11-08]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202112/t20211215_ 964275.html.

[20] 高煜昕,高 明.中国"无废城市"发展水平的空间关联结构与影响机制 [J]. 环境科学, 2024,45(8):4980-4992.
Gao Y X, Gao M. Spatial correlation structure and influencing mechanism of development level of zero-waste cities in China [J]. Environ. Sci., 2024,45(8):4980-4992.

[21] 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. Misuses and modification of the coupling coordination degree model in China [J]. J. Nat. Resour., 2021,36(3):793-810.

[22] 喻 平,张敬佩.区域绿色金融与高质量发展的耦合协调评价 [J]. 统计与决策, 2021,37(24):142-146.
Yu P, Zhang J P. Evaluation of coupling coordination between regional green finance and high-quality development [J]. Stat. Decis., 2021, 37(24):142-146.

[23] 刘耀彬,宋学锋.城市化与生态环境耦合模式及判别 [J]. 地理科学, 2005,25(4):26-32.
Liu Y B, Song X F. Model and criterion of coupling between urbanization and ecological environment [J]. Geogr. Sci., 2005,25(4): 26-32.

[24] 唐健飞,刘剑玲.省域农业可持续发展水平评价及其耦合协调分析——以长江经济带 11 省市为例 [J]. 经济地理, 2022,42(12):179-185.
Tang J F, Liu J L. Evaluation and coupling coordination analysis of provincial agricultural sustainable development: Evidence from 11provinces in the Yangtze River Economic Belt [J]. Econ. Geogr., 2022,42(12):179-185.

[25] 闫 丹,黄少轩,何佳乐,等.数字经济对区域碳排放空间关联网络结构的作用机制及优化策略 [J]. 环境科学, 2025,46(5):2852-2864.
Yan D, Huang S X, He J L, et al. Formation mechanism of digital economy on spatial correlation network structure of carbon emission and its optimization strategy [J]. Environ. Sci., 2025,46(5):2852-2864.

[26] 于 立,曹曦东.城市环境治理理论研究及对中国城市发展适用性的思考 [J]. 城市发展研究, 2019,26(4):110-116,124.
Yu L, Cao X D. Review of urban environmental governance theories and their applicability to China's urban development [J]. Urban Dev. Stud., 2019,26(4):110-116,124.

[27] 罗良清,谢海洋.我国省域绿色全要素生产率的增长机制及其时空非平稳性研究 [J]. 数理统计与管理, 2024,43(2):315-330.
Luo L Q, Xie H Y. Research on influencing factors and spatio-temporal non-stationarity of provincial green total-factor productivity in China [J]. J. Appl. Stat. Manag., 2024,43(2):315-330.

[28] 李俊铭,黄海刚,夏友富,等.数字经济与城市高质量发展:影响效应与作用机制 [J]. 统计与决策, 2024,40(20):30-36.
Li J M, Huang H G, Xia Y F, et al. Digital economy and high-quality urban development: impact effects and mechanisms [J]. Stat. Decis., 2024,40(20):30-36.

[29] 陆 军,毛文峰.中国首都圈的综合发展能力和协同治理水平测度 [J]. 北京社会科学, 2022,(11):34-45.
Lu J, Mao W F. Measurement of comprehensive development capacity and collaborative governance level of the Capital Metropolitan Circle in China [J]. Soc. Sci. Beijing, 2022,(11):34-45.

[30] 姜玲玲,刘晓龙,崔磊磊,等."无废城市"试点建设协同推进策略研究 [J]. 环境保护, 2021,49(5):57-60.
Jiang L L, Liu X L, Cui L L, et al. Research on the cooperative promotion strategy of the pilot construction of zero-waste cities [J]. Environ. Prot., 2021,49(5):57-60.

[31] 刘晓龙,崔磊磊,杜祥琬.纵深推进"无废城市"建设的总体思路和发展方向 [J]. 环境保护, 2023,51(24):18-20.
Liu X L, Cui L L, Du X W. Overall thought and development direction of promoting the construction of zero-waste city [J]. Environ. Prot., 2023,51(24):18-20.

[32] 葛彩虹,韩慧波,马利阳,等.杭州市全域"无废城市"建设成效、问题与对策 [J]. 环境保护, 2024,52(19):41-44.
Ge C H, Han H B, Ma L Y, et al. Effectiveness, problems and countermeasures in building a zero-waste city for the whole region of Hangzhou [J]. Environ. Prot., 2024,52(19):41-44.

[33] 曹得宝,胡勘平.新质生产力视域下的"无废城市"建设 [J]. 环境保护, 2024,52(19):38-40.
Cao D B, Hu K P. Construction of zero-waste city under the perspective of new quality productive forces [J]. Environ. Prot., 2024, 52(19):38-40.

作者简介：高 明(1965-),男,吉林农安人,教授,博士,研究方向为生态环境管理.发表论文 139 篇.gaoming65@163.com.