

DOI: 10.20103/j.stxb.202309222057

赵慧敏, 胡宏, 李可昕. 基于神经网络算法的城市生态环境设施智慧化建设类型识别及驱动机制. 生态学报, 2024, 44(11): 4527-4543.

Zhao H M, Hu H, Li K X. Type identification and driving mechanism of intelligent construction of urban ecological environment facilities based on neural network algorithm. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4527-4543.

# 基于神经网络算法的城市生态环境设施智慧化建设类型识别及驱动机制

赵慧敏<sup>1</sup>, 胡宏<sup>1,2,\*</sup>, 李可昕<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

<sup>2</sup> 江苏智慧城市研究基地, 南京 210093

**摘要:**既有生态城市和智慧城市建设评价研究颇丰,但针对区域内城市生态环境设施智慧化建设类型分异及其复杂驱动机制的解析相对缺乏。以江苏省为研究范围,共划分 53 个研究单元,聚焦于与通信技术和数字基础设施相关的生态环境指标,从智慧生态环境监管平台、智慧生态环境信息传播平台、智慧生活、智慧生态环境创新潜力四个维度构建评价指标体系,采用加权 TOPSIS 对城市生态环境设施智慧化建设水平进行评价,并基于自组织映射神经网络划分建设类型,随后从人口规模、经济发展、基础设施、生态环境、居民生活与政府投入 6 个维度建立城市生态环境设施智慧化建设水平影响因素指标库,进而构建 BP-DEMATEL-ISM 复合多级递阶结构模型,探讨城市生态环境设施智慧化建设水平的直接和间接影响机制。研究发现:①江苏省城市生态环境设施智慧化建设水平表现出明显的市区>县级市>县现象;②建设类型可分为智慧发展引领型、智慧创新不足型、智慧生活特色型和智慧发展滞后型 4 类,且市区多为智慧发展引领型和智慧创新不足型,县级市和县多为智慧生活特色型和智慧发展滞后型;③城市生态环境设施智慧化整体建设水平的影响因素划分为 4 级,其中恩格尔系数和绿化覆盖率是最根本的深层影响指标,宽带用户数和人均电信业务量是最有效的直接影响指标;④分维度影响因素作用机制中人口规模、经济发展和居民生活三个维度的指标为城市生态环境设施智慧化建设水平的根本因素,是“经济基础决定上层建筑”哲学观的体现,三者直接作用并通过政府投入间接作用于基础设施和生态环境,进而影响最终的城市生态环境设施智慧化建设水平。研究可为提升城市生态环境设施智慧化建设水平提供科学参考。

**关键词:**生态环境设施;类型分异;神经网络;驱动机制;江苏省

## Type identification and driving mechanism of intelligent construction of urban ecological environment facilities based on neural network algorithm

ZHAO Huimin<sup>1</sup>, HU Hong<sup>1,2,\*</sup>, LI Kexin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

<sup>2</sup> Jiangsu Smart City Research Base, Nanjing 210093, China

**Abstract:** There is a wealth of researches on the evaluation of eco-city and smart city construction, but there is a relative lack of analysis on the type identification and complex driving mechanisms of the urban eco-environment facilities intelligent construction. This paper takes Jiangsu province as the research area, with a total of 53 research units. Focusing on the eco-environment indicators related to ICT and digital infrastructure, an evaluation index system is constructed including supervision platform, information dissemination platform, smart life, and innovation potential. The paper evaluates the level of urban eco-environment facilities intelligent construction with weighted TOPSIS, and identifies construction types based on

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(42271202)

**收稿日期:**2023-09-22; **网络出版日期:**2024-03-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: h.hu@nju.edu.cn

self-organizing mapping neural network. Then, the influencing factors system of urban eco-environment facilities intelligent construction is established from six dimensions: population size, economic development, infrastructure, ecological environment, residents' life, and government investment. The paper adopts BP-DEMATEL-ISM to explore the direct and indirect influencing mechanism of urban eco-environment facilities intelligent construction. The results show that: ① The overall ranking of urban eco-environment facilities intelligent construction is urban districts > county-level cities > counties; ② The construction types are divided into four categories including the intelligent leading development, intelligent innovation insufficiency, smart life featured, and the intelligent lagging development, and most of the urban districts are intelligent development leading type and intelligent innovation insufficient type, while most of the county-level cities and counties are smart life featured type and intelligent development lagging type; ③ The influencing factors of urban eco-environment facilities intelligent construction are divided into four levels, of which Engel's coefficient and green coverage rate are the most fundamental deep-seated influencing factors, while the number of Internet broadband access users and per capita telecommunication service volume are the most effective direct influencing factors; ④ From the perspective of sub-dimension, influencing factors of population size, economic development, and residents' life are fundamental, which is the embodiment of the philosophical view that "the economic foundation determines the superstructure". Factors of these three dimensions not only directly affect the urban eco-environment facilities intelligent construction, but also indirectly play a role by affecting the infrastructure and eco-environment through government investment. This paper can provide scientific reference for improving the level of urban eco-environment facilities intelligent construction.

**Key Words:** ecological environment facilities; type differentiation; neural network; driving mechanism; Jiangsu province

随着全球变暖和城市可持续发展问题日益突出,生态城市和智慧城市理念相继从不同视角提出解决方案<sup>[1]</sup>。生态城市建设最初以生态保护为关注焦点,强调经济增长需要与环境保护协调,但随着生态-社会-经济问题相互制衡,生态环境标准逐渐软化<sup>[2]</sup>。智慧城市建设重视数字技术的变革作用,强调通过监控城市硬件系统和社会行为实现智慧治理。有研究指出智慧城市建设与可持续发展之间存在脱节,智慧城市更关注社会经济发展<sup>[3]</sup>。因此,有学者提出将生态城市和智慧城市理念结合,建设城市智慧生态环境<sup>[4]</sup>,通过智慧城市技术提高城市资源利用率<sup>[4-5]</sup>和废物回收利用率<sup>[6]</sup>、节约能源<sup>[7]</sup>、降低污染物控制成本<sup>[7]</sup>、降低城市污染率<sup>[8]</sup>,进而推动城市产生积极的生态效应<sup>[9]</sup>。

生态环境设施智慧化建设的相关研究主要包含两类主题。一类认为生态环境保护本身是智慧城市建设的组成部分,将生态环境设施智慧化与智慧城市六个维度中的智慧环境相对应<sup>[10]</sup>,强调通过信息和通讯技术使得政府更透明、负责、高效地使用资源,并通过互动平台为公民参与环境改善提供可能<sup>[11]</sup>。例如,使用无线传感器网络测量和调节温室的环境参数<sup>[12]</sup>,基于物联网及其他时空地理大数据对城市生态环境等进行连续监测<sup>[13]</sup>。另一类主题则将智慧城市和生态城市相结合,提出智慧生态城市建设策略<sup>[9,14]</sup>。例如,将智慧城市相关政策和规划方法引入生态环境修复,建设智慧生态社区<sup>[15]</sup>;通过绿色技术方法和智能化设备建立城市生态环境感知体系,促进智慧生态城市后低碳经济时代过渡<sup>[16]</sup>。

现有相关研究存在三点不足亟待完善。首先,城市生态环境设施智慧化建设的系统化评估较为欠缺,现有研究偏重生态环境治理的评价<sup>[17]</sup>,多采用能源使用<sup>[10]</sup>、环保处理<sup>[18]</sup>、废物处理<sup>[19]</sup>、环保意识<sup>[18]</sup>、环境质量<sup>[10,19]</sup>等指标,而对于信息技术支持的环境监测基础设施、废物收集设施等较少研究,缺少“智慧”的维度,个别研究虽涉及智能电表、住宅能源使用等变量<sup>[20]</sup>,但指标间存在较强的相关性,影响整体结果。第二,缺乏对城市生态环境设施智慧化建设类型的细分探索,城市所处的区位特征、自然本底条件、社会经济基础、政府治理水平等都可能致其建设水平的差异化,在完成城市建设水平评价后,多数定量研究会基于城市建设水平的综合评价得分或综合排名划分城市等级<sup>[21-23]</sup>,或进一步以系统间耦合协调度的高低划分城市类型<sup>[24]</sup>,但如此划分出的不同城市类型多体现为整体水平上的差异,维度或指标间的特色差异被合并隐藏,类型划分不

具备针对性。同时,相关研究主要集中在城市生态环境设施智慧化建设的评价结果,较少深入解析其背后的复杂驱动机制。第三,评价方法多采用线性加权,此类方法对指标体系间的联系考虑不足,易割裂系统内部关联<sup>[25]</sup>。部分研究将神经网络方法应用于城市智慧生态发展的水平评价、类型划分、影响机制探究以及预测,但既有研究在进行类型划分时多将指标进行等权重处理,未考虑各维度指标重要性的差异,并且忽视了城市生态环境系统中各要素间联系的错综复杂,亟需厘清影响因素之间的逻辑关系,从而识别关键影响因素。

依据既有关于智慧生态城市及生态环境智慧化建设相关文献,本文将城市生态环境设施智慧化建设定义为:基于城市生态技术创新、信息通讯技术发展及智能基础设施应用,实现对复杂城市生态环境的监测、分析、决策和管理,进而降低城市生态系统中建筑和(半)自然环境的环境污染与能源消耗。在此基础上构建评价指标体系包括四个维度:智慧生态环境监管平台、智慧生态环境信息传播平台、智慧生活、智慧生态环境创新潜力。《江苏省“十四五”生态环境基础设施建设规划》提出生态环境设施智慧化建设需要关注生态环境监测监控、环境风险防控与应急处置等<sup>[26]</sup>。相关研究表明环境质量监测是掌握生态环境质量状况的重要手段,完善生态环境动态监测与评估体系,于生态环境管理与污染快速处置具有重要意义<sup>[27]</sup>。近年来,对环卫和工地施工的实时监管也受到关注,相关智慧化建设一方面可以有效缓解由传统垃圾收集与管理的运作效率低下造成的生态环境压力<sup>[28]</sup>,另一方面可以显著提高垃圾资源利用水平和工程项目建设与管理效率<sup>[29]</sup>。智慧生态环境信息平台是信通技术和智慧基础设施等与生态环境的结合<sup>[30]</sup>,例如垃圾分类管理信息系统的建设能为居民提供一个有关垃圾分类的沟通交流平台,面向公众提供透明信息<sup>[31]</sup>,而各地政府通过微博、微信等新媒体创新生态传播路径,向公众传播生态环保相关信息,则有助于构建公众生态保护意识<sup>[32]</sup>。智慧技术赋能城市生态环境设施还可以体现在绿色建筑、智慧灯杆和智慧垃圾桶等市民生活环境的智慧化。绿色建筑作为零碳建筑与零能源建筑,对人与生态和谐共生具有巨大的正效应<sup>[33]</sup>,智慧灯杆的自动调节亮度和环境监测功能则是其生态环境友好的表现<sup>[34]</sup>,而智慧垃圾桶则可以通过传感器自动识别并将垃圾分类,同时监控垃圾桶状态,方便环卫部门对垃圾桶等公共设施的智能化管理<sup>[35]</sup>。此外,有关研究表明智慧生态环境创新能力也是城市生态环境设施智慧化建设评价的重要方面,通过智慧化技术和环境保护法规、标准等改变粗放、高消耗的生产生活方式,促进实现资源的合理配置与高效利用,进而实现社会经济发展与生态环境保护相协调<sup>[36-37]</sup>。

在评价方法的选择上,考虑到传统的 TOPSIS 无法反映决策者偏好,故加入层次分析法对其进行改进。随后采用自组织映射神经网络(SOM)对城市生态环境设施智慧化建设类型进行划分。相较于其他神经网络聚类方法,SOM 为无监督学习,且聚类结果具有拓扑结构保持、概率分布一致及可视化等优点<sup>[38]</sup>。

相关影响因素的研究在结论上表现出一致性:多数学者认为城市的人力资源<sup>[39]</sup>、经济基础<sup>[29,37]</sup>、现代通讯设施<sup>[39]</sup>、科学技术投入及相关产业的发展<sup>[40]</sup>对智慧城市建设具有重要影响,而大气质量、环境噪声及科技投入、居民生活水平<sup>[41]</sup>则是限制城市生态环境建设的主要因素。因此本文从人口规模、经济发展、基础设施、生态环境、居民生活与政府投入 6 个维度(表 2)建立城市生态环境设施智慧化建设水平影响因素指标库,进行驱动机制的分析。本文借助前馈反向传播神经网络(BP 神经网络)计算各影响因素之间的直接关联矩阵,再引入决策与试验评价实验室分析和解释结构模型的复合方法(DEMATEL-ISM)构建多级递阶结构模型,探讨城市生态环境设施智慧化建设水平的直接和间接影响机制,以期提升城市生态环境设施智慧化建设水平提供政策建议。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域概况

本文选择江苏省为研究区(图 1)。江苏省位于中国大陆东部沿海中心,全省面积 10.72 万 km<sup>2</sup>,包括 13 个地级市、55 个市辖区、21 个县级市、19 个县。本次研究将同一地级市下的市辖区合并为一个研究单元,称为市区,共计 53 个研究单元。截至 2020 年末,研究区总人口为 8477.26 万人。

### 1.2 技术路线

如图 2 所示,本文首先构建城市生态环境设施智慧化建设水平评价指标库,包括智慧生态环境监管平台、

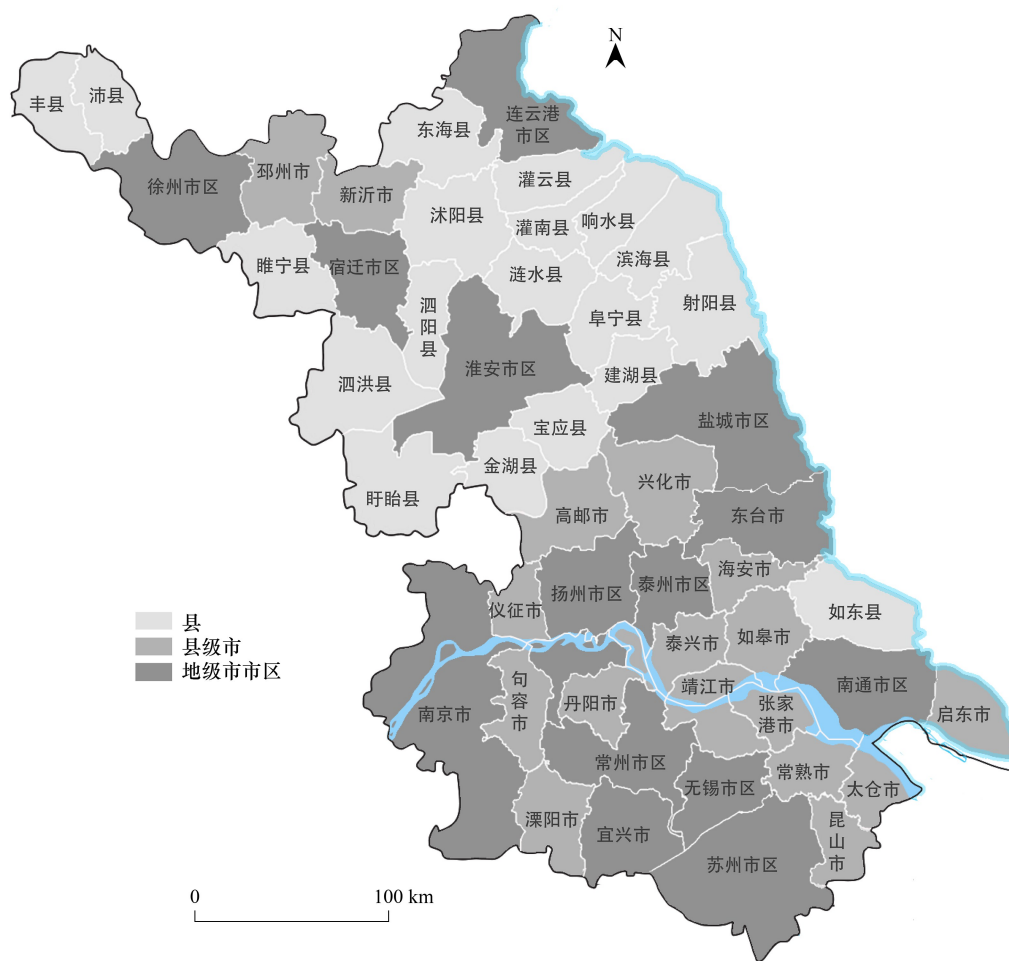


图1 研究单元分布图

Fig.1 Distribution map of research units

该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2017)1268 号的标准地图制作,底图无修改

智慧生态环境信息传播平台、智慧生活、智慧生态环境创新潜力 4 个维度共计 12 个指标,基于层次分析法 (AHP) 和 TOPSIS 方法计算分维度得分和各研究单元城市生态环境设施智慧化建设总得分;采用 SOM 方法对 53 个研究单元的城市生态环境设施智慧化建设特征进行分类,分为智慧发展引领型、智慧创新不足型、智慧生活特色型、智慧发展滞后型 4 种类型;进而构建城市生态环境设施智慧化建设影响因素指标体系,包括人口规模、经济发展、基础设施、生态环境、居民生活和政府投入 6 个维度共计 21 个指标;随后引入 BP-DEMATEL-ISM 分析模型,识别直接和间接影响因素,并据此提出江苏省城市生态环境设施智慧化建设的改善策略。

### 1.3 数据来源

本研究共构建两个数据库:江苏省 2020 年城市生态环境设施智慧化建设水平评价数据库和影响因素指标库。数据来源见表 1 和表 2。其中生态环境智慧平台建设数据主要通过新闻网页获取相关信息,政府生态环境信息传播力则是计算各研究单元 2020 年原创微博转评赞三者 P 指数的算数平均值,智慧生态环境创新潜力维度的指标在对应网站检索获得。影响因素指标库中的产业结构高度指数为地区三类产业占国民经济生产总值的比例和各自劳动生产率乘积的总和;城市生态效率则基于 Dearun 平台,将就业人口总数、固定资产投资额、全社会用电量、国内生产总值和  $PM_{2.5}$  浓度带入产出导向的 SBM 超效率模型进行数据包络分析。

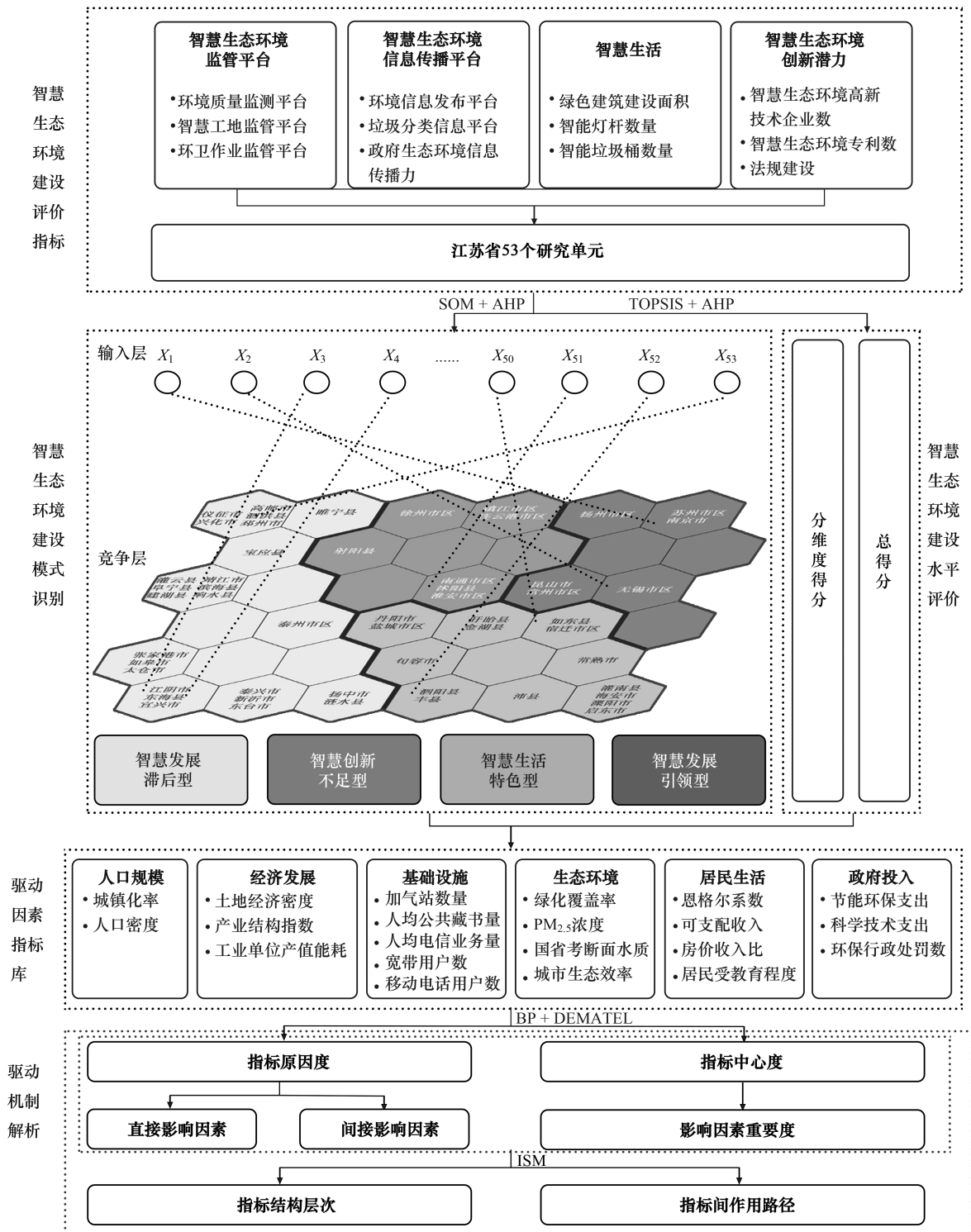


图2 技术路线图

Fig.2 Technology roadmap

## 2 研究方法

### 2.1 指标权重及城市生态环境设施智慧化建设水平评价方法

本文将 AHP<sup>[42]</sup> 和 TOPSIS 模型<sup>[43]</sup> 结合,通过计算各评价指标与“正理想解”和“负理想解”的接近程度对其相对优劣进行打分。

表 1 评价指标及数据来源

Table 1 Evaluation indexes and data sources

| 维度<br>Dimension                                    | 指标<br>Index   | 含义<br>Meaning                                  | 来源<br>Data source |
|----------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|-------------------|
| 智慧生态环境监管平台<br>Supervision platform                 | 环境质量监测平台      | 运用自动监控和通讯设备,实时监测环境质量                           | 新闻网页              |
|                                                    | 智慧工地监管平台      | 运用物联网技术,实现对工地现场人员、设备等的采集、监测、管理                 | 新闻网页              |
|                                                    | 环卫作业监管平台      | 对环卫人员/设施进行远程监管与调度的平台                           | 新闻网页              |
| 智慧生态环境信息传播平台<br>Information dissemination platform | 环境信息发布平台      | 整合自动监测数据,展示环境要素监测信息                            | 新闻网页              |
|                                                    | 垃圾分类信息平台      | 协调垃圾箱及运输车辆,反映环卫智能水平                            | 新闻网页              |
|                                                    | 政府生态环境信息传播力   | 以官微原创微博转发、评论、点赞三者 P 指数的均值表示传播力 P 指数,反映官微信息传播能力 | 微博网页              |
| 智慧生活<br>Smart life                                 | 绿色建筑建设面积      | 反映建筑建设的智慧生态水平                                  | 绿色建筑规划            |
|                                                    | 智能垃圾桶数量       | 便于垃圾的分类收集和处理,反映环卫智能水平                          | 新闻网页              |
|                                                    | 智能灯杆数量        | 反映照明、数据采集的智慧程度                                 | 新闻网页              |
| 智慧生态环境创新潜力<br>Innovation potentiality              | 智慧生态环境高新技术企业数 | 地区内存续的、与智慧生态相关的高新技术企业数量                        | 天眼查网站             |
|                                                    | 智慧生态环境专利数     | 当年发布的、智慧生态相关的专利数量                              | 专利检索及分析系统平台       |
|                                                    | 法规建设          | 将地方政府颁布的智慧生态文件数量按效力等级加权求和,反映其对智慧生态的关注度         | 北大法宝法律数据库         |

表 2 影响因素指标体系及数据来源

Table 2 The system of influencing factors and data sources

| 维度<br>Dimension             | 指标<br>Index                            | 计算公式<br>Formula                                     | 备注<br>Note                                                                        | 来源<br>Data source            | 类型<br>Type |
|-----------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------|
| 人口规模<br>Population scale    | $a_1$ 城镇化率/%                           | $\gamma = \frac{P_c}{P}$                            | $a_1$ :常住人口城镇化率<br>$P_c$ :年末城镇常住人口<br>$P$ :年末常住人口                                 | 统计年鉴                         | +          |
|                             | $a_2$ 人口密度/<br>(人/km <sup>2</sup> )    | —                                                   | —                                                                                 | 统计年鉴                         | +          |
| 经济发展<br>Economy development | $a_3$ 土地经济密度/<br>(万元/km <sup>2</sup> ) | $a_3 = \frac{E}{L}$                                 | $a_3$ :土地经济密度<br>$E$ :地区国民经济生产总值<br>$L$ :地区土地面积                                   | 统计年鉴                         | +          |
|                             | $a_4$ 产业结构高度                           | $a_4 = \sum V_i \times LP_i^N$                      | $a_4$ :产业结构高度指数<br>$V_i$ :产业 $i$ 产值占 GDP 比例<br>$LP_i^N$ :产业 $i$ 标准化后的劳动生产率        | 统计年鉴; EPS 平台; 钱纳里 1986 年结构模型 | +          |
|                             |                                        | $LP_i^N = \frac{LP_i - LP_{ib}}{LP_{ij} - LP_{ib}}$ | $LP_{ij}$ :工业化完成时产业 $i$ 劳动生产率<br>$LP_{ib}$ :工业化开始时产业 $i$ 劳动生产率                    |                              |            |
|                             |                                        | $LP_i = \frac{VA_i}{L_i}$                           | $LP_i$ :产业 $i$ 2020 年原始劳动生产率<br>$VA_i$ :产业 $i$ 2020 年的产业增加值<br>$L_i$ :产业 $i$ 就业人数 |                              |            |
|                             | $a_5$ 工业单位产值能耗/<br>(t 标煤/万元)           | $a_5 = \frac{C}{E_2}$                               | $a_5$ :规上工业单位产值能耗<br>$C$ :规上工业综合能源消耗量<br>$E_2$ :规上工业总产值                           | 统计年鉴                         | -          |
| 基础设施<br>Infrastructure      | $a_6$ 加气站数量/座                          | —                                                   | 部分县级市的数据根据 2022 年爬取的 poi 修正获得,修正指数为县级市所属地级市汽车加气站 2020 年数量和 2022 年的平均比例            | 中国城市建设统计年鉴;高德地图              | +          |

续表

| 维度<br>Dimension                | 指标<br>Index                                                    | 计算公式<br>Formula                                          | 备注<br>Note                                                                                              | 来源<br>Data source | 类型<br>Type |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|
| 生态环境<br>Ecological environment | $a_7$ 人均公共藏书/<br>(册/人)                                         | $a_7 = \frac{B_T}{P}$                                    | $a_7$ :人均公共图书馆藏书量<br>$B_T$ :公共图书馆藏书总量<br>$P$ :地区常住人口数量                                                  | 统计年鉴              | +          |
|                                | $a_8$ 人均电信业务量/<br>(万元/人)                                       | $a_8 = \frac{TE_b}{P}$                                   | $a_8$ :人均电信业务量<br>$TE_b$ :电信业务总量<br>$P$ :常住人口数量                                                         | 统计年鉴              | +          |
|                                | $a_9$ 宽带用户数/(万户)                                               | —                                                        | —                                                                                                       | 统计年鉴              | +          |
|                                | $a_{10}$ 移动电话用户/<br>(万户)                                       | —                                                        | —                                                                                                       | 统计年鉴              | +          |
|                                | $a_{11}$ 绿化覆盖率/%                                               | $a_{11} = \frac{G_p + G_r}{L_b} \times 100\%$            | $a_{11}$ :建成区绿化覆盖率<br>$G_p, G_r$ 分别为园林绿化、道路面积<br>$L_b$ :建成区面积                                           | 统计年鉴              | +          |
|                                | $a_{12}$ PM <sub>2.5</sub> 浓度/<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | —                                                        | —                                                                                                       | 达尔豪斯大气组           | -          |
|                                | $a_{13}$ 国考断面水质/%                                              | $a_{13} = \frac{W_a}{W_e} \times 100\%$                  | $a_{13}$ :国考断面水质Ⅲ级以上的比例<br>$W_a$ :地表水环境监测优良的数据条数<br>$W_e$ :地表水环境的监测数据总条数                                | 青悦数据              | +          |
|                                | $a_{14}$ 城市生态效率                                                | —                                                        | 使用就业人口数、固定资产投资额、全社会用电量、国内生产总值和 PM <sub>2.5</sub> 浓度基于 Dearun 平台 SBM 超效率模型进行数据包络分析                       | 统计年鉴              | +          |
|                                | $a_{15}$ 恩格尔系数/%                                               | $a_{15} = \frac{EX_f}{EX_t} \times 100\%$                | $a_{15}$ :恩格尔系数<br>$EX_f$ :居民食品支出总额<br>$EX_t$ :居民个人消费支出总额                                               | 统计年鉴              | -          |
|                                | $a_{16}$ 人均可支配收入/<br>(元/人)                                     | —                                                        | 城镇居民人均可支配收入                                                                                             | 统计年鉴              | +          |
| 居民生活<br>Resident life          | $a_{17}$ 房价收入比                                                 | $a_{17} = \frac{S_t \times \omega}{S_\omega \times M_l}$ | $a_{17}$ :房价收入比<br>$S_t$ :城镇居民人均住房建筑面积<br>$\omega$ :商品房销售额<br>$S_\omega$ :商品房销售面积<br>$M_l$ :城镇居民人均可支配收入 | 统计年鉴              | -          |
|                                | $a_{18}$ 居民受教育程度/年                                             | —                                                        | 15 岁以上人口平均受教育年限                                                                                         | 第七次全国人口普查公报       | +          |
|                                | $a_{19}$ 节能环保支出/%                                              | $a_{19} = \frac{EX_e}{EX_T} \times 100\%$                | $a_{19}$ :节能环保支出比例<br>$EX_e$ :地方政府节能环保支出<br>$EX_T$ :地方政府财政总支出                                           | 统计年鉴              | +          |
|                                | $a_{20}$ 科学技术支出/%                                              | $a_{20} = \frac{EX_s}{EX_T} \times 100\%$                | $a_{20}$ :科学技术支出占比<br>$EX_s$ :地方政府科学技术支出<br>$EX_T$ :地方政府财政总支出                                           | 统计年鉴              | +          |
| 政府投入<br>Government investment  | $a_{21}$ 环保行政处罚数/件                                             | —                                                        | —                                                                                                       | 青悦数据              | +          |

指标类型中的“+”、“-”分别表示效益型指标和成本型指标

## 2.2 城市生态环境设施智慧化建设类型识别方法——自组织映射(Self-Organizing Maps, SOM)

本研究采用 SOM 捕捉江苏省 53 个研究单元城市生态环境设施智慧化建设的样本数据特征,将各指标权重加入神经网络模型,进行无监督自组织聚类。使用 SOM 需要确定竞争层的网络单元个数及网络结构,本次研究根据经验公式<sup>[44]</sup>(1)确定竞争层神经元个数,结合量化误差(Qualitization Error, QE)、拓扑误差(Topoloty Error, TE)和 Kaski-Lagus Error 选择最终的网络结构,其中:QE 和 TE 数值越小,模型对输入样本的拟合能力和持续映射能力越好;Kaski-Lagus Error 是 R 语言 supersom() 模块对模型的综合评价指标。

$$M = 5 \sqrt{N} \quad (1)$$

式中: $M$  为输出层神经节点个数; $N$  为输入层神经节点个数。

## 2.3 城市生态环境设施智慧化建设水平驱动机制挖掘方法——BP-DEMATEL-ISM 复合模型

本文建立 BP-DEMATEL-ISM 复合模型,即影响因素的多级递阶结构模型。通过划分影响因素层次、明晰影响因素作用路径,进一步探索其影响机制,识别最终的关键影响因素(图 5)。其中,BP 神经网络用于求解各影响因素之间的直接关联矩阵,可有效解决传统 DEMATEL 模型(Decision-making Trail and Evaluation Laboratory, DEMATEL)难以适应多指标复杂问题的不足<sup>[45]</sup>。DEMATEL 模型根据指标间的直接关联矩阵计算中心度和原因度,将影响因素划分为原因型和结果型,并判断其对系统影响的强弱<sup>[45-46]</sup>。ISM (Interpretative Structural Modeling, ISM)通过建立可达矩阵划分影响因素层次,以多级递阶结构表达影响因素之间的逻辑关系,识别关键影响因素<sup>[47]</sup>。因为独立使用 ISM 需要进行大量的矩阵运算,研究将 DEMATEL 与 ISM 结合,可以简化可达矩阵的计算过程。

关键计算步骤如下:

(1)确定 BP 神经网络隐含层层数及节点个数。将隐藏层设为 1 层<sup>[48]</sup>,根据经验公式(2)、公式(3)确定节点个数范围,分别计算不同情境下的均方误差(MSE),选取误差最小时对应的隐藏层节点个数<sup>[49]</sup>。

(2)计算可达矩阵  $F$ 。引入阈值  $\lambda$  对整体影响矩阵  $H$  进行简化,得到可达矩阵  $F$ 。根据公式<sup>[47]</sup>公式(4)确定阈值参考值,在其附近优化取值。

(3)根据可达矩阵  $F$  划分各因素的可达集合  $R(a_i)$ 、先行集合  $A(a_i)$  和共同集合  $C(a_i)$ <sup>[50]</sup>。

(4)构建影响因素多层递阶结构。当  $C(a_i) = R(a_i)$  时,将对应要素提取至最顶层影响因素集,随后删除该要素并重复上述操作,直至所有影响要素划分完毕。

$$n = \log_2 n_i \quad (2)$$

$$n = \sqrt{(n_i + n_o)} + a \quad (3)$$

式中: $n$  为隐含层神经节点个数, $n_i$  为输入节点个数, $n_o$  为输出节点个数, $a$  取 1—10 之间的常数。

$$\lambda = \alpha + \beta \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$  分别为全关联矩阵  $AT$  的均值和标准差。

## 3 江苏省 53 个研究单元城市生态环境设施智慧化建设类型分析

### 3.1 指标权重确定

在递阶层次结构确定以后构建城市生态环境设施智慧化建设指标判断矩阵,最终权重如表 3 所示。一致性比值(Consistency ratio,  $CR$ )均小于 0.1,通过一致性检验。其中,绿色建筑建设面积、法规建设、环境质量监测平台和环境信息发布平台 4 个指标占有较高权重。

### 3.2 基于 TOPSIS 的江苏省城市生态环境设施智慧化建设水平评价

将城市生态环境设施智慧化建设水平评价指标导入 MATLAB(9.0.0.341360 (R2016a)),归一化后,使用指标权重矩阵加权处理,在此基础上计算得到的研究单元整体和各维度排名如图 4 所示。

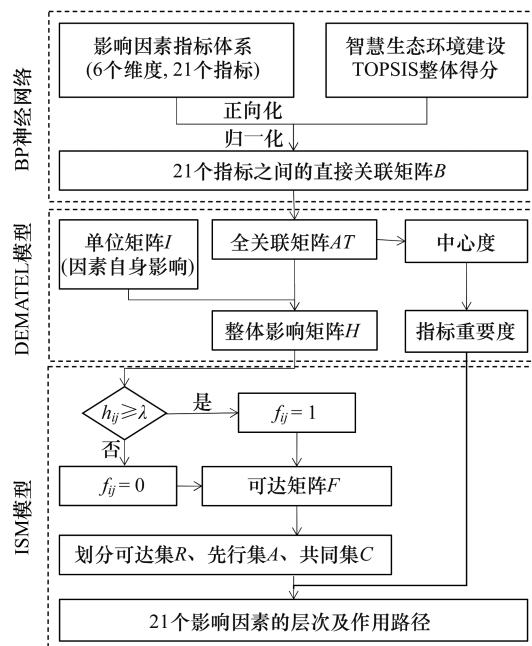


图 3 基于 BP-DEMATEL-ISM 复合模型的城市生态环境设施智慧化建设水平影响因素研究流程图

Fig. 3 Research flow chart of influencing factors of ecological environment facilities intelligent construction level based on BP-DEMATEL-ISM

表 3 评价指标权重表

Table 3 Weights of evaluation indexes

| 维度<br>Dimension                                    | 指标<br>Index   | 分维度权重<br>Dimension weight | 一致性比值<br>Consistency ratio( CR) | 指标权重<br>Index weight | 一致性比值<br>CR |
|----------------------------------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------|-------------|
| 智慧生态环境监管平台<br>Supervision platform                 | 环境质量监测平台      | 0.25                      | 0                               | 0.14285              | 0           |
|                                                    | 智慧工地监管平台      |                           |                                 | 0.035725             |             |
|                                                    | 环卫作业监管平台      |                           |                                 | 0.071425             |             |
| 智慧生态环境信息传播平台<br>Information dissemination platform | 环境信息发布平台      | 0.25                      |                                 | 0.1349               | 0.0088      |
|                                                    | 垃圾分类信息平台      |                           |                                 | 0.04085              |             |
|                                                    | 政府生态环境信息传播力   |                           |                                 | 0.07425              |             |
| 智慧生活<br>Smart life                                 | 绿色建筑建设面积      | 0.25                      |                                 | 0.162075             | 0.0035      |
|                                                    | 智能灯杆数量        |                           |                                 | 0.057425             |             |
|                                                    | 智能垃圾桶数量       |                           |                                 | 0.0305               |             |
| 智慧生态环境创新潜力<br>Innovation potentiality              | 智慧生态环境高新技术企业数 | 0.25                      |                                 | 0.05                 | 0           |
|                                                    | 智慧生态环境专利数     |                           |                                 | 0.05                 |             |
|                                                    | 法规建设          |                           |                                 | 0.15                 |             |

| 研究单元  | 总排名 | 智慧生活 | 智慧生态环境<br>监管平台 | 智慧生态环境<br>信息传播平台 | 智慧生态环境<br>创新潜力 | 研究单元 | 总排名 | 智慧生活 | 智慧生态环境<br>监管平台 | 智慧生态环境<br>信息传播平台 | 智慧生态环境<br>创新潜力 |
|-------|-----|------|----------------|------------------|----------------|------|-----|------|----------------|------------------|----------------|
| 南京市   | 1   | 14   | 1              | 1                | 1              | 泰州市区 | 28  | 35   | 30             | 15               | 38             |
| 苏州市区  | 2   | 18   | 2              | 3                | 2              | 海安市  | 29  | 51   | 23             | 33               | 12             |
| 昆山市   | 3   | 4    | 8              | 6                | 3              | 睢宁县  | 30  | 32   | 13             | 33               | 24             |
| 镇江市   | 4   | 1    | 3              | 8                | 47             | 如东县  | 31  | 52   | 37             | 25               | 11             |
| 无锡市区  | 5   | 17   | 9              | 2                | 7              | 建湖县  | 32  | 36   | 37             | 17               | 29             |
| 扬州市区  | 6   | 21   | 4              | 4                | 42             | 宜兴市  | 33  | 33   | 37             | 30               | 8              |
| 南通市区  | 7   | 24   | 9              | 10               | 10             | 江阴市  | 34  | 34   | 37             | 31               | 9              |
| 连云港市区 | 8   | 16   | 16             | 7                | 16             | 阜宁县  | 35  | 41   | 37             | 16               | 32             |
| 常州市区  | 9   | 22   | 23             | 5                | 15             | 滨海县  | 36  | 42   | 37             | 17               | 31             |
| 徐州市区  | 10  | 8    | 4              | 14               | 21             | 响水县  | 37  | 45   | 37             | 17               | 28             |
| 淮安区   | 11  | 11   | 9              | 9                | 46             | 金湖县  | 38  | 5    | 26             | 26               | 51             |
| 沭阳县   | 12  | 12   | 26             | 11               | 33             | 邳州市  | 39  | 37   | 16             | 33               | 22             |
| 常熟市   | 13  | 27   | 13             | 26               | 6              | 启东市  | 40  | 48   | 26             | 33               | 14             |
| 宿迁市区  | 14  | 3    | 30             | 12               | 29             | 兴化市  | 41  | 26   | 16             | 33               | 41             |
| 溧阳市   | 15  | 29   | 6              | 33               | 20             | 泗阳县  | 42  | 10   | 25             | 33               | 36             |
| 句容市   | 16  | 2    | 30             | 33               | 48             | 泗洪县  | 43  | 52   | 16             | 26               | 33             |
| 仪征市   | 17  | 38   | 7              | 33               | 44             | 沛县   | 44  | 31   | 26             | 33               | 26             |
| 太仓市   | 18  | 20   | 37             | 33               | 4              | 高邮市  | 45  | 44   | 16             | 33               | 43             |
| 射阳县   | 19  | 40   | 13             | 17               | 36             | 扬中市  | 46  | 7    | 37             | 33               | 49             |
| 张家港市  | 20  | 25   | 37             | 32               | 5              | 东海县  | 47  | 49   | 37             | 33               | 18             |
| 盐城市区  | 21  | 9    | 30             | 13               | 27             | 丰县   | 48  | 28   | 30             | 33               | 24             |
| 丹阳市   | 22  | 6    | 30             | 17               | 50             | 盱眙县  | 49  | 15   | 30             | 26               | 51             |
| 宝应县   | 23  | 43   | 16             | 17               | 44             | 新沂市  | 50  | 30   | 37             | 33               | 23             |
| 灌云县   | 24  | 47   | 37             | 17               | 19             | 泰兴市  | 51  | 23   | 37             | 33               | 39             |
| 灌南县   | 25  | 46   | 9              | 33               | 17             | 涟水县  | 52  | 19   | 37             | 33               | 51             |
| 靖江市   | 26  | 13   | 37             | 17               | 39             | 东台市  | 53  | 39   | 37             | 33               | 35             |
| 如皋市   | 27  | 50   | 22             | 33               | 13             |      |     |      |                |                  |                |

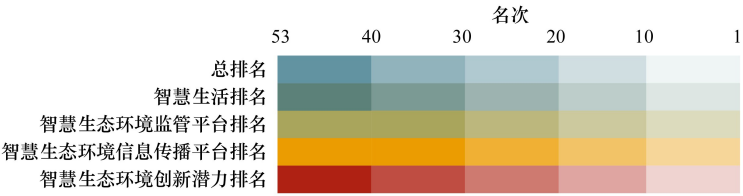


图 4 城市生态环境设施智慧化建设评价排名热力图

Fig.4 Evaluation ranking heat table of urban ecological environment facilities intelligent construction

从城市生态环境设施智慧化建设的整体评价结果看:市区生态环境设施的智慧化建设水平>县级市>县,排名前十的研究单元除昆山市为县级市,其余皆为市区,15 名之后的研究单元除盐城市区和泰州市区为市区,其余皆为县级市或县,但宿迁市区、盐城市区和泰州市区的生态环境设施智慧化建设水平均落后于自身所属地级市管辖的某一县级市/县,分别对应沭阳县、射阳县和靖江市。

从分维度看:在智慧生活、智慧生态环境监管平台两个维度,市区>县级市>县的现象明显,且均通过单因素方差分析;在智慧生态环境信息传播平台维度,市区优于县/县级市的现象明显,其中市区全部位于前十五名,但不同于其余维度的是,县的智慧生态环境信息传播平台建设水平明显优于县级市,查看评价指标构成发现县级市的微博传播力较高,但在环境信息发布平台和垃圾分类信息平台建设方面明显差于县,说明相较于县,县级市更侧重于交流平台的运维,忽略了专业知识平台的建设;在智慧生态环境创新潜力维度,市区得分均值虽高于县级市高于县,但未通过方差分析,说明创新潜力的建设水平在研究单元之间没有显著差异。

综合整体排名和各分维度排名,只有昆山市所有排名均位于前十,其余研究单元在某一维度或多维度发展不佳。总排名在前十的研究单元除昆山市、镇江市区和徐州市区外,其余智慧生活维度的排名均在 10 名以后,建议此类研究单元将提升居民生活的智慧性作为接下来的工作重点。

3.3 基于 SOM 神经网络的城市生态环境设施智慧化建设聚类

3.3.1 SOM 神经网络确定

研究根据经验公式确定竞争层神经元个数,结合  $QE$ 、 $TE$  和 Kaski-Lagus Error,最终选择  $6\times 6$  作为本次实验聚类的神经网络结构。不同 SOM 模型的误差统计如表 4 所示。

表 4 不同网络结构误差统计一览表

Table 4 Error statistics of different network structures

| 网络大小<br>Network size | 1×36   | 36×1   | 2×18   | 18×2   | 3×12   | 12×3   | 4×9    | 9×4    | 6×6    |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $QE$                 | 0.1446 | 0.1445 | 0.1939 | 0.2142 | 0.1871 | 0.194  | 0.201  | 0.1983 | 0.2112 |
| $TE$                 | 0.0189 | 0.0377 | 0.2264 | 0.0566 | 0.0189 | 0      | 0.0377 | 0.0377 | 0.0189 |
| Kaski-Lagus Error    | 0.6919 | 0.6433 | 0.764  | 0.6456 | 0.6913 | 0.7162 | 0.7178 | 0.6438 | 0.6674 |

不同训练模型的参数均采用初始学习率 0.09、最终学习率 0.01、初始邻域半径 5、最终邻域半径 1、学习步长 200 的设置,样本按顺序输入,并将随机种子设定为 7 用于固定初始权值; $QE$ :量化误差 Qualitization error; $TE$ :拓扑误差 Topoloty error

3.3.2 SOM 聚类及空间可视化

SOM 为无监督分类,在确定聚类个数时,碎石图(图 5)建议将竞争层 36 个网络单元分为 8 类,但聚类稳定性检验结果(表 5)显示:当分为 8 类时,第一类和第五类不稳定;当分为 5 类时,第二类不稳定。因此结合聚类稳定性检验,研究最终将江苏 53 个研究单元的生态环境设施智慧化建设类型聚为 4 类,分别是:智慧发展引领型、智慧创新不足型、智慧生活特色型、智慧发展滞后型。

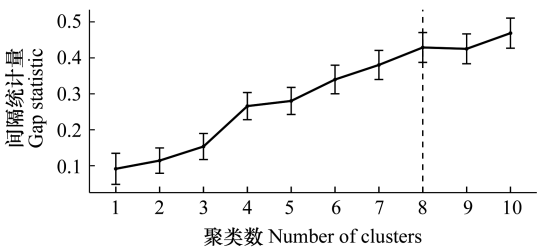


图 5 碎石图

Fig.5 Scree plot

表 5 聚类稳定性检验结果

Table 5 Stability test results

| 8 类 8 categories     | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 稳定性检验 Stability test | 0.5834 | 0.7984 | 0.7165 | 0.6816 | 0.5812 | 0.8242 | 0.7121 | 0.7014 |
| 5 类 5 categories     | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | —      | —      | —      |
| 稳定性检验 Stability test | 0.8315 | 0.4596 | 0.7644 | 0.7206 | 0.7738 | —      | —      | —      |
| 4 类 4 categories     | 1      | 2      | 3      | 4      | —      | —      | —      | —      |
| 稳定性检验 Stability test | 0.8193 | 0.8495 | 0.8178 | 0.7562 | —      | —      | —      | —      |

如图 6、图 7 所示:智慧发展引领型在 4 个维度的建设水平都较高,主要分布于苏南市区,具有较强的空间聚集性;智慧创新不足型在监管平台、信息传播平台两个维度发展较好,智慧生活最高,但创新潜力维度的建设水平最差,此类主要位于苏中和苏北的市区及部分县,且当该县为智慧创新不足型时,其所属的市区全部为智慧生活特色型,可以推测正是由于所属地级市的生态环境设施智慧化建设尚处于起步阶段,未能给下辖县提供法规引领及政策帮扶,进而使其下辖县的生态环境设施智慧化建设受阻;智慧生活特色型在监管平台、信息传播平台和创新潜力三个维度的建设水平都很低,在智慧生活维度虽排名第三,但与前两名差值不大,处于较高的发展水平,主要分布于苏中和苏北,除盐城市区和宿迁市区,其余皆为县或县级市,分布较为分散;智慧发展滞后型在四个维度的建设水平都很低,但其创新潜力维度的得分仍略高于除智慧发展引领型之外的另外两类研究单元,位居第二,该类别基本成片分布,具有较强的空间聚集性,且全部为县或县级市。

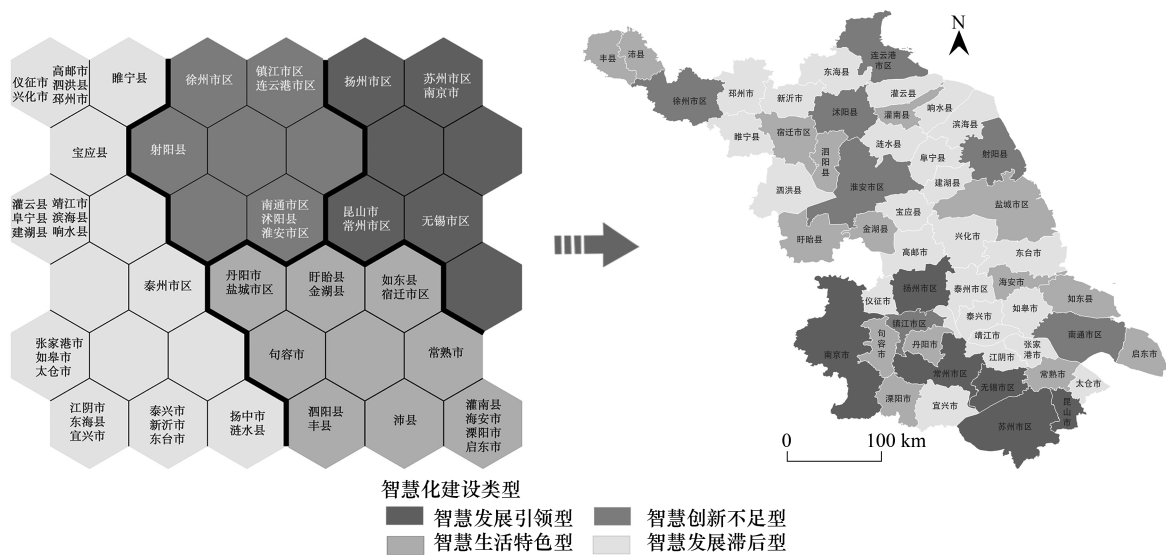


图 6 SOM 聚类结果

Fig.6 Clustering results of SOM

观察四类研究单元的分维度得分,可以发现:智慧发展引领型虽然在各个维度的排名都靠前,但不同维度的得分仍具有较大差异,此类城市主要通过信息传播平台建设提高居民的生态环境意识,并通过政策鼓励生态环境专利创新,为整体生态环境设施智慧化建设培育良好的社会土壤,但智慧生活方面的硬件建设相对落后,是后续重点提升的内容;智慧创新不足型城市在其他三个维度的得分较为均衡,但创新潜力得分在四类城市中最低,城市生态环境设施智慧化建设以政府投资建设平台或生活设施,但缺少政策支撑,企业创新能力不足,发展建设缺乏后续动力;智慧生活特色型城市在智慧生活维度虽排名不高但得分与前两名相差不大,但其余维度的建设相对落后,整体表现为以生活设施的智慧化、生态化建设为主,后续需要加强智慧化动态监测平台和信息平台的建设,并提高社会创新潜力;智慧发展滞后型城市在各个维度的得分都较低,处于生态环境设施智慧

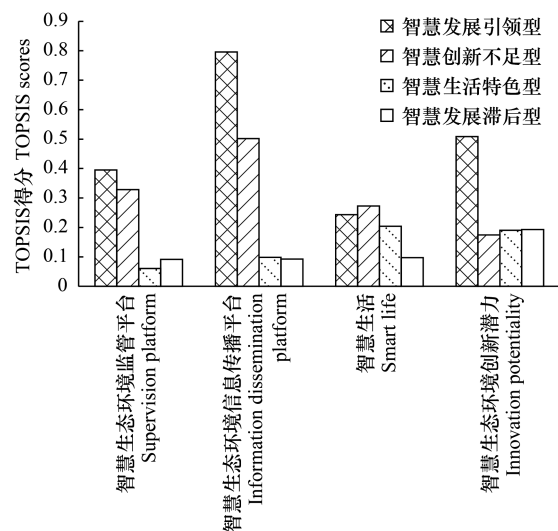


图 7 聚类结果分维度得分

Fig.7 Scores of clustering results

化建设的起步阶段,此类城市的当地政府应当提高对生态环境的重视程度,在自身能力范围内运用智慧化、数字化手段提高生态环境监督、治理水平。

4 江苏省 53 个研究单元城市生态环境设施智慧化建设驱动机制分析

4.1 基于 BP-DEMATEL 的关键影响因素识别

4.1.1 整体关键影响因素识别

结合 3.3.3 中的公式确定 BP 神经网络隐含层的节点数取值范围为 $[4.39, 14.69]$ ,即 $[5, 15]$ 。不同隐藏层神经节点的均方误差(MSE)统计如表 6 所示。

表 6 不同隐藏层神经节点的均方误差(MSE)统计

Table 6 Statistics of mean square error (MSE) of neural nodes in different hidden layers

| 隐藏层神经元个数<br>Number of neurons in hidden layer | 均方误差<br>MSE           | 隐藏层神经元个数<br>Number of neurons in hidden layer | 均方误差<br>MSE           |
|-----------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|
| 5                                             | $1.31 \times 10^{-6}$ | 11                                            | $5.12 \times 10^{-8}$ |
| 6                                             | $2.61 \times 10^{-7}$ | 12                                            | $6.11 \times 10^{-8}$ |
| 7                                             | $1.34 \times 10^{-6}$ | 13                                            | $1.31 \times 10^{-6}$ |
| 8                                             | $4.14 \times 10^{-8}$ | 14                                            | $1.67 \times 10^{-7}$ |
| 9                                             | $4.76 \times 10^{-8}$ | 15                                            | $1.42 \times 10^{-6}$ |
| 10                                            | $2.07 \times 10^{-6}$ |                                               |                       |

结合误差统计与后续实验结果,本次研究最终选取隐藏层神经节点个数为 9 个,输入层到隐藏层、隐藏层到输出层的传递函数分别为 tansig、purelin,训练函数为 trainlm,设置随机种子为 0,动量因子设为 0.5。

根据 BP-DEMATEL 求得各影响因素的原因度和中心度,构建以原因度为纵坐标、中心度为横坐标的城市生态环境设施智慧化建设水平影响因素原因结果图(图 8),并在此基础上结合 ISM 的层次化处理结果,构建城市生态环境设施智慧化建设水平影响因素多级递阶结构模型,用以反映影响因素的作用层次及作用路径。

原因度是划分影响因素属性的重要依据,以零为分界线,将数值大于零、小于零的影响因素分别定义为原因因素和结果因素<sup>[41]</sup>,即影响城市生态环境设施智慧化建设水平的间接因素和直接因素,本次研究结果显示 21 个影响因素共分为 12 个间接因素和 9 个直接因素,其中 $a_{11}$ (绿化覆盖率)是间接因素中原因度数值最高的指标,说明绿化覆盖率最容易对其他因素产生影响, $a_9$ (宽带用户数)在直接因素中原因度数值的绝对值最大,说明宽带用户数最容易受其他因素影响。中心度反映各影响因素的重要程度<sup>[41]</sup>,结果显示,相较于其他影响因素, $a_9$ (宽带用户数)、 $a_{11}$ (绿化覆盖率)、 $a_8$ (人均电信业务量)、 $a_{15}$ (恩格尔系数)的中心度数值较高,说明这四项是城市生态环境设施智慧化建设水平的重要影响因素,增加宽带的用户数量及人均电信业务量、提高绿化覆盖率、降低居民的恩格尔系数能够极大地促进城市生态环境设施智慧化建设水平的提高。

4.1.2 分类型关键影响因素识别

江苏省 53 个研究单元在上述研究中经 SOM 分为 4 类,不同类型的研究单元在生态环境设施智慧化的建设模式上存在差异,研究在此基础上对每一类研究单元分别进行 BP-DEMATEL 建模,识别其关键影响要素,为后续提出针对性的发展策略提供支撑。

四类研究单元在进行 BP-DEMATEL 建模的过程中,BP 神经网络中竞争层的神经元个数结合经验公式和 MSE 确定,分别为 7、13、12、11。关键影响因素的识别结果见表 7。

智慧发展引领型研究单元在各个维度的建设都具有领先性,而其关键影响指标也涉及经济、生态、社会等多方面,提高居民受教育程度、绿化覆盖率和恩格尔系数对此类研究单元均具有重要意义。智慧创新不足型研究单元主要表现为创新潜力低,缺乏保障与创新引领,因此提升其生态环境设施智慧化建设的水平需要提高政府在节能环保方面的投入,以相关设施(宽带、加气站)的完善促进社会与企业创新。智慧生活特色型和

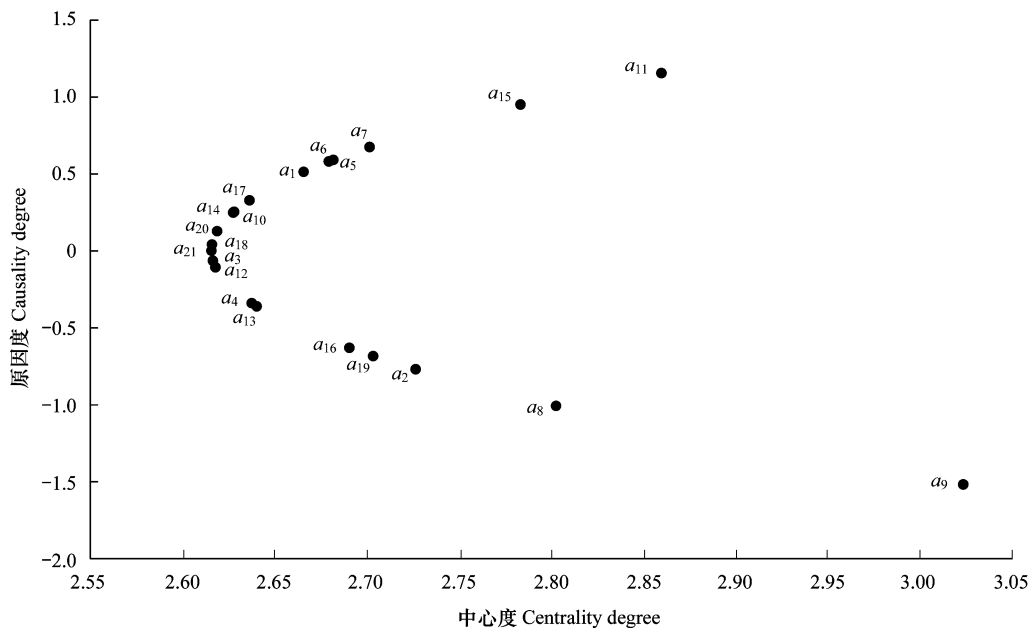


图 8 影响因素原因结果图

Fig.8 The causes-results figure of influencing factors

$a_1$ 城镇化率; $a_2$ 人口密度; $a_3$ 土地经济密度; $a_4$ 产业结构高度; $a_5$ 工业单位产值能耗; $a_6$ 加气站数量; $a_7$ 人均公共藏书; $a_8$ 人均电信业务量; $a_9$ 宽带用户数; $a_{10}$ 移动电话用户; $a_{11}$ 绿化覆盖率; $a_{12}$ PM<sub>2.5</sub>浓度; $a_{13}$ 国省考断面水质; $a_{14}$ 城市生态效率; $a_{15}$ 恩格尔系数; $a_{16}$ 人均可支配收入; $a_{17}$ 房价收入比; $a_{18}$ 居民受教育程度; $a_{19}$ 节能环保支出; $a_{20}$ 科学技术支出; $a_{21}$ 环保行政处罚数

智慧发展滞后型研究单元的关键影响因素都包括人口密度,说明其生态环境设施智慧化建设水平均受限于自身规模,而智慧生活特色型还需要从产业结构高度和恩格尔系数两方面分别提升自身的产业生态化、科技化水平以及居民的生态环保意识。智慧发展滞后型研究单元的整体生态环境设施智慧化建设水平较低,此类研究单元应当在做好生态保育的基础上,通过公共文化设施建设提高人口素质。

表 7 分类型关键影响指标统计

Table 7 Statistical table of key impact indicators of different types

| 类型<br>Type                                      | 典型研究单元<br>Typical research units | 关键影响指标<br>Key impact indicators |
|-------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 智慧发展引领型<br>The intelligent leading development  | 南京市、无锡市区、苏州市区                    | 恩格尔系数、绿化覆盖率、居民受教育程度             |
| 智慧创新不足型<br>Intelligent innovation insufficiency | 镇江市、淮安区、沭阳县                      | 加气站数量、节能环保投入、宽带用户数              |
| 智慧生活特色型<br>Smart life featured                  | 常熟市、溧阳市、海安市                      | 产业结构高度、恩格尔系数、人口密度               |
| 智慧发展滞后型<br>The intelligent lagging development  | 张家港市、太仓市、宜兴市                     | 人口密度、国省考断面水质、人均公共藏书量            |

## 4.2 基于 DEMATEL-ISM 的驱动机制分析

### 4.2.1 建设水平影响因素指标作用机制

在 BP-DEMATEL 模型和 MATLAB 编程计算得到各指标之间的全关联矩阵  $AT$  的基础上,加入单位矩阵  $I$ ,构成整体影响矩阵  $H$ ;多次运算后,选择阈值  $\lambda$  为 0.08,据此对矩阵  $H$  进行简化得到可达矩阵;根据 2.3 中的操作步骤(3)和(4),将城市生态环境设施智慧化建设水平影响因素的可达矩阵进行层次化处理,最终处理结果如下:

$$L_1 = \{a_2, a_8, a_9\}$$

$$L_2 = \{a_3, a_4, a_{12}, a_{13}, a_{16}, a_{18}, a_{19}, a_{21}\}$$

$$L_3 = \{a_1, a_5, a_6, a_7, a_{10}, a_{14}, a_{17}, a_{20}\}$$

$$L_4 = \{a_{11}, a_{15}\}$$

多级递阶结构模型中(图9)的顶层因素为表层因素,直接作用于城市生态环境设施的智慧化建设水平,而下层所有因素均通过影响该层指标发挥作用;底层因素为深层因素,起关键、决定性作用,可以直接影响表层因素或通过作用于其他因素而间接影响表层因素,并最终影响城市生态环境设施智慧化建设水平;其余层级为中间因素,通过因素之间的传递作用影响城市生态环境设施智慧化建设水平,同时中间因素也受深层因素的影响。

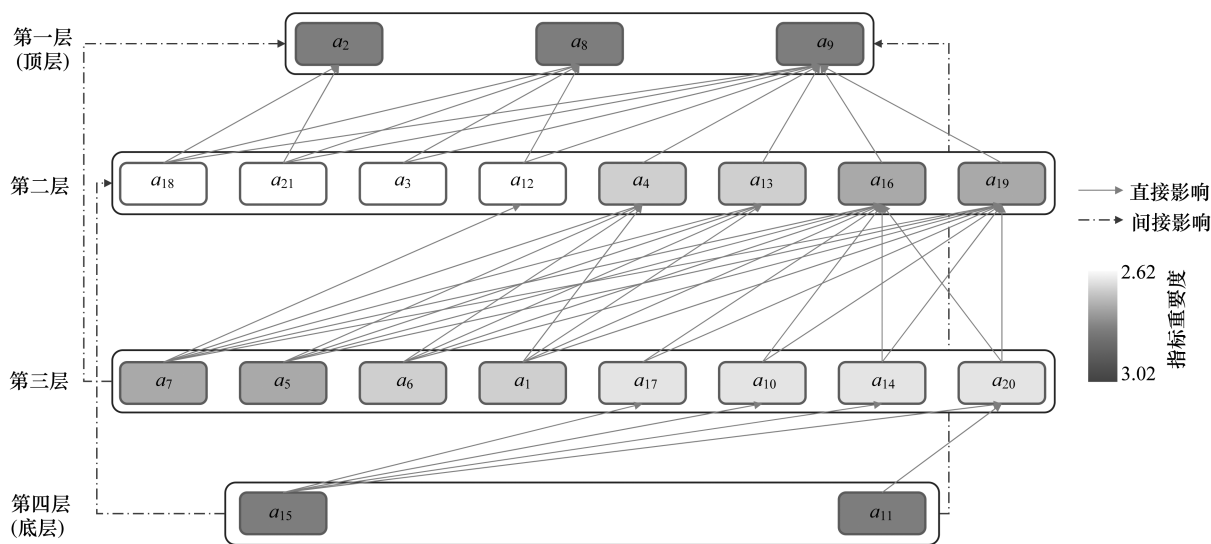


图9 影响因素多级递阶结构模型

Fig.9 The multilevel hierarchical structure model of influencing factors

由图9可知,江苏省53个研究单元的城市生态环境设施智慧化建设水平影响因素共分为3阶4层,其中 $a_2$ (人口密度)、 $a_8$ (人均电信业务量)、 $a_9$ (宽带用户数)为表层因素, $a_{15}$ (恩格尔系数)、 $a_{11}$ (绿化覆盖率)为深层因素,其余指标为中间因素。 $a_{15}$ (恩格尔系数)和 $a_{11}$ (绿化覆盖率)两个深层因素分别反映当地居民生活水平和生态环境建设基础,不同发展阶段的人群对环境舒适性的需求存在差异,而社会经济的发展、人均可支配收入的提高、人们生活水平的改善可以显著促进居民环境意识的提升,进而有效推进智慧生态环境设施在社会的普及度。

通过梳理各层级影响因素之间的作用路径,可知深层因素通过直接作用及对中间层指标的传导作用,与其他因素共同形成城市生态环境设施智慧化建设水平的影响传导链条。例如, $a_{15}$ (恩格尔系数)的作用路径可以分为三条:首先,由于恩格尔系数是食品消费支出占总支出之比,数值越小,人民生活水平越富裕,反映在图9则为 $a_{17}$ (房价收入比)降低、 $a_{16}$ (可支配收入)的增加,此时人民群众可以将资金更多地投入智慧设备,因此诸如 $a_{10}$ (移动电话用户数)、 $a_9$ (宽带用户数)、 $a_8$ (人均电信业务量)等反映智慧基础设施建设水平的指标受到显著影响;其次,当人们处于较高生活水平时,将会注重自身素质的提高,因此 $a_7$ (人均公共藏书量)、 $a_{18}$ (居民受教育程度)大幅增加,并进一步带动智慧设施建设水平的提高;第三,一般来讲人民生活水平高的地区对城市智慧生态环境的建设也更加重视,因此在图9可以看到恩格尔系数对 $a_{14}$ (城市生态效率)、 $a_{20}$ (科学技术支出)和第二层与政府举措、生态环境质量相关的指标都产生影响。另一方面, $a_{11}$ (绿化覆盖率)反映当地生态环境的建设基础以及政府对生态环境建设的重视程度,因此其作用路径与恩格尔系数的第三条大致相同。

#### 4.2.2 分维度影响因素作用机制

将影响因素指标库的各维度指标归一化处理,并以等权重计算江苏省 53 个研究单元在六个分维度上的数值,将结果带入 BP-DEMATEL-ISM 模型,结合公式(2)和公式(3),隐藏层神经节点个数、 $\lambda$  分别取值为 13 和 0.45,分维度的层次化最终处理结果如下:

$$L_1 = \{\text{基础设施, 生态环境}\}$$

$$L_2 = \{\text{政府投入}\}$$

$$L_3 = \{\text{人口规模, 经济发展, 居民生活}\}$$

影响因素分维度的作用层次和作用路径如图 10 所示,结果显示:基础设施和生态环境两个维度是影响江苏省 53 个研究单元城市生态环境设施智慧化建设水平的直接因素,其中基础设施维度主要包括公共文化设施和智慧设备,结合单因素分析结果,智慧设备的应用及普及是基础设施维度直接作用城市生态环境设施智慧化建设水平的关键,而公共文化设施则起中间过渡作用;生态环境维度各指标反映当地的生态建设基础及生态环境质量,其中生态环境质量相关的两个指标在单影响因素分析中均表现为结果型指标,且位于多级递阶结构模型(图 9)中的第二层,说明其对城市生态环境设施智慧化建设水平具有直接作用,而生态建设基础相关指标即“绿化覆盖率”由于更多的是对当地政府环境建设态度的反映,因此表现为原因型指标,为根本因素,但该维度在整体上表现为结果型的直接因素。

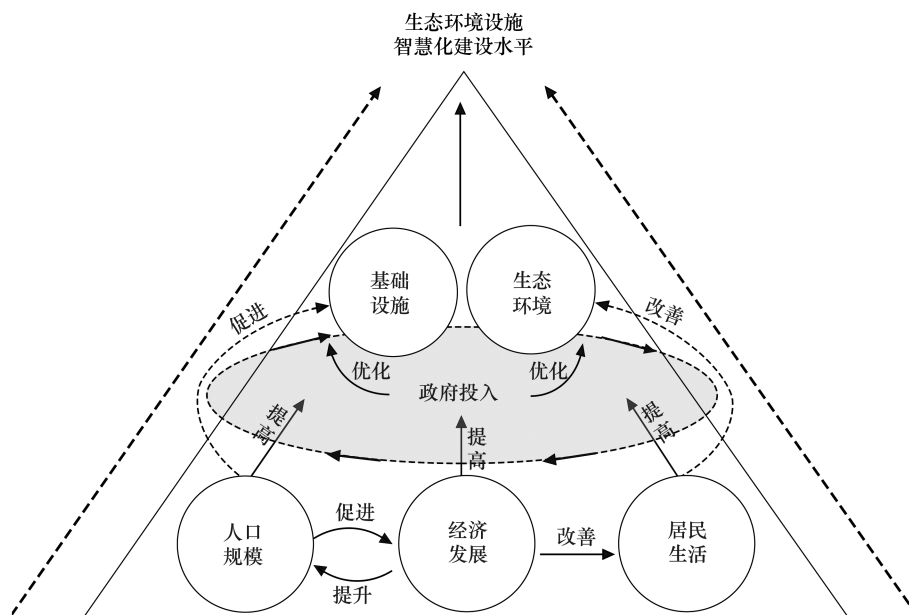


图 10 分维度驱动机制示意图

Fig.10 Schematic diagram of sub-dimension driving mechanism

居民生活、人口规模和经济发展三个维度的指标在整体上表现为城市生态环境设施智慧化建设水平的根本因素,三者对直接影响因素的影响路径分为两条:一是直接作用于基础设施维度和生态环境维度,城市人口的集聚和增加、经济效率的提升和产业结构的优化以及人民生活水平和人口素质的提高,有利于提高能源利用效率、减少废弃物的排放、促进基础设施建设;二是通过促进政府投入间接作用于基础设施和生态环境,一般情况下,当人口规模较大、经济高质量发展和人民生活无忧时,政府对智慧生态的重视程度将会提升,并将资金更多地投入科技发展和节能环保事业,同时加大对企业的环保监控力度,而这对基础设施维度和生态环境维度将产生巨大的推动作用。

## 5 结论与讨论

在全球生态问题频发的背景下,基于城市生态技术创新、信息通讯技术发展及智能基础设施应用的城市生态环境设施智慧化建设为城市建设提供新的解决思路。本文基于江苏省 53 个研究单元 2020 年城市生态环境设施智慧化建设数据,构建城市生态环境设施智慧化建设水平评价体系,进而研究城市生态环境设施智慧化建设类型及其驱动机制。研究结果表明江苏省城市生态环境设施智慧化建设模式分为智慧发展引领型、智慧创新不足型、智慧生活特色型和智慧发展滞后型 4 类。总体而言,居民生活质量的高低及政府的重视程度是影响城市生态环境设施智慧化建设水平的根本因素,它们通过影响智慧基础设施与生态基底共同作用于生态环境设施智慧化建设。具体来说,智慧发展引领型城市的关键影响因素为恩格尔系数和居民受教育程度等,居民生活质量的高低对其生态环境设施智慧化建设水平有关键影响;智慧创新不足型城市主要受限于节能环保投入和智慧基础设施相对缺乏,政府的重视程度较低使其发展潜力不足;智慧生活特色型的关键影响因子包括人口密度和产业结构高度;智慧发展滞后型城市主要受制于人口规模、基础设施和生态环境类指标。

本研究结果表明生态环境设施的智慧化建设需要地方具备智慧设施的应用能力和社会普及度,否则相关智慧化平台难以实现多利益主体的共同参与。在社会经济发展水平较高的地区,政府和居民的环保意识觉醒较早,政府施行的生态环境相关举措也较为系统,生态环境智慧化建设更易推进。江苏省内生态环境设施智慧化建设水平受其社会经济发展形势影响,智慧化建设的地域差异较为明显,苏南地区生态环境设施智慧化建设水平总体高于苏中和苏北地区,这是因为苏南地区临近上海,享有国家政策倾斜与区位优势,产业现代化水平和基础设施建设水平相对较高,较早使用信息化、智能化方式进行生态环境的智慧化治理,这与于小兵等学者的研究结论可互相印证<sup>[51]</sup>。

在我国当前社会经济发展阶段下,政府决策对城市生态环境设施智慧化建设起关键作用,各地政府基于区域发展形势和自身发展基础制定未来发展战略,在对局势进行研判后决定对生态环境设施智慧化建设的财政投入,并制定相关法规政策鼓励社会、企业参与,引进生态环境设施智慧化建设的高端人才,可达到较好的生态环境设施智慧化建设效果。如昆山市在江苏省生态环境设施智慧化建设中位居前列,这是因为其通过人才招揽政策建立包括清华大学科技园、北京大学科技园在内的众多科技园<sup>[51]</sup>,为城市生态环境设施智慧化建设提供了技术创新的土壤。

针对生态环境设施智慧化建设的不同类型,在未来提升中应结合地方政府的社会经济发展水平及各类型发展特征,提出因地制宜的智慧化建设路径。具体而言,智慧发展引领型城市应当在保育生态基底的同时,以高素质人才带动生态经济、创意产业发展,并通过教育宣传的方式提高居民生态环保意识;智慧创新不足型的城市需要政府加强对生态环境设施智慧化建设的重视程度,增加节能环保方面的财政投入,以相关设施(宽带、加气站)的完善促进社会与企业创新;智慧生活特色型城市在除智慧生活维度外的三个维度得分都较低,其在后续建设过程中应加强城市经济建设,推动产业转型,大力发展第三产业,进而提高人口密度和居民生活质量,同时完善相关政策法规,鼓励企业创新,提高土地经济效率;智慧发展滞后型城市则在做好生态保育的基础上,严格监控各类生态要素的质量,并完善文化设施建设,以良好的居住环境吸引高素质人才入驻,同时发展创新经济,提高扩大城市发展规模。

由于当前数据可获得性的限制,未来研究可从以下几方面深入:①在进行城市生态环境设施智慧化建设水平评价时,除关注客观建成数据和传统统计数据,还可增加对人群感知和满意度相关的定性测量以及对大数据、实时数据的挖掘;②南京市没有下辖县级市或县,因此与其他研究对象在体量上存在差距,后续研究可尝试将南京市进行空间细分;③在确定评价指标权重时,可根据城市的社会经济发展水平、资源禀赋、发展愿景等,将同一指标对不同城市的重要性进行差异化处理。

## 参考文献(References):

- [1] Cugurullo F. Exposing smart cities and eco-cities: Frankenstein urbanism and the sustainability challenges of the experimental city. *Environment and*

- Planning A; Economy and Space, 2018, 50(1): 73-92.
- [ 2 ] de Jong M, Joss S, Schraven D, Zhan C J, Weijnen M. Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 109: 25-38.
- [ 3 ] Gazzola P, Del Campo A G, Onyango V. Going green vs going smart for sustainable development: *Quo vadis?* *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 881-892.
- [ 4 ] Mosannenzadeh F, Bisello A, Vaccaro R, D'Alonzo V, Hunter G W, Vettorato D. Smart energy city development: A story told by urban planners. *Cities*, 2017, 64: 54-65.
- [ 5 ] Martin C, Evans J, Karvonen A, Paskaleva K, Yang D J, Linjordet T. Smart-sustainability: A new urban fix? *Sustainable Cities and Society*, 2019, 45: 640-648.
- [ 6 ] Aid G, Eklund M, Anderberg S, Baas L. Expanding roles for the Swedish waste management sector in inter-organizational resource management. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 124: 85-97.
- [ 7 ] Chu Z, Cheng M W, Yu N N. A smart city is a less polluted city. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 172: 121037.
- [ 8 ] Amore M D, Bennesden M. Corporate governance and green innovation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2016, 75: 54-72.
- [ 9 ] 沈清基. 智慧生态城市规划建设基本理论探讨. *城市规划学刊*, 2013(5): 14-22.
- [ 10 ] 董宏伟, 寇永霞. 智慧城市的批判与实践——国外文献综述. *城市规划*, 2014, 38(11): 52-58.
- [ 11 ] Artmann M, Kohler M, Meinel G, Gan J, Ioja I C. How smart growth and green infrastructure can mutually support each other—A conceptual framework for compact and green cities. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 10-22.
- [ 12 ] Mesas-Carrascosa F J, Verdú Santano D, Meroño J E, Sánchez de la Orden M, García-Ferrer A. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. *Biosystems Engineering*, 2015, 137: 73-83.
- [ 13 ] 刘国波, 戎恺, 唐力, 王伟民, 周伟奇, 韩宝龙, 刘凯, 黄洪. 深圳城市生态大数据智慧管理和服务平台技术集成与应用研究. *生态学报*, 2022, 42(24): 10051-10059.
- [ 14 ] 张佳丽, 王蔚凡, 关兴良. 智慧生态城市的实践基础与理论建构. *城市发展研究*, 2019, 26(5): 4-9.
- [ 15 ] 洪菊华, 丁舒. 法国智慧城市实践探索研究——以伊西莱莫利诺市“伊西堡”智慧生态社区为例. *城市住宅*, 2017, 24(6): 37-40.
- [ 16 ] 民建北京市委. 城市环境大脑助力打造生态智慧城市. *北京观察*, 2021(9): 14-15.
- [ 17 ] 郑季良, 陈白雪. 智慧城市生态环境建设模式研究. *未来与发展*, 2019, 43(1): 8-15.
- [ 18 ] 陈小燕, 高园, 李敏纳. 基于平衡记分卡的生态环境治理评价. *理论导刊*, 2017(6): 80-82.
- [ 19 ] 顾德道, 乔雯. 我国智慧城市评价指标体系的构建研究. *未来与发展*, 2012, 35(10): 79-83.
- [ 20 ] 龚恺. 智慧城市评价指标体系研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
- [ 21 ] 何琴. 基于 AHP 的智慧城市建设水平评价模型及实证. *统计与决策*, 2019, 35(19): 64-67.
- [ 22 ] 陈莉, 张海侠. 基于熵权-云模型的我国绿色智慧城市评价. *系统仿真学报*, 2019, 31(1): 136-144.
- [ 23 ] 宋冬梅, 肖笃宁, 申元村. 我国沿海地区生态城市建设评价. *地理科学进展*, 2004, 23(4): 80-86.
- [ 24 ] 杜德林, 黄洁, 王姣娥. 基于多源数据的中国智慧城市发展状态评价. *地球信息科学学报*, 2020, 22(6): 1294-1306.
- [ 25 ] 范育鹏, 方创琳. 城市可持续发展新型定量研究方法进展. *生态学报*, 2023, 43(8): 3020-3031.
- [ 26 ] 陈志鹏. 把准生态环境基础设施建设的着力点. *群众*, 2023(2): 38-39.
- [ 27 ] 郑渊茂, 王业宁, 周强, 王豪伟. 基于景感生态学的生态环境物联网框架构建. *生态学报*, 2020, 40(22): 8093-8102.
- [ 28 ] 段妍婷, 胡斌, 余良, 陈治. 物联网环境下环卫组织变革研究——以深圳智慧环卫建设为例. *管理世界*, 2021, 37(8): 207-225.
- [ 29 ] 毛志兵. 推进智慧工地建设 助力建筑业的持续健康发展. *工程管理学报*, 2017, 31(5): 80-84.
- [ 30 ] 吴华赞. 可持续发展水资源与水环境信息共享系统分析与设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [ 31 ] 付哲. 基于.NET 平台的北京市垃圾分类管理信息系统. *网络与信息*, 2012, 26(7): 37.
- [ 32 ] 勾莞玥, 吴承彦, 常百钧. 城市生态文化传播路径创新的新媒体之维——以南京生态环境官方微博为例. *汉字文化*, 2020(18): 154-155, 168.
- [ 33 ] 王凯, 吉宇飞. 论我国绿色建筑的内涵与外延. *西安建筑科技大学学报: 社会科学版*, 2016, 35(1): 70-73.
- [ 34 ] 吴建荣. 智慧灯杆在智慧城市中的应用. *工程技术研究*, 2021, 6(17): 124-125.
- [ 35 ] 叶广源, 熊正炜, 李铭士, 陈旭然. 物联监控智能垃圾分类桶的设计. *数字技术与应用*, 2017(1): 136-138.
- [ 36 ] 马吉宏, 田长彦, 吕光辉. 基于“智慧芽”专利数据库的塔里木河生态环境领域专利分析. *科技管理研究*, 2018, 38(10): 158-164.
- [ 37 ] 史亚楠, 佟光霁. 浅析城镇化建设中生态环境保护的问题及对策. *农业经济*, 2013(8): 45-47.
- [ 38 ] 杨占华, 杨燕. SOM 神经网络算法的研究与进展. *计算机工程*, 2006, 32(16): 201-202, 228.
- [ 39 ] Caragliu A, Del Bo C, Nijkamp P. Smart cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, 2011, 18(2): 65-82.
- [ 40 ] 刘笑音, 郑淑蓉. 基于主成分方法的我国智慧城市发展潜力评价——根据东部 11 个城市的数据. *科技管理研究*, 2013, 33(22): 75-79.
- [ 41 ] 李英. 基于居民支付意愿的城市森林生态服务非政府供给方式研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [ 42 ] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 陈俊羊, 赵俊峰. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100.
- [ 43 ] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 奉婷, 安萍莉. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 217-227.
- [ 44 ] 李娜娜. 基于 SOM 算法的城市给水管网水质评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [ 45 ] 崔强, 武春友, 匡海波. BP-DEMATEL 在空港竞争力影响因素识别中的应用. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(6): 1471-1478.
- [ 46 ] Tzeng G H, Chiang C H, Li C W. Evaluating intertwined effects in e-learning programs: A novel hybrid MCDM model based on factor analysis and DEMATEL. *Expert Systems with Applications*, 2007, 32(4): 1028-1044.
- [ 47 ] 陈为公, 张娜, 张友森, 程准, 张悦. 基于 DEMATEL-ISM 的城市灾害韧性影响因素研究. *灾害学*, 2021, 36(1): 1-6, 17.
- [ 48 ] 王嵘冰, 徐红艳, 李波, 冯勇. BP 神经网络隐含层节点数确定方法研究. *计算机技术与发展*, 2018, 28(4): 31-35.
- [ 49 ] 潘雨红, 詹翌, 马旭. 基于 DEMATEL-BP 的装配式住宅预制构件供应商选择的影响因素识别. *数学的实践与认识*, 2017, 47(9): 22-34.
- [ 50 ] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究. *管理科学学报*, 2008, 11(2): 20-26.
- [ 51 ] 于小兵, 俞显瑞, 杨兵, 卢逸群. 基于 TOPSIS 的江苏省生态智慧城市建设研究. *生态经济*, 2018, 34(5): 154-159.