

长三角城市群碳中和潜力评价与实现策略研究

□ 王 焱, 朱美琳, 王 勇, 李 萌, 孟晓东

【摘要】文章基于“统计数据+大数据”的多源数据,从人居环境科学视角构建城市群碳中和潜力评价体系,测度长三角城市群碳中和潜力指数,分析碳中和潜力空间格局与聚类特征,结果发现:长三角城市群碳中和潜力呈现出明显的核心—边缘结构,与城市经济发展水平、行政层级呈现明显的空间一致性,并且存在明显的省域空间差异;空间聚类表现为城镇化主导、产业主导、生态主导、交通主导4种类型,呈现出典型的地域集聚特征。在此基础上,文章提出构建“碳排放权—发展权”区域协调机制、实施“以碳定人”的城市规模管控及开展“因城治碳”的国土空间规划等策略建议。

【关键词】碳中和;潜力评价;人居环境;多源数据;长三角城市群

【文章编号】1006-0022(2022)03-0061-07 **【中图分类号】**TU984 **【文献标识码】**B

【引文格式】王焱,朱美琳,王勇,等.长三角城市群碳中和潜力评价与实现策略研究[J].规划师,2022(3):61-67.

Potential Evaluation and Planning Strategy of Carbon Neutrality in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration/
Wang Yao, Zhu Meilin, Wang Yong, Li Meng, Meng Xiaodong

【Abstract】In this paper, the potential evaluation system of carbon neutrality is built from the perspective of the science of human settlement environment based on multi-source data of “statistical data and big data”. The potential index of carbon neutrality is measured respectively in the cities of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration to analyse the spatial distribution and clustering characteristics of carbon neutrality potential. It is found that the carbon neutrality potential presents characters of core-periphery structure, spatial differences across provinces, and spatial consistency with urban economic development level and administrative hierarchy. Spatial clustering shows four categories: urbanization-oriented, industry-oriented, ecology-oriented, and transportation-oriented, presenting typical characteristics of regional agglomeration. A regional coordination mechanism of “carbon emission right—development right” needs to be built to promote the city size control of “fixing population with carbon” and to carry out territorial space planning of “governing carbon for cities”.

【Key words】Carbon neutrality, Potential evaluation, Human settlement environment, Multi-source data, Yangtze River Delta urban agglomeration

0 引言

当前,全球变暖对人类的生存与可持续发展构成长期重大威胁,减缓全球二氧化碳排放成为当务之急。

2020年习近平总书记在第75届联合国大会上郑重承诺:

“中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。近年来,国家层面相继

出台了《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《中国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》(以下简称《“十四五”规划纲要》)等政策文件,完成了绿色低碳转型发展的顶层设计。早在2019年启动建设的长三角生态绿色一体化发展示范区对实现区域碳中和起到了引领和示范作用。长三角城市群作为

【基金项目】国家自然科学基金青年项目(52008281)、江苏高校优势学科建设工程三期项目

【作者简介】王焱,苏州科技大学建筑与城市规划学院讲师、硕士生导师,兼职于长三角人居环境碳中和发展研究院。

朱美琳,苏州科技大学建筑与城市规划学院硕士研究生。

王勇,苏州科技大学建筑与城市规划学院党委书记、教授、硕士生导师。

李萌,规划师,现任职于厦门市城市规划设计研究院有限公司。

孟晓东,通讯作者,苏州科技大学建筑与城市规划学院讲师。

我国经济发展程度最高的地区之一，在绿色低碳发展理念推动下实现经济发展的转型是其迈向更高质量一体化发展的内在需求，未来必将成为绿色低碳经济的重要空间载体。

自然资源保护协会的资料显示，我国70%以上的碳排放来自城市。城市群若要实现碳中和目标，则需要区域内的各个城市之间进行相互协调与配合。当前，长三角城市群面临两大难题：一是“人口达峰”与“碳达峰”的双峰叠加；二是城镇化发展带来的碳排放持续增长。面对城市群实现碳中和的现实需求，新时期的国土空间规划应全面统筹、优化区域与城市的绿色低碳人居环境。因此，了解和掌握当前长三角城市群实现碳中和的潜力，制定相应的国土空间规划策略，对长三角城市群实现“双碳”目标具有现实意义。而城市群碳中和潜力评价体系及其相关数据的获取是学界长期关注的难点，也是国土空间规划实践中不能忽略的问题。

因此，本文尝试从人居环境科学视角出发，采用多源数据构建长三角城市群碳中和潜力评价体系，分析碳中和潜力空间格局，并提出实现城市群碳中和发展的策略。

1 相关研究概况与方法创新

1.1 研究概况

通过文献梳理可以发现，城市碳中和潜力评价体系是当前学界关注的焦点。从评价体系的构建视角看，当前的研究可分为3类：第一类是从环境视角构建“压力—状态—响应”评价框架，强调对绿色低碳的产生原因、现状表征及解决对策的全过程研究^[1-2]；第二类是从综合发展视角构建“能源—经济—环境”评价体系，认为城市碳中和评价涉及城乡能源利用、经济发展、环境保护和社会稳定等多方面的协调^[3-4]；第三类是基于“碳源—碳汇”过程来设定评价指标，强调对碳排放开展全生命周期分析^[5-6]。从评价指

标的数据来源看，大部分研究采用的数据为统计年鉴数据，主要是考虑到数据来源的可获取性；同时，随着信息技术的发展，也有学者开始尝试采用灯光遥感、PM2.5等数据进行研究^[4]。此外，一些研究关注城市群碳中和潜力的空间格局，包括低碳空间结构、碳中和驱动机理和碳排放影响因素等^[7-9]；少量研究还关注了城市群碳中和转型发展的规划策略与区域治理^[10-11]。

以“双碳”目标为导向，本文认为当前的研究仍存在三方面不足：一是评价体系多是从环境、经济、土地等维度构建的，指标选取相对宏观，未能充分考虑快速城镇化进程中微观个体行为对外部人居环境碳排放的显著影响，如美国居民的生活方式、交通方式等所产生的碳排放明显高于其他国家；或者未能充分考虑政策治理与科技创新对城市未来实现碳中和的作用，如地方政府对实现碳中和的意志往往能够决定相关政策的落实，科技创新能力则有助于实现高能耗产业的转型和绿色产业的培育。二是评价指标的数据来源多为统计数据，不同省份或城市的统计口径存在差异，对指标的选取影响较大，不利于在全国或区域等大尺度建立全面、准确的评价体系；同时，一些指标更多是对城市过去某种状态的评价，在时效性上相对受限^[12]。三是研究过于关注获取评价结果，缺乏针对评价结果的规划应对策略，难以满足国土空间规划的实践要求。

1.2 方法创新

(1) 从人居环境科学视角构建城市群碳中和潜力评价体系。

针对过去城市碳中和潜力评价体系的不足，本文尝试从人居环境科学视角构建评价体系。人居环境作为与人类生存活动密切相关的空间场所，是人类利用自然、改造自然的主要场所^[13]。人居环境中涵盖了山、水、林、田、草等碳汇资源和建筑、交通、工业等人类经济社会中主要的碳排放活动。更为重

要的是，人居环境科学突出探讨了地表空间上的人类活动，而人类的任何活动都有可能产生碳排放。

从人居环境科学视角出发，能够将宏观层面的城乡空间环境与微观层面的人类活动相统一，全面客观地反映城乡空间内山、水、林、田、草等碳汇资源和人类活动作用下的碳排放活动，将有助于发挥空间规划对城乡空间内各类要素的整合能力，最大限度地实现城乡人居环境中碳排放活动和碳汇资源的有机协调与动态平衡，推动城乡更高效地实现碳中和目标。因此，本文从人居环境科学视角构建城市群碳中和潜力评价体系，既有助于全面了解和掌握当前长三角城市群碳中和发展的现实基础，又能够有效对接与指导国土空间规划实践。

(2) 基于“统计数据+大数据”的多源数据优化碳中和评价指标。

针对传统统计数据的不足之处，最近国内外研究常采用“统计数据+大数据”的方式，构建多源数据，进一步丰富数据来源和提升数据质量。近年来，信息技术的发展催生了居民时空轨迹、遥感等实时感知数据，这些数据具有数据量大、时效性强、获取门槛低和统计口径一致等优势，显著提升了城市群、城市等大尺度的城市空间数据质量。因此，本文尝试使用手机信令、夜间灯光遥感、全国空气质量监测等多源大数据，从城市交通、能源消耗、城市气候等多维度测度城市相关的碳排放活动与碳汇资源，构建多源数据支持下的城市碳中和潜力评价体系。

2 城市碳中和潜力评价体系的构建

2.1 研究区域

本文研究的长三角城市群范围包括上海、江苏、浙江和安徽“三省一市”，这也是《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》划定的规划范围。研究区域内“七普”常住人口为2.35亿，GDP产值为23.72万亿元。本文将地级及以上城市

作为研究对象, 共计 41 座城市。

2.2 城市碳中和潜力评价体系

基于人居环境科学体系, 本文从自然、人类、社会、居住和支撑五大系统出发, 构建城市群碳中和潜力评价体系。其中, 准则层由五大系统构成: ①自然系统着重关注自然/人工生态系统的碳汇潜力; ②人类系统着重评价人类生活中的物质需求与行为活动的碳排放潜力; ③社会系统是通过社会经济、体制与创新的发展程度来综合反映城市实现碳中和的基础; ④居住系统关注人类居住空间的碳排放潜力; ⑤支撑系统关注人类、社会与居住三大系统所需能源基础设施的碳排放潜力。

指标层是基于人居环境五大系统选取 20 个碳相关指标作为城市碳中和潜力指标。在自然系统层面, 通过森林覆盖率、空气质量指数 (Air Quality Index, 简称“AQI”) 反映自然生态系统的情况, 通过每年城市的高温/低温天气的次数与人均公园绿地面积反映城市热岛效应、人工绿地等人工生态系统的情况, 4 个指标共同反映自然/人工生态系统的碳汇潜力; 在人类系统层面, 选取恩格尔系数、城镇化率 2 个指标从微观与宏观层面反映人类生活的物质需求, 通过每万人拥有公共汽车数量/私家车数量反映人类的行为活动, 4 个指标反映人类系统的碳排放潜力; 在社会系统层面, 选取人均 GDP、第三产业增加值比例、财政支出中科学技术支出额、碳中和政策文件数量 4 个指标, 分别反映城市在经济、产业、科技和政策方面实现碳中和的潜力; 在居住系统层面, 选取城市建设用地占市区面积比重、通勤时间、城市市政公用设施建设固定资产投资、人均城市建设用地面积 4 个居住空间相关指标, 分别从宏观与微观层面反映土地、交通、服务设施等人类主要居住空间的碳排放潜力; 在支撑系统层面, 选取夜间灯光总量、单位 GDP 能耗 (标准煤)、人均城镇居民生活用电量、人均居民家庭供气用量

表 1 基于人居环境科学的城市群碳中和潜力评价体系

目标层	准则层	指标层	
城市碳中和发展潜力	自然系统	X_1 森林覆盖率 /%	
		X_2 AQI	
		X_3 每年城市的高温 (低温) 天气的次数 / 天	
		X_4 人均公园绿地面积 / (人 / 平方米)	
	人类系统	X_5 恩格尔系数 /%	
		X_6 城镇化率 /%	
		X_7 每万人拥有公共汽车数量 / (辆 / 万人)	
		X_8 每万人拥有私家车数量 / (辆 / 万人)	
		社会系统	X_9 人均 GDP / 元
			X_{10} 第三产业增加值比例 /%
	X_{11} 财政支出中科学技术支出额 / 亿元		
	X_{12} 碳中和政策文件数量 / 个		
	居住系统	X_{13} 城市建设用地占市区面积比重 /%	
		X_{14} 人均城市建设用地面积 / (人 / 平方米)	
		X_{15} 通勤时间 / 分钟	
		X_{16} 城市市政公用设施建设固定资产投资 / 万元	
	支撑系统	X_{17} 夜间灯光总量 / DN 值	
		X_{18} 单位 GDP 能耗 (标准煤) / (吨标煤 / 万元)	
		X_{19} 人均城镇居民生活用电量 / (千瓦时 / 人)	
		X_{20} 人均居民家庭供气用量 / (立方米 / 人)	

4 个指标, 从宏观与微观层面反映城市的碳排放潜力 (表 1)。

2.3 数据来源

本文采用“统计数据+大数据”的方式, 明确碳中和潜力评价体系的数据来源包括两部分: 一部分是长三角城市群范围内各个城市的相关统计数据; 另一部分是手机信令、夜间灯光遥感、AQI、城市全年实时温度等大数据。其中, 统计数据主要来自公开的统计年鉴, 包括 2019 年的中国城市统计年鉴、各个城市的统计年鉴、中国能源统计年鉴和中国林业统计年鉴等, 本文从中选取能够体现城市经济、社会、能源、生态等发展情况的指标展开研究^[12]。多源大数据则是通过数据公司、公开渠道获取。例如, 通勤时间是基于中国联通公司的手机信令数据, 采用 2019 年某个月长三角城市群所有中国联通用户的时空移动信息, 利用当前相对成熟的算法识别出手机用户的夜间居住地和日间工作地,

测算出每个手机用户每次通勤的时间, 最终按照城市单元汇总通勤时间^[14-17]; 夜间灯光总量是利用武汉大学的“珞珈一号”获取的遥感卫星数据, 采用 2019 年全年研究范围内 1.5 km 网格的夜间灯光遥感数据, 从中提取并统计市域行政边界范围内的夜间灯光总亮度值; AQI 数据来自中国天气网站的实时监测空气质量指数, 采集 2019 年一年内研究范围内的城市日均 AQI 数据; 城市实时温度是从天气 APP 上获取 2019 年一年内长三角城市群内城市平均每日的实时温度信息, 按照每日温度筛选出全年高温/低温天气的次数。

3 长三角城市群碳中和潜力评价与空间格局

3.1 城市碳中和潜力评价指数的测度

主成分分析 (Principal Component Analysis, 简称为“PCA”) 是构建指标评价体系的常用分析方法^[18], 其通过将原

表 2 城市碳中和潜力主成分分析结果

指标变量	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
X ₁ 森林覆盖率 / %	- 0.243 0	0.030 1	0.844 7	0.103 1
X ₂ AQI	- 0.129 3	- 0.025 0	- 0.895 7	0.174 9
X ₃ 每年城市的高温 (低温) 天气的天数 / 天	- 0.208 3	- 0.010 3	- 0.557 6	0.252 9
X ₄ 人均公园绿地面积 / (人 / 平方米)	- 0.823 5	0.305 1	- 0.039 5	0.175 5
X ₅ 恩格尔系数 / %	- 0.589 5	- 0.321 7	- 0.270 5	0.286 8
X ₆ 城镇化率 / %	0.878 5	0.176 7	0.107 3	- 0.302 7
X ₇ 每万人拥有公共汽车数量 / (辆 / 万人)	0.856 5	0.159 3	0.100 8	- 0.105 9
X ₈ 每万人拥有私家车数量 / (辆 / 万人)	0.511 9	0.314 3	0.331 2	- 0.540 9
X ₉ 人均 GDP / 元	0.779 1	0.165 7	0.095 7	- 0.474 6
X ₁₀ 第三产业增加值比例 / %	0.581 4	0.430 9	0.530 3	0.145 0
X ₁₁ 财政支出中科学技术支出额 / 亿元	0.708 5	0.589 7	0.020 1	- 0.090 8
X ₁₂ 碳中和政策文件数量 / 个	0.541 2	0.392 2	0.266 1	0.351 3
X ₁₃ 城市建设用地占市区面积比重 / %	0.680 0	0.219 6	- 0.233 3	0.138 3
X ₁₄ 人均城市建设用地面积 / (人 / 平方米)	0.918 6	- 0.039 2	- 0.032 4	0.077 3
X ₁₅ 通勤时间 / 分钟	- 0.074 5	- 0.156 7	- 0.033 1	0.832 7
X ₁₆ 城市市政公用设施建设固定资产投资 / 万元	0.608 9	0.636 6	0.072 2	- 0.011 8
X ₁₇ 夜间灯光总量 / DN 值	0.119 8	0.898 2	- 0.040 8	- 0.223 1
X ₁₈ 单位 GDP 能耗 (标准煤) / (吨标煤 / 万元)	0.148 7	- 0.677 2	- 0.259 6	0.037 9
X ₁₉ 人均城镇居民生活用电量 / (千瓦时 / 人)	0.786 2	0.354 2	0.386 6	- 0.169 5
X ₂₀ 人均居民家庭供气用量 / (立方米 / 人)	0.889 9	0.152 5	- 0.228 9	0.112 5

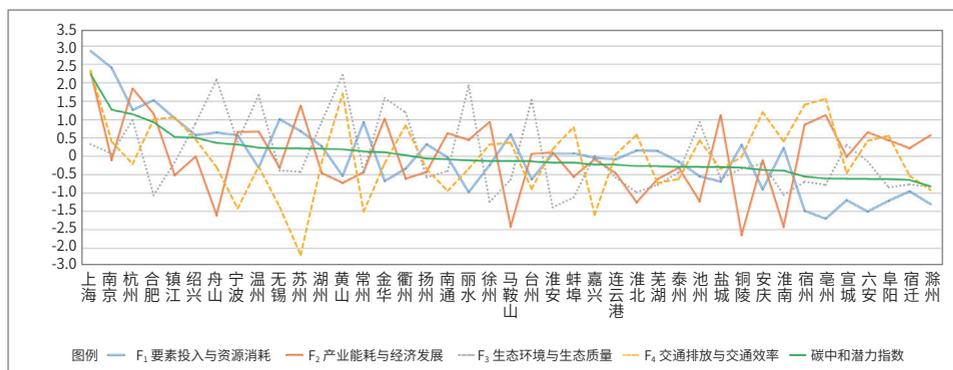


图 1 长三角城市群中 41 座城市的碳中和潜力指数

始变量转换为原始变量的线性组合 (主成分), 在保留主要信息的基础上, 达到简化和降维目的。相较于因子分析 (Factor Analysis, 简称为“FA”), PCA 分析更强调数据本身的内在关系, 分析过程相对客观。因此, 本文采用 PCA 分析法划分潜力评价体系的主成分, 基于各个主成分的解释值占比与得分, 测度城市碳中和潜力评价指数, 具体公式如下:

$$I = aF_1 + bF_2 + cF_3 + \dots + nF_m$$

公式 (1)

其中, I 为城市碳中和潜力评价指数;

a, b, c, \dots, n 为选定各个主成分的解释值与总解释值的比值; $F_1, F_2, F_3, \dots, F_m$ 为各个主成分的得分。

在此基础上, 将 20 个城市碳中和潜力指标作为变量数据导入 Stata15 软件中进行降维处理, 得到 KMO=0.758 4, 接近于 1.0, BTS 值 (球形检验) 的显著性小于 0.01, 表示通过检验。根据主成分分析结果, 在所有 20 个指标变量中有 4 个主成分的特征值均大于 1.0, 占总组合方差的 76.36%, 所以将上述 4 个主成分保留, 分别重命名为主成分 F_1, F_2, F_3, F_4 (表 2)。

可以看出, 主成分 F_1 对 $X_4, X_5, X_6, X_7, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{13}, X_{14}, X_{19}, X_{20}$ 有较大荷载, 这些变量体现了城市经济社会发展对土地、能源等资源要素的需求, 可命名为“要素投入与资源消耗”主成分; F_2 对 X_{16}, X_{17}, X_{18} 有较大荷载, 这些变量体现了城市高能耗产业支撑的城市经济社会发展水平, 可命名为“产业能耗与经济发展”主成分; F_3 对 X_1, X_2, X_3 有较大荷载, 这些变量体现了城市所处区域自然系统的总体生态环境与质量, 可命名为“生态环境与生态质量”主成分; F_4 对 X_8, X_{15} 有较大荷载, 这些变量体现了城市交通的发展水平及居民出行效率, 可命名为“交通排放与交通效率”主成分。

本文通过 PCA 分析获取每座城市的主成分得分之和, 采用公式 (1) 测度长三角城市群的碳中和潜力评价指数 (图 1)。长三角城市群碳中和潜力指数排名前十的城市分别是上海、南京、杭州、合肥、镇江、绍兴、舟山、宁波、温州和无锡。同时, 41 座城市的 4 个主成分的得分与最终的碳中和指数并不一致, 说明每座城市在人居环境建设方面的差异会影响到城市的碳中和潜力。

3.2 城市碳中和潜力指数的空间分布特征

城市碳中和潜力指数的空间分布为典型的重尾分布 (Heavy-tailed Distribution)。Jiang B 等人认为重尾分布特征下常用的自然断裂法不能有效反映出高值区的分布特征, 由此提出了头尾断裂法 (Head-tail Breaks)^[19-20]。本文采用头尾断裂法分析城市碳中和潜力指数, 按碳中和潜力指数的高低将 41 座城市分为低潜力城市、相对低潜力城市、相对高潜力城市和高潜力城市 4 类 (图 2)。

结果显示, 长三角城市群内高潜力城市为上海, 相对高潜力城市为南京、杭州和合肥, 高潜力城市和相对高潜力城市的数量占全部研究城市总数不足 1/10。上海是长三角城市群唯一的直辖

市,南京、杭州和合肥是省会城市,这说明行政级别高的城市在经济、社会、科研和设施等方面具有优势,更有利于率先实现碳中和。

相对低潜力城市主要位于苏南和浙北地区,分为两类:一类是苏州、无锡、常州、镇江、绍兴、宁波和温州等传统的经济发达城市,其产业基础、科技实力、生态环境等较好,能为实现碳中和奠定坚实的物质基础;另一类是湖州、舟山、金华、衢州和黄山等经济发展相对落后但生态环境优越的城市,这些城市在发展过程中严格保护生态环境,尽管经济发展相对落后,但为绿色低碳转型发展奠定了良好的生态基础。

低潜力城市包括安徽绝大部分城市、江苏的苏北、苏中地区与浙江的嘉兴、台州和丽水,这些城市的经济发展水平相对较低且生态环境相对脆弱,由于过去高耗能、高污染的产业发展路径造成自然生态环境的破坏,制约了城市的碳中和潜力。

综上所述,长三角城市群碳中和潜力的空间布局呈现出明显的核心—边缘结构,东部沿海、沿江地区城市的碳中和潜力相对较高,与城市经济发展水平、行政层级呈现明显的空间一致性;不考虑上海,浙江 11 座城市、江苏 13 座城市与安徽 16 座城市的碳中和潜力指数平均值分别为 0.216 3、0.030 0、- 0.312 4,说明城市碳中和潜力存在明显的省域空间差异。尽管当前浙江 11 座城市的整体经济产业增加值不如江苏的 13 座城市,但浙江的城市碳中和潜力远高于江苏与安徽,这体现了浙江在“两山”理念指引下城市经济转型升级、资源高效利用、环境持续改善与城乡均衡发展的良好局面,相对实现了经济、社会的更高质量发展。

3.3 城市碳中和潜力评价指数的空间聚类分析

使用 Stata15 软件对 4 个主成分进行 k-mean 聚类分析,结果显示 4 个主

成分呈现出 4 个聚类,空间分布具有明显的地域集聚特征(图 3)。

第 1 个聚类是基于 PCA 分析中的主成分 F_1 形成的,由镇江、泰州、扬州、淮安、连云港、马鞍山、芜湖、淮南、蚌埠、铜陵与淮北 11 座城市组成。这类城市主要位于长江沿岸、江苏北部和安徽中部等交通便捷地区,当前处于快速城镇化阶段,城市土地过度扩张与人口快速增长,经济快速发展对各类资源要素的需求较大,能耗需求较高,城镇化主导了城市碳中和潜力,所以本文将这类城市称为“城镇化主导型城市”。

第 2 个聚类是基于主成分 F_2 形成的,由上海、南京、杭州、苏州、无锡、常州、南通、宁波、嘉兴和合肥 10 座城市组成。这类城市全部是长三角城市群的核心城市,与长三角城市群的“Z”型结构基本一致,既包括了上海、南京、杭州、苏州、无锡、常州等传统发达地区,也涵盖了合肥、南通等新兴城市。这类城市是长三角城市群对外开放的高地,其产业集聚规模、城市设施建设等方面处于领先地位,整体能耗较高,产业发展主导了城市碳中和潜力,所以本文将这类城市称为“产业主导型城市”。

第 3 个聚类是基于主成分 F_3 形成的,由湖州、绍兴、舟山、黄山、池州、衢州、金华、丽水、台州与温州 10 座城市

组成。这类城市全部位于长江以南地区,大部分位于浙江内,生态环境本底较好,城市经济产业与城市建设相对落后,能耗相对较低,生态环境主导了城市碳中和潜力,所以本文将这类城市称为“生态主导型城市”。

第 4 个聚类是基于主成分 F_4 形成的,由盐城、宿迁、滁州、六安、徐州、宿州、亳州、阜阳、安庆与宣城 10 座城市组成。与其他类型城市相比,这类城市主要位于江苏北部和安徽西部地区,经济相对落后,城市生态环境本底一般,城市基础设施相对落后,但城市人均汽车保有量高且通勤时间长,交通问题相对凸显,交通主导了城市碳中和潜力,所以本文将这类城市称为“交通主导型城市”。

4 长三角城市群碳中和实现策略

针对长三角城市群碳中和潜力的空间分布和空间聚类特征,本文从区域协调机制、城市规模管控、国土空间规划 3 个方面提出实现城市群碳中和的策略。

4.1 建立“碳排放权—发展权”区域协调机制,建设智慧信息与区域政府合作平台

通过上述分析发现,长三角城市群碳中和潜力指数呈现出核心—边缘结构

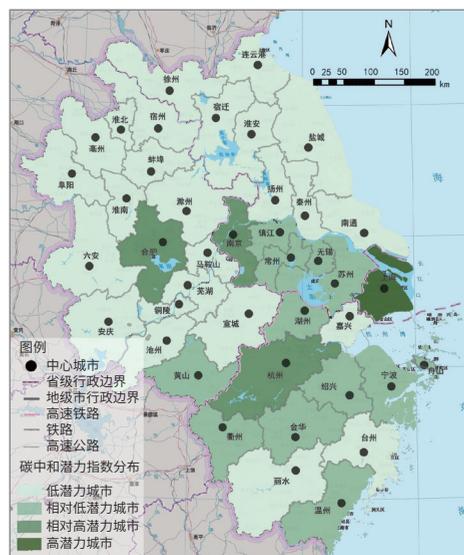


图 2 长三角城市群碳中和潜力评价指数空间分布

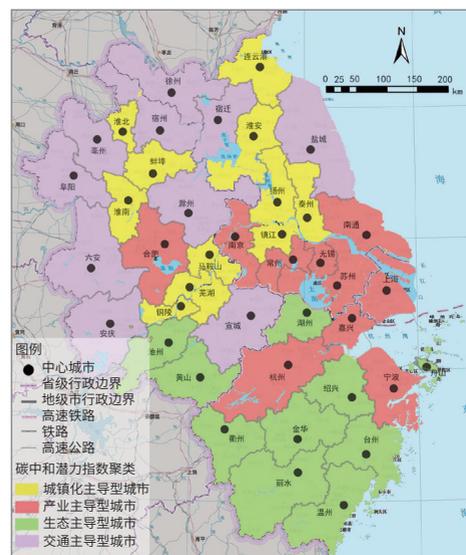


图 3 长三角城市群碳中和潜力评价指数空间聚类

特征，省际差异较大，城市群碳中和潜力空间分布不均衡。随着长三角区域一体化进程的推进，各类空间要素流动加速，城市间形成了产业、交通、基础设施、绿色生态等一体化空间，如机场与城际轨道等区域交通设施的碳排放活动、区域湖泊流域和山脉形成的碳汇资源，均难以厘清来源并实施管控；同时，区域城市经济发展规模扩大和居民生活水平提高将带来碳排放活动的增长和碳汇资源的损耗。因此，破解区域城市间经济发展与碳中和平衡的难题显得尤为重要。

面对实现“双碳”目标的紧迫要求及城市群更高质量一体化发展的目标，应将各个城市的碳中和目标纳入长三角城市群统筹考虑，从区域视角推动城市间的经济发展与碳排放的相互协调，通过政策引导建立“碳排放权—发展权”区域协调机制。著名经济学家张五常认为，过去我国经济发展的奇迹在于地区间的经济竞争^[21]。然而，这种过度追求城市经济效益的发展模式造成了生态保护缺失与产业能耗失控的问题，表现出对城市“发展权”的管控不足。例如，过去长三角地区的太湖、巢湖、长江等重大生态廊道的保护缺失破坏了区域重要的碳汇资源，而严格的保护政策又会在一定程度上牺牲所在城市的“发展权”，因此急需构建“碳排放权—发展权”区域协调机制。一些城市因生态保护造成的“发展权”损失，将由其他城市通过购买其“排放权”进行经济补偿。这种“碳排放权—发展权”区域协调机制与中央对地方财政的转移支付类似，但更多是通过市场化的碳交易制度进行，能够最大限度地发挥市场主体的调节能力，有助于实现城市群更高质量的一体化发展。

为了保障“碳排放权—发展权”区域协调机制的实施，还需加强建设两个平台：一是建设智慧信息平台，通过数字化、智慧化技术将长三角城市群人居环境中的碳排放活动与碳汇资源进行量化汇总与分析，实现对碳相关数据的全方位、多尺度、高精度、长时段的监测，

并对未来趋势进行态势感知和精准预测；二是建设区域政府合作协商平台，通过成立区域协同减排政府工作组，以制度规范增强“碳排放权—发展权”的权威性，建立健全政府推动、市场主导、社会共同参与的碳中和协同机制。

4.2 推动“以碳定人”的城市规模管控，落实以人为核心的新型城镇化建设

针对城市群碳中和潜力的空间分布不均衡特征，除了要建立区域协调机制，还需进一步提升城市层面的碳中和潜力，其中的关键是控制城市碳排放规模。既有研究表明了城市碳排放规模与城市人口规模呈现正相关^[22]，而本文测算的当前城市群碳中和潜力的空间分布与人口规模分布不完全一致，因此未来需要从城市实际的碳需求出发加以管控和调整。过去是基于常住人口数量来确定城市建设用地总量，但“以人定地”的规划测度方法间接造成了“土地城镇化”现象，不仅增加了城市碳排放活动，还减少了生态用地等碳汇资源。

为此，《“十四五”规划纲要》提出以人为核心的新型城镇化，以此改善过去的“土地城镇化”现象，从城市的实际需求出发确定人居环境的“人—地”关系；《“十四五”节水型社会建设规划》提出“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”，把水资源作为最大的刚性约束，合理规划人口、城市和产业发展，并且将其运用于雄安新区的城市规模预测中。在“双碳”目标下，“以水定人”虽然有利于实现城市规模增长与资源环境的有序协调，但是更多的是通过资源环境约束实现“人—水”关系的平衡，这难以满足城市实现碳中和的现实需求。

因此，在新型城镇化发展背景下，本文借鉴“以水定人”的规划理念，提出“以碳定人”的城市规模管控方法，在统筹协调“人—地”“人—水”关系的基础上，突出城市层面各类碳要素的规模管控，将土地、水等资源要素统一纳

入“人—碳”体系范畴，重点加强对城市发展中各类碳排放活动和碳汇资源的界定，通过“以碳定人”的城市规模管控预测城市碳中和潜力能够承载的合理人口规模，落实以人为核心的新型城镇化建设。

4.3 开展“因城治碳”的国土空间规划，促进人居环境的绿色低碳转型

研究发现，长三角城市群碳中和潜力具有明显的地域集聚特征，并且呈现出城镇化、产业、生态与交通4种主导类型。针对各类型特征，本文认为适宜开展“因城治碳”的国土空间规划，促进人居环境的绿色低碳转型。

(1) 城镇化主导型城市。

该类型城市处于快速城镇化阶段，是长三角城市群未来的高碳排放地区。这类城市的国土空间规划应严格控制城市建设用地规模，强化对城镇开发边界的管控，提高城市产业准入门槛，大力发展绿色产业，有序淘汰落后产能，提升城市创新发展的新动能，提高城市基础设施的运行效率。

(2) 产业主导型城市。

该类型城市的人口规模较大且经济产业基础较好，是长三角城市群未来可能率先实现碳中和的地区。这类城市的国土空间规划应合理划定城镇开发边界，加快实施产业绿色转型与智慧生态城市建设，促进城乡融合与产城融合，提高城市生产能源效率，优化城市能源结构，构建紧凑布局、高效有序的多中心网络化城镇空间。

(3) 生态主导型城市。

该类型城市的生态本底好，是长三角城市群未来主要的碳汇空间。这类城市的国土空间规划应强化对山、水、林、田、草等生态用地的刚性管控，推进城市生态修复与提升生态碳汇能力，协调生态保护用地与城市发展用地的关系，营造增强碳汇能力的城市生态空间。

(4) 交通主导型城市。

该类型城市的交通基础薄弱,也是长三角城市群未来主要的碳源。这类城市的国土空间规划应重点解决城市交通问题,减少通勤时长与人均汽车保有量,提升交通运行效率,优先发展公共交通、共享单车与慢行交通,打造连续通畅的步行道网络,协同发展智慧城市与智能网联汽车,构建智慧绿色交通运输体系。

5 结语

本文尝试从人居环境科学视角出发,使用多源数据构建长三角城市群碳中和潜力评价体系,以此测度城市碳中和潜力评价指数,通过分析碳中和潜力的空间分布与空间聚类特征,发现长三角城市群碳中和潜力的空间布局呈现出明显的核心—边缘结构特征,这与城市经济发展水平、行政层级具有明显的空间一致性,并且呈现典型的省域空间差异;同时,根据长三角城市群的碳中和潜力及地域集聚特征,将区域内的城市分为城镇化主导型、产业主导型、生态主导型、交通主导型4种类型。此外,本文根据当前长三角城市群碳中和空间格局特征,提出以下策略:建立“碳排权—发展权”区域协调机制,建设智慧信息与区域政府合作协商平台;推动“以碳定人”的城市规模管控,落实以人为核心的新型城镇化建设;开展“因城治碳”的国土空间规划,促进人居环境的绿色低碳转型。

尽管本文使用多源数据优化了碳中和潜力评价指标,并尝试以大数据反映城市碳中和潜力的实时指标数据,但这些数据依然不能全面、准确地反映城市碳排放和碳汇情况,如手机信令数据测度的通勤时间虽然能够在一定程度上反映居民出行所产生的碳排放,但是个体采用的交通方式和对交通工具的使用习惯依然会影响碳排放;不同地区和不同气候条件下单位面积绿地的碳汇能力存在地域差异,不能统一核算。因此,未来需要了解和掌握更加精准的城市运行碳排放活动与碳汇资源相关数据,进一

步提升评价和监测的精准性。

本文仅是基于城市尺度进行城市群碳中和潜力的现状评价,研究结论还难以直接指导城市微观层面的规划建设。而且在“双碳”目标的引领下,实现碳中和是一个长期实践过程,今后的研究还应关注微观尺度,从土地使用、城市更新、居民生活、城市小气候等小尺度展开量化分析,以更深入地反映城市碳排放情况,这也将有助于进一步提升国土空间规划实践的有效性。■

【参考文献】

- [1] Yang Y, Li X, Zheng H. Analysis on Beijing's Low-carbon City Evaluation Index System[C]//International Conference on Advances in Education and Management, 2011.
- [2] 朱婧, 刘学敏, 张昱. 中国低碳城市建设评价指标体系构建[J]. 生态经济, 2017(12): 52-56.
- [3] 中国社会科学院城市发展与环境研究所. 重构中国低碳城市评价指标体系: 方法学研究及应用指南[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2013.
- [4] 吴健生, 许娜, 张曦文. 中国低碳城市评价与空间格局分析[J]. 地理科学进展, 2016(2): 204-213.
- [5] 付允, 刘怡君, 汪云林. 低碳城市的评价方法与支撑体系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010(8): 44-47.
- [6] 邹茆, 张晨悦, 房涛, 等. 基于碳平衡核算的寒冷地区高校校园低碳建设策略研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017(4): 144-150.
- [7] 覃盟琳, 黎小元, 袁倩文, 等. 北部湾城市群(广西)低碳空间结构评价与优化策略[J]. 规划师, 2019(13): 82-86.
- [8] 朱潜挺, 宋娜, 阚之程, 等. 京津冀城市群低碳转型的微观主体驱动机理分析与建模[J]. 环境保护, 2021(增刊2): 40-43.
- [9] 曹丽斌, 李明煜, 张立, 等. 长三角城市群CO₂排放达峰影响研究[J]. 环境工程, 2020(11): 33-38, 59.
- [10] 蒋长流, 韩春虹. 低碳城镇化转型的内生性约束: 机制分析与治理框架[J]. 城市发展研究, 2015(9): 9-14.
- [11] 田云, 林子娟. 巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究[J]. 自

然资源学报, 2021(4): 921-933.

- [12] 尚丽, 苏昕, 汪鸣泉, 等. 城市低碳评价指标体系研究进展[J]. 城乡规划, 2018(1): 78-83.
- [13] 吴良镛. 人居环境科学导论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [14] 钮心毅, 王垚, 丁亮. 利用手机信令数据测度城镇体系的等级结构[J]. 规划师, 2017(1): 50-56.
- [15] 王垚, 钮心毅. 长江三角洲城市群核心区的功能多中心特征和规划响应——基于城际出行联系的研究[J]. 国际城市规划, 2021(6): 98-108.
- [16] 王垚, 钮心毅, 宋小冬. 基于城际出行的长三角城市群空间组织特征[J]. 城市规划, 2021(11): 43-53.
- [17] 王垚, 朱美琳, 王勇, 等. 全球功能要素流动视角下长三角城市群空间组织特征与规划响应[J]. 规划师, 2021(17): 59-67.
- [18] Xiao Y, Wang Y, Miao S, et al. Assessing Polycentric Urban Development in Shanghai, China, with Detailed Passive Mobile Phone Data[J]. Environment and Planning B Planning and Design, 2021(9): 2 656-2 674.
- [19] Jiang B. Head/Tail Breaks: A New Classification Scheme for Data With a Heavy-tailed Distribution[J]. The Professional Geographer, 2013(3): 482-494.
- [20] 王垚, 钮心毅. 基于跨城出行联系的城市群等级结构测度与规划建议——以长江三角洲城市群核心区为例[J]. 南方建筑, 2020(2): 28-34.
- [21] 张五常. 中国的经济制度[M]. 北京: 中信出版社, 2009.
- [22] 钟宜根, 葛幼松, 张强华, 等. 城市规模与碳排放的相关性思考[J]. 现代城市研究, 2010(5): 65-69.

【收稿日期】2022-01-18