

2000—2020年长三角地区城市低碳竞争力时空演化

孔旻蔚¹,胡 宏^{1,2},张宏韫¹,杜思涵¹

(1.南京大学建筑与城市规划学院,南京 211093;2.江苏智慧城市研究基地,南京 211093)

摘要:“双碳”目标下需要在区域范围研究城市低碳竞争力,解析区域内各城市低碳发展条件的时空演化差异。以长三角41个城市2000—2020年低碳竞争力为研究对象,以碳排放量、碳排放社会经济关联因素、低碳技术与政策3个维度构建城市低碳竞争力评价指标体系,基于TOPSIS-灰色关联法解析长三角地区城市低碳竞争力时序演化特征,并采用LISA时间路径和时空跃迁模型分析其空间演化格局,最终划分了城市时空演化类型。结果表明:①长三角地区城市低碳竞争力位序更替明显,近50%的城市演化呈现波动上升趋势,地区平均水平上海市>浙江省>江苏省>安徽省。②碳排放量空间关联度变化较大,碳排放社会经济关联因素空间关联度较弱,而低碳技术与政策时空协同发展态势显著。③长三角城市不发生时空类型跃迁或跃迁方向一致的概率为81.1%,表明长三角城市低碳竞争力空间格局存在一定的路径依赖。④长三角地区低碳竞争力存在不同的时空演化类型,北部部分城市属于低水平固化型;皖南和浙南地区部分城市属于高水平协同型;中部的杭州、宁波等城市属于高水平溢散型,带动周边地区向好发展;而上海、南京与合肥属于高水平中心型,尚未充分发挥带动作用。从长三角整体视角来看,城市低碳竞争力三维度存在时空上的外部动力和内在因素之间的相互协调与转化,这驱动着该地区整体低碳竞争力的持续发展提升。本研究可为低碳导向的区域一体化发展提供政策借鉴。

关键词:长三角;低碳竞争力;时空演化;TOPSIS-灰色关联;探索性时空数据分析

DOI: 10.11821/dlyj020230046

1 引言

在区域范围研究城市低碳竞争力有助于深入了解区域内各城市低碳发展水平差异,推动经济、社会、生态、技术等资源在区域层面的合理有效配置,实现区域绿色低碳协同发展,进而实现国家的“双碳”目标。2009年,澳大利亚气候研究所(the Climate Institute)与英国第三代环境主义组织(E3G)联合发布《G20低碳竞争力》研究报告,提出“竞争力评估内容需要适应未来的低碳发展需求,低碳竞争力强的地区会以更低的碳排放强度和商品生产成本创造出更高的商品利润”^[1]。Lee等认为低碳竞争力是国家或地区的各经济体通过低碳技术、低碳产品和低碳服务,持续不断地创造经济价值的能力^[2]。2011年以来,低碳竞争力概念被引入国内,但近年来既有关于低碳竞争力的研究多针对高耗能企业和行业的发展,以城市和区域为研究对象的长时间序列低碳竞争力分析较少。在城市研究领域,国内学者延用G20低碳竞争力定义,并从竞争优势理论切入,认

收稿日期: 2023-01-13; 录用日期: 2023-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271202)

作者简介: 孔旻蔚(1999-),女,江苏南京人,研究方向为低碳与绿色发展研究,城市与区域空间分析技术。

E-mail: minw_k@hotmail.com

通讯作者: 胡宏(1983-),女,甘肃天水人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为低碳城市规划支持方法,多层次社会-生态系统,空间-行为-健康耦合机制。E-mail: h.hu@nju.edu.cn

2713-2737页

为城市通过创造良好的低碳环境有助于形成相对竞争优势，进而对各种资源要素持续强劲的集聚、扩散和利用^[3]。依托脱钩理论，城市低碳竞争力起初被等同于城市经济增长脱离碳排放的变化状态，研究侧重于以碳排放约束为前提的城市经济增长问题^[4,5]。随着理论研究的推进，相关学者引入生态经济学理论、可持续发展理论等扩展城市低碳竞争力内涵，刘国平等主张城市低碳竞争力发展要超越增长，追求社会经济可持续发展的综合福利^[3,6]；慈福义认为提高城市低碳竞争力的根本目标是协同发挥各类要素以维持城市经济、社会和生态协调发展的最优化效益^[7]，并逐渐在国内外学界达成基本共识。

城市低碳竞争力评价框架最早多由经济、社会与环境三大维度构成，主要从总量、效率、变化率3个方面进行度量。具体而言，经济维度指标主要包括GDP和碳生产率，社会维度指标主要衡量社会福利水平及其碳效率，而环境维度指标主要衡量碳排放总量和均量^[8,9]。2013年以来，国内外研究借鉴低碳城市评价体系和DPSIR分析框架，围绕驱动力、压力、状态、影响和响应5个方面细分出经济产出、产业结构、能源模式、城市交通、建筑能耗、社会生活、生态碳汇、环境治理、清洁技术、政策规划等分维度^[10-14]。另一些学者通过构建LMDI、STIRPAT等分解模型，或应用PCA、AHP、熵权、灰色关联以及TOPSIS法等解析碳排放驱动因素，主要结论包括：经济产出与碳排放呈正相关，能源强度与结构改善是碳排放的重要抑制因素，产业结构调整与技术进步对碳排放也有抑制作用^[15-17]。也有研究从城市化与碳排放的关系入手，分析低碳城市建设路径，相关研究表明：城市化进程中建设用地的扩张和城市空间形态组织的变化对碳排放产生影响，空间规划调控对于城市化地区尤其是城市新区的碳减排来说颇具意义^[18-20]；伴随城市化进程加速，城市富裕程度提升，住房、用能、交通等居民生活消费对碳排放的影响比生产端碳排放更应予以重视^[21,22]；低碳环保政策可推动城市碳减排^[23,24]。

由上文可知，依托竞争优势、生态经济学、可持续发展理论等相关理论以及碳排放驱动因素解析的实证结论，城市低碳竞争力内涵界定和评估准则得到不断延伸。其中，直接影响能源消耗强度和效率的产业结构、技术水平是多数低碳竞争力评估研究的关注重点^[7-9]；近年来，随着低碳城市建设如火如荼地开展以及居民生活水平不断提高带来的消费侧碳排放压力，政策支持力度、社会生活消费模式被逐渐纳入低碳竞争力考量范围^[10-14]；越多研究关注到城市空间形态通过影响土地利用模式和交通系统结构在城市碳排放上产生的作用^[19]。因此，本文认为城市低碳竞争力是：在碳排放硬约束的首要前提下，城市进一步通过产业结构、社会生活、空间规划、技术进步、政策支持多层面的综合改善不断推动城市低碳发展转型，从而相对其他城市更具备协同各类资源要素、维持社会经济与生态可持续协调发展的竞争优势。

虽然低碳城市现有研究资料丰富，但在城市低碳竞争力研究方面存在三点不足。①城市低碳竞争力评价指标偏重社会经济统计数据，对空间形态维度关注不足。如通过影响社会经济活动配置和城市交通出行进而影响碳排放的土地利用碳排碳汇、城市空间格局与形态特征^[19]较少被纳入指标体系，因而研究结论较难从国土空间规划和治理角度提出低碳发展策略。②缺少从长时间序列时空耦合角度对城市低碳竞争力演化的综合分析。一些研究采用变异指数、Theil指数等测度区域空间差异^[25,26]，但对区域空间结构的变迁过程探讨不足，另一些研究对低碳竞争力时序曲线进行直观规律描述或采用灰色预测等模型进行仿真预测^[12,27]，但又仅聚焦于时间序列分析，缺乏对空间维度的考量。而探索性时空数据分析方法可以将时间和空间维度有效整合，更好地揭示区域内各城市的时空关联动态性特征^[28]。③已有研究从省域、都市圈和城市群整体视角分析了内部城市低碳竞争力的发展趋势，但鲜少对其发展模式类型进行归纳总结，且缺乏对城市低碳竞争

力内外驱动机制的讨论。如李健等对中国30个省、市、自治区的低碳竞争力水平进行了划分^[11]，杨春苗等对比研究了武汉城市圈、京津唐城市群、珠三角城市群、呼包鄂城市群内的城市低碳竞争力演化轨迹分异，但尚未结合时空双维度划分城市低碳竞争力演化模式类型^[27]；相关研究指出区域绿色发展受到资源禀赋等内部因素和政策制度等外部环境的综合影响，两者在不同地区的交织转化作用差异造成了区域绿色发展演化的时空分异^[29,30]，因此进一步厘清长三角城市低碳竞争力的内外驱动因素及其作用机制有助于回答如何促进区域低碳竞争力协调发展、协同提升的问题。

针对上述研究不足，本文基于对城市低碳竞争力内涵的理解，综合构建包含社会、经济、空间等多维度的低碳竞争力评价框架，在此基础上以2000—2020年长三角地区41个地级市为研究对象，综合运用TOPSIS-灰色关联、时间序列聚类、探索性时空数据分析等方法探析两个研究问题：①城市和区域的低碳竞争力在长时间序列上的时空演化格局；②区域内城市低碳竞争力时空演化的模式类型及驱动机制；以期为城市与区域低碳竞争力综合评估提供方法借鉴，进一步丰富时空交互视角下的区域与城市低碳竞争力演化研究，为低碳导向的国土空间规划和治理提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

本文选择长三角地区作为研究区。长三角地区是世界第六大城市群，也是中国经济社会发展的重要战略区域。长三角城市间的经济发展阶段、资源禀赋、产业结构、科技水平和生态本底状况等存在较大差异。随着长三角区域一体化深入推进，城市社会经济联系不断增强，区域生态廊道建设进一步加强，城市综合发展潜力和城市间的竞合关系也在逐步发生变化。同时，长三角地区是中国实现“双碳”目标的重点区域。21世纪以来，长三角城镇化进程加快，致使人口急剧膨胀、城市建成空间蔓延，依赖高碳化石能源消耗的社会经济活动迅速扩张，资源环境保护的压力日益沉重。城镇化、工业化快速导致长三角地区碳排放持续增长，区域间的碳排放规模差距也在不断加大。图1展示了国家与区域层面长三角地区低碳发展政策的变迁历程。2006年开始，长三角各省市加强合作，逐渐将节能减排、绿色发展作为区域的共同目标；2007年党的十七大明确提出生态文明建设战略后，长三角地区在生态环境共治领域的合作也日益加深；2010年以来随着长三角城市化进程加速，上海、杭州与苏南地区逐渐将高能耗传统制造业向苏中、苏北和皖江城市带转移，工业碳排放开始向西迁移；2012年第二批低碳城市试点政



图1 国家与区域层面长三角地区低碳发展政策变迁历程

Fig. 1 Changes in low-carbon development policies in the Yangtze River Delta at national and regional levels

策开展，长三角地区内杭州、上海、宁波等率先开启低碳发展实践，长三角地区东西部碳减排力度形成明显差异；党的十九大以来，伴随长三角一体化上升为国家战略，长三角城市低碳发展也逐渐向一体化前进；2019年《长江三角洲区域一体化发展纲要》提出以实现“双碳”目标推动长三角生态绿色一体化发展，对改善长三角地区城市的低碳竞争力差异形成助力。因此，在长三角一体化发展政策施行背景下，探索二十年来长三角城市低碳竞争力时空演化规律及其影响机制对于中国制定区域协同发展政策，实现“双碳”目标具有重要意义。

本文依据2019年国务院印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》划定的长三角地区范围作为研究区，包括江苏省、浙江省、安徽省和上海市，共41个地级市。区域总面积35万km²，2020年末常住人口2.35亿人，2020年GDP总量占全国的24%。长三角地区是单位国土面积能源消耗最大的地区之一，近20年来能源消耗总量在全国占比保持在16%左右，碳排放量位居全国前列^[31,32]，沿长江岸线城市人均碳排放量相对较高（图2）。

2.2 指标体系与数据来源

基于低碳竞争力概念内涵和既有研究从低碳基础、生产生活、科技政策等维度构建指标体系的思路^[3,10,11]，本文以碳排放量、碳排放社会经济关联因素、低碳技术与政策为三大准则层构建城市低碳竞争力评价指标体系。其中，碳排放量是城市低碳竞争力的具体体现，碳排放社会经济关联因素是城市低碳竞争力的内在驱动因素，而低碳技术与政策是推动城市低碳发展的核心催化剂。对此三大准则层的综合度量不仅反映城市当前的低碳发展水平，也体现了城市未来的低碳发展潜力。此外，这三个维度是彼此交织、互相影响作用的，进而形成了城市低碳竞争力的驱动—响应机制的整个过程：高强度的生产生活耗能与空间扩张致使城市面临着生态环境恶化和“碳排放双控”的压力，这驱使了城市碳减排政策施行与技术创新；相关政策响应进一步强化碳排放硬约束，倡导绿色

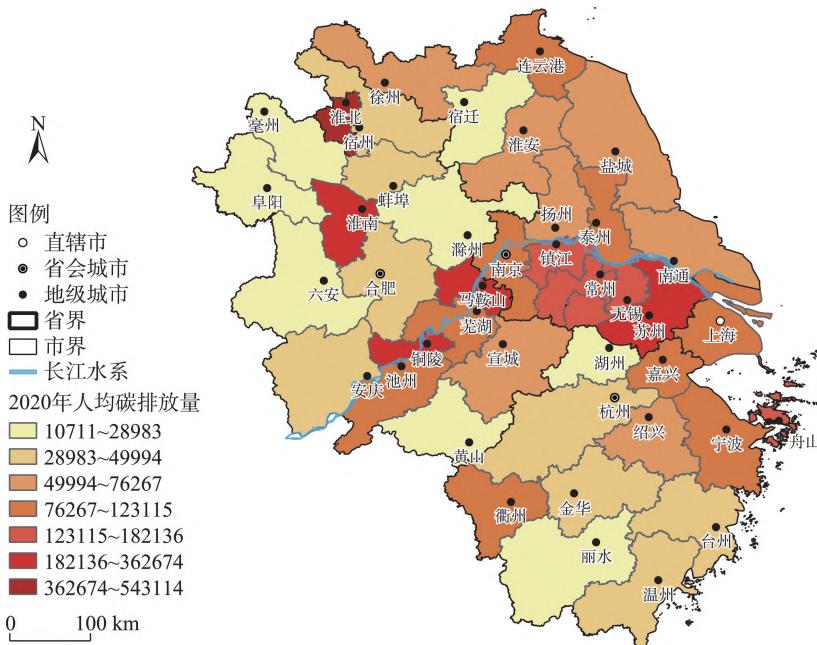


图2 研究范围及长三角地区2020年人均碳排放空间分布

Fig. 2 Study area and spatial distribution of per capita carbon emissions in the Yangtze River Delta in 2020

注：2020年长三角地区各市人均碳排放量的计算方式和数据来源见表1和注释①。

生产生活方式，激励企业和研究机构的低碳技术研发与成果转化，进而提升能源利用效率、促进低碳转型进程。

2.2.1 指标选取 依据上述评价框架，并结合长三角地区实际状况与发展特点，进一步细分出碳排放密度、土地碳源碳汇、低碳空间、低碳生产、低碳生活、低碳技术与低碳政策7个要素层，并筛选出21项表征性指标（表1），涵盖各方面的碳排放来源和影响碳排放的因素，并被大量研究证实了其与城市低碳发展的明确相关性。考虑到评价对象的时空跨度较大，本文尽可能兼顾了评价的全面性和数据的完整性，避免缺失值的插补给总体评价带来过大误差。在指标赋权上，赋予三大准则层相同的权重值，基于组合赋权法得到具体指标权重。

在碳排放量准则层，研究时期内长三角地区以煤类能源为支撑的粗放式经济增长导致了大量碳排放，土地利用方式的快速转变也降低了城市碳汇能力，因此本文将该维度分为碳排放密度和土地碳源碳汇两个二级指标层，关注城市社会经济活动和土地利用碳排放的总量、效率及其变化趋势。碳排放密度层包含经济、空间和人口三方面的单位排放量以及碳排放与经济的脱钩程度，其中社会经济碳排放总量计算参照IPCC指南^[43]、《省级温室气体清单编制指南》^[44]、《城市温室气体清单研究》^[45]以及胡欢等^[46]的测算方法、内容和排放系数，测算内容包括能源消费、工业过程、人口呼吸、废水处理和垃圾焚烧5项主要人类活动^①。土地碳源碳汇层反映城市土地利用的碳排总量，包含建设用地与耕地碳源量和生态用地碳汇量^②。为确保社会经济碳排放计算值的可靠性，将其中的能源消费排放数据与中国碳排放数据库（CEADs）中1997—2019年中国省级碳排放清单数据进行比照。该数据库由中英美欧多国研究机构共同建立与编纂，包括17种化石能源碳排放清单，目前已被国内外学者广泛运用^[47-49]。从该清单中汇总统计2000—2019年本研究涉及的8种化石能源碳排放总量，通过计算发现本研究历年长三角能源消费排放总量数据中，江苏、浙江和安徽各城市的平均相对误差分别为0.43%、1.66%、1.05%，三省的城市整体精度良好，而上海市在2007年以前可能由于该数据库与本文数据统计口径存在差异，导致平均相对误差大于10%，但2007年后小于5%，整体仍在合理精度范围内。

在碳排放社会经济关联因素准则层，研究时期内长三角逐渐走向城镇化与工业化中后期，产业结构变迁促使碳排效率提升，而居民消费水平提高为碳减排带来了新压力，城市建成区的无序扩张和空间分散也致使该地区承载的生产生活、交通出行碳排放增多，因此本文将该维度分为低碳空间、低碳生产和低碳生活3个二级指标层，关注生产、消费方式与结构的演变对城市碳排放总量的深远影响，以及城市形态通过影响社会经济活动的空间配置而对城市碳排放产生的间接效应。低碳空间层反映城市全域建成区和中心建成区形态的集中紧凑程度，研究表明城市建设空间越集中、规整和紧凑，产生的碳排放越少^[19,36]。低碳生产层反映产业结构的低碳程度，产业结构合理化通过衡量三大产业投入产出之间的协调程度以反映城市资源利用效率，资源利用效率越高，低碳化程度越高。产业结构高级化反映产业结构的“服务化”趋势，“轻能耗、重服务”的第三产

① 社会经济碳排放总量中，基于IPCC指南中计算温室气体排放量的基本方法，各项人类活动的碳排放量等于活动水平和排放因子的乘积。考虑长三角城市数据可获性，本文能源消耗主要统计原煤、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、液化石油气、电力九种能源；工业过程主要统计水泥、钢、成品钢材三种工业产品；废水处理和垃圾焚烧主要统计生活污水处理和生活垃圾焚烧产生的碳排放量，其中参考相关研究取城乡人口人均生活污水COD排放量的平均值70g（人/天）^[42]；人口呼吸统计城市所有人口全年呼吸产生的CO₂量。

② 参照IPCC指南并结合中国实际土地利用类型划分，以耕地、建设用地核算碳源，以林地、草地、水域和未利用地核算碳汇。不同区域由于自然条件不同，土地利用排放系数存在差异，本文采取经相关文献修正后的长江下游地区土地利用碳排和碳汇系数^[34]，具体数值见2.2.1表1。

表1 城市低碳竞争力评价指标体系及指标权重

Tab. 1 Index system of urban low-carbon competitiveness and index weight

准则层	要素层	指标层	计算公式/统计方法	指标含义
A碳排放量	A1碳排放密度	A11碳排放强度 (t/元) 0.0727 (-)	$A11 = A0/Y$	反映该城市碳排放的经济效率, 式中: $A0$ 是社会经济碳排放总量; Y 是该城市当年GDP ^[14]
		A12脱钩指数 0.0866 (-)	$A12 = \frac{\Delta A0/A0}{\Delta Y/Y}$	反映该城市碳排放变化相对于GDP增长的弹性系数, $A12 < 0$ 表示绝对脱钩, $A12 \in (0,1)$ 区间内表示相对脱钩; $A12 > 1$ 表示负脱钩 ^[33]
		A13地均碳排放量 (t/km ²) 0.0563 (-)	$A13 = A0/S$	反映该城市碳排放的空间效率; S 是该城市建成区面积 ^[14]
		A14人均碳排放量 (t/万人) 0.057 (-)	$A14 = A0/P$	反映该城市居民的平均碳排放量, 式中: P 是该城市当年人口总数 ^[14]
A2土地碳源碳汇	A21土地利用碳源量 (kg) 0.064 (-)	$A21 = \sum F_i \times A21i$		反映该城市耕地和建设用地的碳排放量, 式中: F_i 为第 i 种类型土地的排放系数; $A21i$ 包括耕地和建设用地; 排放系数分别取 $0.0422 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[34] 和 $5.58 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[35]
	A22生态用地碳汇量 (kg) 0.0373 (+)	$A22 = \sum G_i \times A22i$		反映该城市生态用地的碳汇量, 式中: G_i 为第 i 种类型土地的碳汇系数; $A22i$ 包含林地、草地、水域和未利用地; 碳汇系数分别取 $0.06125 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、 $0.0021 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 、 $0.00248 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $0.0005 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[35]
B碳排放社会经济关联因素	B1低碳空间 0.0445 (+)	B11优势度	$B11 = S_{\max}/S$	反映该城市建成区集中程度, 式中: S_{\max} 是最大建成区面积, S 是该城市建成区总面积 ^[36]
		B12紧凑度 0.0363 (+)	$B12 = 2\sqrt{\pi S_{\max}}/P_{\max}$	反映该城市建成区空间形态的规整程度; P_{\max} 是最大建成区周长 ^[39]
		B13破碎度 0.0409 (-)	$B13 = N/S$	反映该城市建成区斑块的破碎程度, 式中: N 是该市建成区斑块数量 ^[36]
B2低碳生产	B21产业结构合理化 0.059 (-)	$B21 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{Y} \right) \ln \left(\frac{Y_i/Y}{L_i/L} \right)$		反映该城市各产业间协调水平和资源有效利用程度, 式中: Y 和 L 为该城市当年GDP和总就业人数; Y_i 和 L_i 为当年第 i 产业的增加值和就业人数 ^[37]
	B22产业结构高级化 0.0613 (+)	$B22 = Y_3/Y_2$		反映该城市经济结构服务化倾向, 式中: Y_2 、 Y_3 分别是该城市当年第二、三产业增加值 ^[37]
B3低碳生活	B31人均乘坐公共汽电车次数 (次/年) 0.0318 (+)	市辖区公共汽电车客运总量/市辖区年末总人口		反映该城市居民公共交通出行情况 ^[38]
	B32城镇人均住房面积(m ²) 0.0402 (-)	统计年鉴城镇人均住房面积指标		反映该城市城镇居民居住诱发的碳排放 ^[39]
	B33农村人均住房面积(m ²) 0.0381 (-)	统计年鉴农村人均住房面积指标		反映该城市农村居民居住诱发的碳排放 ^[39]
	B34户均家庭用电量 (亿kwh/户) 0.0747 (-)	城乡居民生活用电量/总户数		反映该城市每户家庭生活用电诱发的碳排放 ^[38]

续表1

准则层	要素层	指标层	计算公式/统计方法	指标含义
C 低碳技术与政策	C1 低碳技术	C11 当年低碳相关企业数目(个)	以企业名称或经营范围包含“低碳”“节能”“减排”“新能源”任一关键词且实缴资本规模1000万以上的检索条件进行分时分市统计	反映支撑该城市发展低碳经济的技术基础和装备保障实力 ^[40]
		0.0785(+)		
	C12 当年低碳技术相关专利公开量(个)	以专利名称或说明书摘要包含“低碳”“节能”“减排”“碳排”任一关键词为检索条件,以专利公开日和申请人所在城市进行分时分市统计	反映该城市低碳技术创新能力 ^[41]	
		0.0415(+)		
	C2 低碳政策	C21 省级地方规范性文件数目(条)	以政策标题包含“节能”“低碳”“减排”“生态”“环保”“可持续”“能耗”“碳排”任一关键词且“现行有效”为检索条件进行分时分市统计	反映省人民政府等对该城市低碳发展的政策关注度 ^[42]
		0.0194(+)		
		C22 省级地方工作文件数目(条)		
		0.0144(+)		
		C23 市级地方规范性文件数目(条)		反映市人民政府对该城市低碳发展的政策关注度 ^[42]
		0.0282(+)		
		C24 市级地方工作文件数目(条)		
		0.0174(+)		

注: 指标层列每项指标末行的数字表示指标的权重, 括号内符号表示指标的正(+)、负(-)性。由产业结构合理化计算公式可知, 当指标值越小并趋于0时, 三大产业的产出结构、就业结构差距越小, 即产业结构越合理化, 城市低碳竞争力越强, 因而该指标是一个负向指标。

业相对第二产业碳排放更少^[37]。低碳生活层反映居民生活方式的低碳程度, 而交通出行和家庭能耗是居民生活碳排放的主要来源^[50]。已有研究表明住房面积大小是诱发居民日常电力和生活用气能耗的重要因素, 与家庭碳排放之间存在正相关关系^[51]。因此除参照已有研究选取人均乘坐公共汽电车次数和户均家庭用电量两项指标外^[38], 本研究还将城镇、农村居民人均住房面积纳入指标体系中。

在低碳技术与政策准则层, 长三角科教资源丰富, 具备低碳科技创新优势, 研究时期内低碳发展政策起步早并不断完善, 但城市间技术与政策发展的差距也在逐渐拉大。因此本文将该维度分为低碳技术和低碳政策两个二级指标层, 反映企业和政府等对城市碳排放问题的积极响应, 通过技术创新和政策施行以约束碳排总量、提升碳生产率。低碳技术层从相关企业和专利数目两方面衡量城市低碳技术创新能力, 低碳政策层反映省市两级低碳相关的政策关注度, 其中低碳企业根据师萍等研究提炼出“低碳”“节能”“新能源”等^[40]作为限定关键词, 低碳技术专利和低碳政策指标的限定词同理, 根据相应网站的检索结果进行调整, 并统一选取当年数值而非历年累计值。

2.2.2 数据来源 本文各项指标的原始数据包括统计年鉴数据、土地利用数据、空间边界数据以及互联网大数据(表2)。

3 研究方法

3.1 TOPSIS-灰色关联

由于城市低碳竞争力受到经济、社会与环境等多维度协同影响, 传统TOPSIS法难以

表2 数据来源一览表

Tab. 2 List of data sources

数据名称	数据时限	数据来源
统计年鉴数据	2000—2020年	《中国城市建设统计年鉴》《中国城市统计年鉴》和历年各省市统计年鉴
土地利用数据	2000年、2005年、2010年、2015年、2020年	中国科学院地理科学与资源研究所 http://www.resdc.cn
空间边界数据	城市建成区 2000年、2005年、2010年、2015年、2018年	清华大学全球城市边界数据集 http://data.ess.tsinghua.edu.cn/gub.html
	城市建成区边界 2000—2018年	清华大学基于遥感反演的不透水面反映中国40年(1978~2017)建成区 http://data.ess.tsinghua.edu.cn/urbanChina.html
	城市行政区边界 2021年	中国科学院资源环境科学与数据中心 http://www.resdc.cn
互联网 大数据	企业大数据 2000—2020年	企查查官网 https://www.qcc.com/web/search/advance
	专利大数据	佰腾专利网 https://www.baiten.cn
	政策大数据	北大法宝 https://www.pkulaw.com

注：对于2000—2020年间市域边界变更，如2011年合肥、芜湖、马鞍山三分巢湖市等情况，本文指标数据依据当年行政区划进行统计，空间分析统一使用2021年现行的长三角行政区划边界。

反映其内部要素的非线性结构，而结合灰色关联法能更有效地衡量评价对象与理想方案的接近程度，提高评价结果的准确性^[52]。因此，本文采用TOPSIS-灰色关联法测度长三角地区城市低碳竞争力，评价体系中的分维度得分计算同理。

3.1.1 计算指标权重 采用极差标准化方法对原始数据进行无量纲化处理。结合AHP法和熵权法进行组合赋权，既保留了客观数据对真实情况的反映，又体现了指标属性对低碳竞争力评价体系的重要程度，由于该方法已应用较多^[53]，具体计算过程不再赘述。

采用线性加权法得到组合权重 w_j ：

$$w_j = \mu \alpha_j + (1 - \mu) \beta_j \quad (1)$$

式中： α_j 、 β_j 分别为AHP法和熵权法所求第 j 个指标的权重； μ 为差异系数，通常取0.5。

3.1.2 计算加权规范化矩阵 V_{ij}

$$V_{ij} = (w_j x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & u_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： x_{ij}^+ 为各城市评价指标标准化值； m 、 n 分别为历年评价城市数和评价指标数，下同。

3.1.3 确定正负理想解 正理想解集：

$$v_j^+ = (\max v_{ij} | j = 1, 2, 3, \dots, n), V^+ = (v_1^+, v_2^+, v_3^+, \dots, v_n^+) \quad (3)$$

负理想解集：

$$v_j^- = (\min v_{ij} | j = 1, 2, 3, \dots, n), V^- = (v_1^-, v_2^-, v_3^-, \dots, v_n^-) \quad (4)$$

式中： v_j^+ 、 v_j^- 分别为第 j 项指标的正、负理想解； V^+ 、 V^- 分别为正、负理想解集合。

3.1.4 计算灰色关联系数 计算第*i*个评价对象的第*j*个指标与其正理想解的灰色关联系数 ρ_{ij}^+ :

$$\rho_{ij}^+ = \frac{\min_{1 \leq j \leq n} \min_{1 \leq i \leq m} |v_{ij}^+ - v_{ij}| + \xi \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} |v_{ij}^+ - v_{ij}|}{|v_{ij}^+ - v_{ij}| + \xi \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} |v_{ij}^+ - v_{ij}|} \quad (5)$$

式中: $\min_{1 \leq j \leq n} \min_{1 \leq i \leq m} |v_{ij}^+ - v_{ij}|$ 为两级最小差; $\max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} |v_{ij}^+ - v_{ij}|$ 为两级最大差; ξ 为分辨系数, ξ 越小关联系数之间的差异显著性越大, 通常取 0.5。各评价对象与正理想解的灰色关联系数矩阵 ρ^+ 为:

$$\rho^+ = \begin{bmatrix} \rho_{11}^+ & \rho_{12}^+ & \cdots & \rho_{1n}^+ \\ \rho_{21}^+ & \rho_{22}^+ & \cdots & \rho_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1}^+ & \rho_{m2}^+ & \cdots & \rho_{mn}^+ \end{bmatrix} \quad (6)$$

计算第*i*个评价对象与正理想解之间的灰色关联度 P_i^+ :

$$P_i^+ = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_{ij}^+}{n}, (i=1,2,\cdots,m) \quad (7)$$

同理, 第*i*个评价对象与负理想解之间的灰色关联度 P_i^- :

$$P_i^- = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_{ij}^-}{n}, (i=1,2,\cdots,m) \quad (8)$$

计算灰色关联相对贴近度 C_i :

$$C_i = \frac{P_i^+}{P_i^- + P_i^+}, (i=1,2,\cdots,m) \quad (9)$$

式中: C_i 取值范围 $\in [0,1]$, 根据其大小对历年城市的低碳竞争力水平进行排序, 贴近度值越大说明该城市的低碳竞争力越强, 反之越弱。

3.2 探索性时空数据分析

传统的探索性空间数据分析(ESDA)对于地理观测变量的空间格局与地区差异分析往往限于截面特征, 而 Rey 等提出的探索性时空数据分析(ESTDA)方法^[54]将时间和空间维度有效整合, 实现时空交互分析。ESTDA 是一系列空间数据分析方法和技术的集合, 主要包括全局和局部空间自相关分析(Moran's *I*)、LISA 时间路径和时空跃迁等。本文借助 ESTDA 系统研究长三角地区城市低碳竞争力的时空格局演化特征。

3.2.1 空间自相关 全局空间自相关指数(Global Moran's *I*)用于判断区域低碳竞争力的空间集聚性, 其表达式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

式中: n 为城市总数, y_i 和 y_j 分别为城市 i 和城市 j 的历年低碳城市竞争力水平, \bar{y} 为所有城市的低碳城市竞争力平均水平。 W_{ij} 为空间权重矩阵, 不同的空间权重矩阵表达出的不同空间区域之间的相互依赖性与关联性具有显著差异, 本文参照已有文献研究选取

地理距离权重矩阵，权重用各城市人民政府驻地位置坐标之间距离的倒数表示，以城市1小时经济圈为空间关联作用的阈值范围，依据中国国家铁路局高铁新设计开行时速250 km/h，该阈值距离为250 km^[55]。

3.2.2 LISA时间路径 LISA时间路径表征的是空间单元在Moran散点图中对应LISA坐标随时间迁移的特性，可揭示城市间时空交互变化、竞合态势以及时空依赖效应对区域系统演化的影响程度^[56]。LISA坐标的移动路径可用向量 $[(y_{i,1}, yL_{i,1}), (y_{i,2}, yL_{i,2}), \dots, (y_{i,T}, yL_{i,T})]$ 表示； $y_{i,1}$ 表示城市在第t年的低碳城市竞争力水平的z-score标准化值； $yL_{i,t}$ 为空间滞后项的z-score标准化值。LISA时间路径的几何特征指标主要包括相对长度 Γ_i 、弯曲度 Δ_i 以及移动方向 θ_i ^[57]。

$$\Gamma_i = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}, \Delta_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,1}, L_{i,T})}, \theta_i = \arctan \frac{\sum_{t=1}^T \sin \theta_{i,t}}{\sum_{t=1}^T \cos \theta_{i,t}} \quad (11)$$

式中： T 为时间序列的间隔； N 为城市总数； L 为第 t 年城市 i 的LISA坐标，即 $(y_{i,1}, yL_{i,1})$ ； $d(L_{i,t}, L_{i,t+1})$ 为城市 i 在 t 到 $t+1$ 年间坐标的移动距离； Γ_i 值越大意味着城市 i 局部空间结构演化更加动态， Δ_i 越大意味着城市 i 具有更加波动的空间依赖演化过程； θ_i 表示城市 i 的平均移动方向， $0^\circ \sim 90^\circ$ 表示赢-赢态势， $180^\circ \sim 270^\circ$ 表示输-输态势， $90^\circ \sim 180^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$ 分别表示输-赢态势和赢-输态势。

3.2.3 LISA时空跃迁 LISA时间路径描述了各空间单元在Moran's *I*散点图中迁移轨迹的几何特征，而时空跃迁则描述了区域空间关系随时间的演变，局部空间关联类型转换情况可被划分为Type₀、Type₁、Type₂、Type₃四种类型^[58]（表3）。

常用时空凝聚指标（SC）来表征研究对象的空间格局路径依赖和锁定特征，具体表示为某类型的跃迁数量与区域内的跃迁总数（ m ）之比^[59]。

$$SC = \frac{Type_0 + Type_{3A}}{m} \quad (12)$$

式中： $Type_0$ 、 $Type_1$ 、 $Type_2$ 、 $Type_{3A}$ 分别表示各自的跃迁数量； m 为所有可能发生跃迁的城市数量，本文 $m=(2020-2000) \times 41$ 。

3.3 研究框架

本文长三角低碳竞争力评价与时空演化分析框架如图3所示。首先基于前文阐述的城市低碳竞争力驱动-响应影响机制构建低碳竞争力评价框架；然后采用TOPSIS-灰色关联法测度2000—2020年长三角地区41市低碳竞争力水平；进而依据水平差异与演进趋势特征进行时间聚类，划分长三角城市低碳竞争力时序演进类型；再者运用探索性时空数据分析揭示长三角地区低碳竞争力全局和局部空间关联格局的动态演化规律；最后综合

表3 时空跃迁类型
Tab. 3 Types of spatio-temporal transition

跃迁类型	跃迁含义	跃迁特征
Type ₀	自身与邻域均不发生跃迁	$HH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LL_{t+1}$
Type ₁	自身发生跃迁，但邻域不变	$HH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HL_{t+1}$
Type ₂	自身不变，邻域发生跃迁	$HH_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LH_{t+1}$
Type ₃	Type _{3A} 自身与邻域跃迁方向一致 Type _{3B} 自身与邻域跃迁方向相反	$HH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HH_{t+1}$ $HL_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow HL_{t+1}$

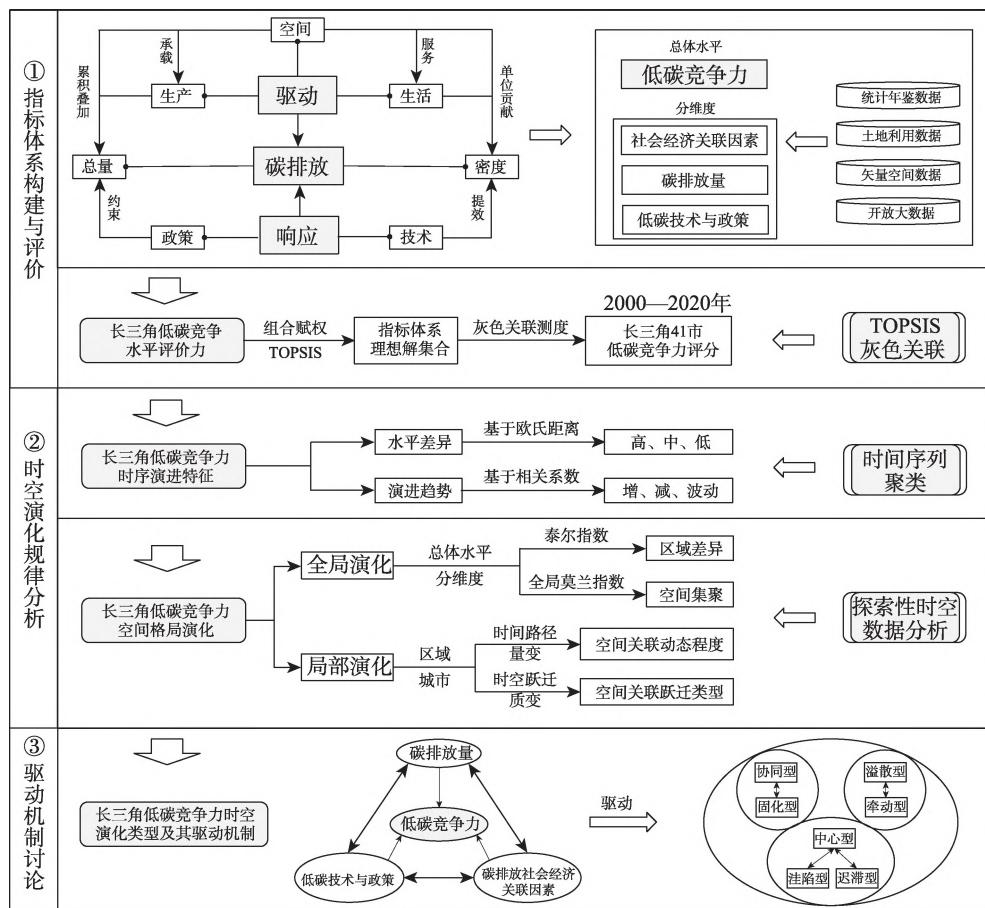


图3 长三角地区城市低碳竞争力评价与时空演化研究框架

Fig. 3 The framework of low-carbon competitiveness evaluation and spatio-temporal evolution in the Yangtze River Delta

各城市低碳竞争力水平位序演替和时空演化特征，划分出七类长三角城市低碳竞争力时空演化类型，并基于低碳竞争力三大维度探讨了其背后的驱动机制。

4 长三角地区城市低碳竞争力时序演进特征

考虑可视化效果，本文选取2000年、2005年、2010年、2015年、2020年5个时间节点的数据进行呈现。图4表示长三角城市低碳竞争力及其分维度评价值的时序演进特征，得分越高代表城市在该维度的竞争力越强。

在碳排放量准则层，大部分城市的演化较平稳。除上海市和江苏省个别城市如苏州、徐州在该维度的水平较低外，江苏省其他大部分城市处于中间水平，浙江省城市均处于中上水平且省内差距较江苏省大，而安徽省城市间差距最大，既有高水平城市也有低水平城市。具体而言，该维度竞争力较低的城市有淮北、淮南、马鞍山等，较高的城市有黄山、丽水、温州等。研究时期，长三角地区逐渐由经济快速发展时期迈向城镇化、工业化中后期，碳排放强度和密度逐年降低，但社会经济活动碳排放人均量和国土空间碳排放规模仍在持续增长，因而在该维度呈现平缓略降的趋势。上海市人口基数和

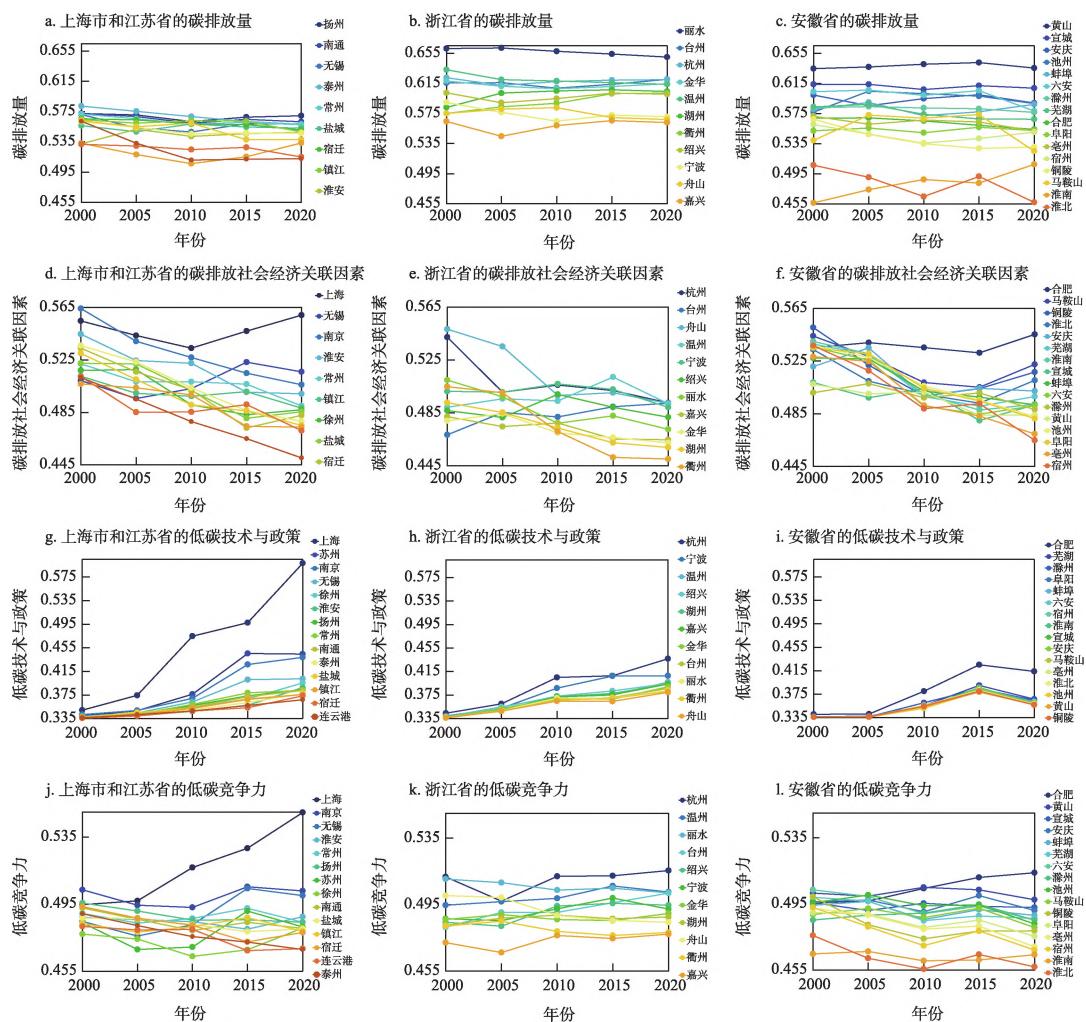


图4 长三角地区城市低碳竞争力与分维度演化

Fig.4 Evolutions of urban low-carbon competitiveness and its subdimensions in the Yangtze River Delta

建设规模远超其余省份城市，而江苏省城市长期以重工业发展为主，因而均在该维度处于相对劣势。浙江省城市地貌多为山地丘陵，生态基底良好且以碳排放强度较小的轻工业发展为主，因而在该维度的竞争力较强。安徽省部分城市如黄山、池州等属于生态城市，第二产业让步于生态保护，而淮南、淮北等作为传统资源型城市，依赖高能耗高排放产业驱动经济发展，因而安徽省在该维度的省内分异明显。

在碳排放社会经济关联因素准则层，大部分城市的演化呈下降趋势。江苏省、安徽省城市在该维度的竞争力整体高于浙江省。具体而言，上海在该维度的水平始终较高且与其他位序靠前的城市如合肥、舟山和南京等拉开一定差距，而水平较低的主要为衢州、金华、嘉兴等城市。研究时期，随着城市社会经济发展，长三角地区居民生活消费碳排放如家庭住房用能等压力日益凸显，加之城市建设用地破碎化程度加深，因而除上海在2010年后通过大量工业转移和产业升级实现竞争力回升以外，大部分城市低碳竞争力在该维度仍旧呈现递降趋势。安徽省社会发展相较苏浙两省滞后，居民生活消费碳排放压力尚未显现，因此在该维度的竞争力整体较高。浙江省城乡居民生活水平较

高，相对宽裕且逐年增加的人均住房面积驱动着生活能源消费碳排放的增长，因此在该维度的优势不及苏皖两省。

在低碳技术与政策准则层，所有城市在该维度的演化均呈上升趋势。2010年之后城市间的差异逐渐拉开，相较其余省份安徽省城市间差距非常小。具体而言，除上海独占鳌头外，在维度水平较高的城市还有苏州、杭州、南京等，落后城市主要为江苏苏北地区城市以及安徽省城市如黄山、亳州、池州等。研究时期，随着2011年碳排放强度目标正式纳入“十二五规划”纲要、2012年“生态文明建设”上升为国家战略以来，长三角地区城市在政策引领下开始绿色经济的发展，上海、南京、苏州等区域中心城市凭借自身资源优势开始大力发展低碳能源和绿色技术创新，在该维度的竞争力显著提升，而合肥则在被纳入长三角城市群后，最先开始推进政策协同、承接技术外溢，因而与省内其他城市逐渐拉大差距。

在综合三大分维度的城市低碳竞争力层面，长三角近一半城市低碳竞争力呈现波动上升趋势，其中上海的增幅相较其他城市更大，其次有无锡、合肥、杭州等。省际对比来看，江苏省内城市差异较小且多处于中下水平区间，浙江省城市低碳竞争力平均水平较高但省内差异较江苏省大，安徽省城市低碳竞争力水平最低且省内差异最大。2000—2010年间，长三角城市低碳竞争力普遍发展迟缓甚至退步，这是因为长三角地区正处于快速城镇化阶段，经济发展方式粗放，城市建设用地扩张无序，绿色生态用地侵占严重。自2010年以来，国内经济发展进入新常态，《长江三角洲地区区域规划》的颁布推动区域分工协作，上海、南京、杭州等中心城市开始将能耗型产业移向苏中、苏北地区和安徽省，产业结构调整“退二进三”效果显著，低碳竞争力走势回升，与其余城市的差距逐渐拉开。然而2015—2020年间，长三角中心与外围城市的低碳竞争力差距并没有进一步加大，表明自2016年《长三角城市群规划》发布以来，长三角地区一体化程度持续加深，区域低碳竞争力差异变化逐渐趋于平稳。

为进一步分析不同城市的低碳竞争力发展分异，本文借助ArcGIS Pro 2.8.4软件中的时空模式挖掘技术，利用K-Medoids算法进行时间序列聚类，具体包含两种分析方法：①基于欧式距离的时间序列聚类将长三角城市低碳竞争力时序演化水平分成高水平、中水平和低水平三类；②基于相关性的时间序列聚类将长三角城市低碳竞争力演化趋势分成整体上升型、整体下降型以及先降后升波动型三类（图5）。

将两种时序聚类结果整合后，对长三角城市低碳竞争力时序演进类型进行划分（表4）。在低碳竞争力高水平的城市中，除丽水逐渐走下坡路外，其他城市呈稳定上升趋势。低碳竞争力中等水平的城市最多，大部分城市处于稳定或波动上升趋势，而亳州、南通、金华等低碳竞争力呈现逐渐下降或波动下降趋势。低碳竞争力低水平的城市大都位于江苏苏北地区和安徽皖北地区，嘉兴、苏州、镇江、淮南等城市有逐渐上升趋势。

5 长三角地区城市低碳竞争力空间格局演化

5.1 低碳竞争力整体空间格局演化

本文分别采用Theil指数和全局Moran's *I*来综合反映2000—2020年长三角地区低碳竞争力水平差异程度与空间关联程度（图6）。

区域整体低碳竞争力Theil指数较低且变化平稳，说明长三角地区低碳竞争力的水平差异近20年变化不显著。对比各维度的Theil指数演化可知，碳排放量维度水平差异相

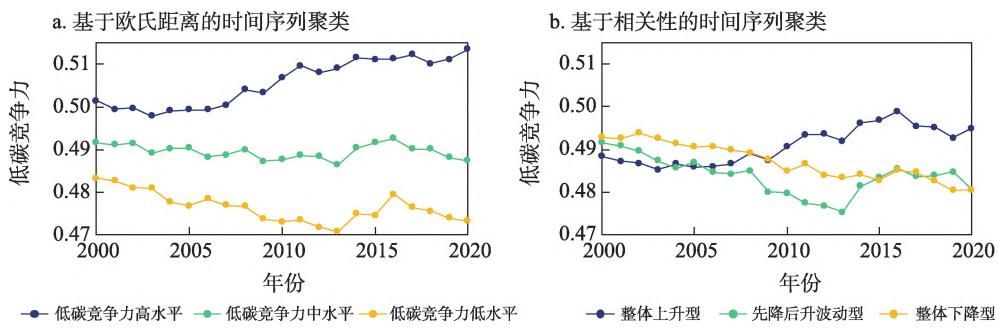


图5 基于欧式距离和基于相关性的低碳竞争力时间序列聚类

Fig. 5 Average time series of low-carbon competitiveness clusters based on value distance and correlation

表4 长三角地区城市低碳竞争力时序演进类型划分

Tab. 4 Classification of urban low-carbon competitiveness development in the Yangtze River Delta

	低碳竞争力高水平	低碳竞争力中水平	低碳竞争力低水平
演化趋势上升	上海、杭州、合肥、黄山、温州	滁州、南京、常州、无锡、湖州、马鞍山、绍兴、宁波、舟山、台州	嘉兴、苏州、镇江、淮南
演化趋势波动	-	阜阳、蚌埠、宣城、淮安、芜湖、安庆、六安	铜陵、淮北、徐州、宿州、盐城
演化趋势下降	丽水	亳州、南通、池州、金华、扬州	衢州、泰州、宿迁、连云港

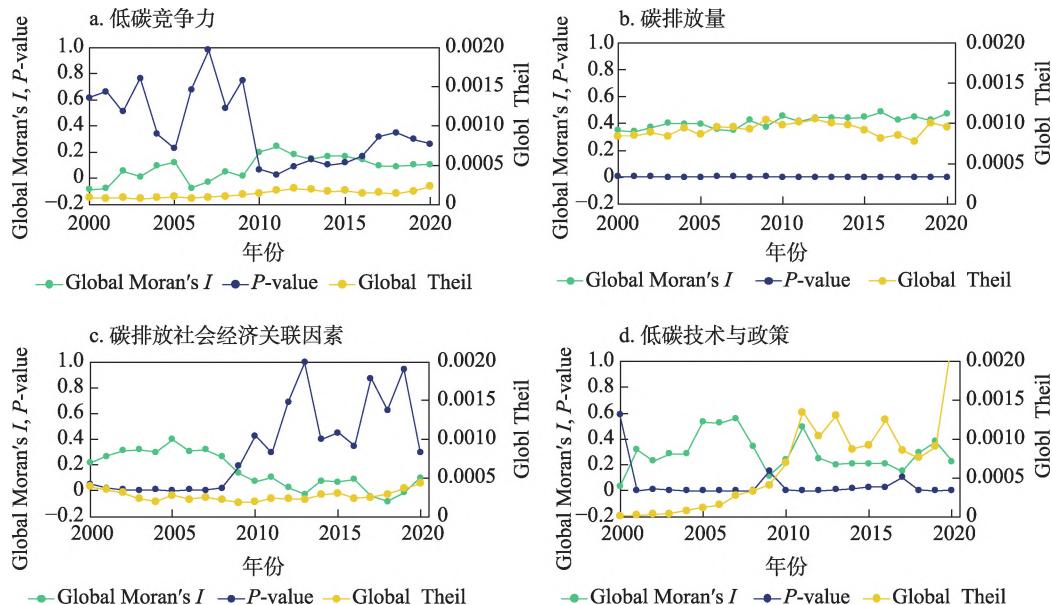


图6 长三角地区低碳竞争力与其分维度的全局差异与空间关联特征

Fig. 6 Global differences and spatial correlation features of low-carbon competitiveness in the Yangtze River Delta

对较大，低碳技术与政策维度水平差异自2010年以后波动上升；碳排放社会经济关联因素维度与低碳竞争力水平区域差异相较前两者则一直较低。

从区域空间自相关特征Moran's I 来看，长三角整体低碳竞争力的空间关联度随时间缓慢增加，显著性也有所提升。碳排放量分维度的全局Moran's I 基本大于0.35（均通过了1%水平的显著性检验），呈现稳定显著的空间集聚特征，区域低碳技术与政策分维度

在部分时间段也呈现出空间集聚特征但整体较为波动，然而碳排放社会经济关联因素分维度的空间关联度呈现明显下降趋势。

5.2 低碳竞争力局部空间格局演化

5.2.1 LISA 时间路径几何特征 LISA时间路径能够反映区域中局部空间结构和空间依赖方向的演化。长三角地区城市低碳竞争力与三大分维度水平的LISA时间路径的相对长度、弯曲度以及移动方向的空间分布格局如图7所示，其中相对长度和弯曲度依据自然断裂点法分为五类。

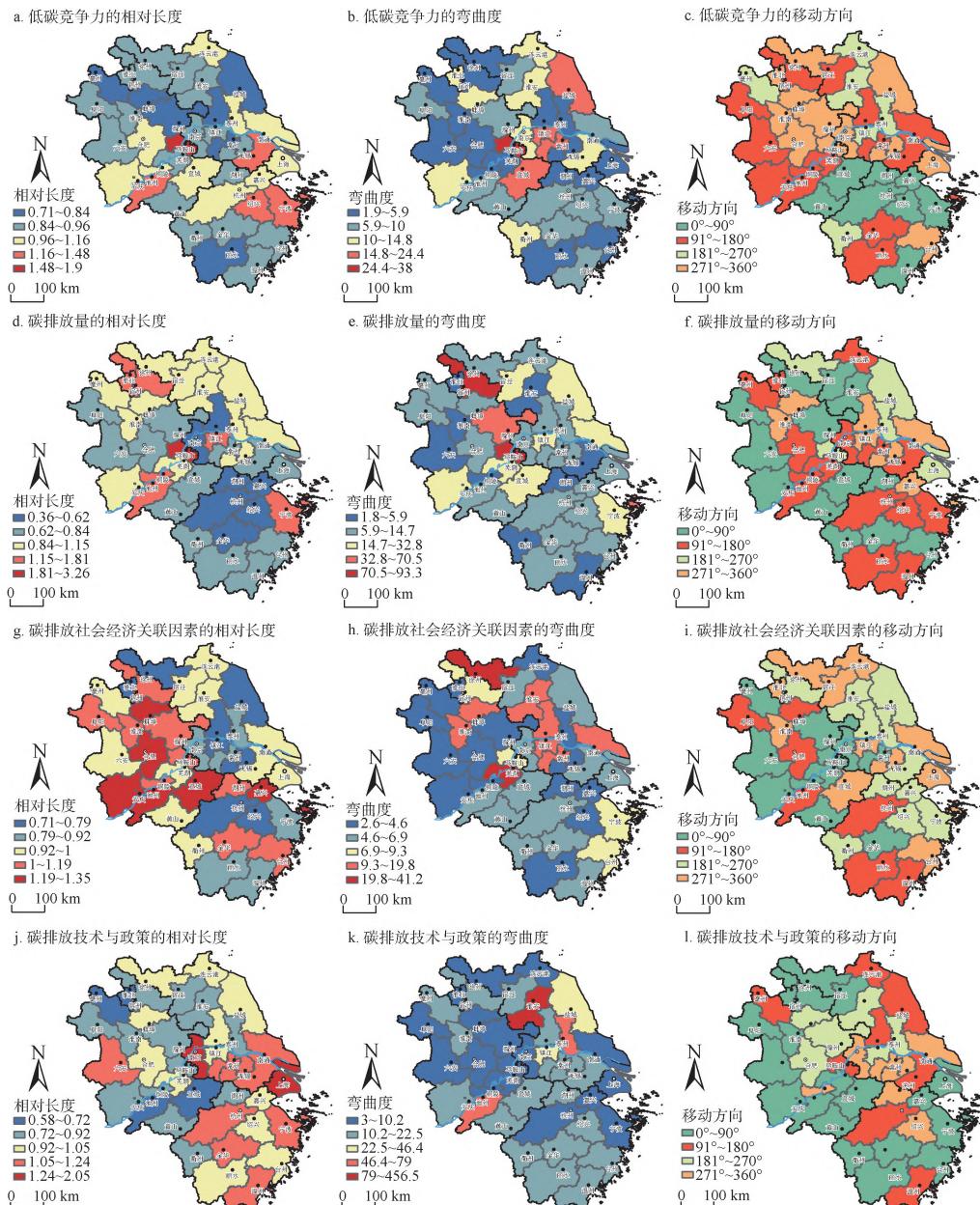


图7 长三角地区城市低碳竞争力与其分维度的时间路径特征空间分布

Fig. 7 Time path feature spatial distribution of low-carbon competitiveness and subdimensions in the Yangtze River Delta

研究时段内长三角地区低碳竞争力水平的相对长度呈现由中部地区向南北地区递减的趋势，说明长三角中部城市在低碳竞争力整体层面拥有更为动态的局部空间结构，而南北地区城市拥有更加稳定的局部空间结构。弯曲度呈中心向外围递减的趋势，弯曲度高值区主要分布于南京及其周边城市，说明该地区低碳竞争力具有较为动态的空间变迁过程。从移动方向上来看，浙江省城市协同演化趋势更明显，即空间整合性较强，而安徽和江苏城市的协同演化趋势不强。

对比不同分维度相对长度的空间分布，碳排放量相对长度总体呈现“北高南低”的空间格局，即长三角北部地区碳排放量局部空间结构动态性大于南部地区，碳排放社会经济关联因素和低碳技术与政策局部空间结构动态性则分别呈现“西高东低”和“东高西低”的格局。

长三角地区各分维度平均弯曲度由大到小依次为：低碳技术与政策（26.04）> 碳排放量（15.84）> 碳排放社会经济关联因素（8.40），表明了局部空间结构在空间依赖方向上的稳定性依次加强。各维度弯曲度高值区均主要分布在江苏省和安徽省内，说明这两省在三个分维度的局部空间依赖方向比浙江省更为波动。

从移动方向的空间分布可看出，长三角地区低碳技术与政策分维度有26个城市呈现正向或负向协同演化趋势（即移动方向为 $0^{\circ}\sim90^{\circ}$ 和 $180^{\circ}\sim270^{\circ}$ ），说明该维度的空间溢出效应更强，空间演变具有较强的传递性；而碳排放量层面呈现输-赢或赢-输（即移动方向为 $90^{\circ}\sim180^{\circ}$ 或 $270^{\circ}\sim360^{\circ}$ ）竞争态势的地区更多，说明该分维度的整体空间极化效应较强。

5.2.2 LISA时空跃迁特征 LISA时空跃迁能够进一步揭示区域中局部空间关联类型的演变，表5分别对低碳竞争力及其三大分维度中的时空跃迁情况进行了统计。

对比总体水平和各维度的时空凝聚性可看出各维度的局部空间格局均较稳定。江苏

表5 长三角地区低碳竞争力与其分维度的时空跃迁矩阵

Tab. 5 The spatio-temporal transition matrix of low-carbon competitiveness and subdimensions in the Yangtze River Delta

维度	t/t+1	HH	LH	LL	HL	类型	数量	比例	省/市	SC
低碳竞争力	HH	0.833	0.094	0.017	0.056	Type ₀	658	0.802	上海市	0.900
	LH	0.131	0.774	0.095	0.000	Type ₁	93	0.113	江苏省	0.792
	LL	0.012	0.065	0.827	0.097	Type ₂	61	0.074	浙江省	0.823
	HL	0.094	0.006	0.146	0.754	Type ₃	8	0.010	安徽省	0.813
碳排放量	HH	0.939	0.034	0.000	0.027	Type ₀	734	0.895	上海市	0.850
	LH	0.147	0.707	0.093	0.053	Type ₁	52	0.063	江苏省	0.915
	LL	0.000	0.019	0.942	0.040	Type ₂	28	0.034	浙江省	0.882
	HL	0.067	0.019	0.162	0.752	Type ₃	6	0.007	安徽省	0.891
碳排放社会 经济关联因素	HH	0.773	0.103	0.034	0.089	Type ₀	633	0.772	上海市	0.750
	LH	0.181	0.746	0.073	0.000	Type ₁	91	0.111	江苏省	0.754
	LL	0.030	0.051	0.847	0.072	Type ₂	73	0.089	浙江省	0.864
	HL	0.190	0.052	0.103	0.655	Type ₃	23	0.028	安徽省	0.778
低碳技术 与政策	HH	0.681	0.142	0.134	0.043	Type ₀	575	0.701	上海市	0.900
	LH	0.271	0.543	0.179	0.007	Type ₁	103	0.126	江苏省	0.692
	LL	0.092	0.063	0.802	0.043	Type ₂	71	0.087	浙江省	0.759
	HL	0.207	0.034	0.224	0.534	Type ₃	71	0.087	安徽省	0.869

省在碳排放量层面的时空凝聚性最大，而在其余维度则相反；浙江省在低碳竞争力总体水平和碳排放社会经济关联因素层面的时空凝聚性最大，而在碳排放量层面则相反；安徽省在低碳技术与政策层面时空凝聚性最大，在其余维度则居中。所有维度Type₀类型占比远大于其余跃迁类型占比之和，即不同局部空间关联类型之间存在迁移惰性，这表明了整个研究时段内长三角城市低碳竞争力发展在不同维度上均显现出一定的局部锁定和路径依赖特征。在总体水平和分维度中普遍存在Type₁数目>Type₂数目>Type₃数目的跃迁情况，即长三角地区低碳竞争力发展过程中城市自身跃迁而邻域不跃迁的概率最大，其次是自身不跃迁而邻域城市跃迁，自身和邻域城市均跃迁的概率最小。

6 长三角地区城市低碳竞争力的时空演化类型

综合各城市低碳竞争力水平位序和时空演化特征分析，最终将长三角城市低碳竞争力时空演化类型划分为七类（表6），七类城市在长三角地区的空间分布如图8。

高水平协同型城市是长期处于低碳竞争力高值集聚区的浙南地区和皖西南地区城市，主要分布在长三角西南部，这一带城市发展相对落后但生态碳汇能力较强，是长三角一体化发展纲要中提出的“皖南-浙西-浙南生态屏障”，因而呈现低碳竞争力高水平协同。

低碳竞争力水平较高的城市还有上海、南京、杭州、合肥、宁波几大核心城市，他们对周边城市分别有着不同的辐射影响。其中，杭州、宁波与被其带动提升的周边城市如湖州、绍兴、金华等形成“溢散-牵动”的时空关联组团，主要分布在长江以南；而上海、南京、合肥尚未能对周边城市产生整体显著的正向溢出效应，因而与其周边低碳竞争力发展较为滞缓的城市如南通、镇江、滁州等形成“中心-迟滞”组团，主要沿长江以北分布。造成杭州等溢散型城市与上海、南京等中心型城市的带动作用差距的主要原因在于浙江与苏沪地区的发展模式差异。浙江地区早年凭借外贸政策利好大力发展了轻工业主导的民营经济，而后更是成为“绿水青山就是金山银山”理念的先行实践地，因此杭州等核心城市能够通过政策协同、产业与科创资源扩散带动周边城市的低碳竞争力。而在早期强政府主导下，苏沪地区凭借财政政策和自然资源优势大规模地布局重工业，且上海、南京等核心城市在后期工业化发展到一定阶段，面临产业结构转型时，将自身能耗型产业向周边城市转移从而造成了碳排放空间溢出，因此尽管其对外同样产生了一

表6 长三角地区城市低碳竞争力的时空演化类型

Tab. 6 Spatio-temporal evolution types of urban low-carbon competitiveness in the Yangtze River Delta

时空演化类型	城市名称	时空关联演化规律
高水平协同型	黄山、池州、安庆、温州、丽水	自身和周边城市始终保持低碳竞争力高水平
高水平溢散型	杭州、宁波	自身低碳竞争力逐渐增长，且带动了周边城市协同增长
高水平中心型	上海、合肥、南京	自身低碳竞争力逐渐增长，但未很好地带动周边城市
辐射区牵动型	绍兴、台州、金华、湖州、无锡、常州、宣城、马鞍山、舟山	受到高水平的周边城市带动，自身低碳竞争力逐渐增长
辐射区迟滞型	南通、泰州、扬州、镇江、滁州、蚌埠、淮南、亳州、六安、芜湖	未能被高水平的周边城市带动，自身低碳竞争力下降或增长滞缓
辐射区洼陷型	苏州、衢州、嘉兴、铜陵	周边城市低碳竞争力均高水平而自身始终低水平
低水平固化型	淮北、阜阳、宿州、徐州、连云港、宿迁、淮安、盐城	自身和周边城市始终保持低碳竞争力低水平

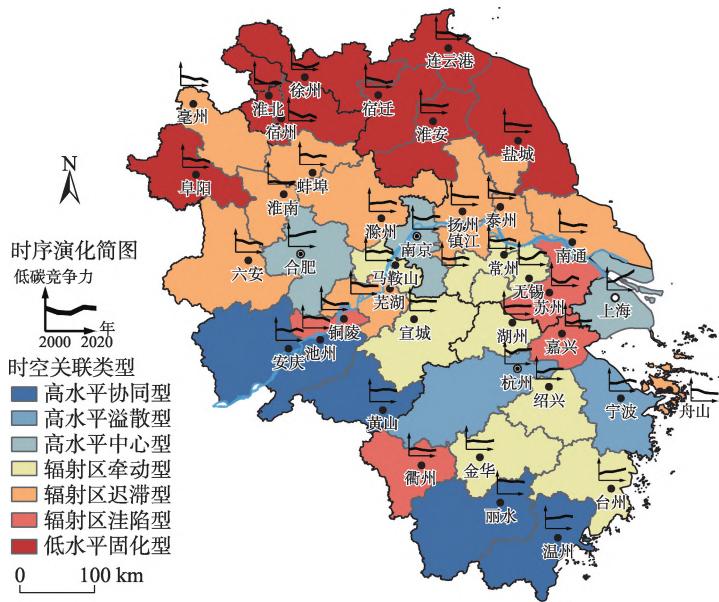


图8 长三角地区城市低碳竞争力时空演化类型空间分布

Fig. 8 Distribution of spatio-temporal evolution types of urban low-carbon competitiveness in the Yangtze River Delta

定的绿色低碳技术扩散，但整体尚未能使周边城市的低碳竞争力与之协同提升。

辐射区洼陷型城市是高值集聚区中的“洼地”，这类城市或位于高水平协同型城市周边，如毗邻皖南-浙西生态屏障的衢州、铜陵，由于自身工业结构偏重导致发展与生态保护矛盾突出，低碳竞争力显著低于周边城市；或位于高水平中心型城市周边，如上海的经济腹地苏州，凭借区位优势和早期“苏南模式”的发展基础，自20世纪90年代以来就成为了上海市产业转型升级中制造业外溢最主要的承接者，导致其碳排放规模日益加速增长，因而相较周边迟滞型城市，这类与核心城市联系更密切的洼陷型城市低碳竞争力水平更低且呈现阶段下降趋势。低水平固化型城市是长期处于低值集聚区的皖北和苏北地区城市，主要分布在长三角东北部，对煤炭等资源的长期依赖及地处长三角外围的区位劣势造成了这类城市粗放发展模式的路径锁定。

7 结论与讨论

7.1 结论

本文在既有研究基础上进一步提出了城市低碳竞争力是现状和潜力相结合的动态发展概念，将社会经济指标与空间形态指标结合使用，从碳排放量、碳排放社会经济关联因素、低碳技术与政策3个维度构建了城市低碳竞争力评价框架。以往研究中学者们多从产业、能源、环境等角度评价城市低碳竞争力^[8,9]，本文一方面补充考虑了城市经济生产活动之外日益增长的社会生活碳减排压力，有助于更加全面地衡量城市低碳竞争力；另一方面关注了具有空间溢出效应的低碳技术与政策因素，有助于更好地理解城市低碳竞争力时空演化。在此基础上，以长三角地区为研究区，将探索性时空数据分析引入城市低碳竞争力长时间序列研究中，评价和解析了2000—2020年研究区41个地级市的低碳竞争力的时空演化特征，对以往基于截面数据的分析结果进行补充。进而基于时间序列

聚类和时空跃迁模型划分城市低碳竞争力演化类型，为厘清区域低碳竞争力时空分异规律及驱动机制提供参考。

本文具体结论如下：

(1) 时序演进方面，长三角城市低碳竞争力分维度中碳排放量、碳排放社会经济关联因素、低碳技术与政策演化分别呈现平稳、波动下降、波动上升趋势。碳排放量、低碳技术与政策维度的区域差异大于碳排放社会经济关联因素维度。近50%的长三角城市低碳竞争力演化呈现波动上升趋势。就地区低碳竞争力平均水平而言，上海市>浙江省>江苏省>安徽省，其中上海、杭州、合肥等发展较快，而淮南、淮北、徐州等较为滞后。有关城市群地区城市低碳竞争力时序研究发现了城市低碳竞争力在经济发展过程中存在下降或者波动的趋势^[27]，本文研究同样发现了相似趋势，不同的是本文城市低碳竞争力演化趋势是在生产生活发展和政策技术响应的综合影响下产生的演化特征。

(2) 空间演化方面，长三角城市低碳竞争力分维度中碳排放量维度空间关联程度最强，低碳技术与政策维度次之。区域低碳竞争力发展存在路径依赖和空间锁定特征。其中浙南和皖西南地区是稳定高值区，苏北和皖北地区是稳定低值区。在中部地区，杭州、宁波带动了周边多数城市低碳竞争力的发展，而上海、南京和合肥的正向溢出效应尚未惠及周边大多城市，仅带动了少数城市如无锡、宣城等。基于各城市低碳竞争力水平位序和时空演化特征可划分出高水平协同型等七大长三角城市低碳竞争力时空演化类型。有关研究分析了中国省际低碳竞争力空间格局并发现了空间差异与协同特征^[11]，本文更进一步地分析了长三角地区城市低碳竞争力的时空动态格局，并对长三角城市低碳竞争力时空演化分异现象的背后原因与机制进行了探讨归纳。

7.2 讨论

本文从碳排放量、碳排放社会经济关联因素和低碳技术与政策3个维度综合评估了长三角各城市低碳竞争力，基于此剖析长三角城市低碳竞争力时空演化类型和演化分异的驱动机制。碳排放量维度决定了长三角城市低碳竞争力的基础水平，该维度在空间上的显著聚集性影响了长三角城市低碳竞争力“南高北低”的空间格局；而核心城市低碳技术与政策维度的溢出方向与范围的动态变化推动了长三角中部地区低碳竞争力空间格局的动态演化。在三大分维度的综合影响下，区域低碳竞争力最终呈现出集聚效应、扩散效应和中心效应三种时空效应。如图9所示，集聚效应可细分为高水平协同式的集聚和低水平固化式的集聚，扩散效应由高水平向外溢散型和接收溢出的辐射区牵动型城市组成，中心效应由高水平独树一帜的中心型和辐射区未受到带动的洼陷型和迟滞型城市组成。

梳理低碳竞争力时空演化的驱动机制可以发现：① 集聚效应主要受到碳排放量和碳排放社会经济关联因素两个维度影响，其中的人均碳排放、碳排放密度以及产业结构合理化等为主导因素；例如，皖北、苏北地区以高耗能产业推动经济发展，形成了低水平固化的集聚区，而皖南、浙南地区城市由于自身的城市定位决定了较小的生产碳排放规模，生态环境治理的区域联动进一步推动了高水平协同区的产生。② 扩散效应主要受低碳技术与政策维度影响，部分核心城市通过低碳企业外迁、绿色节能技术外溢以及低碳政策的示范推广，牵动了辐射区城市低碳竞争力的提升；中心效应主要受碳排放社会经济关联因素维度影响，由于低碳技术与政策维度的正向作用尚未彰显，核心城市可能通过高能耗产业碳排放转移或对低碳技术等资源要素的虹吸致使周边城市低碳竞争力发展迟缓甚至退步，且低碳生活层面中人均住房面积、户均家庭生活用电量等消费端碳排放的增加，也进一步抑制了辐射区洼陷型和迟滞型城市低碳竞争力的提升。此外，土地碳

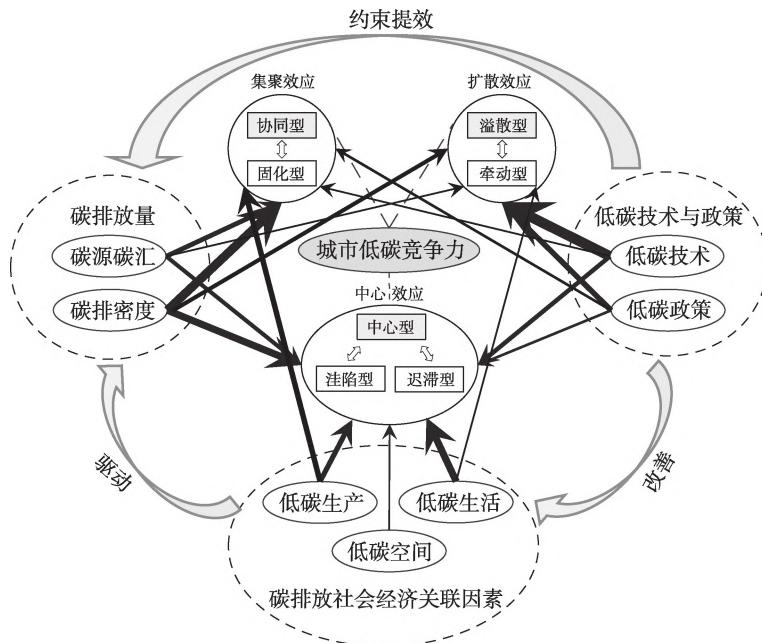


图9 长三角城市低碳竞争力时空演化驱动机制

Fig. 9 Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of the low-carbon competitiveness in the Yangtze River Delta

源碳汇、低碳空间二级维度对长三角地区时空效应的影响相对不明显，表明长三角地区有待进一步探索“双碳”目标下的国土空间协同管控。

造成长三角城市低碳竞争力时空演化分异的根本原因是城市低碳竞争力的3个维度存在时空上的外部力量和内在因素之间的相互转化。碳排放量、碳排放社会经济关联因素反映的是城市自身低碳发展的基础条件，是城市低碳竞争力的内在因素；而低碳技术与政策对低碳竞争力的影响往往存在由外部推力转化为内生动力的作用路径，例如，先从国家和区域宏观层面的“双碳”战略目标和政策指令传达到地方，各城市再根据自身情况对低碳政策进行细化落实，催生低碳技术进步的内在动力，这一过程就是一种由外及内的转化过程。同时，在低碳竞争力时空演化的区域整体视角下，中心城市低碳竞争力的内在因素亦能够通过空间扩散效应或中心效应变成周边城市的外部动力或阻力。例如，作为高水平中心型城市的上海低碳技术扩散是苏州等腹地城市的外部动力，但其产业转移造成的碳排放溢出又是致使后者成为低碳竞争力洼陷型城市的外部阻力。此外，缺乏外部动力的城市亦容易形成落后发展模式的路径依赖，例如目前还是主要受到自身内在因素驱动的苏北、皖北地区的低水平固化型城市。因此，从长三角城市低碳竞争力时空演化过程可知，只有在内外力量互相协调、相互转化的情况下，该地区整体低碳竞争力发展才能形成持续性的动力机制。

由上分析可知，未来提升长三角地区整体低碳竞争力的关键在于打破“马太效应”和“核心-边缘”的空间格局，进一步优化区域一体化策略。在区域尺度需突破行政壁垒、加强政府间合作，建立一体化的长三角低碳产业体系，提高各地区产业互补性与协同性；同时向公众大力倡导低碳生活消费理念，在政策协同下形成区域低碳发展合力。在城市尺度应充分发挥各城市差别优势，在区域内由竞争走向竞合。对于低碳竞争力高水平溢散型城市如杭州、宁波，可大力推动节能环保产业和战略性新兴产业发展，建设整体协同提升的引领示范区；对于低水平固化型城市如苏北、皖北地区城市，应与周边

统一制定环境规制政策，减少高能耗产业的转移承接；对于沪、宁、合等低碳竞争力高水平中心型城市，应进一步扩大技术、人才和资金的空间溢出效应，充分发挥其在绿色创新、环境治理等方面的帮带作用。

国土空间规划与治理是推动实现区域协同减排的另一重要途径。低碳发展在当前国土空间规划中仍以指导性政策为主，在未来长三角地区需探索建立跨行政区重要碳汇生态空间协同保护机制、区域碳汇交易平台与区域间横向碳补偿机制，通过区域内的碳中和实现碳排放动态平衡。各城市也应将低碳城市规划框架和相应指标体系纳入国土空间规划编制和用途管制方案，并结合自身发展水平和资源禀赋采取差异化的国土空间碳排放管控措施。对于生态资源优良的高水平协同城市，应加强森林碳汇生态基底的保护与修复；对于经济发展领先的高水平溢散型、中心型城市，应进一步提升国土空间利用效率，优化布局各类碳源、碳汇空间。对于城镇化率快速提升的辐射区牵动型城市等，应严控建设用地无序扩张，引导城镇空间紧凑布局。

本文解析了长三角城市低碳竞争力的时空演化规律，讨论总结出长三角区域特有的集聚效应、扩散效应和中心效应三种时空关联效应，并进一步探讨了其背后的低碳竞争力三维度内外部驱动机制。本文尝试探索具有普适性的城市低碳竞争力评价体系与时空演化分析思路，为其他区域的相关实证研究提供借鉴。然而，本文对于长三角城市低碳竞争力内部维度间的内在交互作用以及区域城市演化时空分异的驱动机制限于理论探讨，在下一步研究中可参考区域时空演化研究中常用的识别驱动因素、探究因子交互作用的方法模型进一步定量探究三个维度之间的互动关系对城市低碳竞争力阶段演化的驱动机理。

致谢：真诚感谢匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力，专家对本文文献综述、低碳竞争力的概念辨析、评价维度与指标选取逻辑、数据严谨性、结论与讨论部分的提炼深化方面的修改意见，使本文获益匪浅。

参考文献(References)

- [1] The Climate Institute and E3G. G20 Low-carbon Competitiveness Report. Washington: The Climate Institute and E3G, 2009
- [2] Lee H, MacGillivray A, Begley P, et al. The Climate Competitiveness Index 2010. Account Ability, 2010, (44): 37-40.
- [3] 陈静,程东祥,诸大建.基于灰理想关联分析的中国城市低碳竞争力评价.资源科学,2012,34(9): 1726-1733. [Chen Jing, Cheng Dongxiang, Zhu Dajian. Evaluation of urban low-carbon competitiveness in China using Grey relational analysis. Resources Science, 2012, 34(9): 1726-1733.]
- [4] 陈飞,诸大建.城市低碳竞争力理论与发展模式研究.城市规划学刊,2011,(4): 15-22. [Cheng Fei, Zhu Dajian. Research on the theory and development model of urban low carbon competitiveness. Urban Planning Forum, 2011, (4): 15-22.] DOI: 10.3969/j.issn.1000-3363.2011.04.003
- [5] Zhang Z. China in the transition to a low-carbon economy. Energy Policy, 2010, 38(11): 6638-6653. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.06.034
- [6] 刘国平. G20国家低碳竞争力研究.管理现代化,2014,34(3): 55-57. [Liu Guoping. Research on low-carbon competitiveness of G20 countries. Modernization of Management, 2014, 34(3): 55- 57.] DOI: 10.3969/j.issn.1003-1154.2014.03.019.
- [7] 慈福义. 提升城市低碳竞争力的对策.经济纵横,2012,(9): 59-61, 65. [Ci Fuyi. Countermeasures to upgrade the urban low-carbon competitiveness. Economic Review, 2012, (9): 59-61, 65.] DOI: 10.16528/j.cnki.22-1054/f.2012.09.013.
- [8] 李彩惠,霍海鹰,李雅洁,等.基于突变级数模型的城市低碳竞争力评价及障碍因子诊断分析.资源科学,2015,37(7): 1474-1481. [Li Caihui, Huo Haiying, Li Yajie, et al. Evaluation of low-carbon city competitiveness and its obstacle indicators analysis in Shandong province. Resources Science, 2015, 37(7): 1474-1481.]
- [9] 许烜,刘纯阳.城市低碳竞争力评价指标体系的构建及实证.统计与决策,2014,(21): 60-61. [Xu Xuan, Liu Chunyang. The structure and empirical study of the urban low-carbon competitiveness index system. Statistics and Decision,

- 2014, (21): 60-61.] DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2014.21.016.
- [10] Tan S, Yang J, Yan J. Development of the low-carbon city indicator (LCCI) framework. Energy Procedia, 2015, 75: 2516-2522. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.253.
- [11] 李健, 朴胜任, 王铮. 基于 DPSIR-ENTROPY-TOPSIS 模型的省际低碳竞争力评价及空间差异分析. 干旱区资源与环境, 2016, 30(12): 40-46. [Li Jian, Piao Shengren, Wang Zheng. Evaluation of low carbon competitiveness of provinces and spatial differences analysis based on DPSIR-ENTROPY-TOPSIS model. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(12): 40-46.] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.381.
- [12] Peng T, Jin Z, Xiao L. Evaluating low-carbon competitiveness under a DPSIR-Game Theory-TOPSIS model: A case study. Environment, Development and Sustainability, 2022, 24(4): 5962-5990. DOI: 10.1007/s10668-021-01680-x.
- [13] Zhou N, He G, Williams C, et al. ELITE cities: A low-carbon eco-city evaluation tool for China. Ecological Indicators, 2015, 48: 448-456. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.09.018.
- [14] 邓荣荣, 赵凯. 中国低碳试点城市评价指标体系构建思路及应用建议. 资源开发与市场, 2018, 34(8): 1037-1042. [Deng Rongrong, Zhao Kai. Construction thread and application suggestion of evaluation index system of low carbon pilot cities in China. Resource Development & Market, 2018, 34(8): 1037-1042.] DOI: 10.3969/j.issn.1005-8141.2018.08.001.
- [15] LI L, Hong X, Peng K. A spatial panel analysis of carbon emissions, economic growth and high-technology industry in China. Structural Change and Economic Dynamics, 2019, 49: 83-92. DOI: 10.1016/j.strueco.2018.09.010.
- [16] Wu Y, Tam V W Y, Shuai C, et al. Decoupling China's economic growth from carbon emissions: Empirical studies from 30 Chinese provinces (2001-2015). Science of The Total Environment, 2019, 656: 576-588. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.384
- [17] Shen L, Wu Y, Lou Y, et al. What drives the carbon emission in the Chinese cities? A case of pilot low-carbon city of Beijing. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 343-354. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.333.
- [18] 蔡苗苗, 吴开亚. 上海市建设用地扩张与土地利用碳排放的关系研究. 资源开发与市场, 2018, 34(4): 499-505. [Cai Miaomiao, Wu Kaiya. Relationship between construction land expansion and carbon emissions of land use in Shanghai city. Resource Development & Market, 2018, 34(4): 499-505.] DOI: 10.3969/j.issn.1005-8141.2018.04.009.
- [19] 陈珍启, 林雄斌, 李莉, 等. 城市空间形态影响碳排放吗? 基于全国 110 个地级市数据的分析. 生态经济, 2016, 32(10): 22-26. [Chen Zhenqi, Lin Xiongbin, Li Li, et al. Does urban spatial morphology affect carbon emission: A study based on 110 prefectural cities. Ecological Economy, 2016, 32(10): 22-26.] DOI: 10.3969/j.issn.1671-4407.2016.10.006.
- [20] Liu W, Qin B. Low-carbon city initiatives in China: A review from the policy paradigm perspective. Cities, 2016, 51: 131-138. DOI: 10.1016/j.cities.2015.11.010.
- [21] Zhou G, Singh J, Wu J, et al. Evaluating low-carbon city initiatives from the DPSIR framework perspective. Habitat International, 2015, 50: 289-299. DOI: 10.1016/j.habitatint.2015.09.001.
- [22] Harris S, Weinzettel J, Bigano A, et al. Low carbon cities in 2050? GHG emissions of European cities using production-based and consumption-based emission accounting methods. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119206. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119206.
- [23] 周迪, 周丰年, 王雪芹. 低碳试点政策对城市碳排放绩效的影响评估及机制分析. 资源科学, 2019, 41(3): 546-556. [Zhou Di, Zhou Fengnian, Wang Xueqin. Impact of low-carbon pilot policy on the performance of urban carbon emissions and its mechanism. Resources Science, 2019, 41(3): 546-556.] DOI: 10.18402/resci.2019.03.12.
- [24] 孙建. 环保政策、技术创新与碳排放强度动态效应: 基于三部门 DSGE 模型的模拟分析. 重庆大学学报: 社会科学版, 2020, 26(2): 31-45. [Sun Jian. Environmental protection policy, technological innovation and dynamic effects of carbon emission intensity: Simulation analysis based on three-sector DSGE model. Journal of Chongqing University: Social Science Edition, 2020, 26(2): 31-45.] DOI: 10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2019.09.004.
- [25] Sun Y, Tong L, Liu D. An Empirical Study of the Measurement of Spatial-Temporal Patterns and Obstacles in the Green Development of Northeast China. Sustainability, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 12(23): 10190. DOI: 10.3390/su122310190.
- [26] 黄跃, 李琳. 中国城市群绿色发展水平综合测度与时空演化. 地理研究, 2017, 36(7): 1309-1322. [Huang Yue, Li Lin. A comprehensive assessment of green development and its spatial-temporal evolution in urban agglomerations of China. Geographical Research, 2017, 36(7): 1309-1322.] DOI: 10.11821/dlyj201707010.
- [27] 杨春苗, 郭海湘, 刘晓, 等. 中国城市群城市低碳竞争力仿真评价. 科技管理研究, 2016, 36(13): 243-254. [Yang Chunmiao, Guo Haixiang, Liu Xiao, et al. Simulation evaluation of urban low-carbon competitiveness of urban clusters in China. Science and Technology Management Research, 2016, 36(13): 243-254.] DOI: 10.3969/j.issn.1000-7695.2016.13.044.

- [28] 张中浩, 聂甜甜, 高阳, 等. 长三角城市群生态安全评价与时空跃迁特征分析. 地理科学, 2022, 42(11): 1923-1931. [Zhang Zhonghao, Nie Tiantian, Gao Yang, et al. Ecological security assessment and spatio-temporal transition characteristics in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(11): 1923-1931.] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.11.007.
- [29] 刘宇峰, 原志华, 郭玲霞, 等. 陕西省城市绿色增长水平时空演变特征及影响因素解析. 自然资源学报, 2022, 37(1): 200-220. [Liu Yufeng, Yuan Zihua, Guo Lingxia, et al. Spatio-temporal characteristics of urban green growth level and its influencing factors in Shaanxi province. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(1): 200-220.] DOI: 10.31497/zrjyxb.20220114.
- [30] 马海涛, 王柯文. 城市技术创新与合作对绿色发展的影响研究: 以长江经济带三大城市群为例. 地理研究, 2022, 41(12): 3287-3304. [Ma Haitao, Wang Kewen. The effect of urban technological innovation and cooperation on green development: A case study of the three urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt. *Geographical Research*, 2022, 41(12): 3287-3304.] DOI: 10.11821/dlyj020220604.
- [31] 郭向阳, 穆学青, 丁正山, 等. 长三角多维城市化对PM_{2.5}浓度的非线性影响及驱动机制. 地理学报, 2021, 76(5): 1274-1293. [Guo Xiangyang, Mu Xueqing, Ding Zhengshan, et al. Nonlinear effects and driving mechanism of multidimensional urbanization on PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1274-1293.] DOI: 10.11821/dlxz202105017.
- [32] 宋府霖, 韩传峰, 滕敏敏. 长三角地区能源消费碳排放驱动因素分析及优化策略. 生态经济, 2022, 38(04): 21-28. [Song Fulin, Han Chuanfeng, Teng Minmin. Analysis of driving factors and optimization strategies of energy consumption carbon emissions in the Yangtze River Delta. *Ecological Economy*, 2022, 38(04): 21-28.]
- [33] Shuai C, Chen X, Wu Y, et al. A three-step strategy for decoupling economic growth from carbon emission: Empirical evidences from 133 countries. *Science of The Total Environment*, 2019, 646: 524-543. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.045
- [34] 范韶峰, 唐奕珏. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异. 经济地理, 2019, 39(02): 190-198. [Yuan Shaofeng, Tang Yiju. Spatial differentiation of land use carbon emission in the Yangtze River Economic Belt based on low carbon perspective. *Economic Geography*, 2019, 39(02): 190-198.] DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2019.02.023.
- [35] 李波, 张俊彪. 基于我国农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异研究. 经济地理, 2012, 32(07): 135-140. [Li Bo, Zhang Junbiao. Study on carbon effects and spatial differences based on changes in China's agricultural land use. *Economic Geography*, 2012, 32(07): 135-140.] DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2012.07.022.
- [36] 郭杰, 丁冠乔, 刘晓曼, 等. 城镇景观格局对区域碳排放影响及其差别化管控研究. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 55-61. [Guo Jie, Ding Guanqiao, Liu Xiaoman, et al. Effect of urban landscape pattern on regional carbon emissions and its differential regulation. *China population, resources and environment*, 2018, 28(10): 55-61.] DOI: 10.12062/cpre.20180728.
- [37] Wang K, Wu M, Sun Y, et al. Resource abundance, industrial structure, and regional carbon emissions efficiency in China. *Resources Policy*, 2019, 60: 203-214. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.01.001.
- [38] 陈运平, 宋向华, 黄小勇, 等. 我国省域绿色竞争力评价指标体系的研究. 江西师范大学学报: 哲学社会科学版, 2016, 49(3): 57-65. [Chen Yunping, Song Xianghua, Huang Xiaoyong, et al. Study on evaluation index system of provincial green competitiveness. *Journal of Jiangxi Normal University (Social Sciences)*, 2016, 49(3): 57-65.]
- [39] 王妍, 石敏俊. 中国城镇居民生活消费诱发的完全能源消耗. 资源科学, 2009, 31(12): 2093-2100. [Wang Yan, Shi Minjun. Energy requirement induced by urban household consumption in China. *Resources Science*, 2009, 31(12): 2093-2100.]
- [40] 师萍, 韩先锋, 卫伟, 等. 我国低碳企业技术效率及其影响因素的实证研究. 中国科技论坛, 2010(11): 67-72. [Shi Ping, Han Xianfeng, Wei Wei, et al. An empirical study on technical efficiency of low-carbon enterprise and its affecting factors in China. *Forum on Science and Technology in China*, 2010(11): 67-72.] DOI: 10.13580/j.cnki.fstc.2010.11.013.
- [41] 刘贝贝, 左其亭, 刁艺璇. 绿色科技创新在黄河流域生态保护和高质量发展中的价值体现及实现路径. 资源科学, 2021, 43(02): 423-432. [Liu Beibei, Zuo Qiting, Diao Yixuan. The value and pathways of green technology innovation for the ecological conservation and high-quality development of the Yellow River Basin. *Resources Science*, 2021, 43(2): 423-432.] DOI: 10.18402/resci.2021.02.19.
- [42] 罗敏, 朱雪忠. 基于共词分析的我国低碳政策构成研究. 管理学报, 2014, 11(11): 1680-1685. [Luo Min, Zhu Xuezhong. Co-Word analysis on low-carbon policies frame in China. *Chinese Journal of Management*, 2014, 11(11): 1680-1685.] DOI: 10.3969/j.issn.1672-884x.2014.11.014.
- [43] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. 2006: 55-60.
- [44] 国家发改委气候司. 省级温室气体清单编制指南. 2011: 15-31. [National Development and Reform Commission. Guidelines for Compiling provincial Greenhouse Gas Inventories. 2011: 15-31.]

- [45] 蔡博峰, 刘春兰, 陈操操. 城市温室气体清单研究. 北京: 化学工业出版社, 2009: 148-152. [Cai Bofeng. City's Green-house Gas Emissions Inventory Research. Beijing: Chemical Industry Press, 2009:148-152.]
- [46] 胡欢, 章锦河, 熊杰, 等. 河北省碳源碳汇测算及碳减排压力分析. 地理与地理信息科学, 2016, 32(3): 61-67. [Hu Huan, Zhang Jinhe, Xiong Jie, et al. Carbon emission estimation and reduction pressure analysis in Hebei province. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(3): 61-67.] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2016.03.012.
- [47] Shan Y, Guan D, Zheng H, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015. Sci. Data 5:170201. DOI: 10.1038/sdata.2017.201 (2018).
- [48] 李在军, 尹上岗, 姜友雪, 等. 长三角经济增长与碳排放异速关系及形成机制. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1507-1523. [Li Zaijun, Yin Shanggang, Jiang Youxue, et al. Analysis of allometric relationship and formation mechanism between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River Delta. Journal of Natural Resources, 2022, 37(6): 1507-1523.] DOI: 10.31497/zrzyxb.20220610.
- [49] 郭艺, 曹贤忠, 魏文栋, 等. 长三角区域一体化对城市碳排放的影响研究. 地理研究, 2022, 41(1): 181-192. [Guo Yi, Cao Xianzhong, Wei wending et al. The impact of regional integration in the Yangtze River Delta on urban carbon emissions. Geographical Research, 2022, 41(1): 181-192.] DOI: 10.11821/dlyj020210506.
- [50] 杜运伟, 黄涛珍, 康国定. 基于微观视角的城市家庭碳排放特征及影响因素研究: 来自江苏城市家庭活动的调查数据. 人口与经济, 2015, 209(2): 30-39. [Du Yunwei, Huang Taozhen, Kang Guoding, et al. A study of urban household carbon emission characteristic and its impact factors from the micro perspective: From the survey data of the urban household activities in Jiangsu province. Population & Economics, 2015, 209(2): 30-39.] DOI: 10.3969/j.issn.1000-4149.2015.02.004.
- [51] Jackson A T. Household energy consumption in the UK: A highly geographically and socio-economically disaggregated model. Energy Policy, 2008, 36: 3177-3192. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.03.021.
- [52] Yuan Chaoqing, Yang Yingjie, Chen Ding, et al. Proximity and similitude of sequences based on grey relational analysis. Journal of Grey System, 2014, 26(4): 57-74.
- [53] 武春友, 郭玲玲, 于惊涛. 基于TOPSIS-灰色关联分析的区域绿色增长系统评价模型及实证. 管理评论, 2017, 29(1): 228-239. [Wu Chunyou, Guo Lingling, Yu Jingtao. Evaluation model and empirical study of regional green growth system based on TOPSIS and Grey Relational analysis. Management Review, 2017, 29(1): 228-239.] DOI: 10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.2017.01.023.
- [54] Rey S J, Janikas M V. Stars: Space-time analysis of regional systems. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 67-86. DOI: 10.1111/j.0016-7363.2005.00675.x.
- [55] 吴珣, 杨婕, 张红. 不同空间权重定义下中国人口分布空间自相关特征分析. 地理信息世界, 2017, 24(2): 32-38. [Wu Xun, Yang Jie, Zhang Hong. Analyzing spatial autocorrelation of population distribution in different spatial weights: A case of China. Geomatics World, 2017, 24(2): 32-38.] DOI: 10.3969/j.issn.1672-1586.2017.02.006.
- [56] Rey S J. Spatial analysis of regional income inequality. Urban/regional, 2001: 280-299.
- [57] Rey S J. Spatial empirics for economic growth and convergence. Geographical Analysis, 2001, 33(3): 195-214. DOI: 10.1111/j.1538-4632.2001.tb00444.x.
- [58] Rey S J, Murray A T, Anselin L. Visualizing regional income distribution dynamics. Letters in Spatial and Resource Sciences, 2011, 4(1): 81-90. DOI: 10.1007/s12076-010-0048-2.
- [59] 张欣, 潘竟虎. 中国城市蔓延时空动态识别及驱动因素探测. 人文地理, 2021, 36(4): 114-125. [Zhang Xin, Pan Jing-hu. Identification of spatio-temporal dynamics and detection for driving factors of urban sprawl in China. Human Geography, 2021, 36(4): 114-125.] DOI: 10.13959/j.issn.1003-2398.2021.04.014.

Spatio-temporal evolution of urban low-carbon competitiveness in the Yangtze River Delta from 2000 to 2020

KONG Minwei¹, HU Hong^{1,2}, ZHANG Hongyun¹, DU Sihan¹

(1. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 211093, China; 2. Smart City
Research Base of Jiangsu, Nanjing 211093, China)

Abstract: To achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals, it is necessary to analyze the low-carbon competitiveness of cities on a regional scale. In other words, it is important to recognize the spatio-temporal evolution patterns of the low-carbon development in various cities in regional scope. This paper aims to analyze the low-carbon competitiveness of 41 cities in the Yangtze River Delta (YRD) from 2000 to 2020. It first constructed the comprehensive index system for evaluating urban low-carbon competitiveness, consisting of three dimensions of carbon emissions, socio-economic correlation factors, low-carbon technologies and policies. It then analyzed the time-series evolution characteristics of urban low-carbon competitiveness in the study area based on the TOPSIS-grey relational analysis method, and identified the spatial evolution pattern of urban low-carbon competitiveness by employing LISA time path and space-time transition models. It finally divided the 41 cities into seven spatio-temporal evolution types. Results have shown that: (1) The urban low-carbon competitiveness in the YRD changed significantly within the 20 years, and nearly half of the cities showed fluctuating evolution with an upward trend, and the average level of low-carbon competitiveness is Shanghai > Zhejiang > Jiangsu > Anhui ; (2) The spatial correlation of the dimension of carbon emissions varied greatly among cities, while the spatial correlation of the dimension of socio-economic factors was relatively weak, and the spatio-temporal coordination of the dimension of low-carbon technologies and policies was becoming better. (3) The probability of non-transition between spatio-temporal types or the same transition direction in the cities is 81.1%, indicating that there was certain path dependence in the spatial pattern evolution of low-carbon competitiveness in the YRD. (4) Different spatio-temporal evolution types of low-carbon competitiveness in the YRD were identified, for instance, the low-level solidification type in the northern areas, the high-level synergy type in southern Anhui and Zhejiang, the high-level overflow type in the central areas such as Hangzhou and Ningbo, which drove the low-carbon development of surrounding areas, the high-level centrality type such as Shanghai, Nanjing and Hefei, which were regional centers yet not fully played a leading role. In general, there are certain coordination and transformation existing in the external and internal factors of the three dimensions of urban low-carbon competitiveness, which drive the overall evolution of low-carbon competitiveness in the YRD. This paper could shed light on policy-making of low-carbon oriented regional integration.

Keywords: Yangtze River Delta; low-carbon competitiveness; spatio-temporal evolution; TOPSIS-grey relational analysis; exploratory spatio-temporal data analysis