



復旦大學

2025

基于碳达峰目标的逆向SEA视角下 长三角城市网络协同降碳研究

Research on the Synergistic Carbon Reduction of the Yangtze River Delta Urban Network from a Reverse SEA Perspective Based on the Carbon Peaking Target

汇报人：施滢滢

复旦大学博士研究生

目 录

CONTENTS



1

研究背景与问题提出



2

研究方法与分析框架



3

实证结果分析



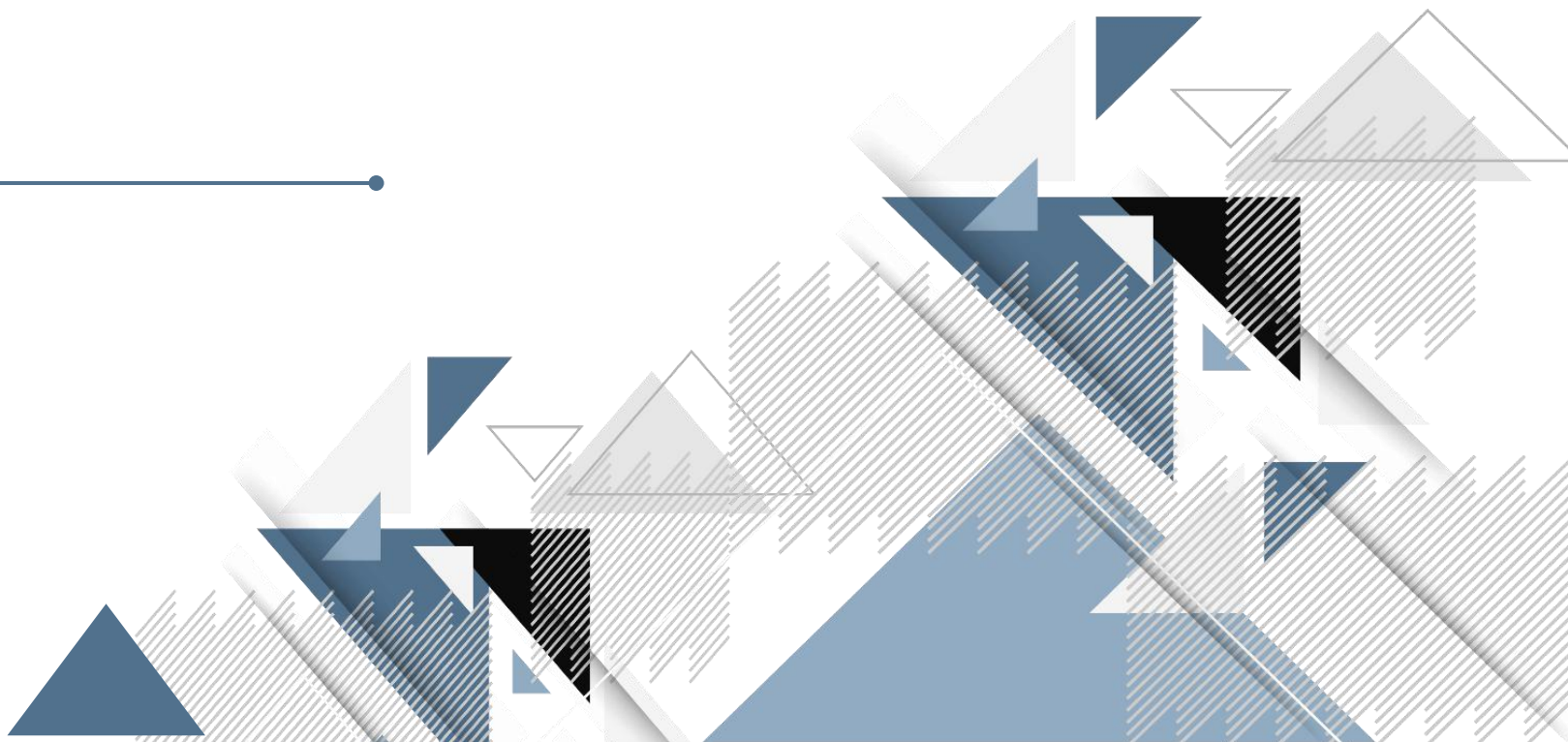
4

结论与政策建议



復旦大學

01 研究背景与问题提出



研究背景

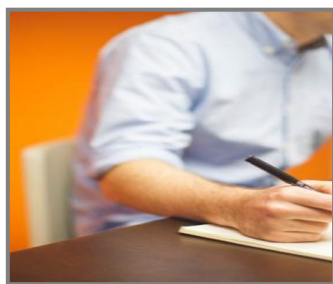
背景一：长三角城市网络协同降碳需求迫切



当前**城市在全球碳排放总量中贡献了约70%的二氧化碳排放**。通过资金、信息、人口等要素的空间流动形成紧密联系，城市体系逐步由垂直的等级体系转变为网络化的功能体系。



作为城市化水平最高的地区之一，**2023年长三角地区贡献了全国碳排放的13.53%**。党的二十大报告提出，“深入实施区域协调发展战略”“**以城市群、都市圈为依托构建大中小城市协调发展格局**”。



因此，有必要对长三角城市网络的协同降碳现状及策略进行研究，从而为区域碳减排提供可借鉴的经验和模式。

研究背景

背景二：双碳目标下的逆向SEA规划协同降碳的需要



01 碳达峰目标的实现既需要国家、区域、省、市等各个层级的行政协作，也需要立法、规划、政策等不同制度的联合发力，涉及到工业、能源、建筑、交通等多个领域的协同降碳。“十五五”规划处于中国实现2030年碳达峰目标的关键时期，研究各项规划对碳达峰目标的支撑作用至关重要。

02

然而，传统的战略环境影响评价（SEA）主要基于可持续发展理念关注已有战略决策行为的环境影响，缺乏预防性、战略性和前瞻性。而逆向的战略环境影响评价可从碳达峰目标出发，反向审视现有的城市发展战略和规划，评估当前碳排放现状与碳达峰目标之间的差距。

04

因此，有必要基于逆向SEA视角研究当前“十四五”各项规划的协同降碳现状，从而对“十五五”规划的制定提出政策建议，推动实现跨部门多领域的协同降碳。

问题提出

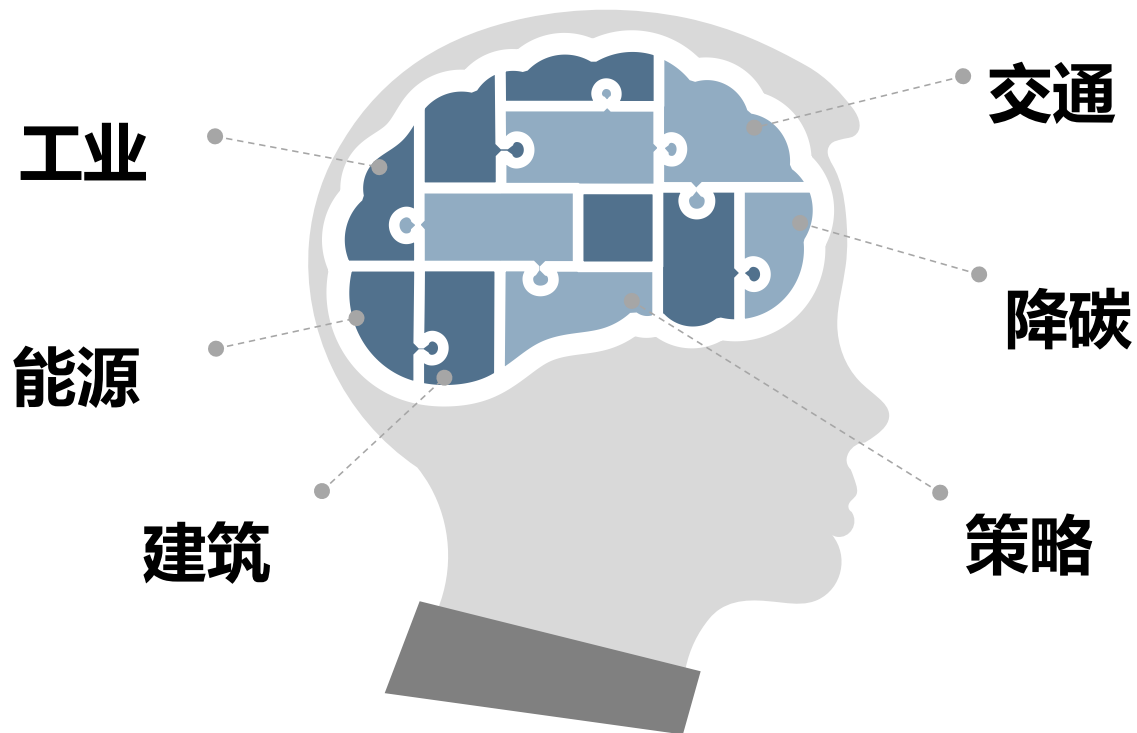
研究问题：长三角城市网络的协同降碳现状如何？如何实现规划协同降碳？

本研究从碳达峰导向下的逆向SEA视角出发，探讨：

①长三角地区2009-2022年城市网络的碳排放现状；

②“十四五”工业、能源、建筑、交通等规划的协同降碳情况；

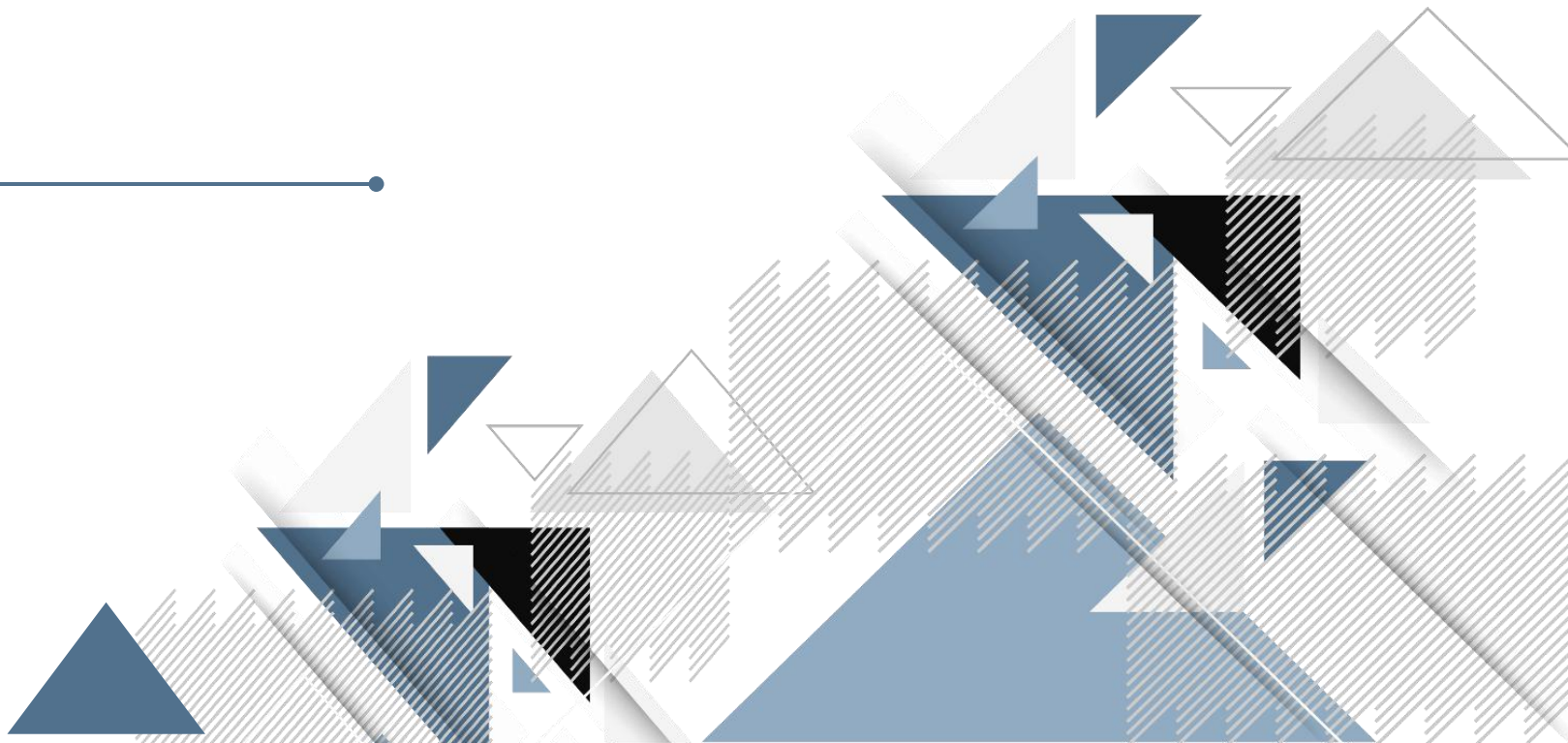
从而为“十五五”规划和区域碳减排政策的制定实施提供科学依据，助力中国实现2030年碳达峰目标。





復旦大學

02 研究方法与分析框架



研究方法與內容



貢獻一

基于经济-能源-环境的3E复合系统，综合考虑GDP、人口、能源消耗、建成区面积等因素，构建了碳排放总量和强度“1+4”指标体系，基于核密度估计和聚类分析准确刻画城市的碳排放特征及定位，有助于为长三角地区制定差异化的碳减排策略。



貢獻二

从城市网络理论出发，引入能源要素改进现有的引力模型，运用社会网络分析法研究长三角城市群碳排放空间关联网络的整体特征及各城市的功能定位，从而更好地设计区域一体化协同降碳路径。

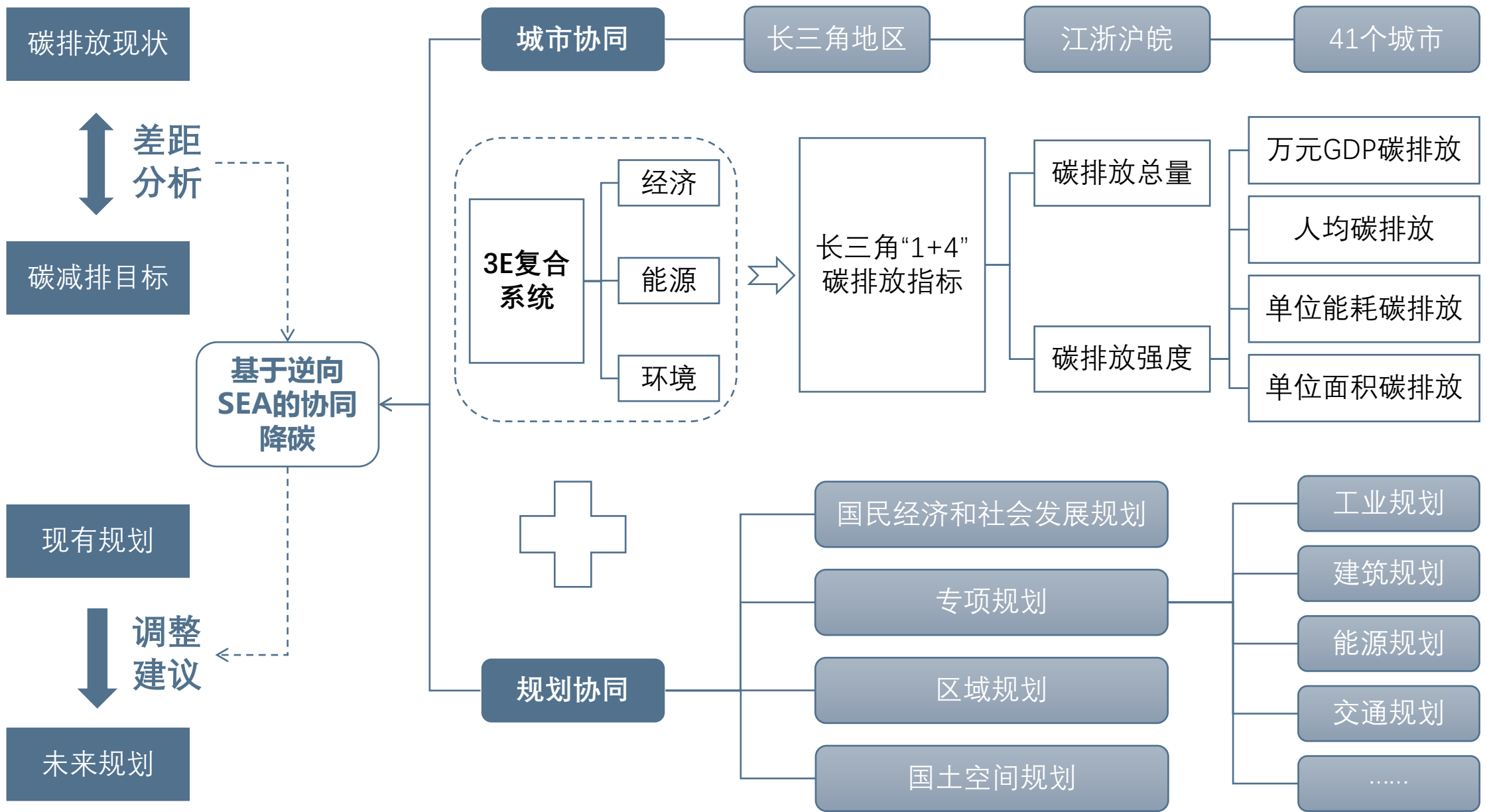


貢獻三

基于碳达峰目标的逆向SEA视角，运用语义网络分析法研究长三角代表性城市“十四五”工业、能源、建筑、交通四个领域规划文本的降碳内容，从而为碳达峰背景下“十五五”规划的制定提出合理的政策建议。



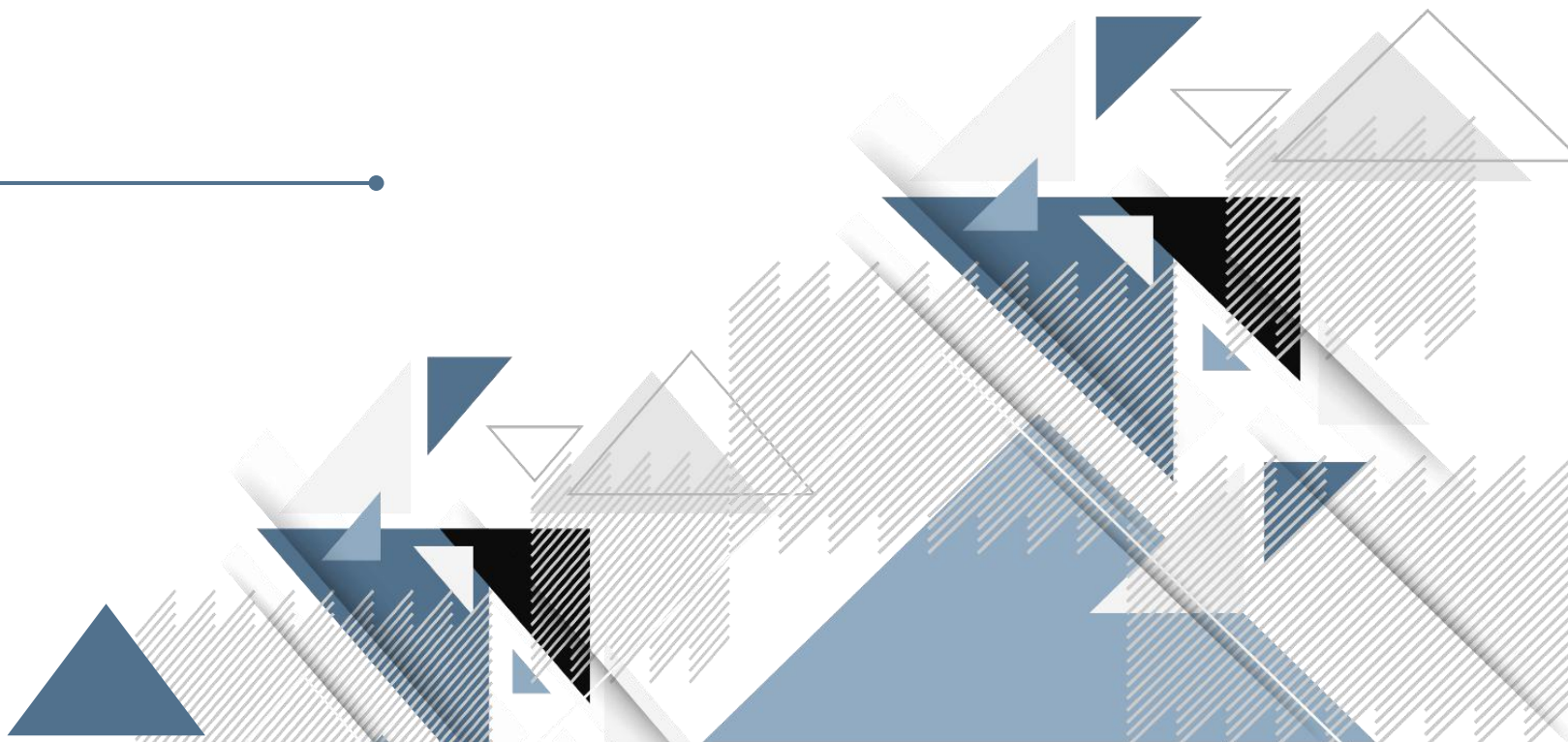
分析框架





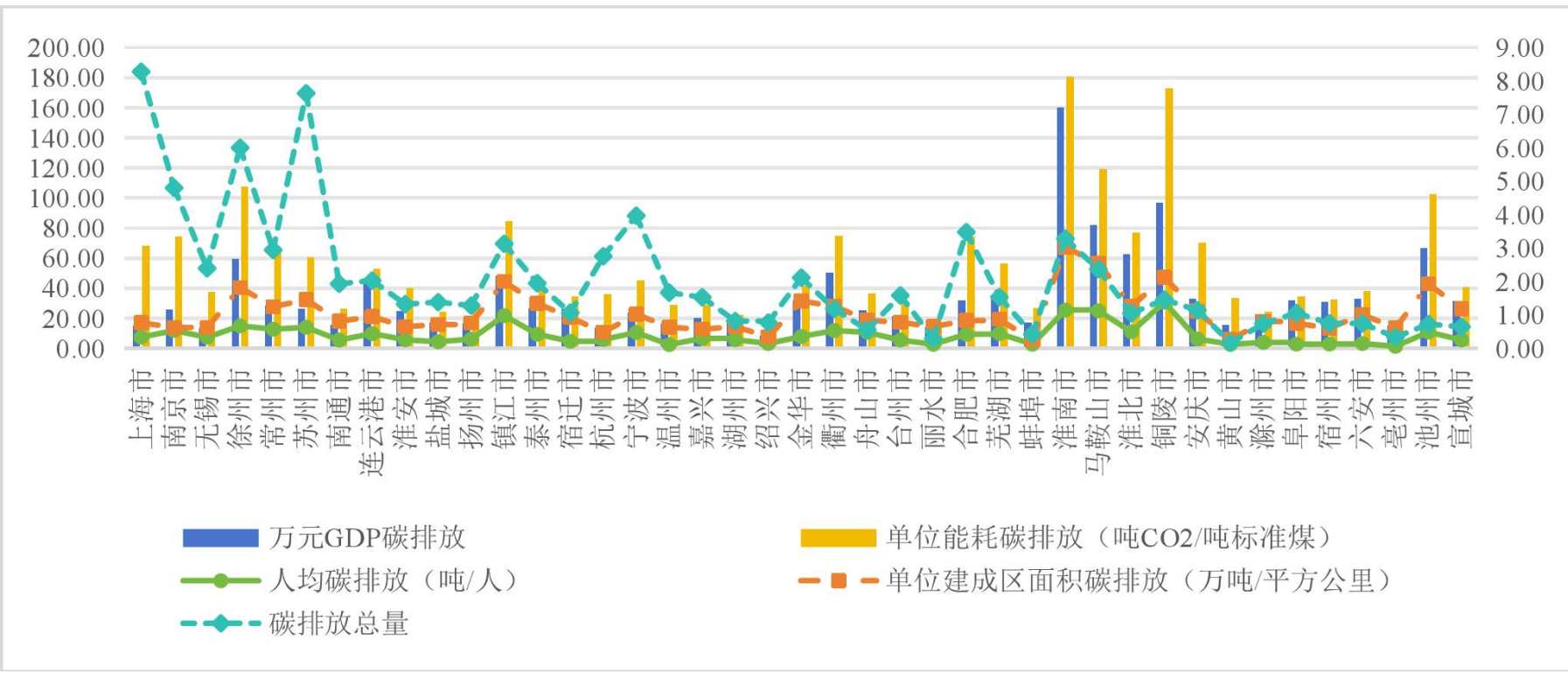
復旦大學

03 实证结果分析



长三角城市碳排放“1+4”指标与空间关联网络分析

1.长三角碳排放总量与强度总体水平分析



长三角地区的碳排放总量及各项强度指标存在显著的空间差异。

从碳排放总量来看，上海、苏州、南京、宁波、合肥的碳排放总量位列前茅，但碳排放强度总体较低。这些城市或为省会城市、或为直辖市及离上海较近的城市，由于经济体量庞大、人口规模较多，因此碳排放总量规模较大。

而黄山、丽水、亳州、蚌埠的碳排放总量相对较低，且强度指标也处于较低水平。这些城市总体规模较小，且旅游业、服务业等第三产业占比较高，产业结构较为清洁化，因此碳排放总量排名较为靠后。

图3 2009-2022年长三角41个城市碳排放总量及强度均值

长三角城市碳排放“1+4”指标与空间关联网络分析

2.长三角城市群碳排放时空演变特征

由图4a可见，长三角城市群的**碳排放总量在2009-2022年逐步增长**，但增速逐渐减缓。核密度曲线由高而窄逐步向扁而宽的趋势演进，右拖尾存在逐年拉长的现象，分布延展性在一定程度上呈现逐步拓宽趋势，**表明长三角地区的碳排放总量空间差距不断扩大**，反映出城市之间经济发展水平与碳减排策略的差异。

图4b显示，**碳排放强度在2009-2022年总体呈现明显下降趋势**。核密度曲线的波峰总体向左迁移，波峰高度显著上升后有轻微下降，水平宽度总体变窄，左拖尾有所拉长，说明**长三角碳排放强度空间分布整体趋于收敛，区域差距逐渐缩小**。由此表明，长三角地区存在区域间技术扩散与转移，促进了碳排放强度的均衡下降，一体化协同降碳成效显现。

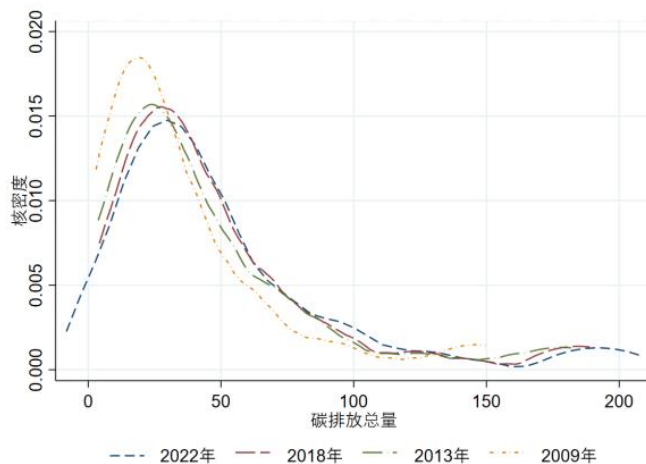


图4a 2009-2022年长三角碳排放总量核密度图

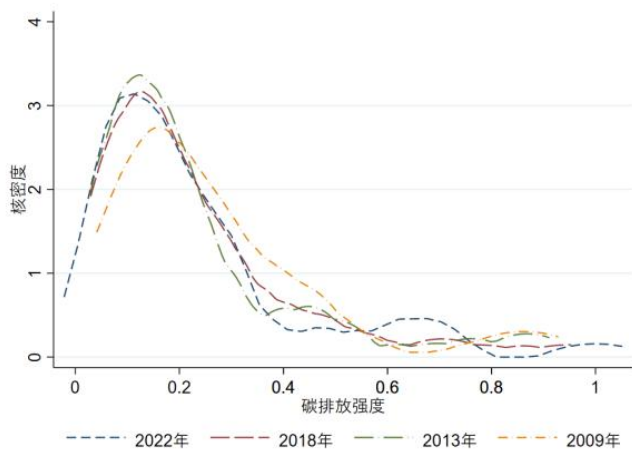


图4b 2009-2022年长三角碳排放强度核密度图

经济的发展首先导致能源需求的增加和碳排放总量的上升，此后随着技术进步与能源结构优化，碳排放强度率先出现下降，并带动总量增速减缓进而达到峰值。**长三角碳排放总量上升且差距扩大而强度下降且差异缩小的总体变化特征反映出该区域碳达峰的发展态势渐趋明显。**在2009-2022年，中国推行了一系列节能减排政策，包括推广清洁能源、建设碳交易市场等，2018年长三角一体化正式上升为国家战略，2020年“双碳”目标的提出，均促进了长三角地区碳排放总量控制和强度减少，推动了区域一体化协同降碳进程。

长三角城市碳排放“1+4”指标与空间关联网络分析

3.长三角城市群碳排放聚类分析

表1 长三角地区41个城市2009-2022年各聚类组别的碳排放总量与强度均值

聚类组别	碳排放总量 /百万吨	万元GDP 碳排放/吨	人均碳排放 /吨	单位能耗碳排放 /吨CO ₂ /吨标准煤	单位建成区面积 碳排放/万吨 /km ²	城市
1	176.81	0.93	10.86	2.90	24.86	上海、苏州
2	54.55	1.18	8.64	2.12	21.50	无锡、常州、南通、连云港、泰州、杭州、金华、合肥
3	21.20	1.23	5.69	1.77	18.11	淮安、盐城、扬州、宿迁、温州、嘉兴、湖州、绍兴、衢州、舟山、台州、丽水、芜湖、蚌埠、淮北、安庆、黄山、滁州、阜阳、宿州、六安、亳州、池州、宣城
4	109.53	1.64	12.60	3.41	25.80	南京、徐州、宁波
5	56.98	4.36	25.88	6.28	53.96	镇江、淮南、马鞍山、铜陵

为进一步分析长三角各城市的碳排放总量和强度特征的差异，从而根据不同类型城市制定针对性的协同降碳策略，论文利用SPSS软件，采用K均值聚类方法对长三角41个城市的碳排放总量和强度指标进行聚类，将长三角41个城市划分为5个组别。表1显示了长三角地区各聚类组别中的城市碳排放总量及强度均值情况。

总体而言，组别1和4碳排放强度指标较为相近而总量差距较大，体现出城市发展规模的差异。组别2和5的碳排放总量较为一致而强度差距较大，反映了城市发展质量的差距。组别3的总量和强度总体均处于较低水平，主要是由于城市规模较小、工业活动较为分散、碳排放密度较低。未来，各组别城市应结合自身碳排放特点，制定差异化的减碳策略，从而推动长三角地区协同降碳。

长三角城市碳排放“1+4”指标与空间关联网络分析

4.长三角地区碳排放空间关联网络分析

由图5可见，在2009-2022年期间，关联关系系数和网络密度整体均呈现波动上升趋势。在2015年之后，关联关系系数和网络密度均出现明显增长，表明城市之间的合作联系不断加强。2016年达到了峰值，该年发布的《长江三角洲城市群发展规划（2016—2020）》正式将安徽省纳入规划范围，进一步推动了长三角一体化发展进程。此后两个指标均有所回落，但在2022年再次接近峰值，表明城市网络的联系紧密度仍在稳步提高。

总体而言，长三角城市碳排放网络在近14年间逐步变得更加紧密，各城市合作联系更加密切，区域一体化水平不断提升。

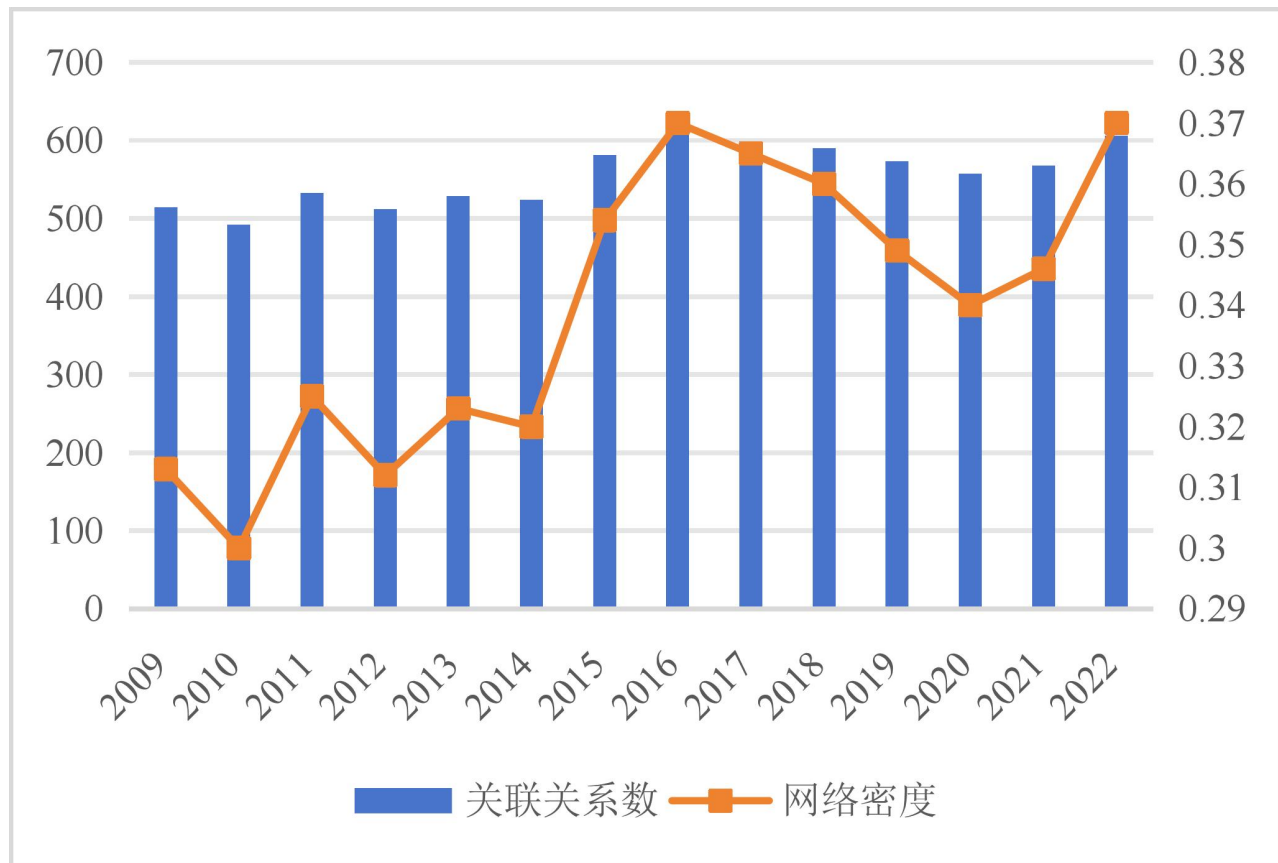


图5 2009-2022年长三角城市网络的关联关系系数和网络密度

长三角城市碳排放“1+4”指标与空间关联网络分析

4.长三角地区经济-能源-碳排放空间关联网络分析

表2 2022年长三角城市群经济-能源-碳排放网络的个体中心度

城市	连入度	连出度	点度中心度	中间中心度	接近中心度
扬州市	24	31	55	114.69	0.82
镇江市	25	29	54	94.82	0.78
常州市	28	23	51	81.72	0.70
杭州市	25	25	50	88.03	0.71
宁波市	20	27	47	80.77	0.74
南通市	22	25	47	81.69	0.73
泰州市	18	24	42	41.67	0.71
合肥市	18	18	36	39.50	0.65
宿州市	16	20	36	17.86	0.66
上海市	27	8	35	15.42	0.54
.....					
舟山市	4	4	8	1.21	0.42
总体均值	14.78	14.78	29.56	25.51	0.60

由表看出，常州、上海、苏州、镇江等17个城市的网络连入度高于总体均值，说明这些城市接收了更多的经济资源、能源供给和碳排放转移，在网络中具有更强的吸引力。舟山、盐城、衢州、连云港等24个城市的连入度低于均值，反映出这类城市对资源的吸引力和集聚能力较为不足。

扬州、镇江、常州、杭州等18个城市的点度中心度高于均值，表明这些城市在网络中具有较高的活跃度，与其他城市的经济-能源-碳排放联系更密切。而舟山、黄山、丽水、衢州等23个城市的点度中心度低于平均水平，处于网络边缘的位置，与其他城市的碳排放联系相对较少。

总体而言，长三角碳排放网络基本呈现“中心-边缘”的空间分布特点。其中，扬州、镇江、常州、杭州等城市个体中心度总体占据高位，而舟山、黄山、丽水、衢州等城市总体处于较低水平，与其他城市碳排放联系较弱。

长三角城市碳排放“1+4”指标与空间关联网络分析

4.长三角地区经济-能源-碳排放空间关联网络分析

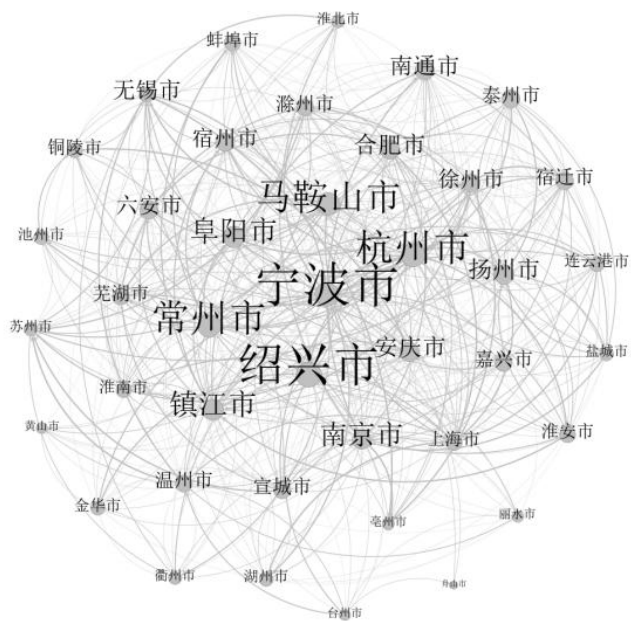


图6a 2009年长三角地区城市网络图

图6b 2022年长三角地区城市网络图

注：城市的节点大小代表点度中心度大小，城市的字体大小代表中间中心度大小。

从2009年到2022年，长三角城市网络的整体结构经历了从简单到复杂、从分散到整合的过程。**长三角城市群的空间结构正逐渐从单一中心向多中心、网络化方向演变**，反映出区域一体化进程的加速，城市间的联系日益紧密，合作领域不断拓展。

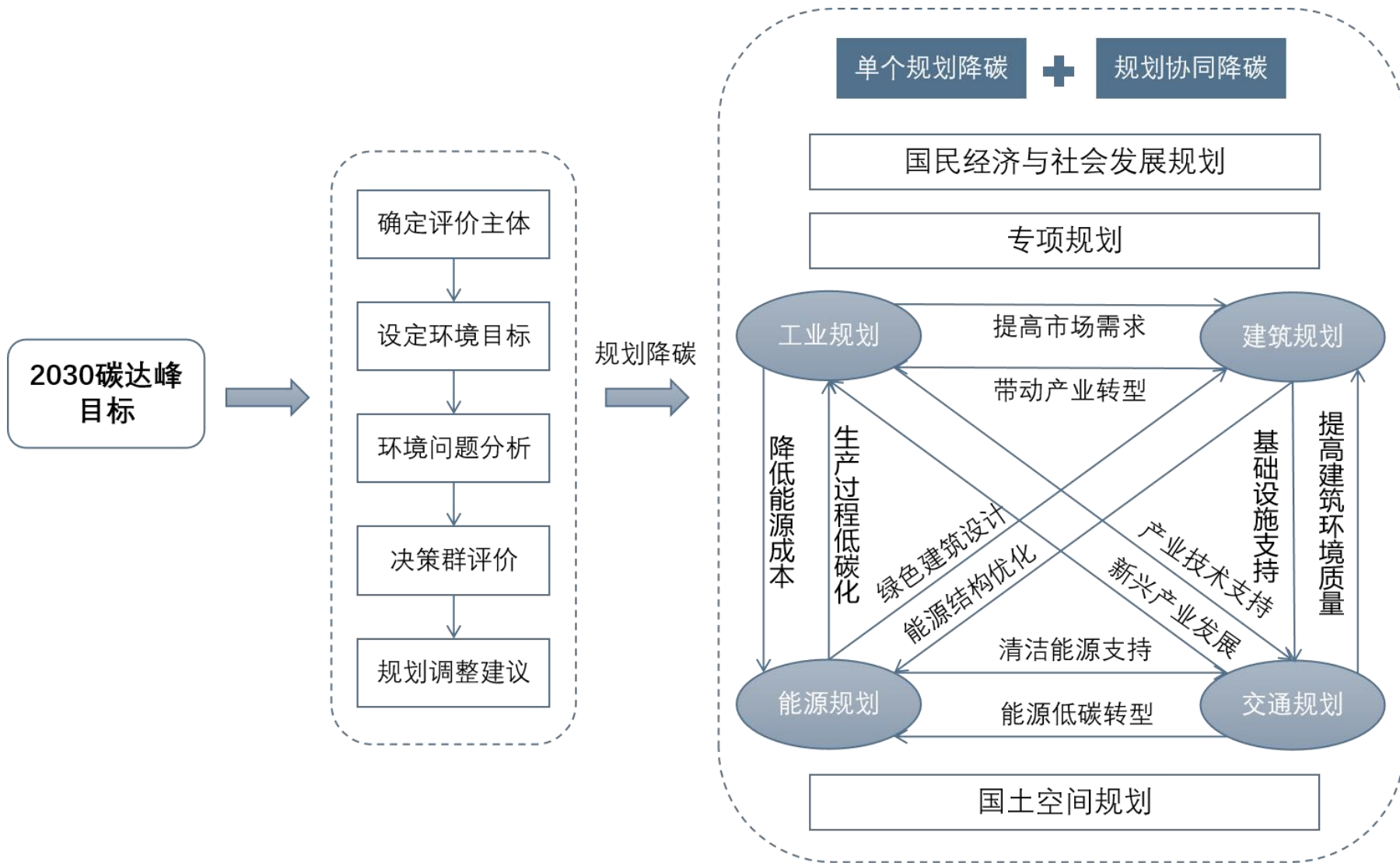
从个体中心度指标来看，**镇江、扬州、南通在2009-2022年点度中心度和中间中心度显著提升**，这些城市正凭借其独特的交通区位优势和产业基础，逐步成为长三角地区的次级中心。其中，镇江提出建设长三角先进制造业基地和区域中心城市，其制造业基础雄厚，能够与上海、南京等核心城市的高端产业形成互补。扬州则在文化旅游、先进制造业等领域具有特色，其产业的多元化和专业化使其在网络中具有较强的连接性。此外，**杭州、宁波、常州等城市在2009-2022年持续保持较高的点度中心度和中间中心度**，占据了长三角经济-能源-碳排放网络的中心地位，反映出其在网络中的活跃度较高，资源中介能力较强。

长三角城市碳排放“1+4”指标与空间关联网络分析

5. 基于语义网络分析的长三角降碳规划协同研究

基于2030年碳达峰目标，从逆向SEA视角出发，首先确定规划的评价主体，然后设定具体的环境目标，接着针对当前评价主体的环境问题进行分析，开展决策群评价，探究环境现状与目标之间的差距，最后得出规划调整的建议。

规划的降碳路径应包含**单个规划自身的降碳及规划之间的协同降碳两方面的内容**。规划内容包括国民经济与社会发展规划、国土空间规划以及各领域的专项规划等。其中各个专项规划，如工业、能源、建筑、交通领域之间存在较为紧密的碳排放联系，可通过相互促进低碳转型实现整体协同降碳。



长三角城市碳排放“1+4”指标与空间关联网络分析

5.基于语义网络分析的长三角降碳规划协同研究

表3 五个代表城市“十四五”工业、能源、建筑、交通专项规划文本高频词及其得分（部分）

城市	工业	词频	得分	能源	词频	得分	建筑	词频	得分	交通	词频	得分
上海	发展	171	100.00	能源	218	100.00	建筑	362	100.00	交通	249	100.00
	企业	143	83.63	发展	80	36.70	绿色	244	67.40	建设	146	58.63
	技术	130	76.02	建设	78	35.78	发展	80	22.10	推进	108	43.37
	服务	110	64.33	上海	58	26.61	能耗	72	19.89	完善	77	30.92
	创新	105	61.40	项目	49	22.48	生态	67	18.51	提升	73	29.32
	智能	97	56.73	推进	46	21.10	节能	63	17.40	服务	69	27.71
	建设	93	54.39	电力	43	19.72	城区	56	15.47	管理	69	27.71
	制造	92	53.80	工程	43	19.72	建设	52	14.36	体系	69	27.71
	领域	87	50.88	天然气	42	19.27	设计	51	14.09	加强	68	27.31
	加快	81	47.37	重点	41	18.81	管理	50	13.81	发展	66	26.51

在工业领域，“企业”“发展”“技术”“创新”等词汇在工业规划中整体居于前列，反映出各城市在工业发展中均强调了企业的核心主体地位，并注重通过技术创新途径实现区域间产业协作，从而推动工业经济的高质量发展。其中，“创新”“智能”反映出上海注重产业升级与智能化转型。“设计”“服务”“人才”表明杭州对工业设计、企业服务与人才培养的重视。然而，“节能”“减排”“低碳”“绿色”等词汇的缺失，表明节能减排与绿色低碳转型尚未成为各城市工业领域的规划重点，且宁波、镇江所在组别的城市碳排放总量与强度较高，亟需加快工业领域绿色发展。总体而言，各城市在能源规划中均强调了节能减排，部分城市在建筑规划中注重能耗降低与绿色发展，而工业与交通规划的低碳发展重视仍有待加强。

5.基于语义网络分析的长三角降碳规划协同研究

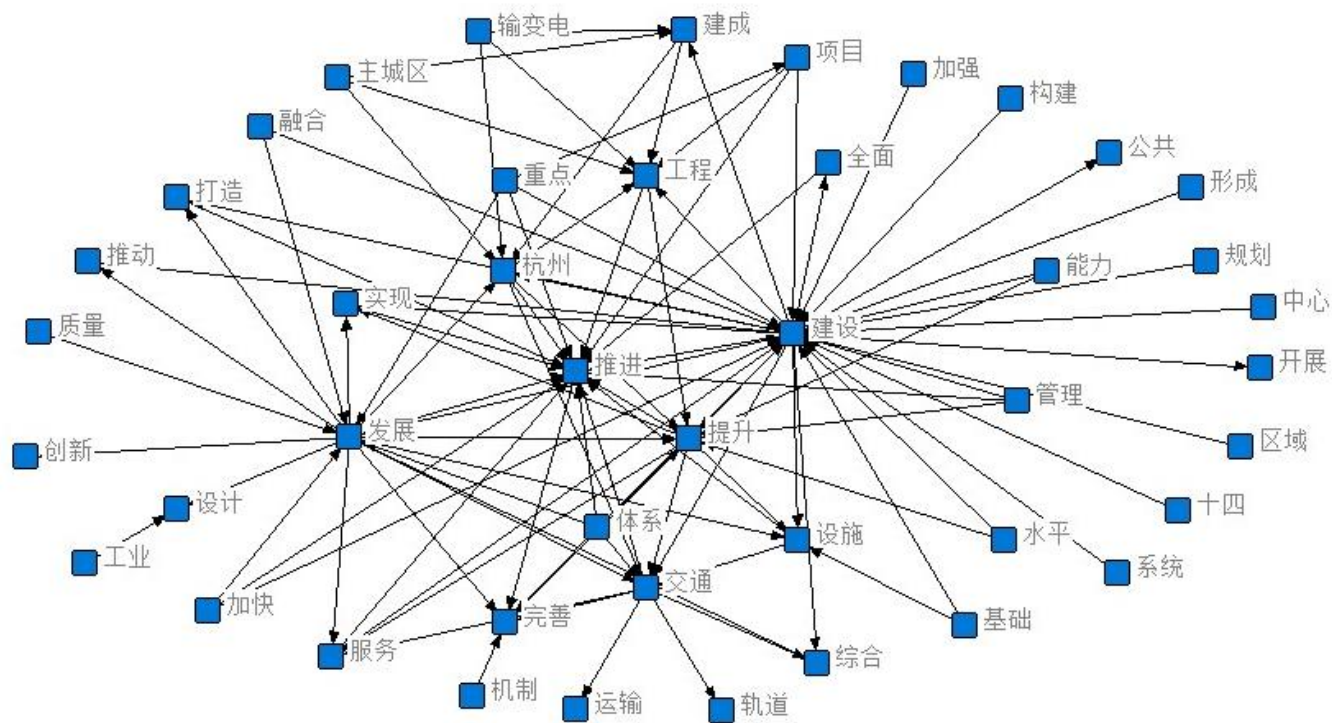


图8b 杭州市四项规划文本语义网络分析

为进一步探究长三角各城市的规划协同现状，论文选取五个碳排放聚类组别中的代表性城市（上海、杭州、扬州、宁波、镇江）的十四五工业、能源、建筑、交通专项规划进行语义网络分析。

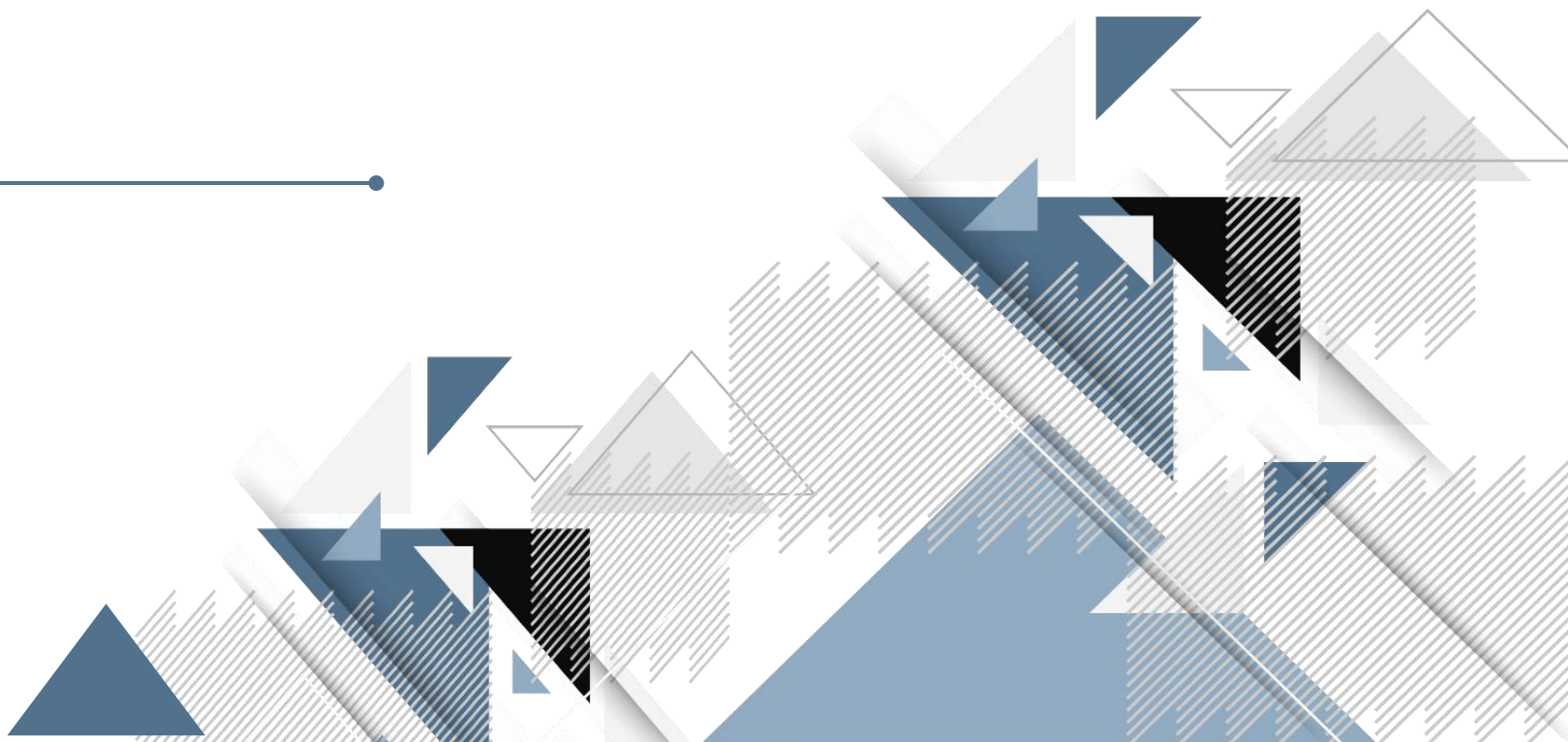
如图8b所示，杭州的四项规划文本语义网络以“推进”“建设”“工程”为中心簇布，以“提升”“发展”“交通”“设施”“输变电”为主要词簇，表明杭州注重通过具体的工程项目建设来实现各领域的目标。其中，“工程”“建成”“输变电”“建设”的关联紧密，表明杭州在十四五期间重点推进各类工程项目，包括电网升级改造、新能源接入等，体现了工业、建筑与能源领域的协同。“交通”“建设”“发展”等词汇联系密切，反映了对提高交通便利性与运输效率的重视，但与其他部门的协同性有待加强。

综上，上海、杭州、扬州、宁波、镇江对工业、能源、建筑、交通领域的低碳发展重视程度存在一定差异，各项规划间的整体协调与衔接仍需加强。未来，应强化多部门跨领域的合作，结合城市自身的碳排放特点，因地制宜地制定发展规划以实现协同降碳。



復旦大學

04 结论与政策建议



结论与政策建议

(一) 研究结论

01



1.长三角地区碳排放具有显著的区域异质性，总量差距不断扩大而强度差距逐渐缩小

上海、苏州、南京等城市碳排放总量较高，而黄山、丽水、亳州的总量较低，反映出城市发展规模的差距。淮南、铜陵、马鞍山的碳排放强度总体水平较高，而杭州、丽水、绍兴的强度水平偏低。2009-2022年长三角城市群的碳排放总量空间差距不断增大，而强度差距有所减小。根据碳排放总量与强度可将长三角城市群划分为五个组别。

02



2.长三角城市碳排放网络联系更加紧密，网络功能呈现“中心-边缘”的辐射分布特点

长三角碳排放空间网络的关联关系数和网络密度在2009-2022年总体呈现波动上升态势，各城市间的碳排放联系与合作愈发密切。扬州、镇江、杭州、宁波等城市的点度中心度、中间中心度及接近中心度等各项指标总体较高，反映出较强的网络活跃度、中介“桥梁”作用及信息传播能力。2009-2022年长三角碳排放网络从单一中心转变为多中心、复杂化的结构特征。

03

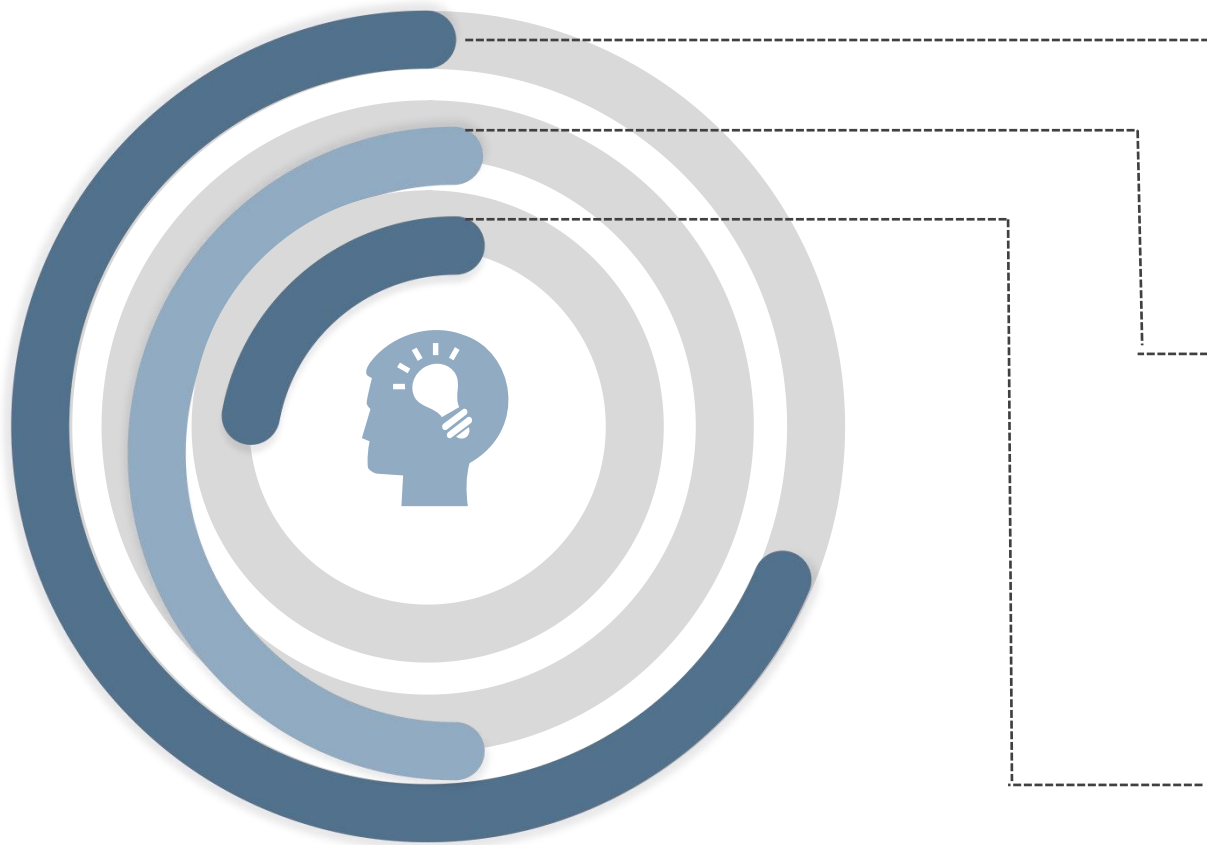


3.长三角城市规划强调了低碳发展，但各规划间的协同性仍需提高

长三角代表性城市通过技术创新、项目建设、管理优化、服务提升等多途径推动工业、能源、建筑、交通领域的高质量发展。其中，能源、建筑领域的规划强调了绿色低碳转型，而交通、工业规划的节能减排尚未成为规划重点。上海、杭州均在工业、能源、建筑领域实现规划协同。扬州的交通规划与工业规划形成协同。宁波、镇江的工业、交通、建筑领域实现了规划协同，而能源与其他领域的协同性需进一步提高。

结论与政策建议

(二) 政策建议



1.加强长三角区域协同治理机制建设，制定差异化的区域碳减排策略

建立跨区域碳排放监测与评估平台，实现碳排放数据共享与实时更新，为制定区域协同减排策略提供科学依据。设立长三角碳减排协调机构，统筹规划长三角地区碳减排任务分配与监督执行，促进区域资源整合与政策协同。

2.强化核心城市的引领作用与协同责任，提高次级城市的网络功能与减排能力

杭州、宁波、常州等碳排放网络核心城市应率先制定更严格的碳减排目标与政策，为区域低碳发展树立标杆。积极发挥中介“桥梁”作用，加强与周边城市的技术交流及项目合作，促进区域整体降碳协同。

3.强调碳达峰目标对各领域规划的引领，推动各项规划的低碳协同发展

推动工业绿色制造体系建设、绿色建筑推广与建筑能效提升、绿色交通体系建设与交通节能减排、清洁能源开发利用及能源结构优化。同时，加强各项规划在碳达峰目标下的统筹协调。



復旦大學

谢谢观看，请批评指正！

汇报人：施滢滢

复旦大学博士研究生