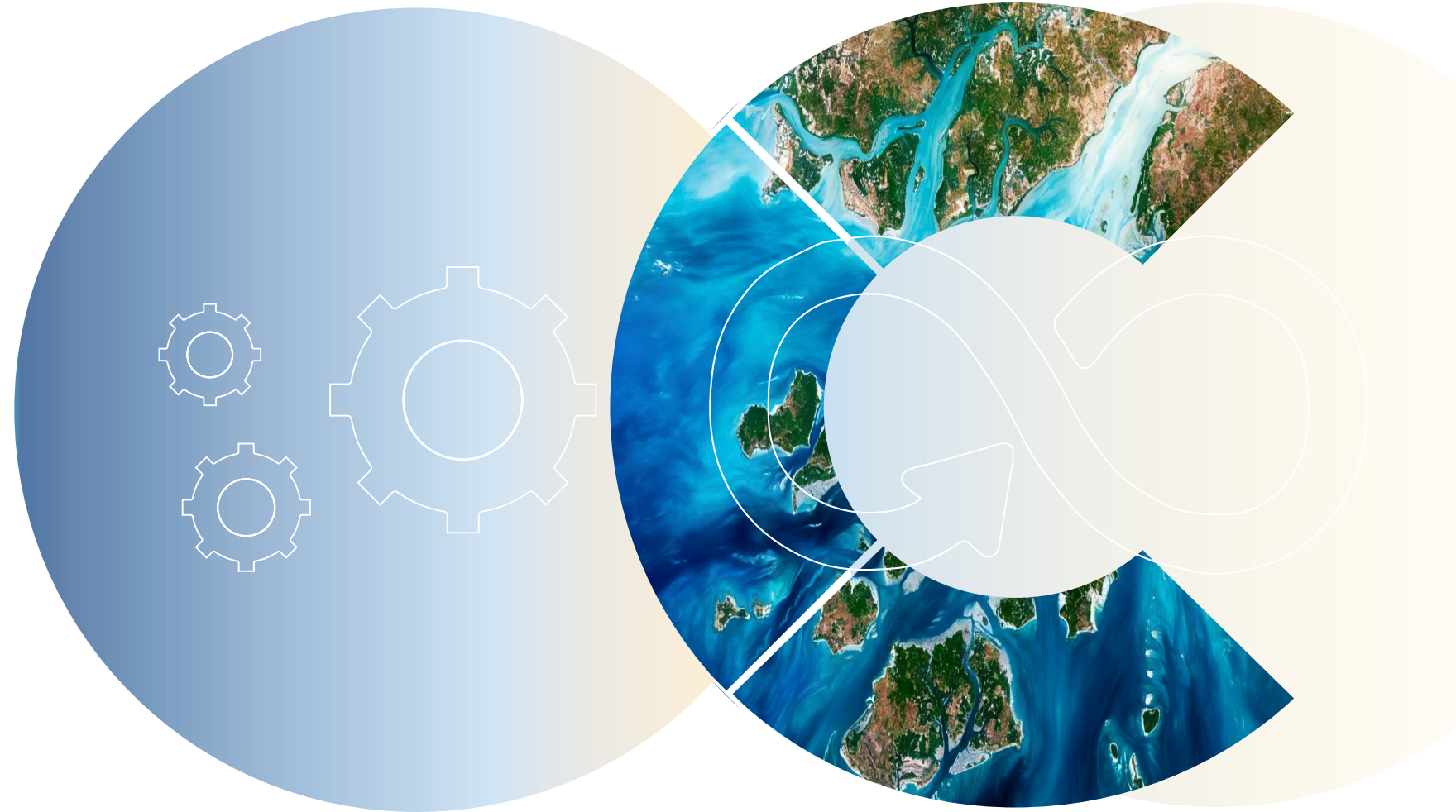




长江三角洲地区碳达峰碳中和路径研究

Research on the Pathways for Achieving Carbon Peak and Carbon Neutrality in China's Yangtze River Delta

联系方式
guojing@caep.org.cn

碳达峰碳中和区域协同路径优化研究课题组
2025

长江三角洲地区碳达峰 碳中和路径研究

Research on the Pathways for Achieving Carbon Peak
and Carbon Neutrality in China's Yangtze River Delta

碳达峰碳中和区域协同路径优化研究课题组

2025

摘要

长江三角洲地区（以下简称长三角地区）作为我国经济最具活力、创新能力最强的区域之一，在国家碳达峰碳中和战略中承担着重要使命。该地区以仅占全国 4% 的国土面积，承载了 25% 的工业产量，同时排放了全国约 20% 的二氧化碳，其低碳转型对全国碳中和目标的实现具有重要示范意义。

2005~2024 年间，长三角地区二氧化碳排放总量从 11.7 亿吨增至 24 亿吨，呈现“持续增长、结构调整、间接上升”的趋势，电力与工业部门合计占比 67%，成为区域碳减排的重点领域。从空间分布看，排放强度呈现“沿江沿海高、山区低”的格局，其中江苏、上海及浙江北部最为突出。

长三角地区低碳转型面临三大挑战：一是工业体系重型化特征突出，区域内分布超 19000 家工业园区，高耗能产业集群碳排放占比高达 62%；二是能源结构“高碳锁定”效应显著，煤炭消费占比超 50%，且 80% 能源依赖外部调入；三是行政壁垒与市场化机制不完善，三省一市在碳配额分配、减排标准等方面存在差异，统一碳市场尚未形成。

本研究基于中国碳达峰碳中和区域协同路径优化综合评估模型（CAEP-CP 3.0），系统研究了长三角地区 2020~2060 年低碳发展路径。研究表明，长三角地区碳排放优化路径将呈现四个阶段：渐进达峰（2020~2027 年）、温和下降（2027~2035 年）、快速减排（2036~2050 年）、趋稳近零（2051~2060 年）。预计区域碳排放将于 2027 年达到峰值 24.3 亿吨，2035 年较峰值下降 10%，2035~2050 年期间实现快速下降，2060 年趋近净零排放。能源结构转型是实现目标的关键，2035 年非化石能源占比将提升至 55%，2060 年达 91%。

长三角地区的低碳转型依赖重点产业链的协同发展。光伏产业链已形成全球最完整体系，仅江苏集聚了全国 40% 以上的光伏组件产能；锂电产业形成了“上游材料—中游制造—下游应用—末端回收”的闭环体系；集成电路产业形成了“设计看上海、封测看江苏、材料看浙江、存储看安徽”的区域协同格局；氢能产业将构建 GW 级电解水制氢工厂和区域氢能网络。这四大产业链将在低碳转型中发挥重要作用。

长三角地区低碳转型离不开重大气候工程的实施和引领。本研究系统规划了十大重点工程，预计总投资 1~2 万亿元，包括：区域一体化绿氢网络示范工程、海上 CCUS 大规模示范工程、零碳园区与产业协同减碳改造工程、以及千万千瓦级深远海风电基地集群工程等。

实现碳中和目标资金需求巨大。根据本研究测算，2025~2030 年资金需求总计 7.05 万亿元，其中能源领域 3.67 万亿元，占比超 50%。2031~2060 年资金需求将攀升至 63 万亿元。

据此，本研究提出 3 大核心政策建议。一是建议构建“区域碳预算—都市圈碳票—企业碳配额”三级协同的区域总量控制与市场化配置新体系，打造长三角国家碳市场改革深化试验区。设定“十五五”期间碳排放净零增长、“十六五”期间全面下降的总量目标，并形成“企业碳履约—都市圈碳盘子—区域碳清算”的三级联动管理模式；二是创新“链主驱动型产业链碳治理体系”，由龙头企业担任“碳链长”，承担全产业链协同减排的主体责任；三是建设长三角地区全球气候技术“双循环策源地”与国际“碳标准输出港”，推动中国标准成为国际规则。



第 1 章

长三角地区二氧化碳排放现状

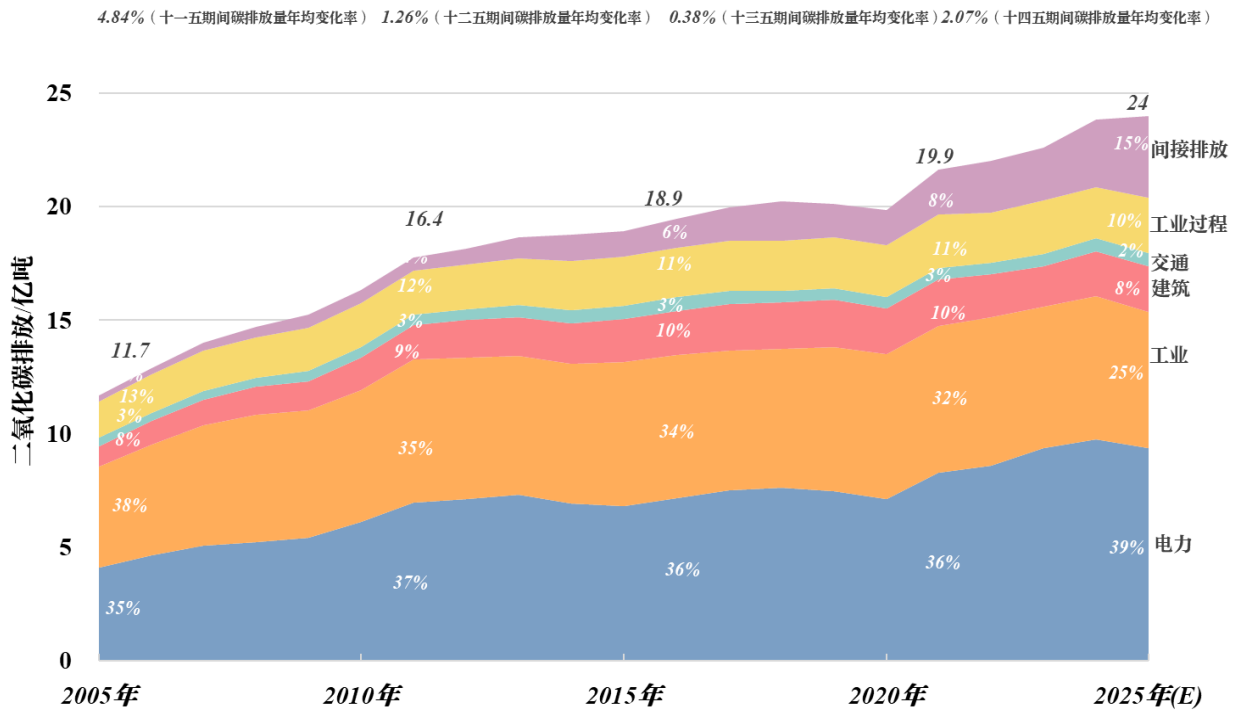


01

OVERVIEW OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS IN THE YANGTZE RIVER DELTA REGION

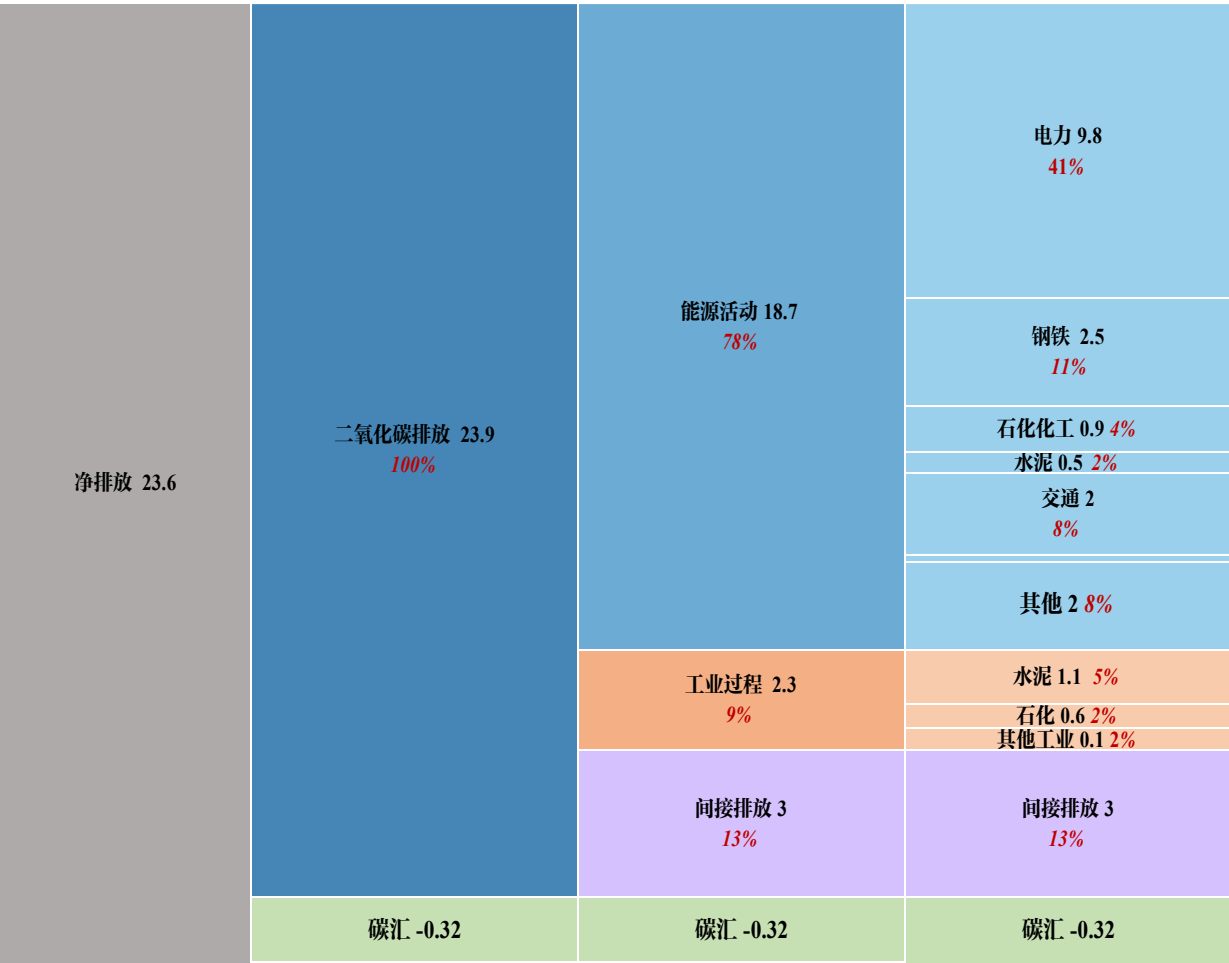
2005~2025 年，长三角地区碳排放总量由 11.7 亿吨增至 24 亿吨，整体呈现“持续增长、结构调整、间接上升”的趋势。“十一五”期间（2006~2010 年），排放从 12.9 亿吨增至 16.4 亿吨，年均增速达 4.8%，电力和工业为主要排放增长源，合计占比超 70%。“十二五”期间（2011~2015 年），排放增速放缓，年均增速为 1.3%，其中工业排放趋于稳定（占比 34%），电力部门仍保持增长（占比 36%），反映节能政策初见成效。“十三五”时期（2016~2020 年），排放缓慢升高，到 2020 年略微下降，年均增速为 0.4%，电力与工业排放略有回落，但建筑部门稳步上升，反映消费端用能拉动增强。“十四五”时期（2021~2025 年），碳排放快速升高，到 2025 年预计总排放达到 24 亿吨，年均增速为 2.1%。其中电力和工业部门是主要的排放来源，2025 年排放预计将分别达到 9.4 亿吨和 6 亿吨，占比为 39% 和 25%。其次是间接排放，预计将达到 3.6 亿吨，年均增速超过 10%。整体来看，长三角地区碳排放结构正由工业主导向电力与终端消费驱动转变，亟需加强清洁电力供给与终端用能协同减排。

图 1 2005~2024 年长三角地区分部门碳排放变化
注：2025 年排放量根据生态环境部环境规划院中国碳情速报数据。



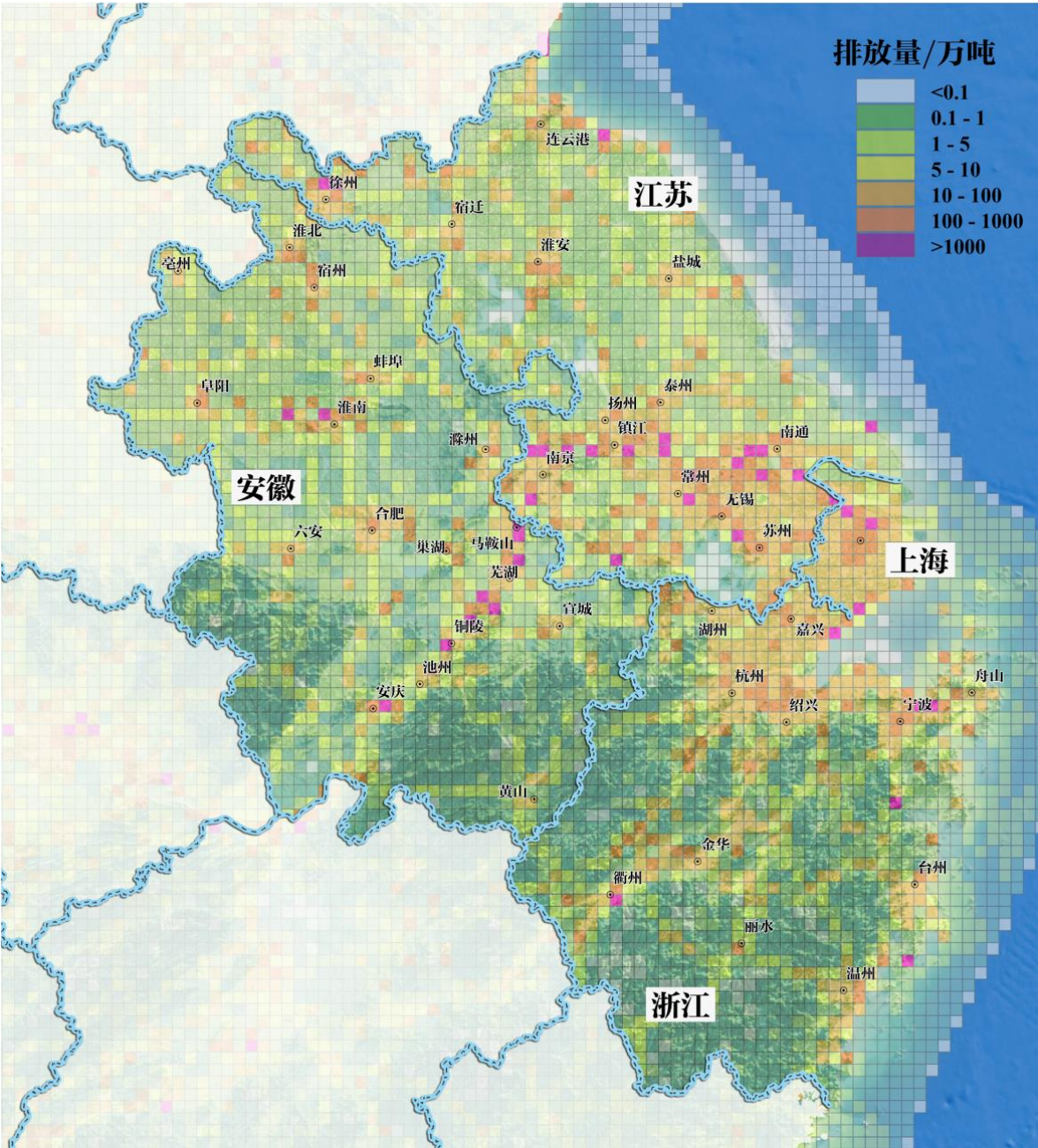
2024 年，长三角地区碳排放总量达 23.9 亿吨，其中电力与工业部门碳排放量合计占比达 67%，是区域碳减排的重点领域。从排放结构看，能源活动为最主要排放来源，贡献总排放量的 78%；其中电力行业排放量居首，高达 9.8 亿吨，其次是钢铁、交通、石化行业。工业过程排放、间接排放分别占总排放量的 9%、13%。水泥行业在工业过程排放中的占比高达 48%，是工业过程减排的关键发力点。从行业维度分析，电力、钢铁、水泥、石化、交通行业的排放量依次为 9.8、2.5、1.6、1.5、2.0 亿吨。碳汇量为 0.3 亿吨，净排放量为 23.6 亿吨。电力和工业部门合计占比为 67%，二者成为长三角未来碳减排的重点方向。

图 2 2024 年长三角地区碳排放结构（单位：亿吨）
注：碳汇包括地质封存、森林碳汇。

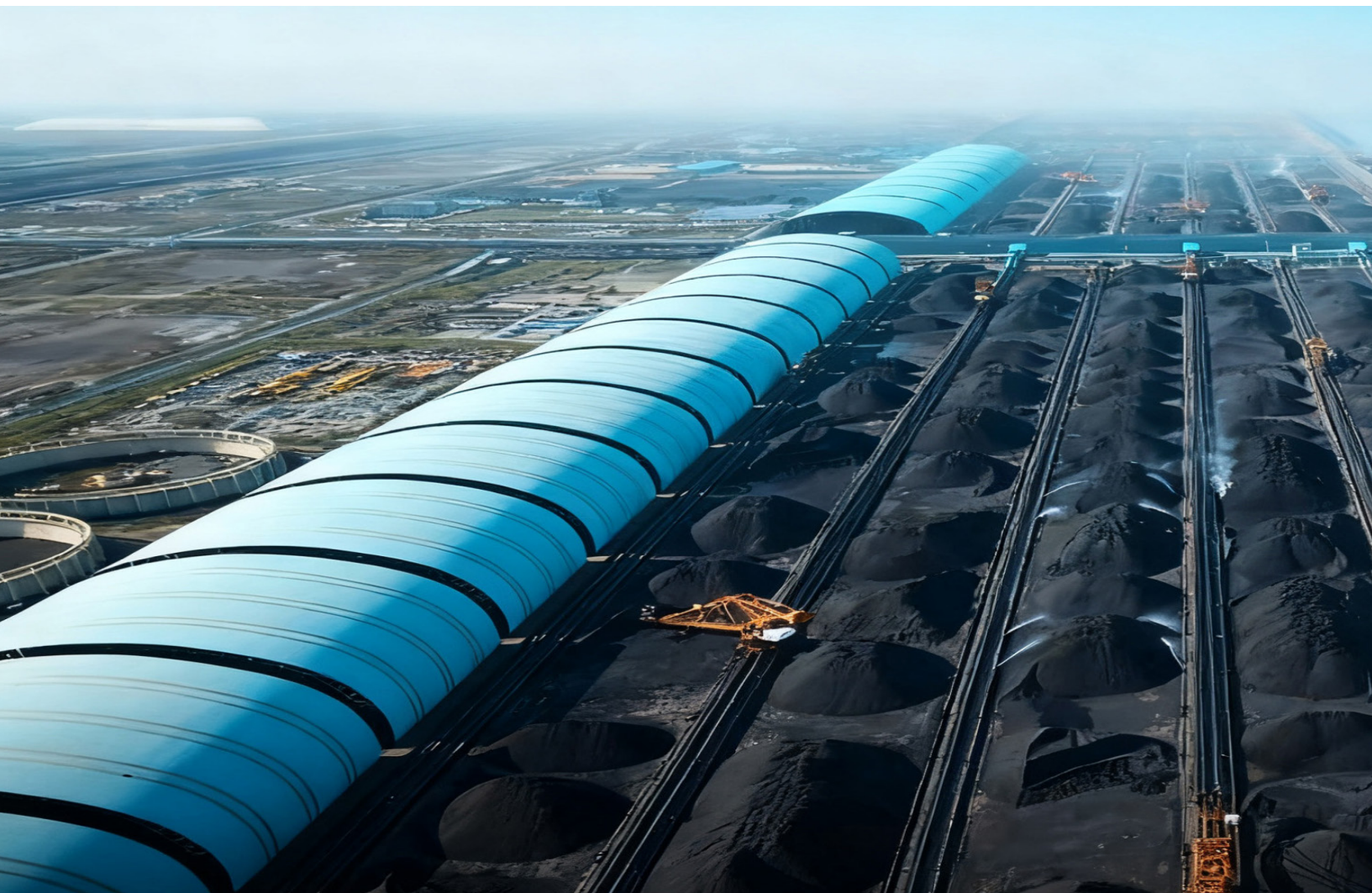


2024 年长三角地区碳排放的空间分布呈现出显著的“沿江沿海高、山区低”格局。江苏、上海以及浙江北部的排放强度最为突出，排放热点集中在南京、苏州、无锡、常州、南通、宁波和上海等主要城市与产业集聚区，多个网格排放量超过 10~100 万吨，部分超过 1000 万吨，凸显出该区域工业活动密集、能源消耗强度大和人口分布集中的特征。相比之下，安徽中南部和浙江西南部则表现为低排放格局，大部分网格排放量低于 1 万吨，主要与其以生态保护、农业及低排放产业为主的产业结构有关。长三角地区碳排放的空间格局与产业分布、人口密度和能源利用模式高度耦合，工业化和城镇化水平较高的区域形成明显的排放集中区。

图 3 长三角地区 2024 年碳排放空间格局 (10km)

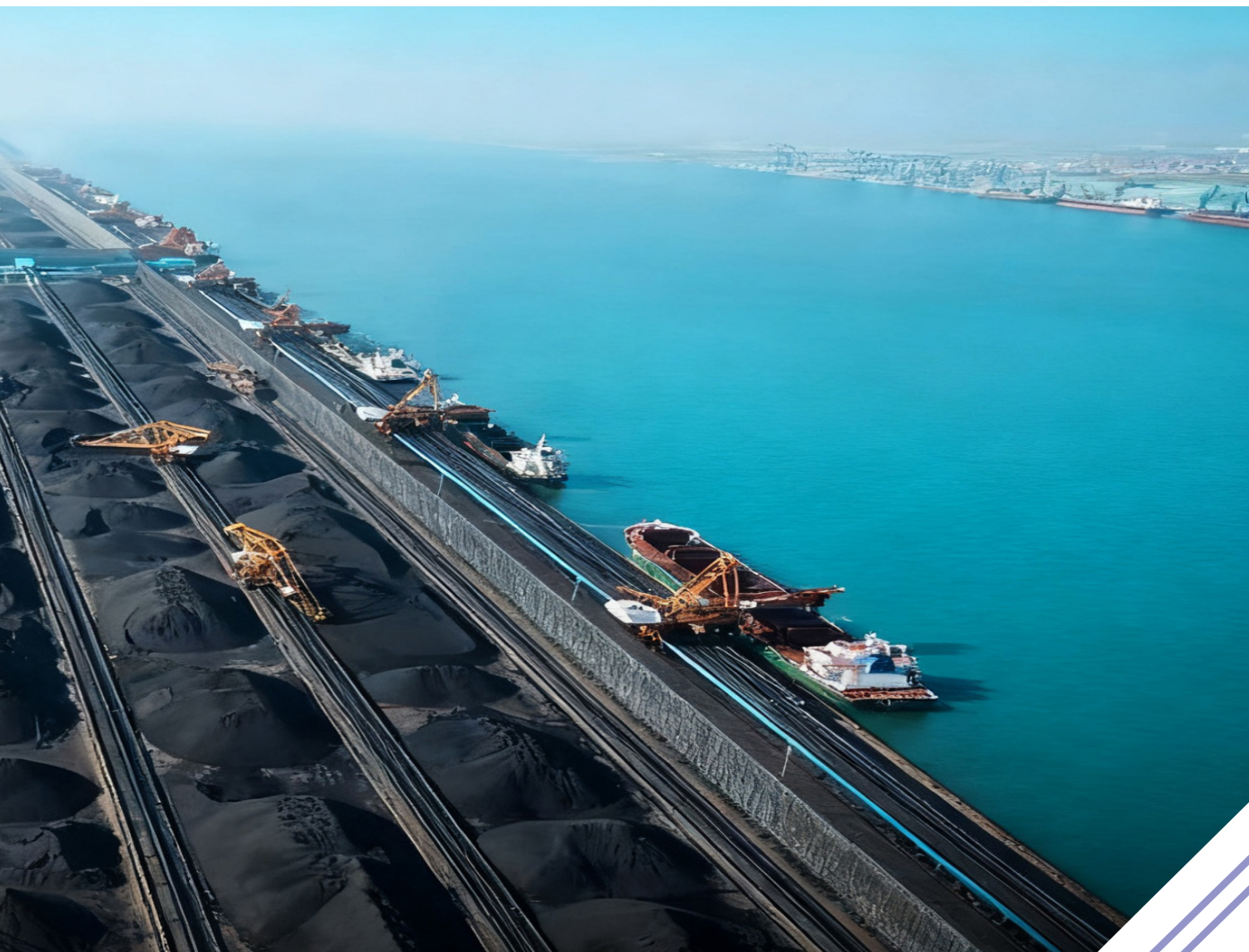






第 2 章

低碳转型发展面临的机遇与挑战



02

OPPORTUNITIES AND
CHALLENGES OF LOW-
CARBON TRANSITION

长三角地区工业体系完备、创新资源富集，具备低碳转型的产业基础与技术潜力，但区域内能源资源禀赋匮乏，80% 能源依赖外部调入，煤炭消费占比长期维持在 50% 以上，高耗能产业集群与碳排放空间转移问题凸显。

长三角地区工业体系的重型化特征为低碳转型带来严峻挑战。长三角地区拥有超 19000 家工业园区，占全国总量的 29%，钢铁、化工、电力热力生产、建材等高耗能行业构成产业主体，工业供热导致的碳排放占全国总排放量的 50% 左右。以江苏省为例，其煤炭消费占比高达 67%，能源密集型产业长期贡献了区域经济增长的重要份额，但也形成了“高投入、高排放、高产出”的发展路径依赖。这类产业普遍存在设备老化、技术迭代缓慢等问题，深度脱碳需巨额技改投入，仅工业领域直接排放占比达区域碳排放总量的 62%，间接排放占 38%，减排任务艰巨。同时，产业集群化布局虽提升了经济效率，但导致碳排放空间集中，单一区域或行业的转型调整可能引发产业链波动，如何平衡减排目标与产业竞争力成为亟待破解的难题。

长三角地区能源结构“高碳锁定”效应显著制约低碳转型进程。长三角地区一次能源消费中，煤炭占比在“十四五”期间仍将保持 50% 以上，石油占比维持 12~16%，化石能源合计占比超 85%，而非化石能源成为主体能源需到 2040 年之后。这种结构源于区域能



源资源禀赋匮乏，上海本地几乎无一次能源生产，浙江 80% 能源依赖外省调入，能源对外依存度居高不下。尽管安徽省可再生能源装机占比已达 49%，但江浙沪地区仍高度依赖煤电与外来火电，形成“西绿东碳”的区域失衡格局。更严峻的是，长三角一次能源需求总量仍在增长。高比例外部能源依赖使区域在低碳转型中同时面临“量价”双重风险，既可能因国际地缘政治导致气源短缺，也可能因价格飙升抬高用能成本，削弱光伏、风电等替代收益。

行政壁垒与市场化机制不完善阻碍了长三角低碳转型的一体化推进。长三角区域一体化对碳排放转移存在正向效应，子区域内部协同成效优于跨区域协作，行政分割导致碳减排“各自为战”。尽管长三角生态绿色一体化发展示范区已启动碳汇交易试点，探索建立区域碳普惠机制，但三省一市在碳配额分配、减排标准、核算方法等方面仍存在差异，统一碳市场尚未形成。例如，上海碳市场运行成熟，但与苏浙皖的联动机制尚未完全打通，跨区域项目核证与减排量互认存在障碍。同时，生态补偿机制缺失使得碳排放转移的环境成本难以内部化，部分地区通过产业转移规避减排责任，存在“碳泄漏”风险。这种协同不足导致区域低碳资源难以优化配置，制约了转型整体效能的发挥。





第 3 章

长三角地区碳达峰碳中和优化路径

基于中国碳达峰碳中和区域协同路径优化综合评估模型（CAEP-CP 3.0），紧密结合长三角地区作为中国经济核心区、能源消费高地和科技创新前沿的禀赋特征，构建区域碳达峰碳中和实施路径。该路径锚定 2030、2035、2050、2060 年四个关键时间节点，系统涵盖能源结构转型、区域间碳排放交互影响调控、重点低碳产业链协同发展、重大气候工程部署及投资需求测算等核心领域，推动地区实现从高碳向低碳、从传统制造向绿色智造、从资源依赖向创新驱动与绿色引领的系统性转型，为全国碳中和进程提供可复制的示范样本与经验借鉴。



03

OPTIMIZING PATHWAYS
TOWARDS CARBON PEAK AND
CARBON NEUTRALITY IN THE
YANGTZE RIVER DELTA REGION

3.1

2020~2060 年碳排放路径

系统评估 2020~2060 年长三角地区低碳发展的排放路径，探讨碳达峰碳中和的时间节点。重点分析强化碳中和路径（IMP-Trans）下的排放变化，旨在为长三角地区实现梯次有序碳达峰碳中和提供科学的路径参考与方法论支撑。

强化碳中和情景下，长三角地区 2020~2060 年碳排放路径呈现出“渐进达峰—温和下降—快速减排—趋稳近零”阶段性排放特征。根据 CAEP-CP 3.0 海量情景模拟，在“渐进达峰”阶段，碳排放量将从 2020 年的 19.9 亿吨逐步上升，预计于 2027 年达到峰值 24.3 亿吨，长三角地区相应碳绩效（地区生产总值与单位二氧化碳排放的比值）从 2020 年的 1.2 元/吨预计增长至 2027 年 1.5 元/吨，显著高于同期全国平均水平（由 0.8 元/吨升至 0.9 元/吨）。该阶段达峰时间与全国碳达峰目标保持一致。尽管碳排放仍呈增长态势，其增速较 2010~2020 年期间的历史平均水平已有所放缓，主要归因于地区经济规模持续扩张与能源需求的刚性增长、电力部门对煤电的较高外部依赖以及城镇化推进与交通需求增加等因素。

在“温和下降”阶段（2027~2035 年），碳排放开始缓慢下降，复合年均下降率为

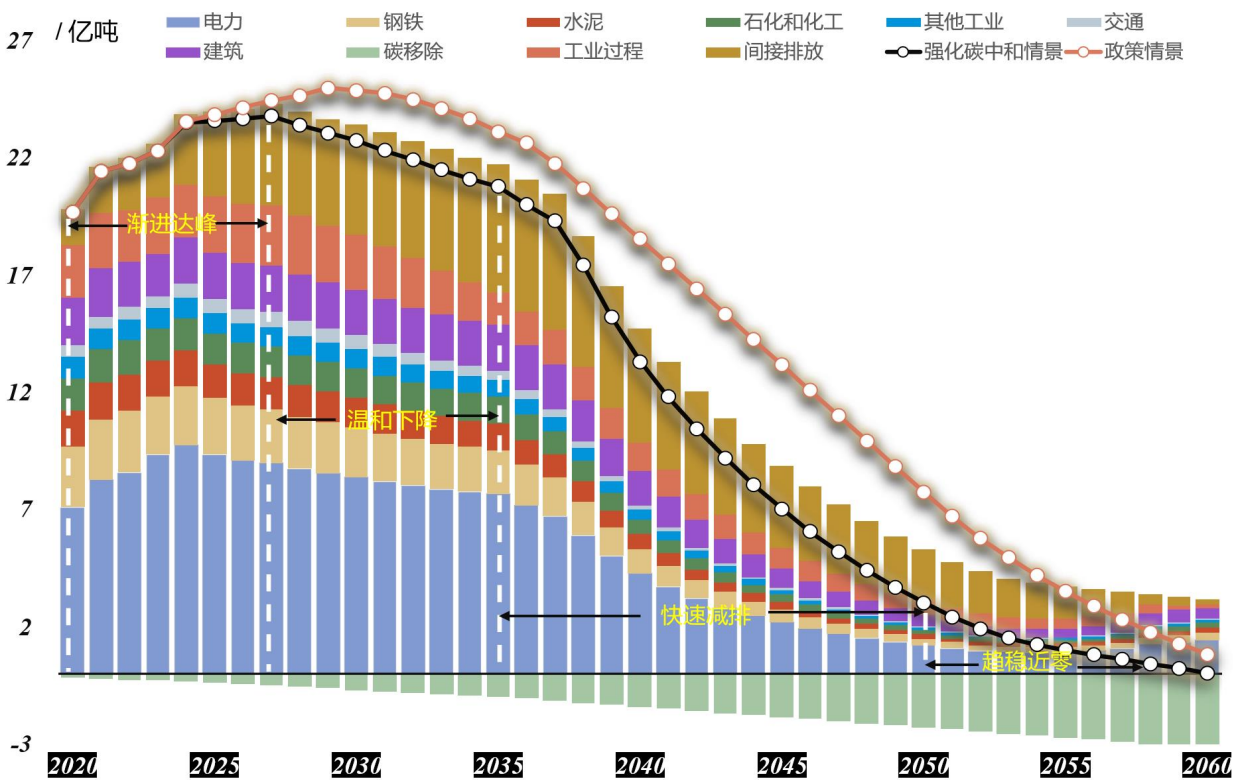
1.4%，总下降比例为 10%。该阶段产业结构进一步优化，长三角一体化政策推动制造业向高端化与绿色化转型（如浙江数字经济与江苏先进制造业集群的发展），同时高耗能行业推进产能压减（如钢铁行业碳达峰行动要求 2025 年前实现达峰）。能源结构持续清洁化，老旧煤电机组逐步淘汰，可再生能源比例不断提高。新建建筑全面执行超低能耗标准（上海、杭州率先推广），交通领域电动化率持续提升。在该阶段，长三角地区碳绩效预计从 1.5 元/吨持续增长至 2.5 元/吨。

在“快速减排”阶段（2036~2050 年），碳排放呈现快速下降趋势，复合年均下降率达 9.4%。该阶段深度脱碳技术实现规模化应用，电力部门基本淘汰煤电，仅保留少数耦合碳捕集、利用与封存（CCUS）的调峰机组，可再生能源占比超过 70%。氢能与储能技术在工业与交通领域得到广泛应用，钢铁、水泥等行业实现氢能炼钢和 CCUS 技术的商业化。道路交通全面电动化，区域轨道交通网络不断完善，降低对公路货运的依赖，建筑领域广泛采用光伏一体化（BIPV）和智能节能系统。

在“趋稳近零”阶段（2051~2060 年），碳排放以复合年均下降率 4.4% 减少，逐步

趋近于近零。该阶段区域能源系统已高度清洁化，可再生能源占比预计超过 90%。针对难以减排的部门（如部分工业过程、长途航空与航运等），需依靠 CCUS、碳汇（森林）及负排放技术抵销这部分“残余排放”。

图 4 政策情景和强化碳中和情景下 2020~2060 年长三角地区排放路径
注：碳移除包括森林碳汇和地质封存。



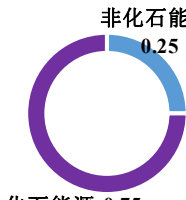
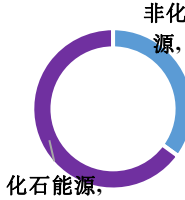
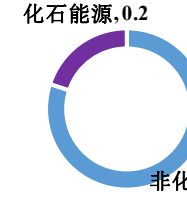
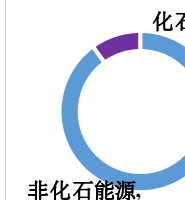
未来低碳发展的路径目标将聚焦能源生产清洁化、多能互补协同、区域市场一体化以及电力系统灵活性增强等关键方向。首先是加快“黑色能源”的减量与清洁化利用，稳妥发挥“蓝色能源”在过渡期的调峰支撑作用，同时全面提升“绿色能源”发展水平，大规模推进风电、光伏和核电

建设，积极探索分布式光伏与海上风电融合发展，逐步形成氢能等新兴产业。在此基础上，依托长三角地区产业链完整、用能密集和科技创新优势，推动电、气、氢等多能互补，构建源网荷储协同机制，提升能源系统运行效率，助力交通、建筑与工业终端电气化进程。随后持续深化区域

电力市场一体化，完善现货、容量和辅助服务市场，扩大跨省绿电与互济交易规模，推动清洁电力在更大范围内优化配置，强化长三角地区在全国能源格局中的枢纽作用。最终加快虚拟电厂、储能与需求响应

的规模化应用，推动 CCUS、碳汇等低碳技术落地，打造“高比例清洁能源+灵活性资源”协同发展的新格局，巩固长三角地区率先实现碳达峰、迈向碳中和的引领地位。

表 1 长三角地区低碳发展路径目标

发展目标		2030 灰色能源为主	2035 蓝色能源推进	2050 绿色能源主导	2060 (净)零碳能源体系
能源结构	能源占比				
	终端电气化率	45%	55%	70%	90%
多能互补		初步建成“电-气-可再生能源-核电”协调体系，源网荷储一体化示范工程广泛落地	形成“风光荷储氢”深度耦合体系，交通电动化与氢能利用进入大规模应用阶段	能源通道建设显著增加，跨区域电力与氢能输送增强，建成低碳能源系统	全面建成以风光为主、核电与氢能协同、储能和需求响应支撑的(净)零碳能源系统
虚拟电厂		在上海、南京等地初步建成虚拟电厂示范，整合分布式光伏与储能，开展需求响应试点，探索市场化运营模式	在杭州、宁波全面推广虚拟电厂，形成区域级调度平台，深度参与电力市场交易，提升系统灵活性与调控能力	长三角虚拟电厂广泛覆盖工商业和居民端，协同风光核储多能资源，实现跨区域优化调度，支撑高比例可再生能源接入	全面建成智慧型虚拟电厂体系，以上海为核心实现全域实时调控，虚拟电厂成为碳中和能源系统关键支撑

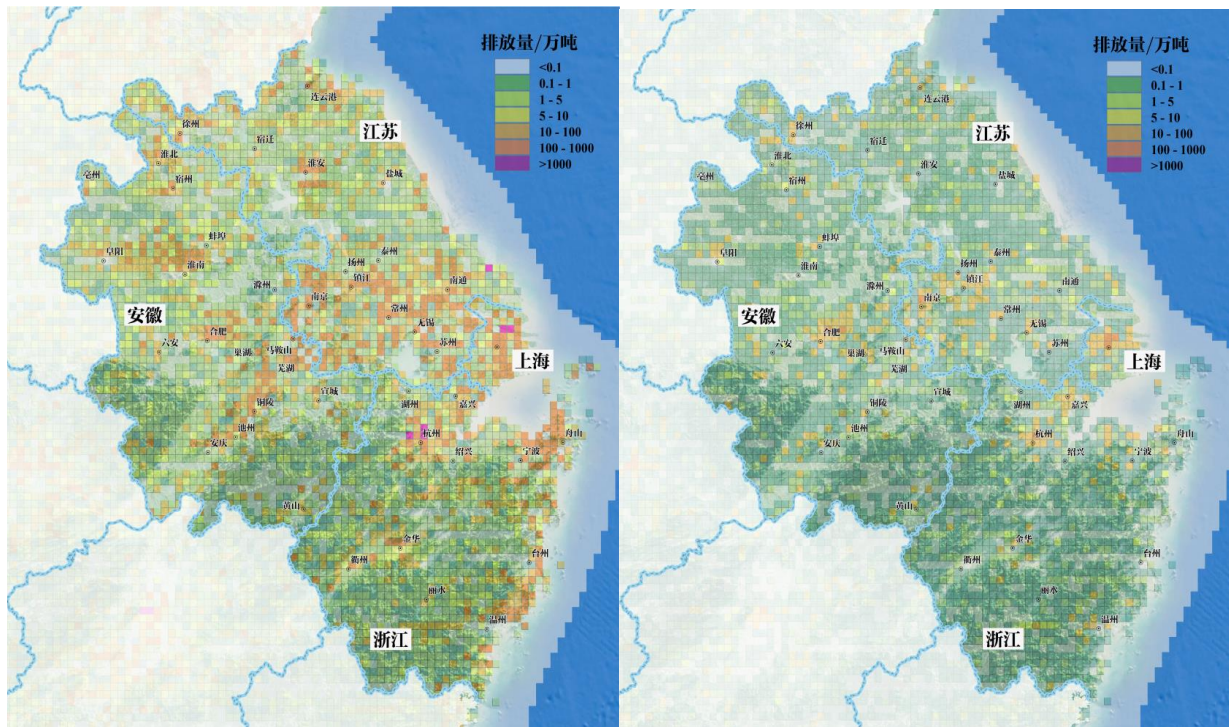
2035 年高排放区域主要集中于经济核心地带，涵盖江苏南部的苏州、无锡、常州，浙江的杭州、嘉兴及上海等地，这些区域因高工业集聚度与高人口密度，成为排放集中区。到 2060 年，排放空间格局发生显著重塑。其一，原有排放热点区域集中度进一步提升：苏南地区（尤以苏州、无锡为核心）的高排放范围持续扩张；其二，

安徽省排放增长尤为突出：以合肥为核心向外辐射的区域，排放强度由弱变强（颜色由浅入深），这与安徽在长三角一体化中承接更多产业发展任务直接相关，使其成为新兴高排放区域；其三，浙江沿海的宁波、台州、温州等城市排放不容小觑，这一变化或与海洋经济崛起及沿海工业扩容密切相关。

2035 年和 2060 年长三角排放空间结构呈现两大核心特征：一是排放热点区域的集中度上升；二是排放范围向内陆安徽及

沿海城市双向扩展，反映出长三角一体化进程中产业布局的调整与经济重心的迁移。

图 5 2035（左）和 2060 年（右）长三角地区碳排放空间结构（10km）



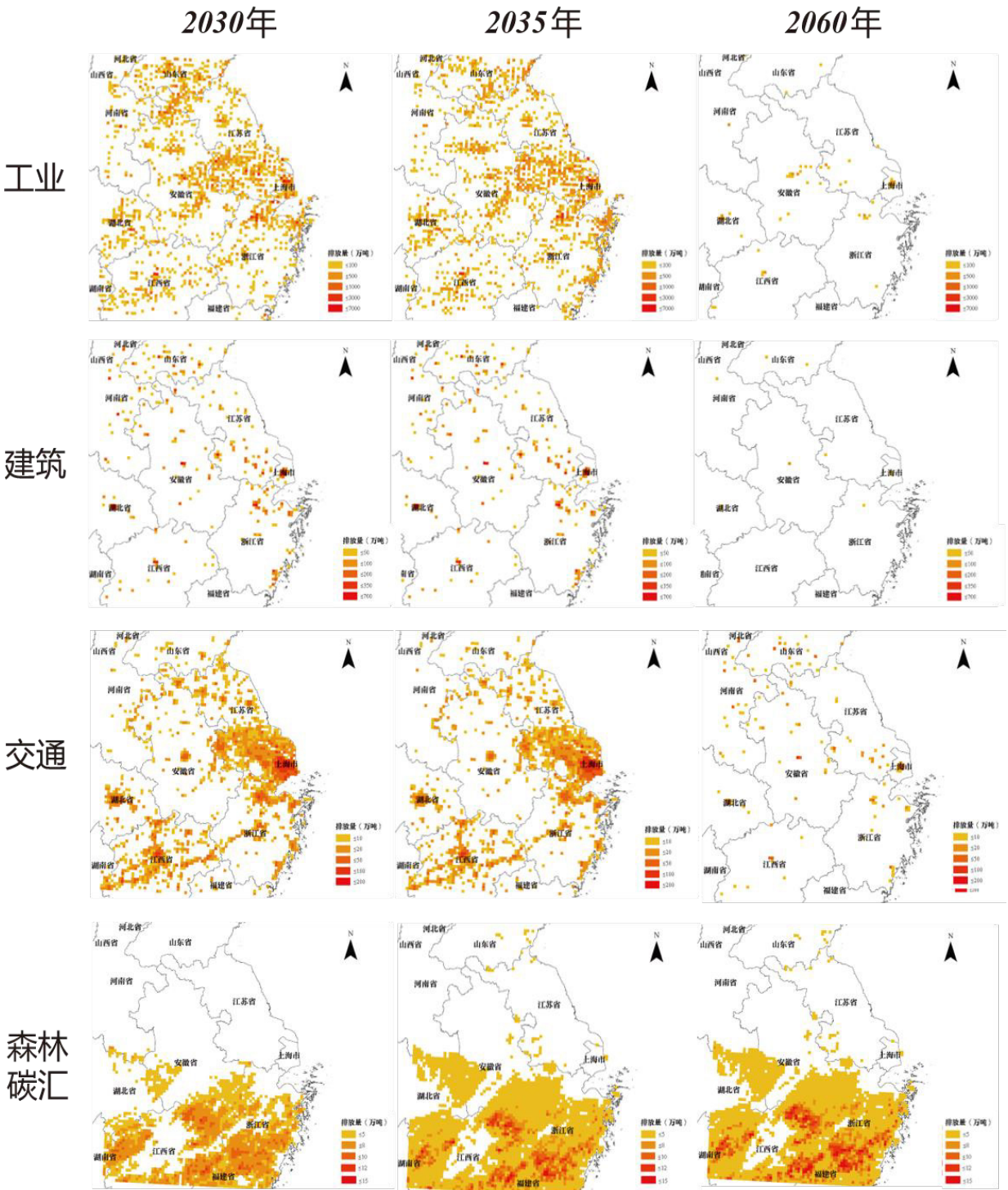
2030~2060 年，工业、交通、建筑三部门排放热点随产业结构调整与城镇化进程逐步收缩并转移，森林碳汇与地质封存潜力快速提高，成为 2060 年碳中和“压舱石”。2030 年工业部门排放热点集中于上海、浙北等经济发达区，随产业结构调整，高排放区收缩，2060 年仅上海中部、安徽中部及浙北部分城市仍有 100~500 万吨排放；建筑部门排放与城镇化进程一致，2030~2060 年集中于浙江、皖南大中城市核心区，随城镇化深入向城市群周边扩展。交通部门的排放热点高度集中于京沪高铁、沪宁城际、沪杭高铁、沪昆高铁等

主要交通走廊，与人口及经济的核心聚集带呈现强相关性。预计到 2060 年，这一排放格局将发生根本性转变：排放热点将显著缩减，交通部门基本实现全面电动化，氢能也将得到大范围推广应用；森林碳汇领域，2030 年的碳汇核心区域呈现多点分布特征，主要集中在植被覆盖率高的浙江全境及皖南等地区，这些区域凭借良好的生态本底发挥着关键固碳作用。到 2060 年，随着大规模植树造林等生态工程的持续推进，浙江地区森林碳汇范围显著扩大，成为全国森林碳汇的核心聚焦区之一。

在生物质能碳捕集与封存技术（BECCS）潜力评估方面，2020~2060 年，长三角地区 CO₂ 累积封存量预计为 107 亿吨。江苏省的 CO₂ 捕集与封存量会居区域

首位，累积封存量高达 74.2 亿吨；由于缺乏适宜的封存盆地，浙江省和上海市在各情景下的 CO₂ 封存量极低。

图 6 强化碳中和情景下 2030、2035 和 2060 年各部门 10km 网格排放分布



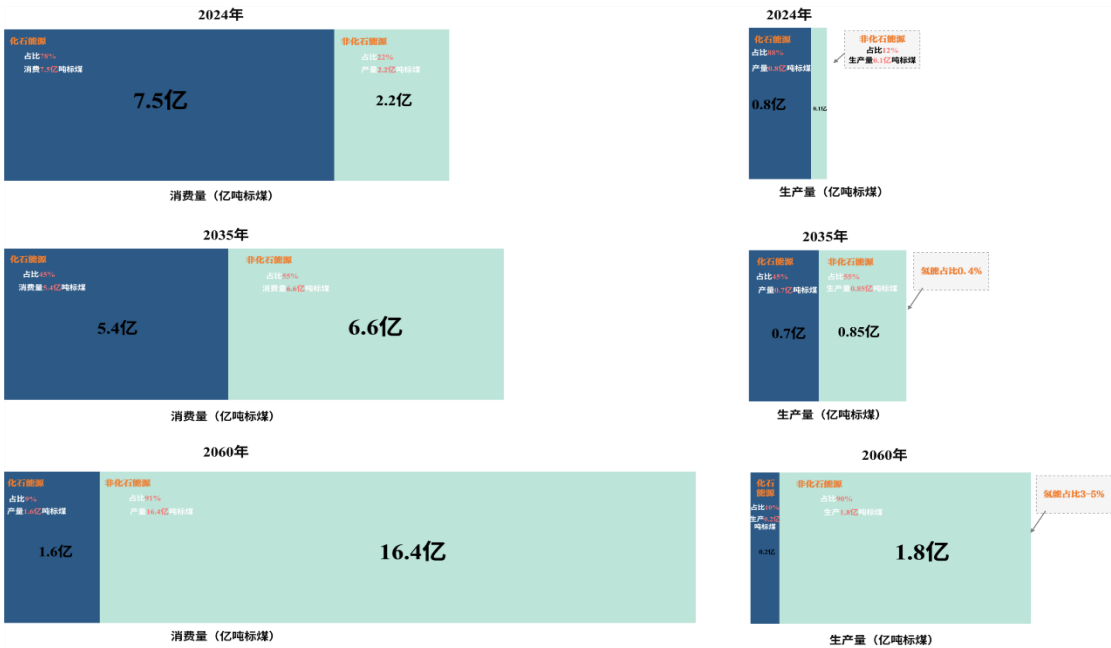
3.2 能源结构转型

在厘清“双碳”目标下长三角地区碳排放变化及构成的基础上，进一步分析契合区域实际的能源结构转型路径，是实现碳达峰、碳中和的关键。通过加快推进能源清洁化、低碳化转型，发挥分布式清洁能源、海上风电与核电的优势，推动电气化和多能互补协同发展，支撑长三角地区产业绿色升级与高质量发展，实现经济、能源与环境的协调共进。

长三角地区能源绿色转型将分阶段推进，逐步构建清洁低碳、安全高效的能源体系，率先打造全国能源转型的示范标杆。2024 年，该地区一次能源消费约 9.7 亿吨标准煤，其中化石能源高达 78%，非化石能源仅占 22%；

能源生产总量仅 0.9 亿吨标准煤，且以安徽煤炭生产为主，整体化石能源占比高达 88%，凸显了当前区域“高消费、低产出、化石依赖”的基本格局。在强化碳中和政策下，到 2035 年，能源消费总量上升至约 12 亿吨标准煤，较 2024 年增长 24%，但非化石能源占比提升至 55%，成为消费结构中的主体；化石能源占比降至 45%。能源生产侧也同步呈现结构性转型，尽管总量保持在 1.55 亿吨标准煤的低位，但非化石能源占比上升至 55%，显著削弱了煤炭的主导地位。到 2060 年，消费总量进一步增加至约 18 亿吨标准煤，非化石能源占比高达 91%，化石能源仅剩 9%，能源系统基本实现脱碳；生产端总量上升至 2 亿吨标准煤，非化石能源贡献率接近 90%，标志着区域能源供给体系的深度绿色化。

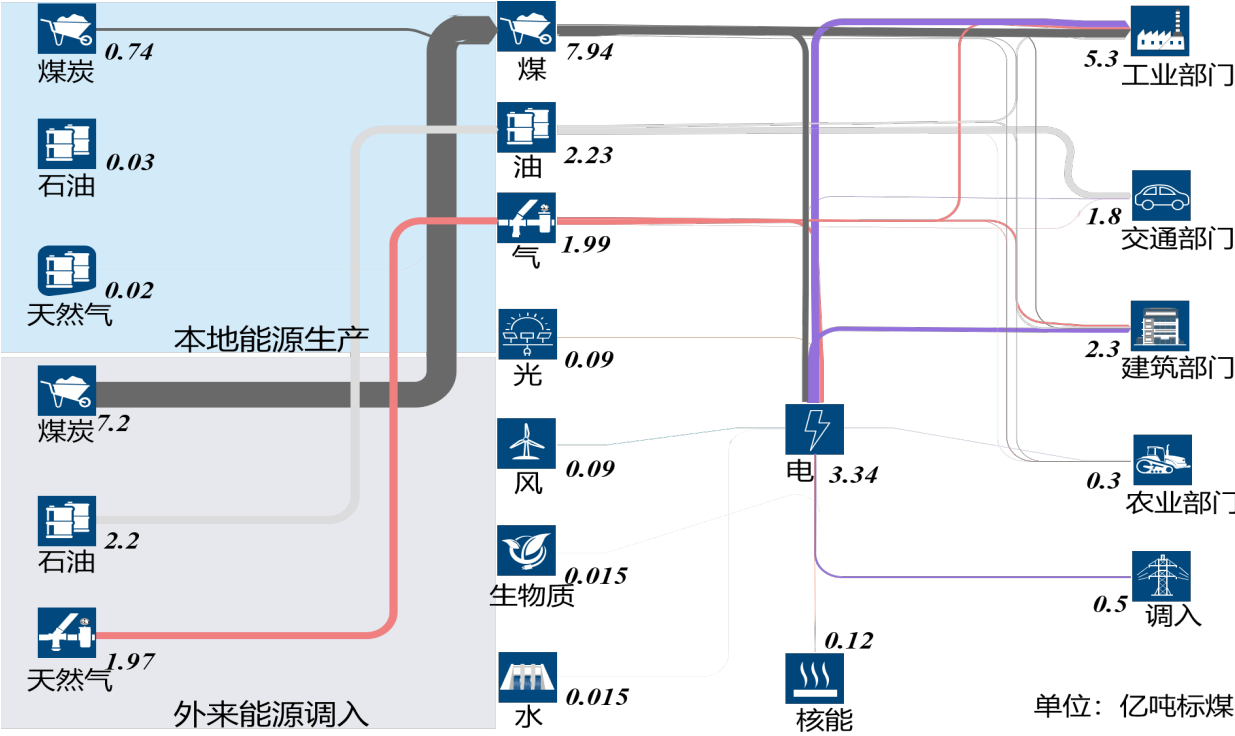
图 7 强化碳中和路径下 2024、2035 和 2060 年长三角地区能源生产及消费情况



2024 年，长三角地区的能源格局呈现出“高消费、低生产、强依赖”的显著特征。该地区一次能源消费总量高达 9.7 亿吨标准煤，而本地生产量仅为 0.9 亿吨标准煤，这意味着高达 93% 的能源需要从外部调入，外调煤炭、石油、天然气分别约为 7.2、2.2、2 亿吨标煤。风电、光伏、水电、生物质、核电总发电量为 0.33 亿吨标

煤。在分部门终端用能结构上，工业部门是主要的用能终端，占比为 55%、交通部门、建筑部门、农业部门终端用能分别约为 1.8、2.3、0.3 亿吨标准煤。为实现深度减排与能效提升目标，长三角地区亟需采取多重举措，包括提高非化石电力占比、降低发电损耗、加速终端电气化进程，并进一步提升清洁电力调入的比重。

图 8 强化碳中和路径下 2024 年长三角地区能源流转情况



从地区发电量来看，上海市 2025 年仍以火电为主（约 15.3GWh，占比超 30%），光伏和风电为补充，2060 年火电降至不足 3GWh（占比不足 2%），光伏和风电合计超 59GWh（占比超 80%），清洁能源成绝对主体；江苏省依托沿海优势，海上风电 2025 年发电量 42GWh、2060 年

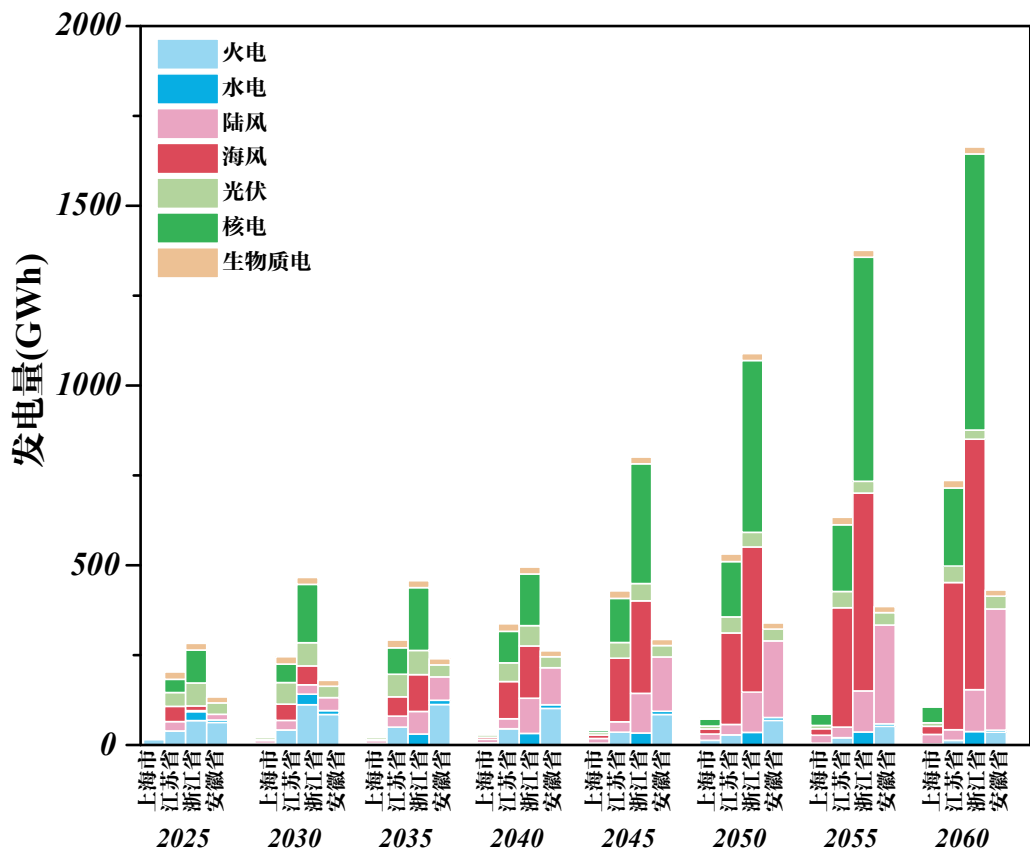
跃升至近 410GWh，成为区域电力支柱，核电同步稳步增长，从 2025 年 36.9GWh 升至 2060 年 217GWh，占比始终约 15%；浙江省核电发展速度更快，从 2025 年 91.7GWh 增至 2060 年 767.9GWh（占比近 40%），并与 2060 年达 403.9GWh 的光伏、116.4GWh 的海上风电构成多元化清洁

能源格局；安徽省因缺乏核电和海上风电条件，主要依赖光伏（2025 年 31.6GWh 至 2060 年 337GWh，占比近 60%）与陆上风

电（占比为 5~6%），生物质能发电量保持 16~17GWh 左右（占比为 3~4%）。

图 9 2025~2060 年不同情景下长三角地区发电量

注：数据来源于团队研究成果 Xie et al., (2024)



3.3

区域间碳排放交互影响

长三角地区的碳排放空间耦合呈现出“核心消费—外围生产”的典型格局，其中上海是区域碳排放的主要净流入中心。基于多区域投入产出核算的结果显示，上海因终端消费（建筑、交通、服务业及居民生活）所引致的二氧化碳排放中，来自其他省份的部分占比高达 49%。这意味着上海近一半的消费排放通过区外生产实现，本地消费需求在推动周边省区生产和碳排放方面作用显著。相比之下，浙江、江苏和安徽的消费排放对外部的依赖度明显较低，其区外生产引致排放的比例均不足 30%。这一差异揭示了长三角内部的经济

分工结构：以上海为核心的消费导向，驱动了区域产业链中大量的生产端排放。从排放拉动来看，上海每产生 1 吨本地直接排放，会进一步诱发浙江 1.3 吨、安徽 0.4 吨、江苏 0.4 吨，以及其他省区合计 0.9 吨，总体达到约 3 吨。这一结果反映出长三角内部产业链分工的高度垂直化与紧密的经济联系，也进一步印证了上海是典型的“消费驱动、外部排放”型地区。值得注意的是，上海在长三角区域碳排放格局中的核心地位，使其减排或达峰不仅对本地具有决定性意义，也可能通过产业链联动效应推动周边省份的减排进程。

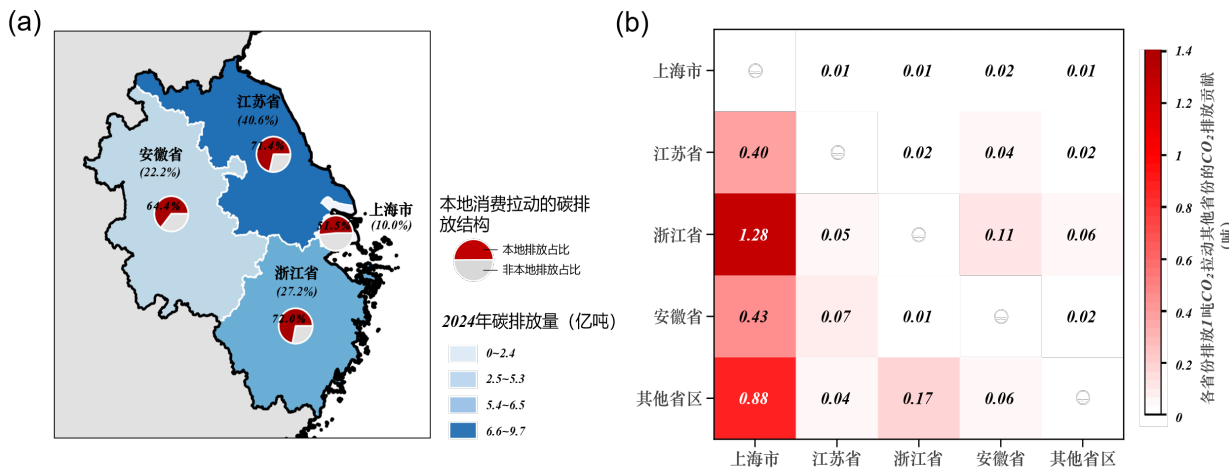
图 10 长三角地区各省市碳排放驱动影响分析
(a) 2024 年长三角区域碳排放总量及本地消费驱动的碳排放结构；(b) 长三角区碳排放交互影响

注 1：图（a）中饼图表示各省消费驱动的碳排放结构，其中红色部分为本地消费对应的本地排放，灰色部分为本地消费对应的外部排放。

注 2：图（a）中括号中的百分比为该省 2024 年碳排放占长三角地区总碳排放比例。

注 3：图（b）中颜色深浅的数值为横轴省份对纵轴省份的单位区域排放拉动系数，即横轴省份每增加排放 1 吨二氧化碳将拉动纵轴省份的相对排放量，颜色越深表示拉动作用越大。

注 4：图（b）中“其他省区”指除长三角地区外的全国其他省区的合计。



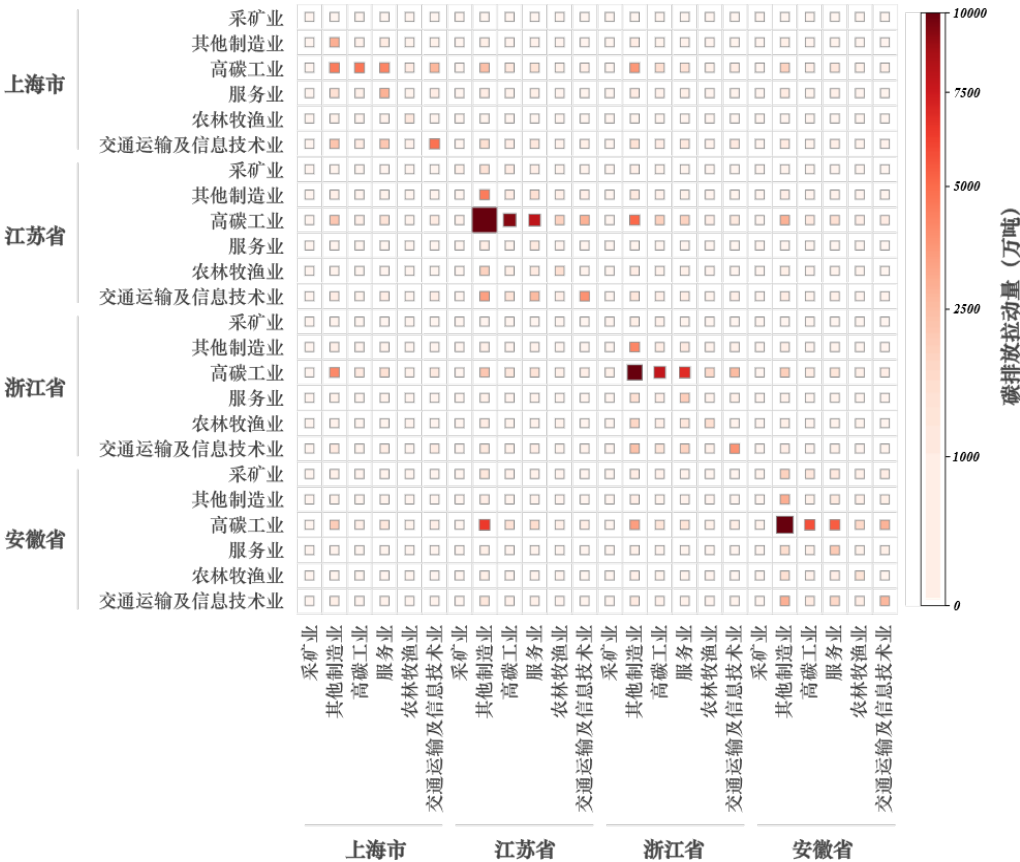
基于长三角地区省际主要行业碳排放交互影响的实证分析（涵盖采矿业、高碳工业、其他制造业、服务业、农林牧渔业及交通运输、仓储和信息技术业），江苏省、浙江省与安徽省域内的其他制造业、服务业活动，对本省高碳工业碳排放形成显著拉动效应。这一现象揭示了产业链下游消费端需求通过供应链网络向上游高碳生产环节传导的内在逻辑，即下游行业的规模扩张与需求增长，直接带动上游高碳工业的产能释放，进而加剧区域碳排放总量累积。结合长三角地区省际关联与行业间碳

排放传递机制的系统性分析，未来区域减排政策需突破传统单一省份的碎片化治理框架，转向区域协同治理模式。具体而言，应依托产业链上下游协同机制，强化需求侧管理工具的应用：一方面，通过产业结构优化、技术标准统一等跨区域协同举措，约束上游高碳工业的排放强度；另一方面，引导下游服务业、其他制造业形成低碳消费与绿色采购导向，从需求端倒逼上游生产环节的低碳转型，最终为长三角地区如期实现碳达峰与碳中和目标提供系统性政策支撑。

图 11 长三角地区各省市行业间的碳排放交互影响分析

注 1：图中颜色深浅的数值为横轴不同省份不同行业对纵轴不同省份不同的排放拉动量，即横轴不同省份不同行业生产活动拉动纵轴不同省份不同行业的直接碳排放总量，颜色越深表示拉动作用越大。

注 2：图中高碳行业包含钢铁、水泥、化工等重工业行业，交通运输及信息技术业中包括仓储、邮政、信息传输、软件所有交通运输及信息技术服务的行业。



3.4

关键产业链低碳协同发展

长三角地区作为国家战略的交汇点与经济发达的压舱石，其低碳转型之路绝非单纯依赖若干个新兴产业的崛起，而是一场涉及能源、制造、消费与数字技术全面融合的系统性变革。

(1)“绿色能源—智能电网—储能技术”一体化的全球能源技术创新与系统解决方案策源地

将长三角地区打造成为全球领先的绿色能源系统解决方案的输出高地。其定位已突破传统制造业的边界，推动产业链由单一产品制造向涵盖技术标准制定、核心装备研发、系统集成设计、智慧运营服务及绿色金融支持的全价值链闭环延伸。区域内雄厚的光伏、海上风电装备制造能力构成战略实施的基础支撑，其核心战略价值更体现为依托上海的研发创新优势、江苏的智能制造基础、浙江的数字经济动能与安徽的应用场景支撑，将上述分散的“节点”整合为协同联动的“网络”。在此过程中，需重点培育分布式光伏、深远海风电、新一代核能与多元化储能（含电化学储能、氢储能等）的一体化调度能力。这一能力的构建需依托集成电路产业供给的高算力芯片，结合先进物联网技术与人工智能算法，进而打造“源网荷储”高效协同的区

域“能源大脑”与虚拟电厂（VPP）网络体系。推动产业价值链实现从“产品销售”向“服务供给与标准输出”的能级跃升。

长三角地区已构建起全球最完整的光伏产业链。江苏集聚了全国 40% 以上的光伏组件产能，硅片、电池等核心环节产能产量连续 10 年位居全国第一，盐城光电产业园已落地光伏电池产能 68.5GW、组件产能 87GW，位于全国前列；安徽滁州光伏玻璃占全国 20% 市场份额，浙江义乌则培育出 3 家年产值超百亿的领军企业，目标 2025 年实现千亿产值规模。这种产业优势源于“研发在沪苏、制造在皖浙”的精准分工：上海聚焦技术创新，江苏主攻组件制造，嘉兴、金华发展高效电池片，滁州提供关键材料，形成覆盖硅料、硅片、电池片、组件及设备的全链条体系，2024 年区域光伏产业营收已超万亿元。

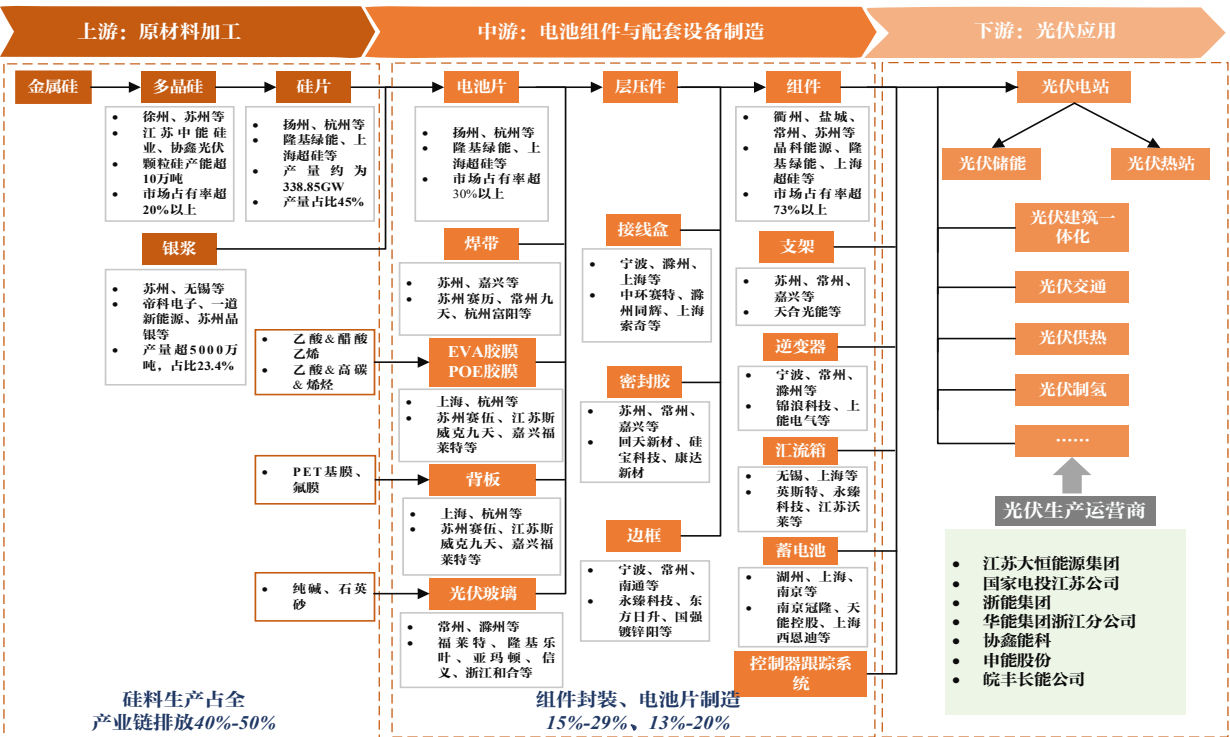
硅料生产是光伏生产产业链的主要碳排放环节。从光伏生产各环节碳排放来看，硅料生产环节的碳排放是约占整个产业链 40%~50%，电池片制造环节 13%~20%，组件封装环节 15%~29%，设备与厂区运行分别约占 10% 和 5%。这种结构决定了长三角地区协同减排的重点——安徽需聚焦硅料生产节能技改，江苏应优化组件制造能

效，浙江可依托数字技术提升全链条碳管理水平。通过上海研发的 N 型电池、钙钛矿技术向苏浙皖制造端转化，长三角正将技术优势转化为低碳竞争力，仅江苏时代“灯塔工厂”通过智能管理实现 38% 的能效提升。

产业链协同是长三角光伏产业的核心竞争力。区域内已形成梯度分工格局，江苏主导组件、硅片、电池等制造环节，上海依托长三角国家技术创新中心聚焦前沿

研发，浙江、安徽则在特色材料和应用领域形成补充。这种协同体现在资源整合上，如通过“风光火”打捆送出优化电力配置；在技术创新上，推动分布式光伏功率精准预测系统覆盖 90 余万户；在绿色转型上，40 家企业 2024 年可再生能源利用量达 5.7 千万兆瓦时，二氧化碳当量减排超 3255 万吨。通过产业链协同，长三角正将单个企业的减碳努力转化为全链条的系统优势，既巩固了光伏制造的领先地位，又为全球能源转型提供了可复制的区域协同方案。

图 12 长三角地区光伏产业链结构图



(2) 打造“核心材料—关键部件—终端应用”全链条贯通的终端用能电气化与氢能化产业生态

长三角地区的减排进程根植于其庞大的工业与交通能耗基础，核心在于终端用

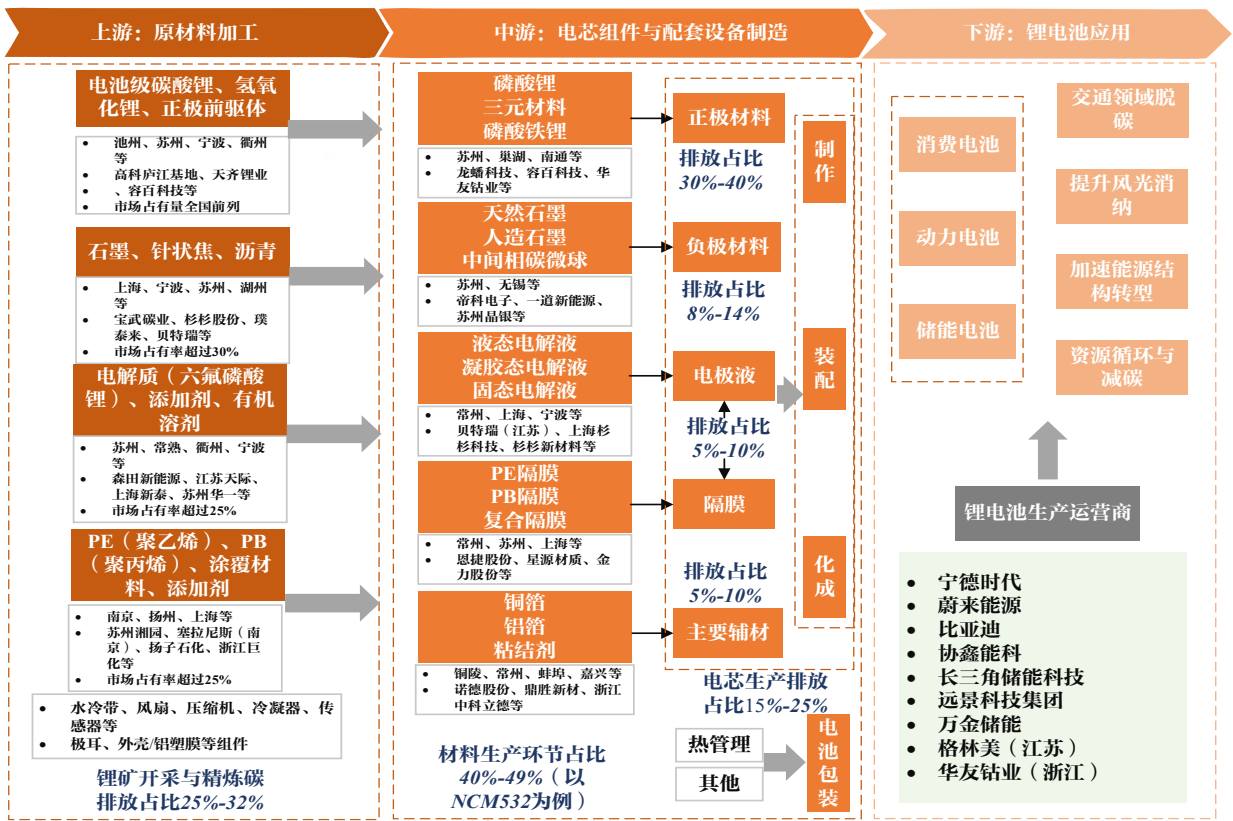
能模式的革命性替代。构建以电力和氢能为核心、全面替代化石燃料的应用生态体系，覆盖工业、交通、建筑等主要耗能领域。其完备的制造业体系既是减排挑战，更成为电气化、氢能化技术的规模化应用试验场，而锂电池产业正是撬动这一能源消费

结构转型的关键抓手，这不仅为交通领域电气化奠基，更需与传统制造业深度耦合，成为区域实现“双碳”目标的核心支撑。

长三角地区锂电产业链已初步形成“上游材料—中游制造—下游应用—末端回收”的闭环体系。以安徽为例，国轩高科与江淮、奇瑞等整车企业形成配套；江苏通过宁德时代、中创新航等电池企业带动正负极材料、电解液、隔膜等配套企业集聚；浙江依托容百科技、华友钴业强化三元材料和钴镍资源保障；上海则发挥特斯拉、上汽等整车企业的牵引作用，推动电池与整车协同发展。

锂电产业自身的碳排放问题，成为衔接“产业发展”与“双碳目标”的关键节点。锂电池生产环节的碳排放主要集中在原材料提取与正极材料、电芯制造等环节。从锂电生产各环节碳排放来看，锂矿开采与精炼环节碳排放占比约为 25%~32%，正极材料、负极材料、电极液、电芯制造环节碳排放占比分别为 30%~40%、15%~20%、5%~10%、15%~20%。对此，长三角正通过推动绿色制造、完善回收体系、引入可再生能源等举措，降低单位产能碳排放强度，以产业自身的绿色升级，夯实区域低碳转型与国家能源安全的保障基础。

图 13 长三角地区锂电产业链结构图



(3) 建设“高端芯片—工业软件—人工智能”三位一体的产业数字化与智能化赋能中枢

能源系统与经济社会整体运行效率的最优适配，是低碳转型进程中的核心命题。长三角地区集成电路产业的战略价值远超单一高科技产业的范畴，其本质是支撑区域低碳转型的“核心中枢神经系统”。无论是智能电网的精准调度、终端用能的效率优化，还是新兴产业的智能制造，均依赖于高效算力、可靠传感与智能算法的支撑，而集成电路正是上述功能实现的物质载体与技术基石。长三角地区形成的“设计看上海、封测看江苏、材料看浙江、存储看安徽”的产业协同格局，为其承载这一赋能功能奠定了不可替代的产业根基。需重点布局并大力发展功率半导体、专用计算芯片（ASIC）、传感器等核心器件，为新能源发电、特高压输电、智能配电网及储能系统提供核心控制单元，推动能源基础设施实现全面数字化与智慧化升级。依托工业互联网、数字孪生等技术，对传统高耗能产业实施全流程数字化重塑：通过在生产场景部署高密度传感器与边缘计算节点，实时优化工艺参数、预测设备能耗、实现余热余压的梯级利用，进而在制造端达成能效的极致提升与碳排放的源头管控。

集成电路制造是打造绿色低碳社会的

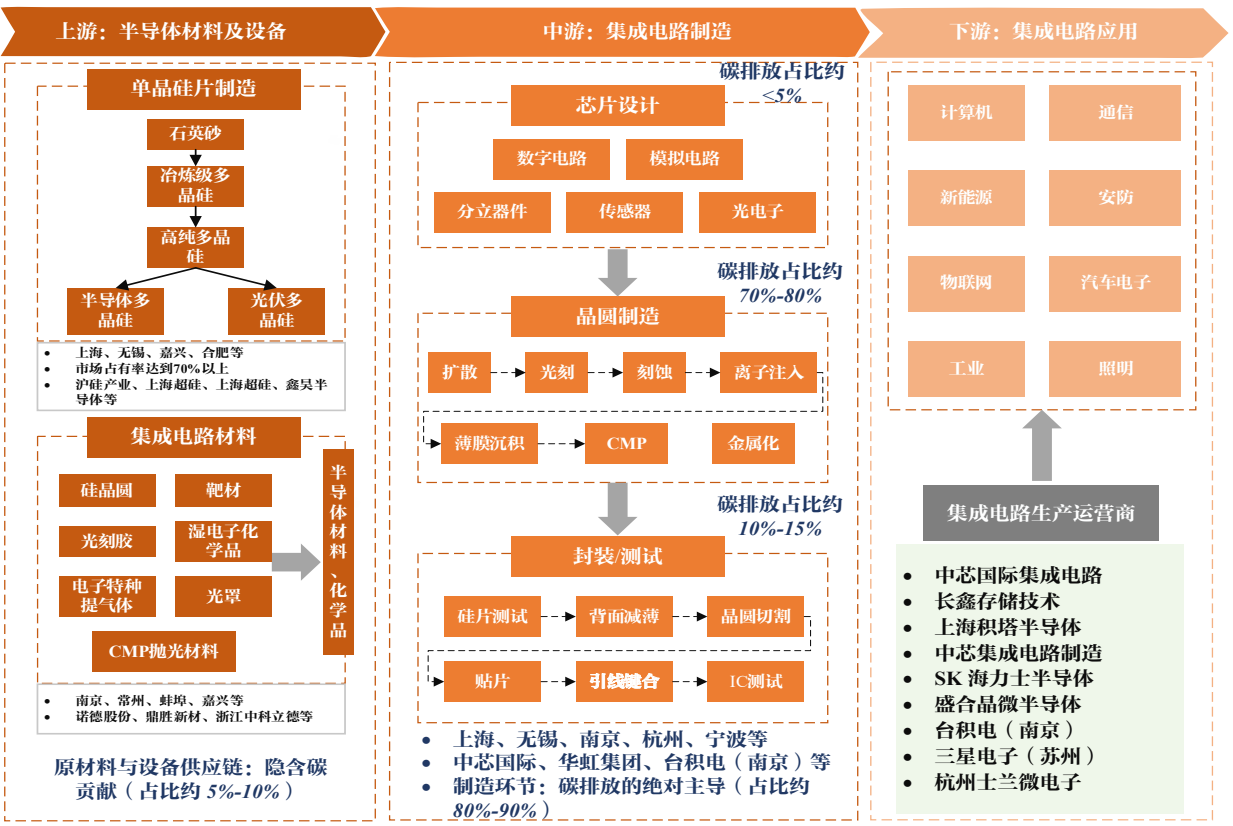
重要助力，可通过优化能源利用效率、支撑可再生能源并网及智能电网技术，助力“双碳”目标实现。一是在产品端，国产高端芯片可使下游数据中心、新能源汽车、智能电网等单位算力或能耗的碳排放下降15%~30%；二是在制造端，通过区域协同把“设计制造—封测—装备材料”的空间半径压缩至150公里以内，2025年可缩短物流平均里程20%，直接减少运输二氧化碳当量排放约50万吨；三是在循环端，上海、无锡、苏州、合肥四地共建的“长三角半导体资源综合利用中心”2023年已使废酸、废铜液回收率提升至90%，对应每年减少4.2万吨二氧化碳排放。

长三角已构建起“上海高新引领、江苏制造封测、浙江模拟功率、安徽存储显示”的链式协同格局。上海主导芯片设计与先进制造，2022年产业销售额超3000亿元，集聚了中芯国际、华虹集团等龙头；江苏在封测领域具备全球竞争力，长电科技、通富微电等企业占据全球前十席位，2023年前三季度封测业收入达1124.6亿元；浙江聚焦半导体材料与设计，2022年材料领域占比达41.4%，杭州设计业贡献全省84%的份额；安徽则在存储芯片领域突破，长鑫存储等企业完善了区域产业链闭环。这种“设计看上海、封测看江苏、材料看浙江、存储看安徽”的分工体系，为集成电路产业协同发展奠定了基础。

晶圆制造是集成电路产业碳排放的主要环节。从集成电路生产各环节碳排放来看，原材料及设备供应链环节碳排放约占5%~10%，芯片设计、晶圆制造、封装测试环节碳排放占比分别为3%~5%、70%~80%、10%~15%。因此，集成电路产业降碳核心在于晶圆制造环节，该环节因光刻、薄膜沉积、蚀刻等工艺复杂且能耗密度高，不仅是产业整体能耗占比最高的

部分，也是通过技术优化（如节能设备应用、工艺参数迭代、绿电替代等）实现碳减排的关键突破口，其降碳成效直接决定了全产业低碳转型的整体进度。通过建立跨省市的能效标准、共享绿色能源供应、联合研发低碳工艺，长三角地区将产业链协同优势转化为碳减排动能，为全球半导体产业绿色转型提供“中国方案”。

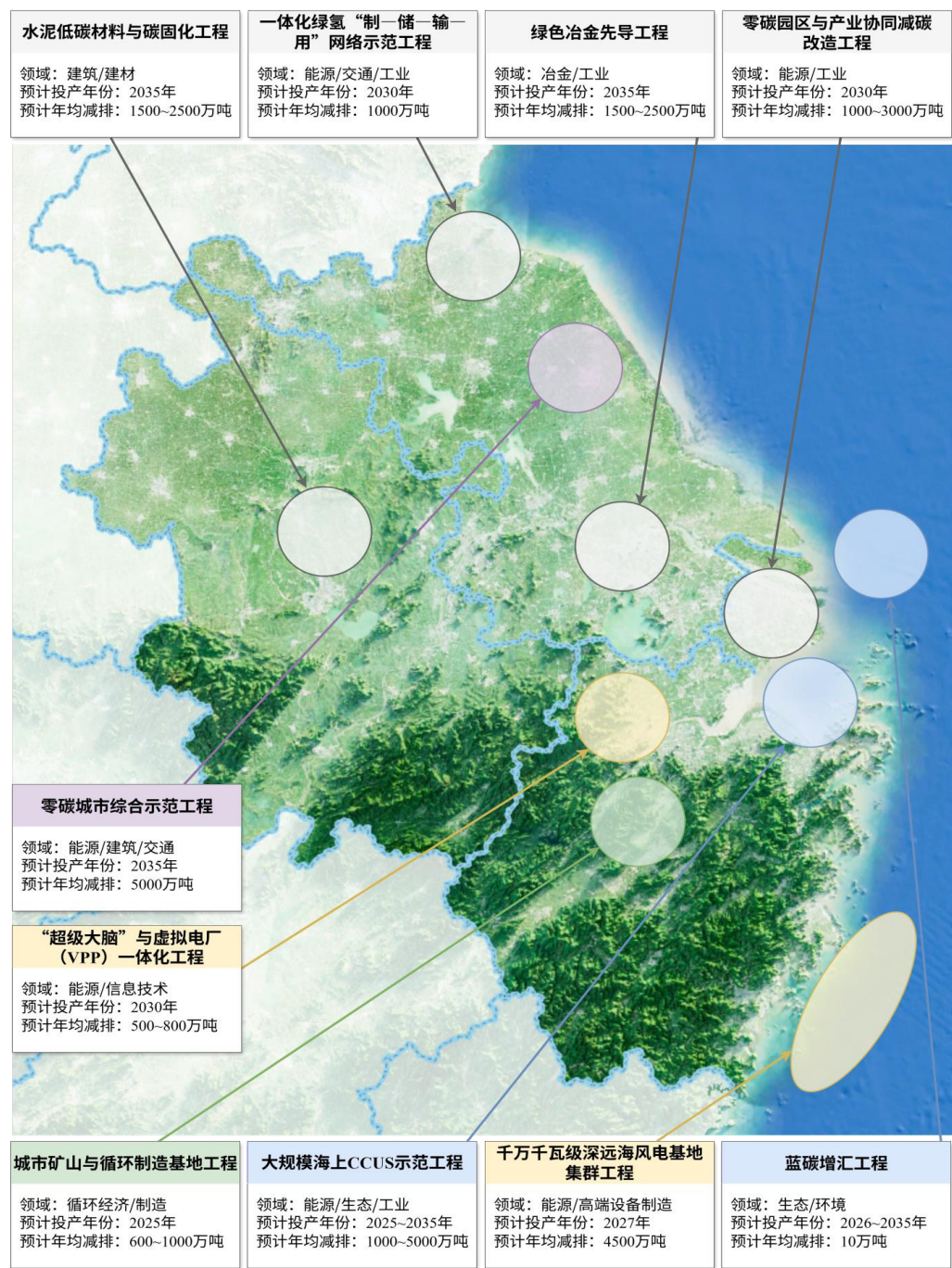
图 14 长三角地区集成电路生产产业链结构图



3.5 重大气候工程

推动一批系统性、标志性气候工程加速落地。基于长三角地区能源资源禀赋与产业特点，规划实施具有引领性的重大气候工程，作为推动地区实现“双碳”目标的关键支撑与路径示范。

图 15 长三角地区重大气候工程分布



长三角区域一体化绿氢“制—储—输—用”网络示范工程。以建设 GW 级电解水制氢工厂和区域氢能网络为核心，依托海上风电及沿海光伏基地，在关键工业园区（如化工、钢铁）及港口枢纽之间，构建高压气态与液氢输送管网，并部署加氢站网络，实现工业与交通领域的系统性氢能应用示范。重点实施措施包括：建设电解水制氢工厂，建设氢气输配网络和加氢站，推动氢能在重型卡车、港口机械、冶金化工及分布式发电等场景的示范应用，形成“制—储—输—用”闭环的区域氢能生态系统。该工程既是推动能源消费方式转型的重要战略举措，也是高端装备制造与绿色经济发展的核心引擎：总投资约 1000~2000 亿元人民币，预计在工业与交通领域替代化石能源，实现千万吨级二氧化碳减排；带动 GDP 增长约 1500~2500 亿元，创造 5~8 万个就业岗位；同时推动电解槽、储氢瓶、燃料电池及氢能装备全产业链发展，成为解决“难减排”行业脱碳的关键抓手。

长三角地区海上 CCUS 大规模示范工程。规划于 2025~2035 年实施，旨在针对长三角沿海火电、钢铁、化工及海上油气平台等重点排放源，构建“捕集—运输—封存—监测”一体化海上碳封存体系，破解沿海高耗能产业深度减排难题，助力区域实现碳中和目标，保障能源安全与生态保护协同发展。核心举措包括：在沿海重点区域布局 20 座碳捕集站（捕集率超 90%）；建 300 公里海底输碳管道及 10 艘

运输船舶，将二氧化碳输送至长江口、杭州湾深部咸水层（容量超 10 亿吨）及废弃油气田封存；布设海底传感与卫星监测系统实现全生命周期管控，通过数值模拟划定生态缓冲区并实施修复补偿。该工程总投资及产业链预计拉动长三角 500~1000 亿元 GDP 增长，带动 2.5~4.5 万人就业；年封存 1000~5000 万吨二氧化碳，最终形成可复制的技术标准与运营模式，为全国沿海减排提供示范，巩固长三角低碳技术领先地位。

长三角地区零碳园区与产业协同减碳改造工程。以系统性零碳化改造工业园区为核心，选取 10~15 个代表性园区（如化工、钢铁、集成电路等），通过部署分布式“风光储”、建设园区级智慧能源网络、推广余热余压高效利用及物质循环利用，实现园区绿电自给率达到 80% 以上，并推动园区内产业链上下游企业协同降碳。积极建设分布式可再生能源及储能设施，构建园区智慧能源管理平台，推动余热余压回收及工业副产物循环利用，形成绿色能源自给和产业链协同减碳的示范模式。该工程既是工业园区低碳转型的重要战略举措，也是经济与就业增长的新引擎：总投资约 800~1800 亿元人民币，预计二氧化碳当量年减排 1000~3000 万吨；带动 GDP 约 2500~3500 亿元，创造 6~12 万个就业岗位，同时催生综合能源服务、节能改造、碳管理咨询等新兴业态。

长三角地区零碳城市综合示范工程。

该工程以系统化路径攻克建筑与交通两大碳排放源，打造城市低碳转型样板。建筑领域：推进既有建筑（近）零碳改造，推广以电代气、光伏直供与智能调控；在学校、医院等公共建筑开展全生命周期（近）零碳示范，应用低碳建材与装配式建造，集成“光储直柔”电力系统，探索虚拟电厂参与调峰。交通领域：构建“节点—干线—枢纽”立体协同网络，零碳物流园区部署分布式光储实现绿能自给，零碳货运廊道推进铁路电气化改造与新能源中重型货车推广，零碳港口、机场升级清洁能源设施与绿色地勤装备，建全链条碳监测体系。工程总投资及产业链预计拉动长三角2500~3500亿元GDP，带动6~12万名专业人才就业；年节约数十亿能源与环境治理开支，为我国城市低碳发展提供可复制范例，服务区域高质量发展与生态安全。

长三角地区千万千瓦级深远海风电基地集群工程。立足长三角丰富的海上风能资源（近海技术可开发量超1亿千瓦），构建覆盖江苏盐城、南通，浙江宁波、温州，上海临港等区域的海上风电集群，形成“海上发电—陆上消纳—产业升级”的全链条体系。到2027年，实现长三角近海风电并网容量突破3000万千瓦，深远海示范项目装机达500万千瓦。重点推进江苏如东、大丰等百万千瓦级基地扩建，浙江嵊泗、岱山等深远海漂浮式风电试点，同步建设海上变电站、柔性直流输电线路等配套设施。依托上海电气、金风科技等龙

头企业，在南通、盐城等地打造风电装备制造产业园，实现大兆瓦级机组（12兆瓦以上）、智能运维系统、海底电缆等核心设备国产化率超90%。探索“海上风电+海洋牧场”模式，在风机基础周边部署人工鱼礁、深水网箱，实现生态保护与经济效益双赢。预期年减排二氧化碳约4500万吨，替代燃煤1350万吨，同时带动产业链年产值超2000亿元，创造就业岗位10万个以上。

长三角地区蓝碳增汇工程。规划于2026~2035年实施，旨在系统修复与扩增长江口盐沼湿地、海草床等滨海生态系统，显著提升其固碳能力和生态韧性，打造全国领先的蓝碳示范区，助力长三角碳中和目标实现。工程将构建“调查监测—生态修复—碳汇核算—价值实现”一体化增汇体系，推动蓝碳资源转化为生态资产。开展长江口蓝碳本底调查，布设100个以上监测点位，精准监测盐沼、海草床的碳汇通量与储量；重点修复崇明东滩、九段沙等区域5000公顷退化湿地，人工种植互花米草、海三棱藨草等优势固碳植被，重建健康食物链；研发本地化高精度碳汇监测与核算方法学，形成可认证、可交易的蓝碳碳汇产品；搭建蓝碳管理与交易平台，推动碳汇纳入区域碳市场，创新生态补偿与绿色金融模式。该工程总投资及相关产业链预计拉动长三角100~200亿元GDP增长，带动1~2万名科研、工程及管护人员就业；预期工程期末年均新增碳汇量10万吨以上，显著增强气候韧性、保护生物多样性。

长三角地区能源“超级大脑”与虚拟电厂（VPP）一体化工程。以建设覆盖全区域的智慧能源调度与交易平台为核心，基于“云一边一端”架构，将分布式光伏、储能单元、电动汽车充电桩、智能家电及工业柔性负荷聚合成可与大电网实时互动的亿千瓦级虚拟电厂，实现区域能源系统的智能化管理与高效调度。为数百万分布式能源和灵活负荷安装智能终端，构建全域数据采集、预测与优化控制体系，形成虚拟电厂与电网互动的闭环调控能力，提升可再生能源消纳能力和系统运行灵活性。该工程既是提升能源系统智能化和可再生能源接入比例的重要战略举措，也是高端技术产业发展的核心引擎，总投资约500~1000亿元人民币，通过智能化调度间接减少火电调峰带来的碳排放约500~800万吨/年；带动区域GDP增长约600~900亿元，创造2~4万个就业岗位；同时推动高端芯片、通信模块、工业软件和人工智能算法等相关产业的快速发展，提升区域能源科技竞争力和产业附加值。

长三角地区城市矿山与循环制造基地工程。以建设跨市逆向物流、高纯回收和再制造中心为核心，选址3~4个区域重点布局电子、电池、铜铝钢等产业，构建“再认证标准+再制造指数”体系，并建立区域循环材料交易平台，实现城市矿山资源的高效回收与循环利用。建设逆向物流网络、回收与分拣中心、高纯材料提取设施

及再制造生产线，推动电子废弃物、废旧电池和金属材料的高效回收与再利用，形成覆盖收集、加工、再制造及交易的闭环产业体系。该工程既是提升资源利用效率与循环经济水平的重要战略举措，也是高端制造与绿色经济发展的核心驱动力：总投资约300~700亿元人民币，预计到2035年实现二氧化碳当量年减排600~1000万吨；带动再生金属及再制造装备产业产值400~700亿元，创造3~5万个就业岗位，同时推动区域循环经济和绿色产业链升级。

长三角地区水泥低碳材料与碳固化工程。以降低熟料系数、推广混合胶凝材料替代及建设二氧化碳固化预制件基地（装配式建造）为核心，覆盖安徽、浙江、江苏区域，叠加工业共生与余热回收技术，实现水泥及建材产业链的系统性升级。建设低碳水泥生产及二氧化碳固化预制件基地，推动装配式建造应用，整合余热回收与工业共生方案，形成从原材料生产、加工到装配应用的全流程低碳建材体系。该工程既是建筑建材行业低碳转型的重要战略举措，也是绿色经济与新兴产业发展的重要引擎，总投资约300~600亿元人民币，预计到2035年实现二氧化碳当量年减排1000~1500万吨；带动低碳建材及装配式工程总包市场产值500~800亿元，创造2~3万个就业岗位，同时推动绿色建筑和建材产业链升级。

长三角地区绿色冶金先导工程。以建设 3~5 套 200 至 300 万吨级绿氢直还铁（H₂-DRI）与废钢电弧炉（EAF）短流程生产线为核心，覆盖上海、江苏、浙江、安徽区域，通过绿电直供及余热回收替代传统高炉长流程，实现钢铁工业低碳化转型。建设绿氢直还铁生产线与废钢 EAF 短流程产线，配套绿电直供及余热回收系统，推动钢铁生产过程电气化与氢能替代，同时完善废钢回收与循环利用体系，形成绿色

钢铁产业链闭环。该工程既是钢铁工业减碳升级的重要战略举措，也是绿色装备制造与循环经济发展的核心引擎，总投资约 800~1500 亿元人民币，预计到 2035 年实现二氧化碳当量年减排 1500~2500 万吨；带动电解槽、氢储运、EAF 装备及废钢循环产业产值约 1000~1500 亿元，创造 3~5 万个就业岗位，同时推动钢铁产业绿色转型与高端装备升级。

表 2 十大重点碳减排工程（2025~2035 年）

序号	工程名称	建设地点	投资规模 (亿元)	部门/ 领域	预计投 产年份	预计减排 量 (万吨)	带动就业 (万人)	GDP 增 长 (亿元)
1	长三角区域一体化绿氢“制—储—输—用”网络示范工程	沿海关键工业园区及港口枢纽	1000~2000	能源、 交通、 工业	2030	1000	5~8	1500~2500
2	长三角地区海上 CCUS 大规模示范工程	长江口、杭州湾沿海	1000~1500	能源、 工业、 生态	2025~2035	1000~5000	2.5~4.5	500~1000
3	长三角地区零碳园区与产业协同减碳改造工程	10-15 个工业园区（如化工、钢铁、集成电路等）	800~1800	工业、 能源	2030	1000~3000	6~12	2500~3500
4	长三角地区零碳城市综合示范工程	城市（建筑与交通领域）	1500~2500	建筑、 交通	2035	5000	6~12	2500~3500
5	长三角地区千万千瓦级深远海风电基地集群工程	江苏盐城、南通，浙江宁波、温州，上海临港等	2500~3500	能源、 高端装 备制造	2027	4500	>10	2000
6	长三角地区蓝碳增汇工程	长江口盐沼湿地、海草床等滨海生态系统	75~150	生态、 环境	2026~2035	10 万以上	1~2	100~200
7	长三角地区能源“超级大脑”与虚拟电厂（VPP）一体化工程	长三角全区域	500~1000	能源、 信息技术	2030	500~800	2~4	600~900
8	长三角地区城市矿山与循环制造基地工程	区域重点城市	300~700	循环经 济、制造	2025	600~1000	3~5	400~700
9	长三角地区水泥低碳材料与碳固化工程	安徽、浙江、江苏区域	300~600	建筑、 建材	2035	1000~1500	2~3	500~800
10	长三角地区绿色冶金先导工程	长三角全区域	800~1500	冶金、 工业	2035	1500~2500	3~5	1000~1500

3.6

资金需求

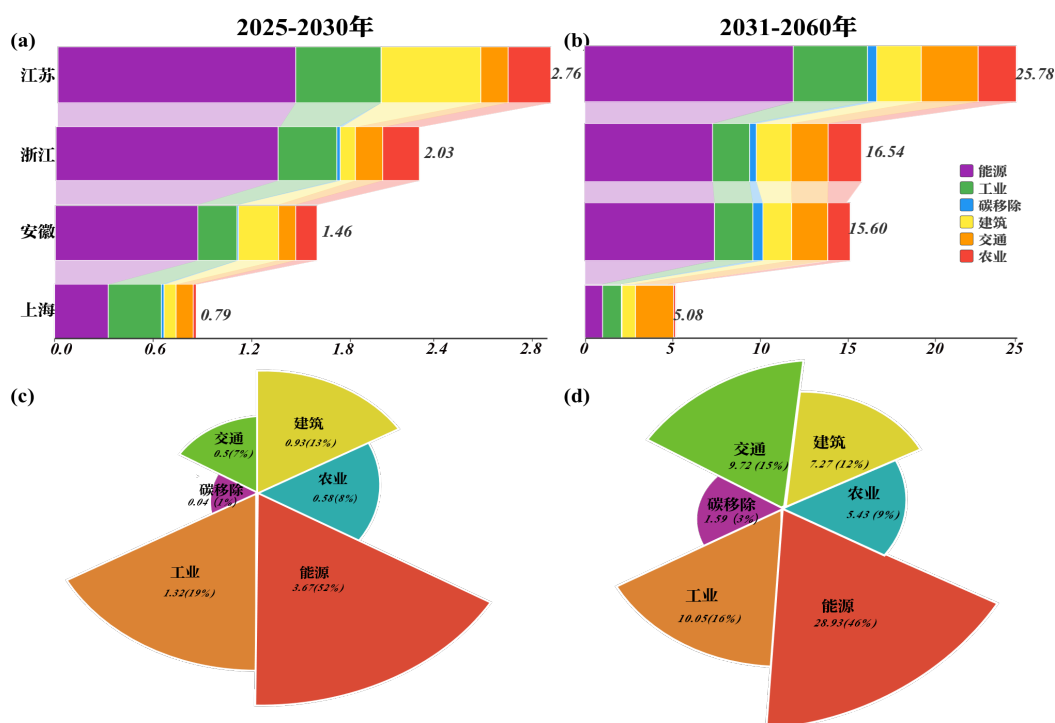
资金投入是保障“双碳”目标如期实现的关键支撑。系统测算并优化资金投入的规模与构成，有助于科学配置资源，统筹能源、产业、技术等领域的低碳转型需求，为长三角地区绿色转型与“双碳”目标的落地提供坚实的金融保障。

2025~2030 年，预计长三角地区实现碳中和目标的资金需求总计达 7.05 万亿元。其中，能源领域为最大资金需求来源，规模达 3.67 万亿元，占总需求比重超 50%，表明在碳中和初期阶段，能源结构优化与清洁能源技术投入是核心任务。其次是工

业与建筑领域，资金需求分别为 1.32 万亿元和 0.93 万亿元，反映出工业生产流程的绿色改造与建筑能效提升，是该时期重要的减碳方向。相比之下，碳移除技术在这一阶段的资金投入较少，相关技术尚处于起步或研发阶段，大规模应用尚未展开。

2031~2060 年，长三角地区碳中和资金需求总额将大幅攀升至 63 万亿元。与前一阶段相比，各领域资金需求均显著增长。能源领域仍是资金需求的主力军，规模达 28.93 万亿元。值得关注的是，交通领域与碳移除技术的资金需求增长尤为迅猛，其

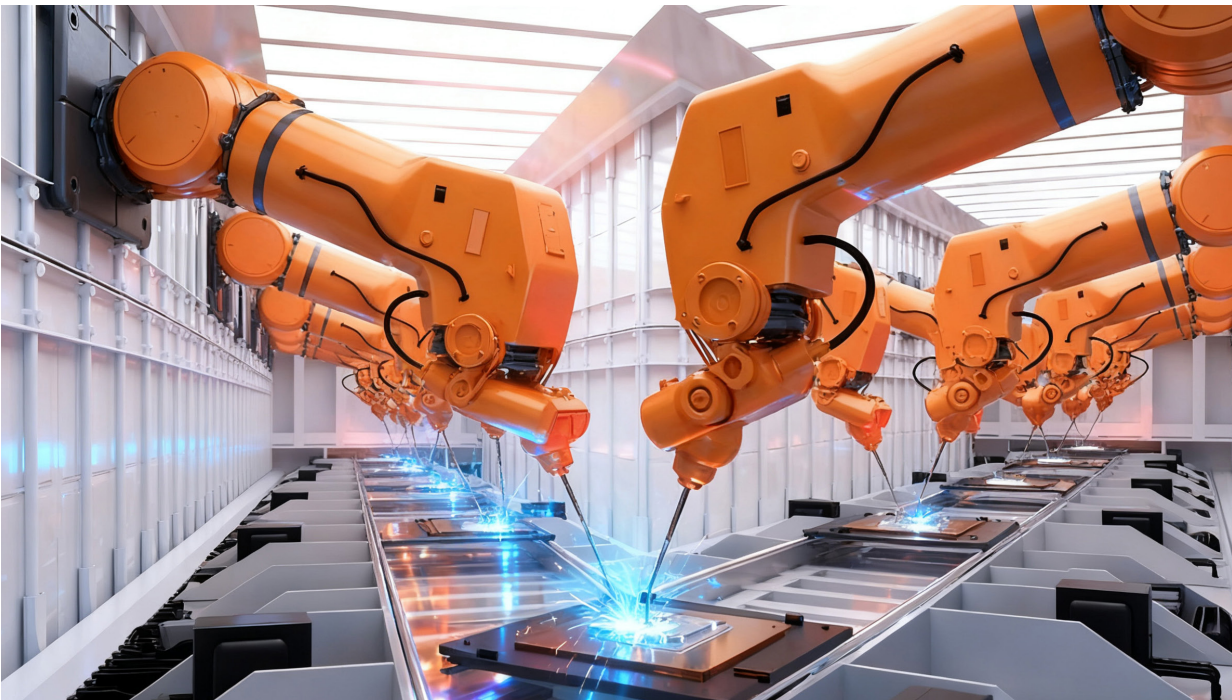
图 16 2020~2060 年强化碳中和情景下累计资金需求情况（万亿人民币）



中，交通领域资金需求激增至 9.72 万亿元，这意味着交通电气化、智能交通系统建设及新能源交通工具普及将在该时期迎来大规模加速。碳移除技术的资金需求则从前期的 442 亿元跃升至 1.59 万亿元，随着技术走向成熟，CCUS 等负排放技术将成为深度脱碳不可或缺的手段。总体而言，这种资金需求的结构性变化表明，随着碳中和进程不断深入，减排重点将从初期的能源转型，逐步拓展至交通、碳移除等更广泛的领域。

表 3 2025~2060 年长三角地区强化碳中和路径下的累计资金需求估算（亿元人民币）

部门 / 领域	2025~2030 年	2031~2060 年
工业	13222	100548
建筑	9326	72657
交通	4980	97249
能源	36731	289284
农业	5794	54346
碳移除	442	15913
总计	70500	630000





第 4 章

政策建议



04

POLICY
IMPLICATIONS

（1）构建新形势下一体化区域碳管理新体系

在长三角地区率先构建“区域碳预算—都市圈碳票—企业碳配额”三级协同的区域总量控制与市场化配置新体系，打造国家碳市场改革深化的压力测试区和制度创新高地。

首先，在区域层面，建立全国首个跨省级行政区的“长三角地区碳预算管理体系”，设定总量目标，“十五五”期间实现净零增长，“十六五”期间实现全面下降，并将总量目标分解为可交易的“都市圈碳票”。

其次，在都市圈层面，创新性引入碳总量“泡泡机制”。在主要都市圈（南京都市圈、杭州都市圈、苏锡常都市圈、合肥都市圈、宁波都市圈和上海都市圈等），以都市圈为最小治理单元，适配长三角独特的“竞合式一体化”，突破现有碳市场仅覆盖企业端的局限，允许都市圈之间进行配额互济和优化配置，同时对接全国碳市场，实现企业端与区域端双层联动。以企业层面对接全国碳市场，都市圈层面激活地方政府减排动力，区域层面实现跨省市协同，形成“企业碳履约—都市圈碳盘子—区域碳清算”的三级联动管理模式。

最后，为保障体系高效运行，建立市场与监管基础设施。发挥上海金融中心优势，建设“长三角碳票交易清算中心”，提供实时撮合、风险对冲、绿色金融等服务，形成“碳价发现—碳票流转—碳债清算”的完整闭环。“泡泡式”总量控制允许区域内部灵活调剂，既保证整体目标刚性约束，又激发地方自主创新活力。构建长三角碳排放预算执行数字化监管平台，集成物联网监测、区块链存证、大数据分析技术，实现碳预算执行的全程可视、可核、可溯。

（2）创新以链主驱动全产业链协同减排新模式

创设基于优势产业集群的“链主驱动型产业链碳治理体系”，以链主企业碳责任制撬动供应链系统性脱碳，构筑我国产业链绿色竞争力的战略支点。

核心举措是基于国家碳足迹管理战略，在长三角选择光伏、锂电、集成电路等战略性新兴产业集群，创新实施“产业链碳链长制”管理机制。由龙头企业担任“碳链长”，承担带动全产业链协同减排的主体责任。核心机制是建立“关键环节碳系数”管理体系，聚焦高碳排放关键环节，通过少量高敏感度参数实现全链条碳足迹的低成本管控。链主企业对一二级供应商的关键环节

碳系数达标率、绿电使用率、单位产品碳强度负责，并通过“绿色采购协议、技术赋能平台、供应链碳金融”等市场化工具传导减排压力。

为确保该模式的可持续性，政府提供差异化政策激励，链主企业可获得碳配额优先权、绿电保障、技改补贴等；达标供应商享受用能权倾斜、融资成本优惠。建立“产业链碳绩效指数”，将其纳入企业的环境、社会和治理（ESG）评级与政府产业政策考核，形成“链主牵引—供应商响应—政府激励—市场认可”的正向循环。将“一企一策”转变为“一链一策”，以产业生态视角推动系统性减排，在降低中小企业合规成本的同时，巩固关键产业链的全球竞争优势。

此模式将区域治理与产业治理深度融合，以都市圈为治理单元，同步把关键环节碳系数纳入城市产业政策、要素配置与金融激励（如绿电消纳、用能权、技改贷款）中，形成“链主—供应商—都市圈”传导闭环，在同构度高、竞合显著的长三角产业格局中以更低成本实现更高强度的系统性减排。

（3）打造衔接全球的气候技术与碳标准国际新格局

建设长三角地区全球气候技术“双循环策源地”与国际“碳标准输出港”，构建“引进消化—本土创新—标准输出—全球推广”的技术主权体系。

将长三角地区打造为连接全球与中国的气候技术“双向转换器”和标准“策源地”。在促进“对内循环”方面，建立国际气候技术首发平台，对标欧美最前沿的氢能、CCUS、虚拟电厂等技术，在长三角设立专门的技术沙盒区，提供真实场景、数据开放、容错机制，加速国际技术的本土化验证和规模化应用，使其成为全国推广前的试验场。在引领“对外循环”方面，着力构建“中国碳标准国际认证体系”，将全国在园区零碳改造、产业链碳管理、城市碳管理等领域的成功实践，提炼为具有自主知识产权的技术标准、认证体系和系统解决方案。依托“一带一路”绿色发展国际联盟等平台，推动中国标准成为国际规则。建立“技术引进—场景验证—标准固化—国际输出”的完整链条，配套设立“长三角气候技术产权交易所”和“国际碳标准认证中心”。通过掌握标准制定权和认证权，实现从技术跟随到规则引领的战略转变，将长三角建设成为全球气候治理体系中的“中国方案”输出基地，提升我国在全球碳市场和绿色贸易规则制定中的话语权。



第 5 章

研究方法



05

METHODS

本研究是“面向国家碳中和的重大基础科学问题与对策”专项项目（72140004）的核心应用成果。致力于解决区域碳排放路径研究的实践落地难题。研究创新性地提出了“国家—省级—部门”多层级排放路径优化技术方法体系，构建中国碳达峰碳中和区域协同路径优化综合评估模型（CAEP-CP 3.0）。该模型整合了多学科理论与人工智能前沿技术，并引入 CGE 模型框架，分析宏观经济政策和产业结构调整对区域碳排放的综合影响。通过动态模拟、技术求优、情景分析和减排评估等功能，建立了一套标准化、科学化的评估体系，为推动我国“双碳”目标实现提供强有力的支持。

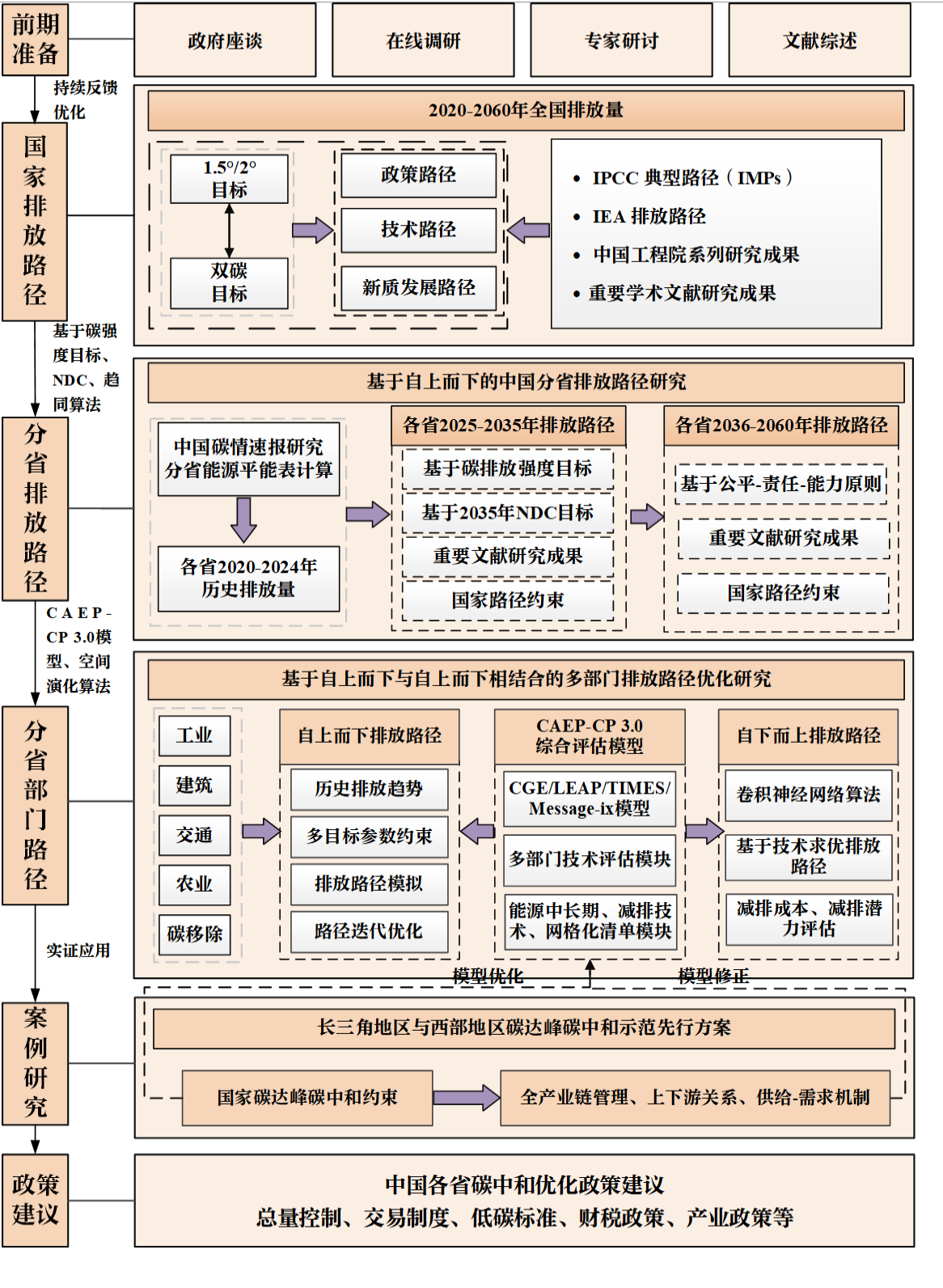
5.1

研究技术路线

研究技术路线是在国家碳达峰、碳中和目标以及社会经济发展框架下，系统整合了 IPCC、IEA、中国工程院等国内外权威机构的前沿研究成果，全面考量了包括历史排放特征、GDP 增速、产业结构、上下游产业联动、减排技术、能源消费结构、可再生能源发展等在内的多维度要素。在方法论上，以成本最优和社会公平为双重约束，耦合了基于空间演化理论的自下而上模型和基于 CGE 模型的自上而下方法。特别是 CGE 模型的引入，使得能够更深入地模拟碳市场碳价机制、资源禀赋条件等

因素对经济系统的影响，从而更好地评估不同减排路径下的经济社会成本与效益。此外，通过实地调研、政府访谈和专家研讨等多种方式对模型进行反复校验和迭代优化，最终形成了覆盖全国、省级及各主要部门（如工业、建筑、交通、农业）的 2020~2060 年多尺度排放优化路径。基于模型模拟与案例研究，为国家碳中和先行示范区专项规划提供科学支持，并进一步提出区域资源优化配置与协同管理的政策建议。

图 17 技术路线图



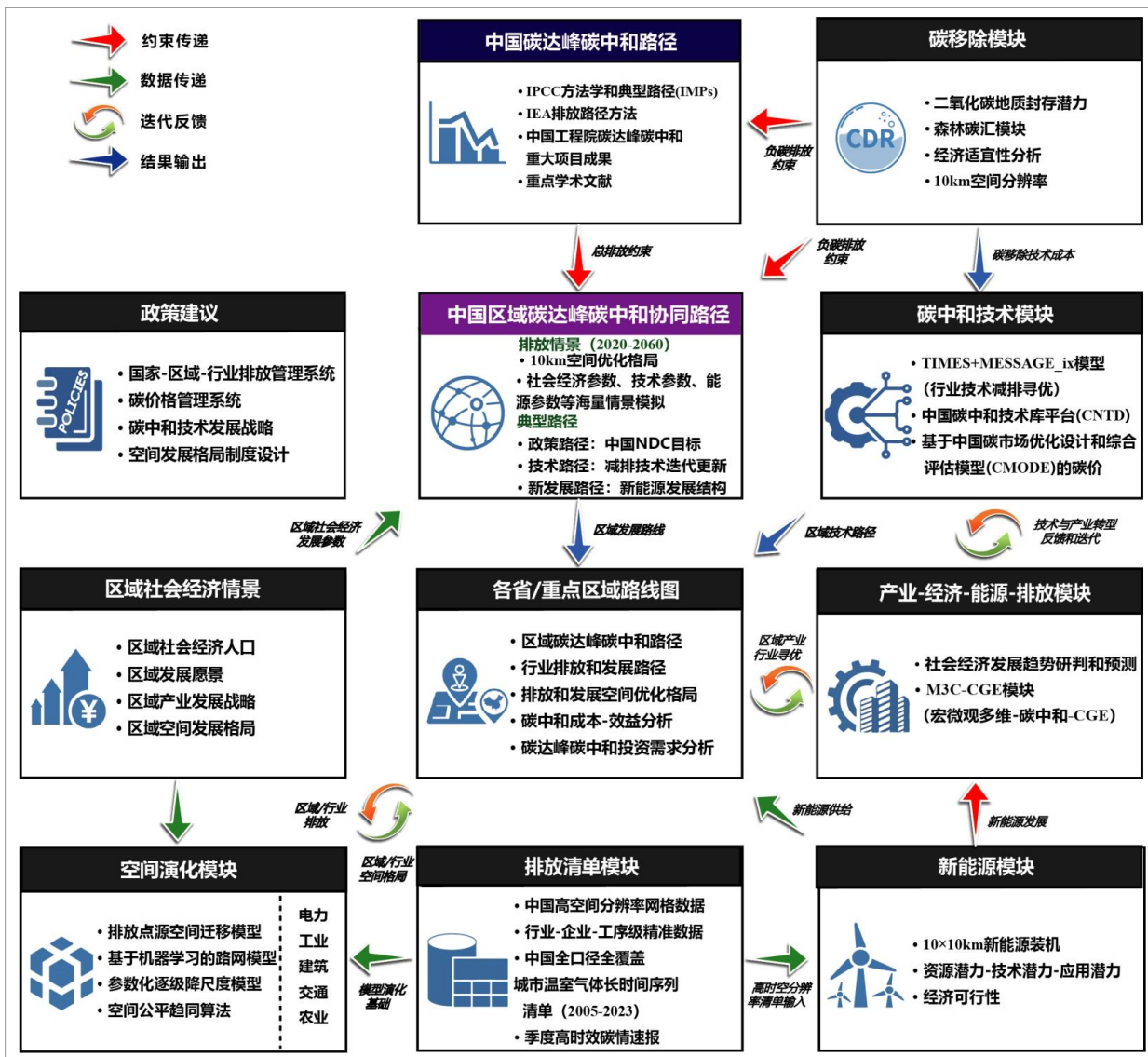
5.2

中国碳达峰碳中和区域协同路径 优化综合评估模型

采取自上而下和自下而上相结合的优化分析方法，以国家碳达峰碳中和总体路径为顶层约束条件，构建区域（省级）与部门碳排放的动态协调机制，形成“国家—区域—部门”三级联动优化架构，科学评

估并优化中国为实现国家碳达峰碳中和目标过程中，分析各区域（省、自治区、直辖市）协同性，求解在满足多重约束下的成本最优或社会福利最优的区域协同减排策略，实现宏观一致性和微观可行性。

图 18 CAEP-CP 3.0 模型框架



• 多层级自上而下和自下而上方法嵌套耦合与迭代反馈 (Coupling and Iterative Feedback of Top-down and Bottom-up Methods)

区域：自上而下以国家层面的排放路径和目标为顶层约束，整合 IPCC 典型路径 (IMPs)、中国工程院碳达峰碳中和重大专项研究成果、重要学术文献等权威方法和成果为区域路径优化提供战略约束；利用 M3C-CGE (Macro-Micro Multi-scale Carbon Neutrality and CGE) 模块和碳中和技术模块，结合区域人口、经济发展愿景、产业结构调整、技术发展路径等自上而下迭代求优。考虑各区域碳达峰碳中和路径的差异化特征，构建各省碳减排目标动态优化机制，实现区域路径与国家整体战略的动态适配。进而通过上下交互反馈机制，以国家目标为导向，实现各区域减排路径的空间协调和动态优化。最终通过区域碳达峰

碳中和路径、部门排放和发展路径、排放和经济空间优化格局、碳中和成本效益分析以及碳达峰碳中和投资需求分析，实现区域差异化实施路径设计。

部门和技术：基于国际主流 TIMES+ MESSAGE_ix 技术模型，结合中国本土化的技术数据库 (CNTD)，精细刻画各类低碳 / 零碳 / 负碳技术的成本、效率、潜力及渗透过程，自下而上分析各区域能源结构与产业结构转型特征与趋势，识别影响区域碳达峰碳中和路径的关键技术因素，确定不同路径下火电、钢铁、水泥等重点行业的分区域产出约束。通过碳移除模块评估负碳排放潜力和空间格局，并将其作为实现碳中和目标的关键负排放手段纳入整体框架。新能源模块则聚焦于风、光资源的高时空分辨率模拟，空间尺度精确到 10km，为新能源产业规模化精准布局提供数据支撑。

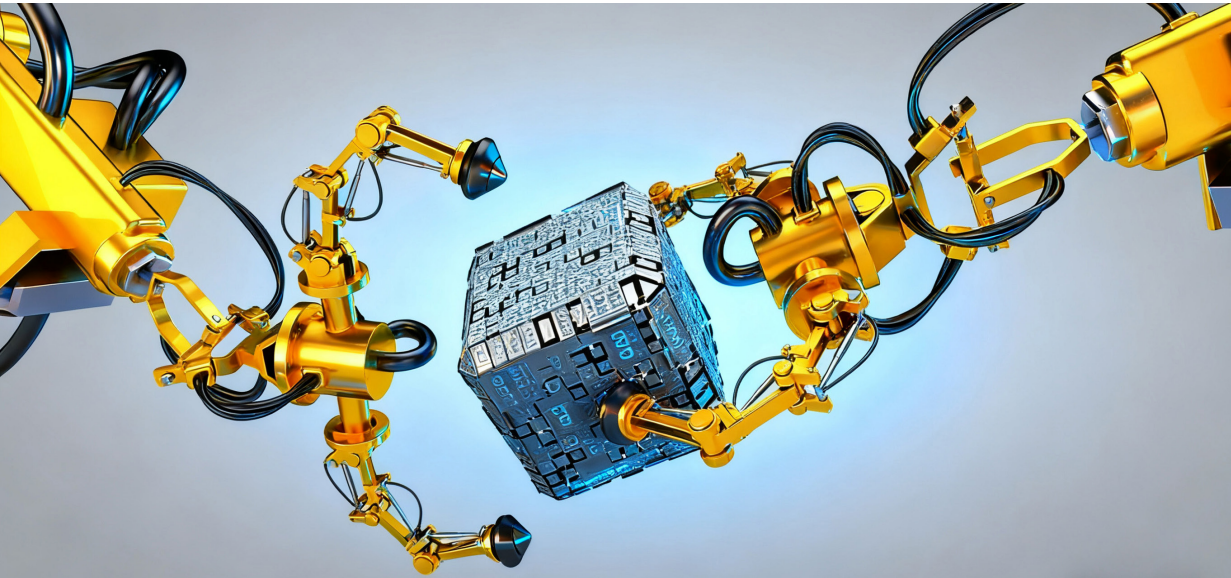
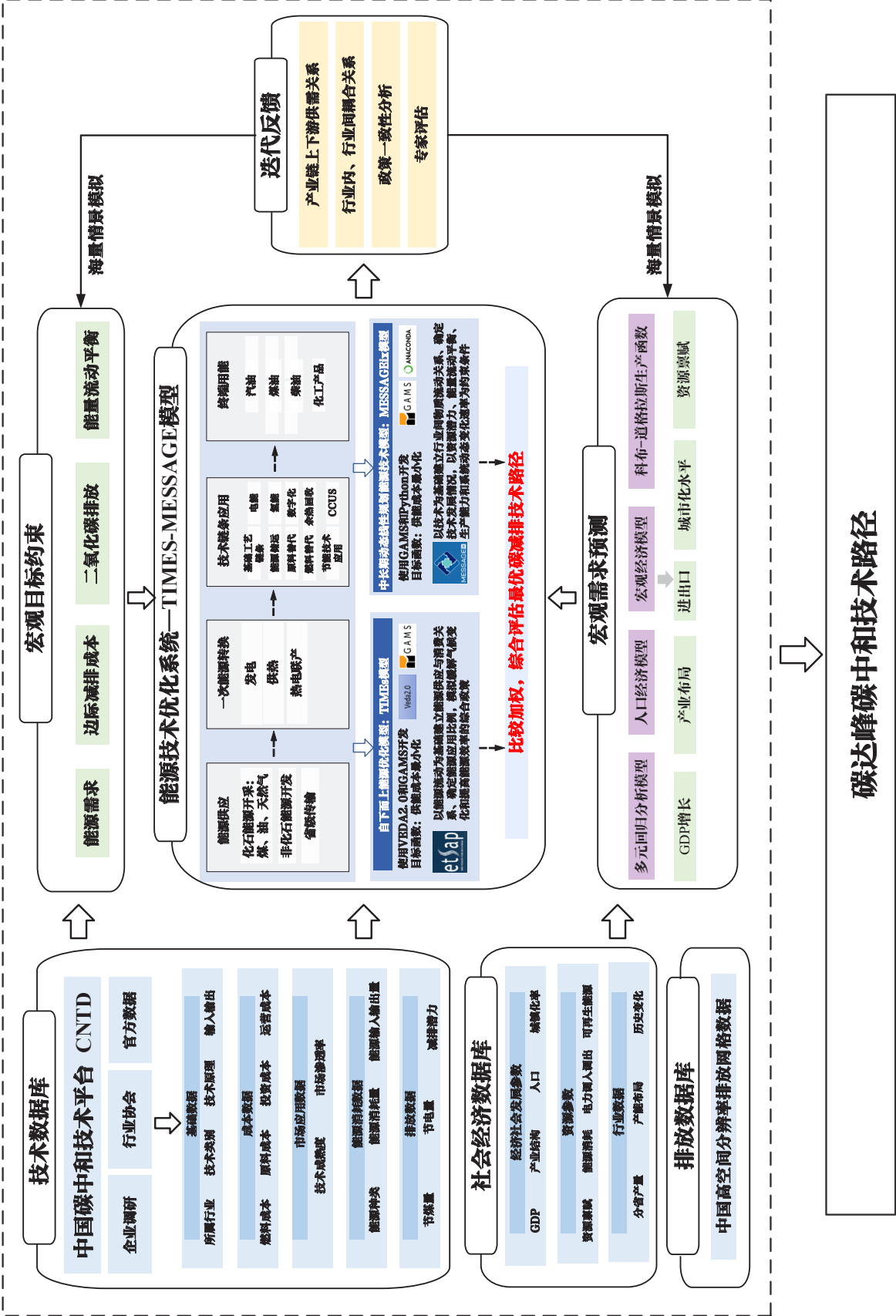


图 19 减排技术路径优化模型



空间网格：在中国高空间分辨率排放网格数据库（CHRED）基础上，采用自下而上方法，结合机器学习、空间计量模型（如排放源迁移模型、参数化路网 / 建成区模型）和空间耦合算法，依据排放源性质，遵循特定规则和约束，自演化出不同阶段的排放格局，构建基于空间演化理论的排放路径模型，包括点源排放演化模型、线源排放演化模型、面源排放演化模型。自上而下，以行业和区域排放为总约束，实现行业 / 区域减排路径在空间尺度上的精准选择与技术布局。

• 多维度强耦合与反馈机制 (Strong Coupling and Feedback Loops)

耦合不同类型（CGE、空间模型、技术模型等）、不同尺度（国家、区域、网格）、不同侧重（技术、经济、空间）的模型方法，融合社会经济情景、技术发展、产业经济演化、能源系统转型、碳排放核算、空间格局演变以及碳移除等多个关键维度，跨越单一模型或单一学科的局限，全面刻画碳中和转型的复杂性。模型内部各模块之间存在显式的输入输出关系和反馈回路，能够捕捉各系统间的相互作用和动态调整过程。其中，碳中和技术模块的成果（如技术成本、减排潜力）会反馈至中央的“协同路径”模块进行迭代优化；“产业—经济—能源—排放模块”与“碳中和技术模块”之间存在“技术与产业转型反馈和迭代”机制；空间演化结果影

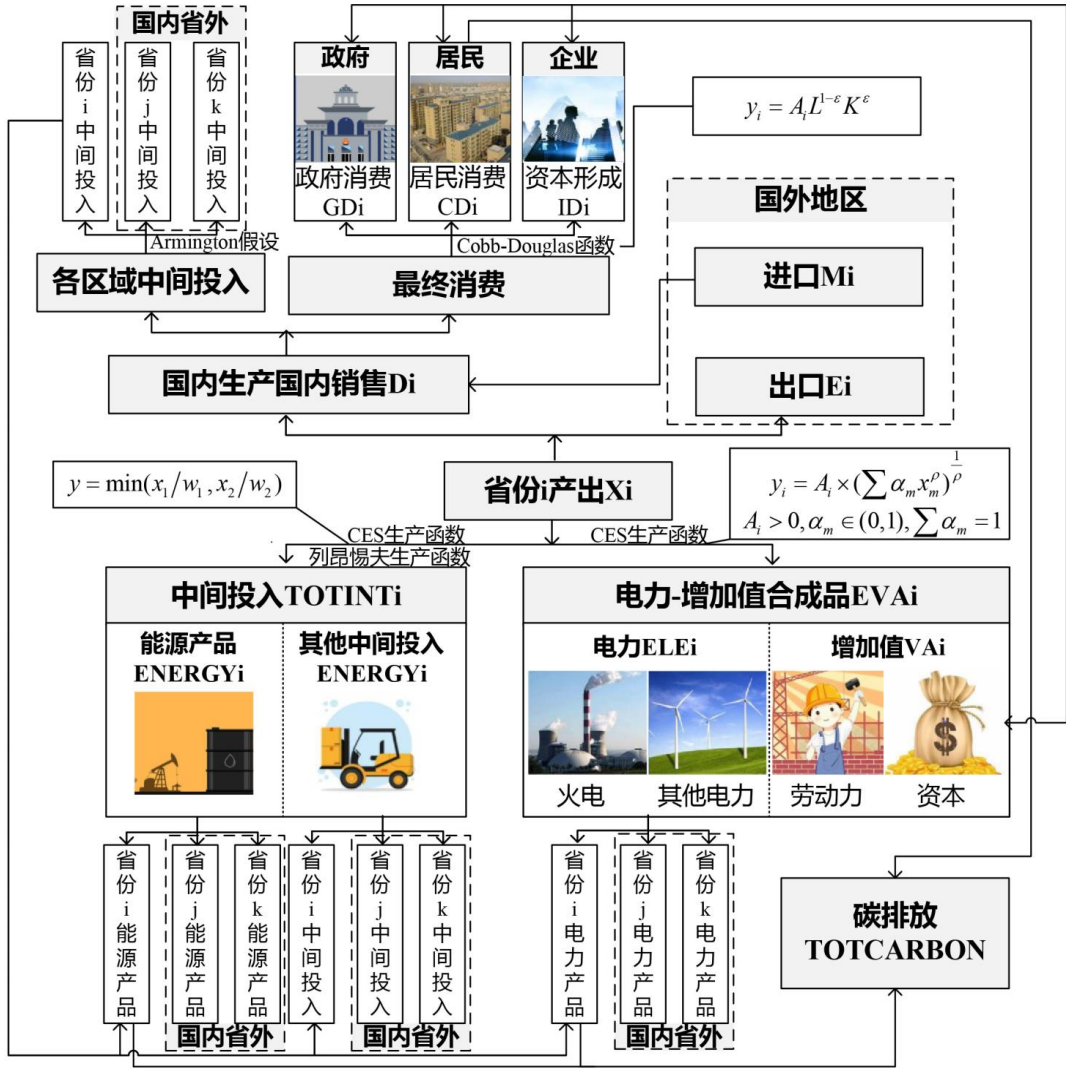
响排放清单计算，进而影响区域路径规划。

宏微观多维—碳中和—CGE（M3C-CGE）模型以可计算一般均衡（CGE）模型为基础，综合考虑环境、经济、社会多个系统之间的相互联系，实现不同区域不同经济主体之间的交互与反馈，从而得到“双碳”目标背景下，不同减排情景对经济、社会、环境等方面的影响。模型运用大量数学方程刻画不同经济主体（企业、居民、政府、投资者、进出口商等）的生产、消费、投资、进出口等行为，在居民效用最大化、企业利润最大化、成本最小化、资源与预算约束的情况下，得出市场均衡时生产要素或其他商品的供给与需求，从而获取均衡价格，并基于市场价格变化和经济各主体之间的相互影响，全面揭示经济发展、能源需求、产业结构和温室气体排放之间的关系。

研究以 2020 年省份投入产出表为社会经济基础数据，结合 2020 年省份能源平衡表、省份统计年鉴、省份碳排放等建立基准年数据。模型涵盖 40 个部门，包括生产模块、国内外贸易市场模块、政府和居民的收支模块以及碳排放模块，以 1 年为步长，动态地模拟了不同碳排放约束情景下，2020~2060 年各省份产业经济态势、产业结构变化、能源消费及其碳排放量的变化，从而探索未来各省份最优减排路径。

图 20 宏微观多维—碳中和—CGE 模型 (M3C-CGE)

注：生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心联合中科院预测科学研究中心和中国科学院大学经济管理学院共同开发。



• 大数据驱动下的情景分析与面向决策的路径求优 (Scenario Analysis and Path Optimization)

以中国高空间分辨率网格数据、行业—企业—工厂级精准数据和中国全口径全覆盖城市温室气体长时间序列清单（2005~2024年）等大数据为输入，基于综合评估模型框架，系统模拟 2020~2060 年不同情景下的分区域产业结构与能源结构变化、碳排放轨迹

及三者在网络空间的演变过程。通过整合各区域技术可行性、经济可承受能力和潜在政策取向，研究提出不同区域梯次有序达峰方案。同时，以各区域制定科学、有效、协同的“双碳”战略为目标导向，紧密围绕管控需求，充分考虑国家整体战略布局、区域差异化发展路径和行业技术进步潜力，实现区域路径优化、投资需求分析、政策效果评估等量化研究。

● 关键参数

表 4 长三角地区各阶段参数

注：参考联合国人口司最新发布的《World Population Prospects 2024》、中国人口与发展研究中心公布的《人口负增长的内在逻辑、趋势特征及对策》、《中国人口预测报告 2023 版》等资料，将人口演变客观规律、人口迁移变化、人口自然增长、国家 / 地方政策等因素纳入考虑，分短期（2025 年至 2030 年）、长期（2030 年至 2060 年）对中国长三角地区 2025 年至 2060 年的人口状况进行宏观分析；参考联合国经济和社会事务部公布的《2025 年世界经济形势与展望》、国际货币基金组织公布的《持续不确定性下的脆弱韧性》、世界银行公布的《中国经济简报》《全球经济展望报告（2025~2026）》、《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》《长期增长与短期波动（中国宏观经济形势分析与预测）》等重要资料，对中国长三角地区 2025 年至 2060 年的 GDP 增长状况进行宏观分析。

阶段	人口 (百万)	GDP (万亿元)
2024 年	238.00	33.17
2025~2030 年	238.29 (增长率 0.1% 至 0.3%)	45.12 (增长率 4.5% 至 6%)
2030~2050 年	236.15 (增长率 -0.3% 至 -0.6%)	75.89 (增长率 1.5% 至 3.5%)
2050~2060 年	235.09 (增长率 -0.3% 至 -0.6%)	99.78 (增长率 1.5% 至 3.5%)

