

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祺, 胡建林 (635)
2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)
郑州市PM _{2.5} 中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炯彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (1026)
基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 耶明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源锌灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析

吴琼¹, 马昊¹, 任洪波^{1*}, 郭明星², 陈鹏², 李琦芬¹

(1. 上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200120)

摘要: 基于上海临港新片区现有统计数据, 结合其未来社会经济发展、产业结构和技术进步等, 构建了LEAP-临港模型, 分析了基准情景、低碳情景和强化低碳情景下新片区的能源需求和碳排放演化趋势。为增强模型的预测精准度, 采用Logistic人口生长模型对临港未来人口数据进行预测, 并利用学习曲线模型模拟相关减碳技术的成本发展趋势。同时, 构建了碳减排技术的经济性评价模型, 通过绘制边际减排成本曲线对典型减碳技术的经济成本及减排潜力进行评估。结果表明, 强化低碳情景下, 2060年临港新片区一次能源消费中可再生能源占比达69%, 电能终端能源需求中占比达91%; 临港新片区可在2030年实现碳达峰, 且2060年碳排放量相较基准情景下降94%。就减排贡献度而言, 清洁能源替代、产业结构优化和终端能效提升对临港碳减排起到关键作用, 中期(至2035年)分别贡献35.1%、27.3%和16.2%的碳减排量, 长期(至2060年)分别贡献50.6%、8.75%和7.7%的碳减排量。就具体减碳技术而言, 氢能发电、电解水制氢及碳捕获和利用与封存(CCUS)技术对实现净零排放意义重大, 但减排成本相对较高。研究成果可为临港及相关地区的绿色低碳发展提供思路和借鉴。

关键词: LEAP模型; 碳排放; 边际减排成本; 贡献度分析; 临港新片区

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0721-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202301093

Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model

WU Qiong¹, MA Hao¹, REN Hong-bo^{1*}, GUO Ming-xing², CHEN Peng², LI Qi-fen¹

(1. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: Based on the existing statistical data of the Lingang Special Area in Shanghai and considering its future socio-economic development, industrial structure, and technological development, a LEAP-Lingang model was developed to analyze the evolution trends of energy demand and carbon emissions under the baseline scenario, low-carbon scenario, and enhanced low-carbon scenario. To enhance the prediction accuracy of the model, the Logistic population growth model was used to predict future population data, and the learning curve model was used to simulate the cost evolution trend of related carbon reduction technologies. In addition, an economic evaluation model for carbon reduction technologies was developed, and the economic costs and emission reduction potential of typical carbon reduction technologies were evaluated by drawing a marginal emission reduction cost curve. The results showed that under the enhanced low-carbon scenario, the renewable energy accounted for 69% of the primary energy consumption, and the electric energy accounted for 91% of the terminal energy demand in 2060. The Lingang Special Area could achieve carbon peak by 2030, and the carbon emissions in 2060 were predicted to decrease by 94% compared to that in the baseline scenario. In terms of contribution to emission reduction, clean energy substitution, industrial structure optimization, and terminal energy efficiency improvement played a key role in reducing carbon emissions near the port. In the medium term (until 2035), they were predicted to contribute 35.1%, 27.3%, and 16.2% of carbon emissions, respectively, and in the long term (until 2060), they should contribute 50.6%, 8.75%, and 7.7% of carbon emissions, respectively. Regarding specific carbon reduction technologies, hydrogen power generation; water electrolysis for hydrogen; and carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology were of great significance for achieving net-zero emissions, but the costs of emission reduction were relatively high. The research results can provide ideas and references for the low-carbon and green development of the Lingang Special Area and related areas.

Key words: LEAP model; carbon emissions; marginal abatement cost; contribution analysis; Lingang Special Area

2019年8月, 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区成立, 目标成为中国特色国际领先的特殊经济功能区, 形成一个包括集成电路、人工智能、生物医药和智能新能源汽车等在内的世界级、开放型和现代化的产业体系。在“四个革命、一个合作”的能源安全新战略及“双碳”目标双重推动下, 如何在保障经济高速增长的同时实现绿色低碳发展是新片区必须面对的一项重要课题。因此, 探索临港新片区中长期低碳发展路径对其高质量发展具有重要意义。

近年来, 随着碳减排压力的日益增加, 国内外学

者围绕城市和行业碳排放预测、低碳发展路径设计等方面开展了大量研究^[1-5]。构建能源经济环境系统模型是系统、科学分析碳排放与减碳路径的重要方式。按照建模方法的差异性, 上述模型可分为自上而下模型、自下而上模型以及由此发展而成的混合模

收稿日期: 2023-01-13; 修订日期: 2023-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(71804106); 上海市青年科技启明星计划项目(22QA1403900)

作者简介: 吴琼(1987~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为城市碳减排路径模拟与分析, E-mail: wuqiongff@163.com

* 通信作者, E-mail: tjrbb@163.com

型^[6]. 各类模型在功能、结构及使用方法上均有各自特色. 自上而下模型属于经济学领域, 便于进行宏观经济分析, 但不能对技术进行详细描述, 无法明晰具体的减碳策略, 大多应用于国家乃至世界范围内的减碳政策规划研究^[7,8]. 自下而上模型属于工程学领域, 拥有较丰富的技术信息, 可从实际出发进行低碳发展路径研究及技术替代效应评估^[9~11]. 而混合模型结合了上述两种模型的特点, 可同时对宏观经济及能源技术进行详细描述, 但由于结构相对复杂, 且需要大量数据支撑, 使用难度较高. 为此, 对于城市尺度或城市内某片区的碳减排分析, 自下而上模型具有更强的适应性. 瑞典斯德哥尔摩环境研究所开发的 LEAP (long-range energy alternatives planning system) 模型是自下而上模型的典型代表. 该模型从技术视角出发, 可充分反映能源生产、转换、输送、终端消费等全生命周期过程, 便于直观洞察技术革新对整个能源系统影响, 具有更好的能源、环境整体结构性以及较强的情景分析能力. 临港新片区作为新成立的独立片区, 历史数据量不足且难以收集整合, LEAP 模型可根据研究对象数据的可得性灵活调整数据框架, 更好地评估各种减碳措施的贡献度.

目前, LEAP 模型主要应用于省市等较为宏观区域或具体行业能源需求预测、碳排放影响分析、碳减排路径设计等方面^[12~18]. 陈睿等^[19]基于 LEAP 模型研究了 GDP 增速和产业结构等对长沙市能源消费总量及能源强度的影响. Hu 等^[20]通过分析不同情景下深圳市能流图, 定量探讨了应用节能减排技术改善能源效率和能源结构对城市能源系统的影响. 刘惠等^[21]采用 LEAP 模型分析了鹤壁市农村生活部门未来碳排放趋势. 周伟铎等^[22]探索了雄安新区的零碳建设路径, 结果表明碳汇政策、能源强度政策和能源结构转型政策的耦合对零碳城市路径设计影响显著. 随着绿色低碳转型的深入推进, 近年来, 有学者开始应用 LEAP 模型探讨城市节能减排技术对减污降碳协同增效的推进作用. 庞可等^[23]以兰州市道路交通领域为例, 模拟分析了温室气体和污染物的协同减排情景. 吴乐敏等^[24]则分析了加速电气化对东莞市 CO₂ 和污染物协同减排的影响. 总体而言, 既有研究大多侧重于城市整体能耗和碳排放的演化分析, 对减碳技术的考虑相对单一, 鲜见考虑氢能和碳捕集等新兴降碳技术. 此外, 对于中长期视角下各项减排技术的经济性相关分析也缺乏深入探讨.

因此, 本文根据临港新片区功能定位和产业结构, 以及对经济社会发展和能源技术进步等方面的分析, 构建了 LEAP-临港模型, 设置了 3 类典型情景. 采用 Logistic 人口生长模型对临港未来人口发展趋势

进行预测; 充分考虑氢能、碳捕获和利用与封存 (CCUS) 技术等减碳技术, 基于大量调研确定不同情景下模型关键输入参数. 同时, 构建学习曲线模型对典型降碳技术成本变化进行分析, 并采用边际减排成本曲线对降碳技术的经济成本及碳减排潜力进行评估. 通过情景对比分析, 本文探索临港新片区“双碳”目标达成的关键影响因素、各类减排手段贡献度及典型减排技术的经济成本, 以期为临港新片区及相似地区的绿色发展路径提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 LEAP 模型架构

作为一种自下而上型分析方法, LEAP 模型基于历史发展关键驱动力及人口、资源、技术等关键数据, 在碳排放目标引导下, 设定不同发展情景进行能源需求量及碳排放预测分析, 其整体结构如图 1 所示. 不同情景下的碳排放总量可由终端部门能源需求量及能源转换部门的能源消耗量, 结合对应的碳排放因子计算得出. 其中, 能源需求预测值取决于终端需求部门活动水平及对应能耗强度; 加工转换模块包括一、二次能源转换、存储及运输过程等.

1.1.1 能耗计算模型

(1) 终端能源需求量 根据各部门活动水平 (如工业部门行业增加值和建筑部门的建筑面积等) 与相应终端能源强度计算得到不同类型的一、二次能源消费量, 如式 (1) 所示.

$$EC_k = \sum_m \sum_n AL_{m,n} \times EI_{m,n} \times S_{m,n,k} \quad (1)$$

式中, EC_k 表示 k 类能源终端需求量 (以标煤计, t). $AL_{m,n}$ 表示 m 部门 n 子部门能源需求的经济活动水平 (m 表示 4 个部门, 分别为居住建筑、公共建筑、工业部门和交通部门), $EI_{m,n}$ 表示对应单位活动水平的能耗强度, $S_{m,n,k}$ 表示 m 部门 n 子部门能源消费中 k 品种能源 (电能、天然气、油品和氢能等) 占比. 在居住建筑、公共建筑、工业部门和交通部门, AL 分别表示家庭总数、建筑面积、工业产值和行驶里程数.

(2) 能源损失量 能源损失量指在能源输送、分配过程中所发生的损失, 如式 (2) 所示.

$$EO_k = \frac{EC_k}{\lambda_k} \times (1 - \lambda_k) \quad (2)$$

式中, EO_k 表示 k 种能源损失量 (以标煤计, t); EC_k 表示 k 种能源的终端需求量 (以标煤计, t); λ_k 表示 k 种能源的输送效率, 单位为 %.

(3) 加工转换消耗量 加工转换部门一般有发电和制氢等部门. 能量在转换过程中不可避免会存在损失, 可表示为在一定时期内投入加工总能量与产出量之间的差额. 转换过程中损失和消耗的能

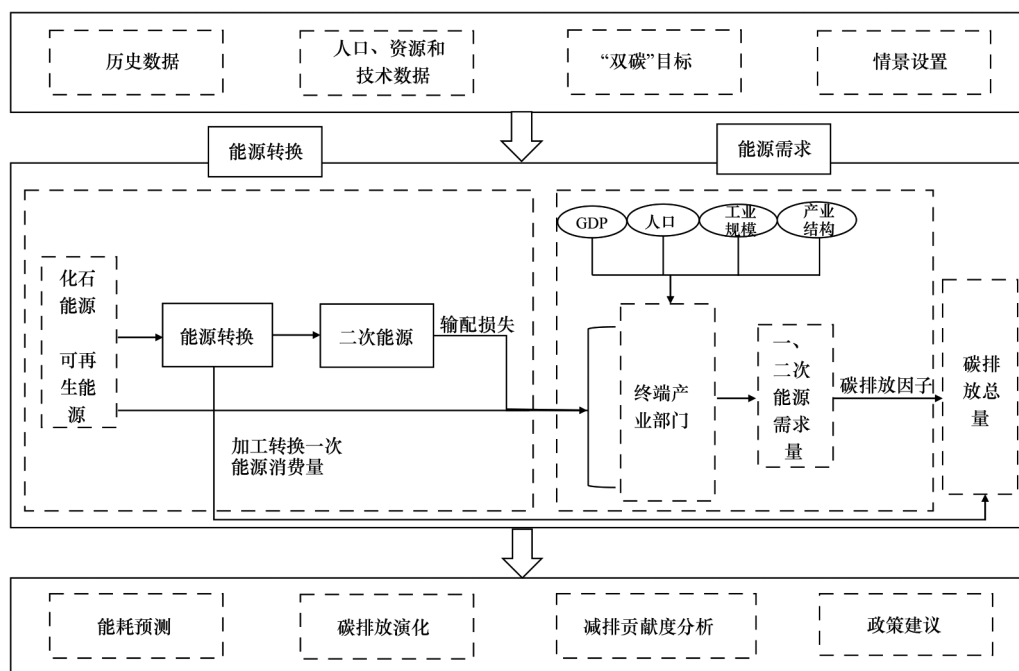


图1 LEAP模型技术路线

Fig. 1 Technology roadmap of the LEAP model

量可表示为:

$$ET_{j,k} = \frac{EC_k + EO_k}{\eta_k} \times (1 - \eta_k) \quad (3)$$

式中, ET_k 表示 k 种能源加工转换所消耗的总能量 (以标煤计, t), η_k 表示 k 种能源的转换效率, 单位为 %.

(4) 能源需求总量 能源需求总量是终端部门能源需求量、加工转换消耗量及能源损失量之和, 如式(4)所示.

$$E_k = EC_k + ET_k + EO_k \quad (4)$$

式中, E_k 表示 k 种能源需求总量 (以标煤计, t).

1.1.2 碳排放量计算模型

根据不同能源消费量和对应碳排放因子, 可确定每种能源的碳排放量, 如式(5)所示.

$$CEC = \sum_k E_k \times EF_k \quad (5)$$

式中, CEC 表示二氧化碳排放总量 (以 CO_2eq 计, t), EF_k 表示对应能源消费量的碳排放系数 (以 CO_2eq 计, $t \cdot t^{-1}$).

1.2 LEAP-临港模型构建

本文基于临港新片区能源、经济、人口和产业等发展现状, 以 2020 年为基准年, 2021~2060 年为预测期, 综合考虑临港新片区资源禀赋、战略定位及未来发展规划, 构建 LEAP-临港模型, 对新片区未来能源消费及碳排放趋势进行分析和预判. 考虑到临港新片区未来将是一个以工商业为主体的产城融合区域, 而且其产业布局中矿石、化学和金属等生产过程中会产生温室气体的行业相对较少, 为此本研究中碳核算过程仅考虑能源活动产生的 CO_2 排放. 如图 2

所示, LEAP-临港模型包含基本条件、需求模块、转化模块和资源模块. 需求模块分为居住建筑、公共建筑、工业部门和交通部门, 转化模块反映出临港新片区的能源生产和传输过程. 结合新片区自身能源资源赋存特点, 电力供应主要依赖于区域内风光等可再生能源发电、氢能发电、天然气发电和区域外调入电.

1.3 中长期参数预测方法

1.3.1 基于回归分析的人口预测模型

本研究采用 Logistic 人口生长模型^[25,26]预测临港新片区未来人口增长情况. 考虑到人口增长会受环境资源及自然条件限制, 不会无止境增加, 最终将达到与环境承载力相适应的人数极值. 这种约束力作用在人口增长率 r 上, r 会随着人口数量 x 增多而减小. 如果将 r 表示为关于人口总数 $x(t)$ 的函数 $r(x)$, 那么它是减函数, 则有方程:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = r(x)x(t), \\ x(t_0) = x_0. \end{cases} \quad (6)$$

假设 $r(x)$ 与 $x(t)$ 为线性关系:

$$r(x) = r_0 - \alpha x(t) \quad (7)$$

式中, r_0 表示固有增长率, 由于受到人口容量限制, 当人口总数 x 达到 x_m 时, 人口停止增长, 即 $r(x_m) = 0$, 则有 $\alpha = \frac{r_0}{x_m}$, 故可得到 Logistic 人口生长模型:

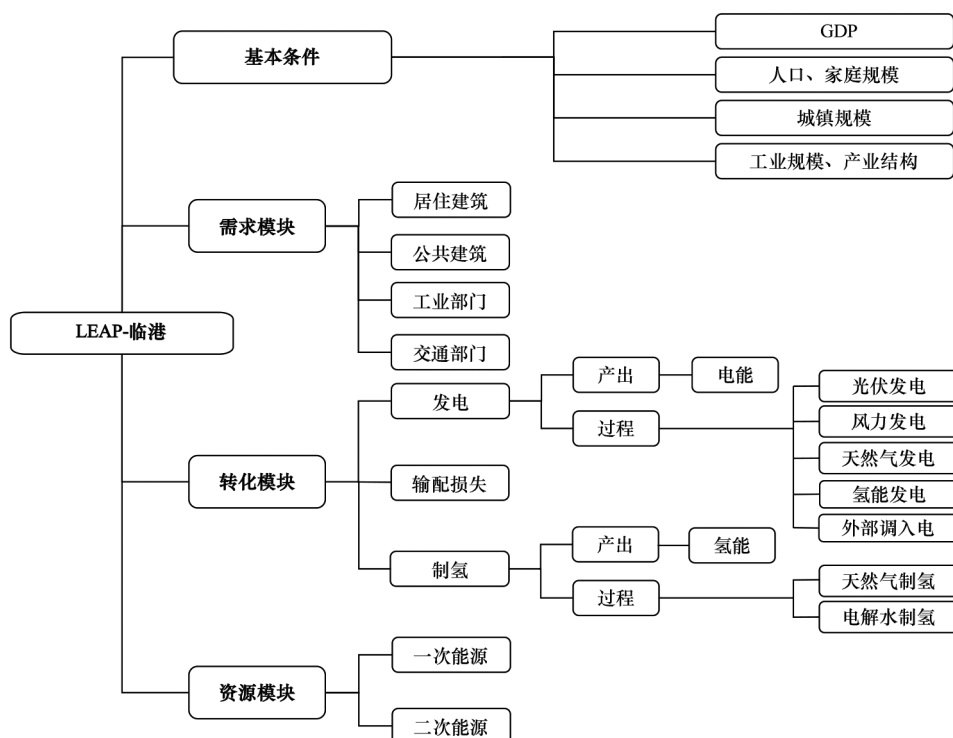


图2 LEAP-临港模型结构示意图

Fig. 2 Structure of the LEAP-Lingang model

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \left[r_0 - \frac{r_0 x(t)}{x_m} \right] x(t), \\ x(t_0) = x_0. \end{cases} \quad (8)$$

解微分方程得到:

$$x(t) = \frac{x_m}{1 + \left(\frac{x_m}{x_0} - 1 \right) e^{-r_0 t}} \quad (9)$$

1.3.2 基于学习曲线的能源技术成本预测模型

学习曲线模型又称经验曲线效应,可用来描述单位生产成本与累积产量之间的关系^[27],表现为产品生产过程中,单位成本随着累积产量的提升按照一定比例下降.根据学习曲线模型,可分析能源技术未来成本发展趋势,从而为政策制定提供参考.学习曲线模型方程可表示为:

$$C = C_0 X^{-b} \quad (10)$$

$$L_R = 1 - 2^{-b} \quad (11)$$

$$P_R = 2^{-b} \quad (12)$$

式中, C 表示单位成本, C_0 表示初始时刻单位发电成本; X 表示累积装机容量, b 表示学习率指数,取值范围为 $0 < b < 1$, b 越接近1表示学习效应越明显^[28]; L_R 表示学习率; P_R 表示成本下降率即技术进步率,当生产数量翻倍时,新产品的单位成本按上述比例递减.

1.4 减碳技术经济性评价模型

为量化分析不同政策和措施的碳减排成本,本文将针对所考虑的各项减排措施中典型减碳技术进

行碳减排边际成本计算,以分析各项减碳技术推广的经济代价^[29,30].同时,为确定最优减碳路径,将通过绘制边际减排成本曲线,以清晰呈现不同减碳技术的减排效果及经济性,有利于政策制定者确定各项减碳技术推广的优先级.各减碳技术单位碳减排成本计算方法如式(13)所示.

$$UC_w = \frac{TC_w^s - TC_w^b}{CR_w^b - CR_w^s} \quad (13)$$

式中, TC_w^s 表示规划情景中实施技术 w 所需的全生命周期成本,包括设备投资成本、运行成本及可变成本. TC_w^b 表示基准情景中采用传统技术或措施所需的全部成本, $CR_w^b - CR_w^s$ 表示实施减排技术 w 后的全生命周期累计减排量. UC_w 即为技术 w 单位碳减排成本,单位为元 $\cdot t^{-1}$.

2 情景设计及数据来源

人口数量、产业结构、GDP和能源强度等因素均会影响区域能源需求及碳排放量.为探寻影响临港新片区中长期碳排放的关键驱动因素,本研究结合新片区“十四五”规划目标及能源利用状况,设计了基准情景、低碳情景和强化低碳情景这3种典型情景,并详述了关键参数的来源.

2.1 情景设计

基准情景、低碳情景和强化低碳情景的差异性主要是通过表1所示的8种减碳措施的导入与否及

实施强度差别进行量化区分。

(1)基准情景 在实现既定经济社会发展目标的前提下,延续当前节能减排政策措施,各部门能源强度在基准年基础上小幅降低,能源结构变化较小。

(2)低碳情景 综合考虑临港未来经济社会可持续发展和节能减排潜力,各部门能源效率有所提高,居民节能意识加强,产业结构及能源结构进一步

优化,节能减碳技术得到较广泛应用。

(3)强化低碳情景 在低碳情景基础上,深入挖掘各部门减碳潜力,电动汽车和氢能交通比例大幅增加;风能、太阳能和氢能等清洁能源发电比例进一步扩大;电解水制氢、CCUS 技术等先进技术得到应用;居民节能意识显著提升,进入强化低碳发展模式。

表 1 3 种情景与各类减碳措施的对应关系¹⁾

Table 1 Relationship between three scenarios and various carbon reduction measures

减碳措施	典型减碳技术/手段	基准情景	低碳情景	强化低碳情景
终端能效提升	工业节能、交通节能和建筑节能等	延续	加强	强化
产业结构优化	淘汰高耗能产业和发展高附加值新型产业等	延续	加强	强化
交通出行方式优化	鼓励公交出行等	延续	加强	强化
电力需求侧管理	需求响应等	×	加强	强化
电气化加速	工业电气化、交通电气化和建筑电气化等	延续	加强	强化
能源传输效率提升	降低管损和降低线损等	延续	加强	强化
清洁能源替代	太阳能发电、风力发电、氢能发电、电解水制氢和氢能车等	延续	加强	强化
CCUS 应用	燃气电厂 CCUS 等	×	×	强化

1)“×”表示在对应情景中不考虑该措施

2.2 主要数据及来源

合理的参数设定直接影响 LEAP-临港模型的预测精准度,本研究采用文献调研和数学模型相结合的方法对输入数据进行设定。社会经济指标(人口和 GDP)等数据来源于《中国(上海)自由贸易试验区临港新片区发展“十四五”规划》^[31]、《2021 上海浦东新区统计年鉴》^[32]和《浦东新区 2020 年 12 月统计月报》^[33],并采用 Logistic 人口生长模型预测新片区 2036~2060 年人口增长情况。由于本文旨在重点探讨临港新片区产业结构优化和能源系统转型对区域低碳发展的支撑作用,为此各情景下人口和 GDP 均保持一致。具体而言,2020、2035 和 2060 年人口分别为 30.5 万人、250 万人和 326 万人;GDP 分别为 1 000 亿元、10 000 亿元和 20 000 亿元。

工业产值数据来源于《中国(上海)自由贸易试验区临港新片区发展“十四五”规划》^[31]、《上海临港新片区统计月报》等相关地区规划文件以及部门统计数据,工业产值能耗来源于《上海产业能效指南(2021 版)》^[34]等报告。交通部门年均行驶里程参考《上海市第六次综合交通调查报告》^[35],燃油经济性、能耗数据参考相关研究报告^[36,37],交通运输结构参考《中国(上海)自由贸易试验区临港新片区综合交通“十四五”规划》^[38]及相关报告^[39]。建筑部门人均面积参考文献[40,41],建筑用能比例及能耗数据等参考《上海产业能效指南(2021 版)》^[34]。供能部门风能发电、太阳能发电等相关数据参考《中国(上海)自由贸易试验区临港新片区综合能源“十四五”规划》^[42]、《临港新片区综合能源发展指标体系研究报告》等规

划文件。氢能相关数据参考《上海临港新片区打造高质量氢能示范应用场景实施方案(2021-2025 年)》^[43]及行业研究报告^[44,45]。CCUS 技术数据参考相关文献和报告^[46,47]。能源输送损失参考《上海市统计年鉴》等统计数据。此外,相关技术成本采用学习曲线方法进行预测。模型各情景关键指标参数设置如表 2 所示。

3 结果与讨论

3.1 不同情景下的能源消费预测分析

图 3 为 2020~2060 年临港新片区 3 种情景下的总能耗演化结果。3 种情景下,能源消费总量均呈逐渐增长趋势。其中,基准情景下,在 2020~2035 年间,由于新片区人口大量流入及产业批量化落地,用能总量(以标煤计)呈明显增长趋势,2035 后增势放缓,2060 年达 1 941.3 万 t,约为 2020 年的 7.2 倍,年均增速约 5.06%,呈现出“准线性”增长特征。低碳情景下,得益于各种节能措施的实施,能源消费总量从 2020 年的 269.3 万 t 增长至 2060 年的 1 304.3 万 t,年均增速为 4.02%,低于基准情景。相比于低碳情景,强化低碳情景下各类节能减排措施协同增效,力度进一步强化和提升。通过充分挖掘新片区各种节能潜力,能源消费总量从 2020 年起小幅稳定增长至 2035 年的 880.8 万 t,而后进入平台期,缓慢增长至 2060 年的 1 020.2 万 t,较基准情景下同年份节能 47.4%,降幅为 921.1 万 t。

为进一步深入探讨临港新片区中长期能源结构演化特性,图 4 为 3 种情景下典型年份的一次能源消费构成。基准情景下,能源消费主要以化石能源为

表 2 不同情景主要参数设置¹⁾
Table 2 Main parameter settings for different scenarios

减碳措施	主要参数/单位	基准年 2020 年	基准情景		低碳情景		强化低碳情景	
			2035 年	2060 年	2035 年	2060 年	2035 年	2060 年
终端能效提升	工业能源强度 5 a 下降率/%	9.6	6.6	5	7.6	7	8.6	8
产业结构优化	第三产业占比/%	48.1	51.5	63	53	73	63	75.3
交通出行方式优化	公共交通占比/%	25	53.5	72.5	56.5	75	72.5	85
电力需求侧管理	电网利用率较基准提高率/%	—	—	—	3	10	5	15
电气化加速	终端电力占比/%	53	71.2	78	76	85	79	90
	私家车电气化占比/%	10	40	80	40	100	70	100
能源输送效率提升	输电损失/%	5	4	3.5	3.5	3	3	2.5
清洁能源替代	非化石能源发电占比/%	22	33	41	40	52	55	78
	氢能公交车占比/%	0.5	5	8	10	15	45	55
	太阳能发电装机容量/MW	188	500	1 000	800	1 200	900	2 000
	风力发电装机容量/MW	465	1 200	1 500	1 500	2 400	3 000	4 000
	氢能发电装机容量/MW	—	—	—	5	50	50	500
	电解水制氢装机容量/MW	—	—	—	5	25	35	700
CCUS 应用	二氧化碳捕集率/%	—	—	—	—	—	90	96

1) “—”表示对应情景下的对应年份不考虑该措施;终端能源利用效率提升所对应的工业能源强度 5 a 下降率根据规划目标设定每个“五年计划”期间的平均下降率;CCUS 应用措施中对应的二氧化碳捕集率为实施 CCUS 技术的天然气发电机组可实现的二氧化碳捕集率

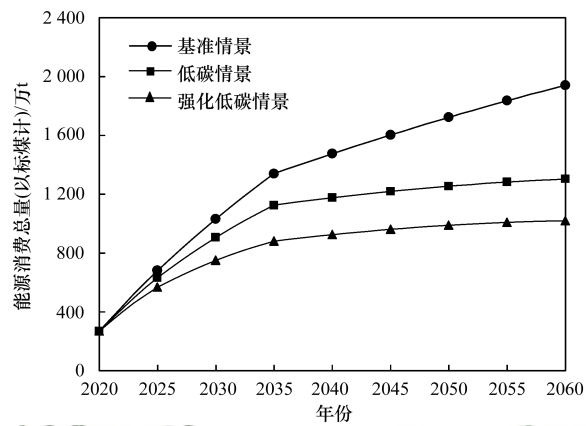


图 3 2020~2060 年不同情景下临港能源消费总量预测
Fig. 3 Total energy consumption forecast under different scenarios from 2020 to 2060

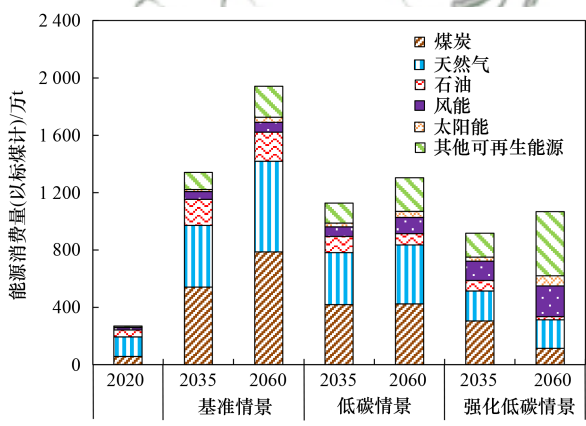


图 4 不同情景下典型年份一次能源消费构成
Fig. 4 Primary energy consumption in typical years under different scenarios

主,煤炭占比将从 21% 增长至 2060 年的 40.5%,可再生能源占比从 2020 年的 10% 缓慢增长至 2060 年的 16.5%,天然气及石油消费量均将持续上升。低碳情景下,煤炭等化石能源消费量将从 2020 年快速增长至 2035 年,随后进入平台期缓慢增长,可再生能源在一次能源消费中占比将从 2020 年的 10% 持续增长至 2060 年的 30%。强化低碳情景下,能源结构将发生根本性转变,化石能源消费量远低于其他两种情景且占比将持续降低,可再生能源消费量大幅攀升,2060 年可再生能源占比将达到一次能源消费总量的 69%,能源结构逐步趋于清洁化和低碳化。

图 5 为不同情景下典型年份终端能源消费结构。在产业结构优化和终端能效提升等措施的作用下,低碳情景和强化低碳情景下的终端能源需求相比基准情景明显降低。3 种情景中,电能始终为最主要的

能源需求,且占比不断增加。2060 年,基准情景下电能可在终端能源消费中占比为 78%,而低碳情景和强化低碳情景的占比分别达到 85% 和 91%,相比基准情景分别提高 7% 和 13%,这归因于在能源消费侧采取的电气化加速措施所带来的能源消费转型效果。虽然引入了氢能交通,但目前主要考虑其在公共交通领域的应用,私家车的更替还是以电气化为导向,为此氢能在终端能源消费中占比相对较低。

3.2 不同情景下的碳排放预测分析

图 6 为临港新片区 2020~2060 年 3 种情景下的碳排放趋势。结果表明,2020~2025 年间,3 种情景下的碳排放均呈较快增长趋势,这主要归因于“十四五”期间新片区新兴产业大量进驻、人口快速扩张和 GDP 高速增长。2025 年后,基准情景下新片区碳排放量将继续呈现较高水平,2035 年后进入稳定期,2035

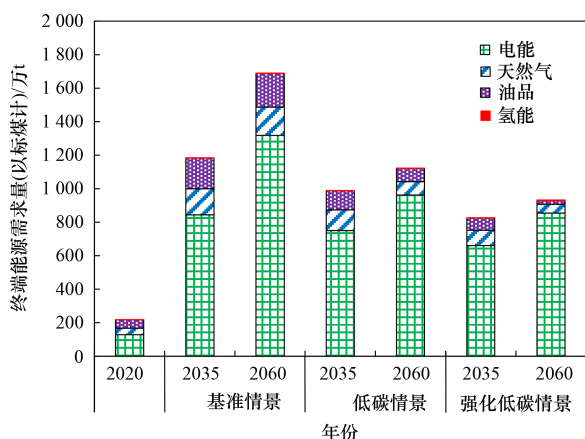


图5 不同情景下典型年份终端能源需求结构
Fig. 5 Terminal energy consumption in typical years under different scenarios

年和2060年碳排放量分别达到2 741.4万t和3 282.9万t。低碳情景下,由于能源结构优化,碳排放量相较基准情景大幅降低,2035年达到峰值,随后进入平台期,排放量稳中略降,2035年和2060年分别为2 081.7万t和1 657.9万t,相比基准情景分别下降24%和49.4%。在强化低碳情景下,各类新兴减碳技术潜能充分发挥,能源结构进一步优化,新片区碳排放达峰时间提前至2030年左右,峰值水平降低至1 350.9万t。峰值拐点后碳排放量在CCUS碳捕集技术等先进减碳技术加持下迅速下降,2060年降至194.5万t,相比基准情景降低94%,趋于碳中和目标。

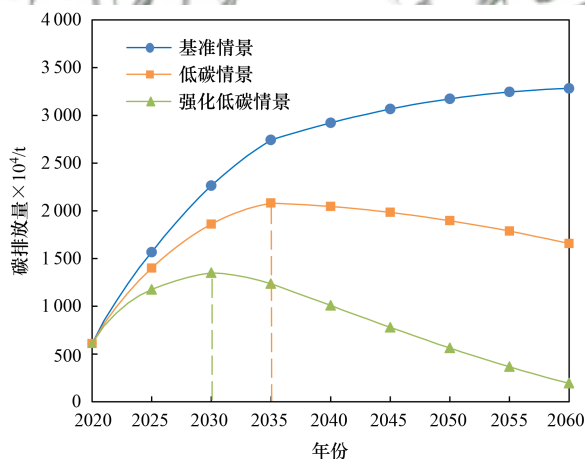
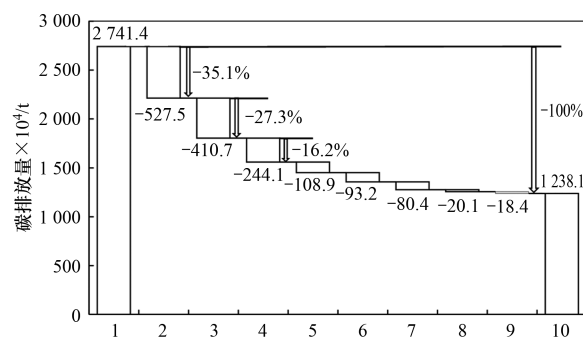


图6 2020~2060年不同情景下临港碳排放量预测
Fig. 6 Prediction of carbon emissions under different scenarios from 2020 to 2060

3.3 不同减碳措施的贡献度分析

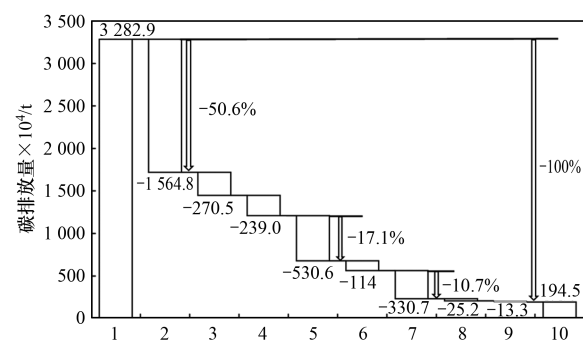
与基准情景相比,强化低碳情景下临港新片区不同减碳措施对减排的贡献率如图7和图8所示。总体而言,清洁能源替代、产业结构优化、终端能效提升及CCUS应用等措施对新片区减碳意义重大。到

2035年,清洁能源替代的贡献度最高,减碳量(以 CO_2eq 计)达527.5万t,可达到2035年总减排量的35.1%;产业结构优化次之,实现410.7万t减排量,减排贡献率为27.3%;终端能效提升和CCUS应用的减碳贡献率分别为16.2%和7.24%。到2060年时,清洁能源替代减排贡献率进一步提升,达50.6%;CCUS应用减排贡献率跃升到第二位,达到17.1%;电气化加速的贡献率提升至10.7%,产业结构优化和终端能效提升的减排贡献率分别为8.75%和7.7%;交通出行方式优化和能源传输效率提升等减排措施贡献率相对较小。



1. 基准情景, 2. 清洁能源替代, 3. 产业结构优化, 4. 终端能效提升, 5. CCUS应用, 6. 电力需求侧管理, 7. 电气化加速, 8. 能源传输效率提升, 9. 交通出行方式优化, 10. 强化低碳情景; 正值表示对应情景下年碳排放量, 负值表示对应减碳措施的减碳量; 百分数表示对应减碳措施的减碳贡献率

图7 2035年临港新片区各减碳措施的减排贡献率
Fig. 7 Contribution level of emission reduction by various measures in 2035



1. 基准情景, 2. 清洁能源替代, 3. 产业结构优化, 4. 终端能效提升, 5. CCUS应用, 6. 电力需求侧管理, 7. 电气化加速, 8. 能源传输效率提升, 9. 交通出行方式优化, 10. 强化低碳情景; 正值表示对应情景下年碳排放量, 负值表示对应减碳措施的减碳量; 百分数表示对应减碳措施的减碳贡献率

图8 2060年临港新片区各减碳措施的减排贡献率
Fig. 8 Contribution level of emission reduction by various measures in 2060

图9所示为中长期视角下不同减碳措施叠加后新片区的碳排放情况。为实现从基准情景到强化低碳情景的转型,即从图9的上边界排放轨迹至下边界排放轨迹,新片区需协同推进各项减碳措施。整体来

看,各种减碳措施的实施均可降低碳排放峰值.其中,清洁能源替代措施的实施大大促进了临港新片区碳达峰时间的提前,40年间累积实现30 343.9万t碳减排量,贡献了42.2%的减排,是实现中长期减排的最主要驱动力.终端能效提升及产业结构优化分别达成8 336.1万t和12 465.2万t的碳减排量,是中短期减排的主要驱动力,通过终端能效提升及产业结构优化措施的推进使得碳达峰时间进一步提前.其他措施虽未对达峰时间提前起到关键性作用,但对碳达峰后临港新片区碳中和目标的实现起到了重要作用.CCUS技术的应用是中长期减排的主要驱动力之一,累积减排10 445万t碳,贡献率达14.5%.然而,仅仅使用节能和减排措施并不能使临港新片区在2060年完全实现碳中和,还需要利用碳汇等措施促成目标的实现.

3.4 典型减碳技术的减排潜力及成本分析

本文通过分析各类减碳技术成本,采用边际减排成本曲线对临港新片区强化低碳情景下不同减排措施中典型减碳技术的经济成本进行评估,直观展现各项减碳技术的减排潜力及代价.

表3和图10所示为典型减碳技术的减排潜力和边际成本.就单项技术的减排潜力而言,CCUS技术的减排效果最为显著,累积减排量(以CO₂eq计)达到了10 445万t,是实现碳减排的有力支

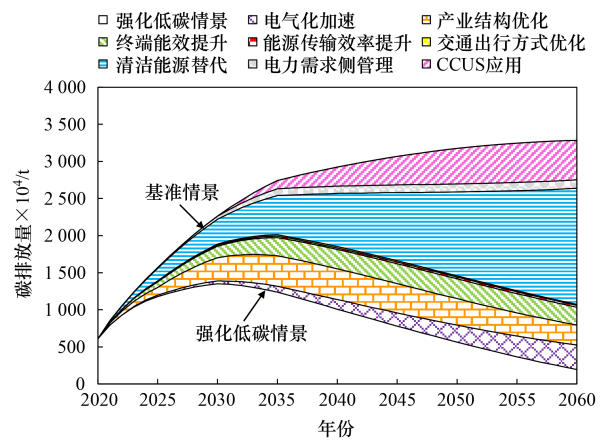


图9 各种减碳措施的贡献演变

Fig. 9 Evolution of contributions of various mitigation measures

撑.风能发电的减排效果同样十分显著,达到了6 293.1万t,其原因在于临港新片区滨海城市的区位优势,具有较大的深远海风电发展潜力.氢能交通推广同样拥有较大的减排成效,累积减排量达到了2 179万t,可以有效降低交通部门碳排放水平.建筑节能技术和太阳能发电技术也具有一定的减排空间,累积减碳量分别达到2 386万t和926.4万t.此外,氢能发电技术及电解水制氢技术由于氢能总体应用规模较小,所以减排效果难以彰显,但从长远来看,是我国未来实现净零排放的强有力支撑.

表3 不同减碳措施下典型减碳技术的减排潜力和边际成本¹⁾

Table 3 Emission reduction potential and marginal cost of typical emission reduction technology

减碳措施	典型减碳技术	年度碳减排量×10 ⁴ /t	累积碳减排量×10 ⁴ /t	边际减排成本/元·t ⁻¹
终端能效提升	建筑节能	101.9	2 368	93.5
	氢能车	141.8	2 179	123.6
	太阳能发电	40.1	926.4	90.1
清洁能源替代	风力发电	216.7	6 293.1	192
	氢能发电	39.9	503.2	1 438.7
	电解水制氢	19.01	240.8	549
CCUS应用	燃气电厂CCUS	530.6	10 445	405
能源传输效率提升	降低线损	6.37	423.8	-84.4

1) 各项减碳技术对于碳减排的作用可能会互相影响,因此整体减排效果不应由各项减碳技术单独实施时的减排效果相加得到,而应在LEAP-临港模型中输入各项减碳技术同时作用时所影响的参数,并得出多技术协同作用时的减排效果

从减排经济效益的角度考虑,所分析的8项减碳技术中经济效益最好的是降低线损技术,每减排1t碳,可节省84.4元,达成了经济性和环境性的双赢.另外7项技术则需要额外付出减排成本,成本较高的几项措施为氢能发电、电解水制氢及CCUS技术,分别达到了1 438.7、549和405元·t⁻¹.这主要是因为氢能及CCUS技术在国内尚处于示范推广阶段,作为新兴技术还不太成熟,因此前期投资成本较高.虽然这3项技术的成本较高,但对实现净零排放具有重要意义.太阳能发电及风能发电的减排成本分别为90.1

元·t⁻¹和192元·t⁻¹,未来仍有较大下降空间.节能及氢能车的边际减排成本分别为93.5元·t⁻¹和123.6元·t⁻¹,减排潜力及减排成本均处于中等水平.

4 政策建议

作为上海经济新的增长极,临港新片区面临经济高速发展背景下实现“碳达峰、碳中和”目标的巨大挑战,基于本研究成果,提出以下4点建议.

(1)情景对比分析结果表明,不同的政策导向与减碳技术推广力度将导致完全迥异的碳排放演化路

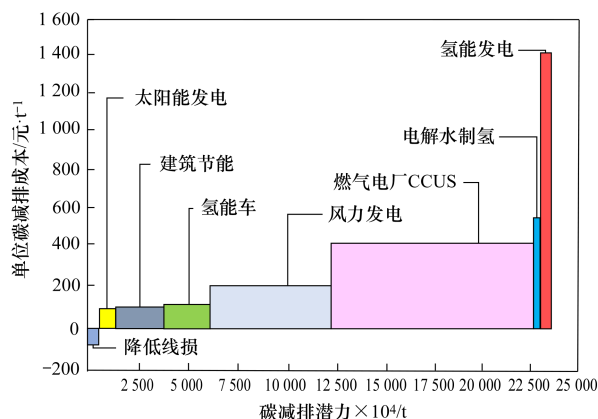


图 10 典型减碳技术的减排潜力和边际成本

Fig. 10 Emission reduction potential and marginal cost of typical emission reduction technology

径。为此,为打破区域经济、能源与环境的三重困境,需要尽快确立顶层设计思路,制定临港新片区“双碳”规划总体目标与路径,明确提出碳达峰和碳中和时间节点。

(2)减排贡献度分析表明,清洁能源替代是临港新片区中长期碳减排的最主要驱动力。为此,新片区应结合资源条件,加快构建以新能源为主体的现代能源体系和新型电力系统。一方面,充分结合区内产业园区开发、商业楼宇建设以及交通港口等基础设施,形成多业态融合的“光伏+”应用场景,推进分布式光伏整区域开发;另一方面,利用滨海城市优势,全面布局近海和深远海风电基地,并因地制宜推动陆上分散式风电建设。

(3)典型减碳技术的经济性分析表明,氢能、CCUS等技术目前成本相对较高,但在中长期视角下是不可或缺的减碳技术。为此,临港新片区应充分发挥在氢能领域的技术集聚优势,以公共交通、集卡和环卫用车等为切入口,加快氢能交通推广力度,并完善加氢站等相关基础设施;同时,加快可再生能源电解水制氢、燃料电池等核心技术研发,降低技术成本,支撑新能源比例的逐渐提升。碳达峰后可结合本地燃气电站运行,开展CCUS技术的示范应用,进一步降低本地碳排放。

(4)充分发挥临港新片区开放的政策优势,构建灵活的能源和碳市场机制,在减碳技术推广应用的同时,叠加有效的市场手段,从而以最低的成本实现全社会节能降碳。

5 结论

(1)随着经济快速增长,若未加引导措施,临港新片区能源消费总量将持续增长至较高水平,在2060年达到1941.3万t,且主要以化石能源消费为

主,占比达83.5%;而通过各种强有力节能降碳措施干预,有望达成能源消费与经济增长的脱钩,并且实现能源消费的清洁化与电气化。

(2)未来临港新片区的碳排放量在基准情景下将呈现持续增长趋势,在各项减碳措施的促进下,低碳情景及强化低碳情景的碳排放量相比基准情景将大幅下降,在2060年将分别下降49.4%和94%。强化低碳情景下临港新片区可在2030年与全国同步实现碳达峰目标。

(3)所考虑的各项减碳措施均能够降低二氧化碳峰值排放,但只有清洁能源替代、产业结构优化和终端能效提升可使达峰时间提前,中期(至2035年)分别贡献35.1%、27.3%和16.2%的碳减排量,长期(至2060年)分别贡献50.6%、8.75%和7.7%的碳减排量。CCUS是长期碳减排的主要驱动力之一,可为新片区碳中和目标的实现提供有力支撑。

(4)强化低碳情景下典型减碳技术的经济性分析表明,降低线损在实现碳减排的同时具有较好的经济效益,可实现无悔减排,但减排潜力一般。长期来看,CCUS技术和风力发电的累积碳减排潜力最大;氢能发电、电解水制氢及CCUS技术减排成本较高,但对于实现净零排放意义重大。

参考文献:

- [1] 王力,冯相昭,马彤,等.典型城市减污降碳协同控制潜力评价研究:以渭南市为例[J].环境科学研究,2022,35(8):2006-2014.
Wang L, Feng X Z, Ma T, et al. Evaluation of co-controlling air pollutants and carbon emission potential in typical cities: a case study in Weinan city [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(8): 2006-2014.
- [2] 洪竞科,李沅潮,郭偲悦.全产业链视角下建筑碳排放路径模拟:基于RICE-LEAP模型[J].中国环境科学,2022,42(9):4389-4398.
Hong J K, Li Y C, Guo S Y. Simulating building carbon emission path with a RICE - LEAP model from the perspective of the whole supply chain [J]. China Environmental Science, 2022, 42(9): 4389-4398.
- [3] 宋鹏,张慧敏,毛显强.面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径[J].中国环境科学,2022,42(3):1446-1455.
Song P, Zhang H M, Mao X Q. Research on Chongqing's carbon emission reduction path towards the goal of carbon peak [J]. China Environmental Science, 2022, 42(3): 1446-1455.
- [4] Huo T F, Xu L B, Feng W, et al. Dynamic scenario simulations of carbon emission peak in China's city-scale urban residential building sector through 2050 [J]. Energy Policy, 2021, 159, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112612.
- [5] Fang K, Li C L, Tang Y Q, et al. China's pathways to peak carbon emissions: new insights from various industrial sectors [J]. Applied Energy, 2022, 306, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118039.
- [6] 燕东,刘枫,叶鹏飞,等.碳达峰情景预测的主要方法及模型[J].环境保护与循环经济,2021,41(7):97-101.
- [7] Liang S, Lin X Y, Liu X X, et al. The pathway to China's carbon neutrality based on an endogenous technology CGE model [J].

- International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, **19**(10), doi: 10.3390/ijerph19106251.
- [8] 许鸿伟, 汪鹏, 任松彦, 等. 基于 CGE 模型的电力低碳转型速度调控策略研究——以粤港澳大湾区为例[J]. 气候变化研究进展, 2022, **18**(1): 81-96.
- Xu H W, Wang P, Ren S Y, *et al.* Research on the speed control strategy of low carbon power transition based on CGE model—take the GBA as an example[J]. Climate Change Research, 2022, **18**(1): 81-96.
- [9] Allena-Ozolina S, Pakere I, Jaunzems D, *et al.* Integrated MARKAL-EFOM system (TIMES) model for energy sector modelling [A]. In: Proceedings of the IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)[C]. Riga: IEEE, 2020. 1-7.
- [10] 刘睿, 姚西龙. 山西省电力部门实现碳中和的路径研究[J]. 中国煤炭, 2021, **47**(8): 8-16.
- Liu R, Yao X L. Study on the realizing path of carbon neutrality in power sector of Shanxi province[J]. China Coal, 2021, **47**(8): 8-16.
- [11] Comodi G, Cioccolanti L, Gargiulo M. Municipal scale scenario: analysis of an Italian seaside town with MarkAL-TIMES [J]. Energy Policy, 2012, **41**: 303-315.
- [12] 朱淑瑛, 刘惠, 董金池, 等. 中国水泥行业二氧化碳减排技术及成本研究[J]. 环境工程, 2021, **39**(10): 15-22.
- Zhu S Y, Liu H, Dong J C, *et al.* Mitigation technologies and marginal abatement cost curves for cement industry in China[J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(10): 15-22.
- [13] 许绩辉, 王克. 中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(7): 3412-3424.
- Xu J H, Wang K. Medium- and long-term carbon emission forecast and technological emission reduction potential analysis of China's civil aviation industry[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(7): 3412-3424.
- [14] 杨柏, 秦广鹏, 邬钦. “双碳”目标下中国省域碳排放核算分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5840-5849.
- Yang B, Qin G P, Wu Q. Analysis of provincial CO₂ emission accounting in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5840-5849.
- [15] 苗安康, 袁越, 吴涵, 等. 中国省域碳达峰路径与政策[J]. 环境科学, 2023, **44**(8): 4623-4636.
- Miao A K, Yuan Y, Wu H, *et al.* Pathway and policy for China's provincial carbon emission peak [J]. Environmental Science, 2023, **44**(8): 4623-4636.
- [16] 付佩, 兰利波, 陈颖, 等. 面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 2365-2374.
- Fu P, Lan L B, Chen Y, *et al.* Life cycle prediction assessment of energy saving and new energy vehicles for 2035[J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 2365-2374.
- [17] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 等. “双碳”背景下长三角地区碳排放情景模拟研究[J]. 生态经济, 2022, **38**(11): 13-18, 35.
- Li J B, Huang X J, Chuai X W, *et al.* Scenario simulation of carbon emissions in the Yangtze River Delta under the background of “Dual Carbon”[J]. Ecological Economy, 2022, **38**(11): 13-18, 35.
- [18] Cai L Y, Duan J L, Lu X J, *et al.* Pathways for electric power industry to achieve carbon emissions peak and carbon neutrality based on LEAP model: a case study of state-owned power generation enterprise in China [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, **170**, doi: 10.1016/j.cie.2022.108334.
- [19] 陈睿, 饶政华, 刘继雄, 等. 基于 LEAP 模型的长沙市能源需求预测及对策研究[J]. 资源科学, 2017, **39**(3): 482-489.
- Chen R, Rao Z H, Liu J X, *et al.* Prediction of energy demand and policy analysis of Changsha based on LEAP model [J]. Resources Science, 2017, **39**(3): 482-489.
- [20] Hu G X, Ma X M, Ji J P. Scenarios and policies for sustainable urban energy development based on LEAP model - a case study of a postindustrial city: Shenzhen China [J]. Applied Energy, 2019, **238**: 876-886.
- [21] 刘惠, 王真, 曹丽斌, 等. 基于 LEAP 模型的鹤壁市农村生活碳排放研究[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(11): 25-35.
- Liu H, Wang Z, Cao L B, *et al.* Research of rural living carbon emission in Hebi based on LEAP model [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(11): 25-35.
- [22] 周伟铨, 庄贵阳. 雄安新区零碳城市建设路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, **31**(9): 122-134.
- Zhou W D, Zhuang G Y. Zero-carbon city construction pathways of Xiongan New area [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, **31**(9): 122-134.
- [23] 庞可, 张芊, 马彩云, 等. 基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3386-3395.
- Pang K, Zhang Q, Ma C Y, *et al.* Forecasting of emission co-reduction of greenhouse gases and pollutants for the road transport sector in Lanzhou based on the LEAP model [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3386-3395.
- [24] 吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 等. 东莞市低碳路径下加速电气化对 CO₂ 和污染物协同减排影响[J]. 环境科学, 2023, **44**(12): 6653-6663.
- Wu L M, Chen B Y, Ou L C, *et al.* Impact of accelerated electrification under the low carbon path in Dongguan city on the coordinated emission reduction of CO₂ and pollutants [J]. Environmental Science, 2023, **44**(12): 6653-6663.
- [25] 王沛林. 四类预测人口方法的对比及 Logistic 人口生长模型的改进[J]. 保定学院学报, 2022, **35**(3): 87-98.
- Wang P L. Comparison of four kinds of population prediction methods and improvement of Logistic population growth model [J]. Journal of Baoding University, 2022, **35**(3): 87-98.
- [26] 陈霞, 肖岚. Logistic 模型的改进与中国人口预测[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, **35**(2): 239-243.
- Chen X, Xiao L. Improved Logistic model and China population forecast [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020, **35**(2): 239-243.
- [27] 王彦哲, 欧训民, 周胜. 基于学习曲线的中国未来制氢成本趋势研究[J]. 气候变化研究进展, 2022, **18**(3): 283-293.
- Wang Y Z, Ou X M, Zhou S. Future cost trend of hydrogen production in China based on learning curve [J]. Climate Change Research, 2022, **18**(3): 283-293.
- [28] 阮前途, 陈赞, 潘智俊. 新型电力系统对实现沿海城市双碳目标贡献的探讨[J]. 电力系统自动化, 2022, **46**(14): 11-18.
- Ruan Q T, Chen Y, Pan Z J. Discussion on contributions of novel power system to achieving carbon emission peak and carbon neutrality of coastal city [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, **46**(14): 11-18.
- [29] 刘耕源, 郭丽思, 陈钰, 等. 城市碳中和措施的边际减排成本分析——以北京市为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, **59**(2): 249-259.
- Liu G Y, Guo L S, Chen Y, *et al.* Marginal abatement cost analysis of urban carbon neutralization measures: taking Beijing as

- a case [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023, **59**(2): 249-259.
- [30] 董金池, 汪旭颖, 蔡博峰, 等. 中国钢铁行业 CO₂ 减排技术及成本研究[J]. 环境工程, 2021, **39**(10): 23-31, 40.
- Dong J C, Wang X Y, Cai B F, *et al.* Mitigation technologies and marginal abatement cost for iron and steel industry in China [J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(10): 23-31, 40.
- [31] 上海市人民政府. 上海市人民政府关于印发《中国(上海)自由贸易试验区临港新片区发展“十四五”规划》的通知[EB/OL]. <https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20210812/bd6b7c5e895d42ac8885362bd0ae6e0c.html>, 2021-08-12.
- [32] 上海市浦东新区统计局, 国家统计局浦东调查队. 2021 上海浦东新区统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [33] 上海市浦东新区人民政府. 浦东统计月报[EB/OL]. https://www.pudong.gov.cn/zwgk/tjj_gkml_ywl_tjsj_yb/2022/326/298309/287583d0d6954bab8438dfc320e8f503.pdf, 2021-02-18.
- [34] 秦宏波, 陶然, 薛恒荣, 等. 上海产业能效指南(2021 版)[R]. 上海: 上海市节能中心, 2021.
- [35] 上海市交通委员会. 小客车使用强度持续下降, 总出行量维持增长态势! 上海市第六次综合交通调查成果发布[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/2A8vz-Wx3vGkJVTSj8RQCg>, 2022-01-30.
- [36] 薛露露, 靳雅娜, 禹如杰, 等. 中国道路交通 2050 年“净零”排放路径研究[R]. 北京: 世界资源研究所, 2019. 1-51.
- [37] 奚文怡, 蒋慧, 鹿璐, 等. 城市的交通“净零”排放: 路径分析方法、关键举措和对策建议[R]. 北京: 世界资源研究所, 2020. 1-48.
- [38] 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区管理委员会. 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区综合交通“十四五”规划[EB/OL]. <https://www.lingang.gov.cn/upload/files/2021/2/67db551efb9563a3.pdf>, 2021-01-26.
- [39] International Energy Agency (IEA). An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. Paris: IEA, 2021.
- [40] 潘毅群, 魏晋杰, 汤朔宁, 等. 上海市建筑领域碳中和预测分析[J]. 暖通空调, 2022, **52**(8): 18-28.
- Pan Y Q, Wei J J, Tang S N, *et al.* Prediction and analysis of carbon neutrality in building sector in Shanghai [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, **52**(8): 18-28.
- [41] 戚仁广, 凡培红, 丁洪涛. 碳中和背景下我国建筑面积预测[J]. 建设科技, 2021, (11): 14-18.
- Qi R G, Fan P H, Ding H T. Forecast of China's building area under background of carbon neutrality [J]. Construction Science and Technology, 2021, (11): 14-18.
- [42] 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区管理委员会. 关于印发《中国(上海)自由贸易试验区临港新片区综合能源“十四五”规划》的通知[EB/OL]. <https://www.lingang.gov.cn/html/website/lg/index/government/file/1481569823465238530.html>, 2021-01-27.
- [43] 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区管理委员会. 关于印发《临港新片区打造高质量氢能示范应用场景实施方案(2021-2025 年)》的通知[EB/OL]. <https://www.lingang.gov.cn/pdfs/2021-09-18/0f486d887649453d9487d0ecaedd9004.pdf>, 2021-09-18.
- [44] 李婷, 刘玮, 李抒苒, 等. 开启绿色氢能新时代之匙: 中国 2030 年“可再生氢 100”发展路线图[R]. 北京: 落基山研究所, 中国氢能联盟研究院, 2022.
- [45] 张永伟, 张真, 苗乃乾, 等. 中国氢能产业发展报告 2020 [R]. 北京: 中国电动汽车百人会, 2020.
- [46] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)—中国 CCUS 路径研究[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- [47] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 1128-1138.
- Zhao Z Y, Yao S, Yang S P, *et al.* Under goals of carbon peaking and carbon neutrality: status, problems, and suggestions of CCUS in China [J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 1128-1138.

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)