

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪便还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

中国省域碳达峰路径与政策

苗安康¹, 袁越¹, 吴涵², 马欣¹, 邵辰宇¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 2. 南京工程学院智能电网研究院, 南京 211167)

摘要: 从省域层面推动发达地区率先碳达峰是中国实现 2030 年前碳达峰目标的有效途径. 以江苏省为例, 构建了省级 LEAP-Jiangsu 模型, 结合改进的多层对数平均迪氏分解 (M-LMDI) 模型、Tapio 脱钩模型和减污降碳协同效应模型探索碳排放的关键影响因素及碳达峰路径. 采用改进的多层 M-LMDI 模型分析了江苏省历史时期和未来预测情况下碳排放的主要影响因素; 基于历史碳排放分解结果和规划目标, 构建了多种发展情景的 LEAP-Jiangsu 模型, 预测江苏省碳排放达峰时间及达峰水平; 运用 Tapio 脱钩模型和减污降碳协同效应模型, 研究碳排放与经济发展的关系和碳排放与大气污染物排放的协同效应. 结果表明, 2035 年江苏省一次能源需求总量以标煤计约为 401.2 ~ 474.6 Mt, 终端能源需求量约为 319.2 ~ 382.3 Mt; 江苏省最可能在 2025 ~ 2030 年实现碳达峰目标, 碳排放峰值约为 815.3 ~ 845.7 Mt; 能源强度降低、产业结构优化、提高终端电气化水平和能源结构调整等节能减排措施的减排贡献率分别为 33.1%、26.8%、21% 和 15.2%.

关键词: 碳达峰路径; 多层 LMDI 模型; LEAP-Jiangsu 模型; Tapio 脱钩指数; 减污降碳协同效应

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4623-14 DOI: 10.13227/j.hjks.202208273

Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak

MIAO An-kang¹, YUAN Yue¹, WU Han², MA Xin¹, SHAO Chen-yu¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Smart Grid Research Institute, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: An effective way for China to achieve a carbon emission peak by 2030 is to encourage developed regions to take the lead in attaining carbon peaking at the regional level. Considering Jiangsu Province as an example, this study established a provincial low emissions analysis platform (LEAP-Jiangsu) model. It combined the improved multilevel logarithmic mean Divisia index (M-LMDI) model, Tapio decoupling model, and the synergistic effect of pollution and carbon reduction model to explore the key influencing factors of carbon emissions and carbon reduction paths. The improved M-LMDI model was used to analyze the factors influencing historical and future carbon emissions in Jiangsu Province. Based on the analysis results and planning objectives, a LEAP-Jiangsu model involving various development scenarios was established to predict the time and value of carbon emission peaks. The Tapio decoupling and synergistic effect models were used to clarify the relationship between carbon emissions and economic development, the synergistic effect of carbon, and air pollutant emission reduction. The prediction results demonstrated that the total primary energy demand of Jiangsu Province in 2035 was predicted to be approximately 401.2-474.6 Mt, and the final energy demand would be approximately 319.2-382.3 Mt. Jiangsu Province was most likely to achieve the goal of carbon peaking in 2025-2030, and the peak carbon emission was approximately 815.3-845.7 Mt. The contribution rates of energy conservation and emission reduction measures such as energy intensity reduction, industrial structure optimization, terminal electrification improvement, and energy structure adjustment were 33.1%, 26.8%, 21%, and 15.2%, respectively.

Key words: carbon emission peak path; M-LMDI model; LEAP-Jiangsu model; Tapio decoupling index; synergistic effect of the carbon and pollutant reduction

自工业革命以来全球平均温度上升加快, 灾害性极端天气频发^[1]. 作为世界上能源生产、消费和进口最多的国家, 中国已成为全球碳减排领域的主要国家之一, 中国的经济发展及碳排放变化趋势逐渐成为全球关注的焦点^[2~4]. 2016 年, 中国加入《巴黎协定》, 承诺为全球平均气温上升幅度控制在 1.5℃ 以内努力^[5]. 在 2020 年第 75 届联合国大会上, 中国提出了碳排放力争于 2030 年前达峰, 2060 年前实现碳中和的“双碳”目标^[6]. 目前, 中国仍存在能源使用效率低下且投资效率较低的问题^[7], 若不进行合理调控, 中国将难以于 2030 年前实现碳达峰目标^[8]. 并且中国省市级的碳排放密度相对较高, 并且各省的排放趋势差异性比较明显^[9,10], 因此在省市层面因地制宜落实碳达峰政策, 推动部分地区率先达峰是实现 2030 年前碳达峰目标的有效途径^[11]. 江苏省作为中国 GDP 总量排名第二的省份,

由于其碳排放集中度较低, 且脱钩程度较弱, 产业低碳转型的进度仍有待继续深化. 因此本文以极具代表性的江苏省作为研究对象, 针对该省碳排放的特征与趋势, 结合其资源禀赋与规划目标, 提出针对性的碳达峰路径与政策, 对于中国区域和全国碳达峰目标的实现具有重要的现实指导价值.

目前国内外对于碳达峰的研究从宏观角度主要以国家层面^[12~14]和区域层面^[15,16]为主, 通过建立综合考虑经济、能源和气候安全以及碳税等因素的综合模型, 分情景预测中国碳排放达峰, 提出 2025 ~ 2030 年是实现碳达峰目标的关键期^[17~19]. 从行业层面, 相关研究主要以重点行业和领域为研究对

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2022-10-18

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX22_0606)

作者简介: 苗安康 (1990 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为资源环境与能源政策, E-mail: miaoankang@hhu.edu.cn

象,开展碳排放达峰路径研究,探索了我国能源电力^[15,20-22]、工业^[23]、建筑^[24,25]、交通^[26,27]和居民^[28-30]等不同行业的碳排放达峰时间^[31,32]、峰值水平以及促进碳排放尽早达峰的控制措施和措施的经济成本.对于碳达峰的研究方法,当前用于预测碳达峰的模型主要有 Kaya 恒等式^[33]、IPAR 模型^[34]、CGE 模型^[35]、STIRPAT 模型^[36]、LMDI 模型^[37]和 LEAP 模型^[38-40]等,结合发展趋势、消费系数和弹性系数等计量经济学方法并结合环境库兹涅茨曲线^[41,42]对未来的行业发展情况及其环境影响进行宏观判断,在此基础上利用联合国政府间气候变化专门委员会或国家发布的温室气体排放清单编制指南计算未来碳排放变化,并结合排放清单编制方法分别核算不同情景下的碳排放情况^[43].从影响因素分析的角度,现有研究通过设置不同的情景研究碳排放影响因素的影响程度,并采用结构分解法和指数分解法进行碳排放驱动因素分析^[44].其中,对数平均迪氏指数法可以解决分解过程中的零值和残差项问题,是能源环境领域的主流分解方法^[45].相关研究表明经济增长^[46,47]、能源消费^[48]、能源结构^[49]、产业结构^[50,51]、技术水平^[52]和减排政策^[53,54]是影响碳达峰的主要因素.另外,不少学者在研究碳排放与经济增长脱钩状态的基础上,利用因素分解法和 Tapio 模型探讨了产业碳排放的脱钩状态及其驱动因素^[55,56].

由于各省之间存在显著的区域性差异,中国碳达峰目标必须分解到具体的省份才可以实现,但是从省域视角研究碳达峰路径的研究相对较少,如何根据各省资源禀赋规划出既符合各省自身情况又能早日实现碳达峰的路径仍有待探索;传统的 LMDI 分解模型多为单层分解模型,分解时仅采用一次能源强度,未能综合考虑能源转化效率、终端能源强度和能源结构等因素;应用脱钩理论研究脱钩状态变化原因的文献则较少,对于碳排放影响分解因素的脱钩状态的研究仍有待挖掘与突破.为解决这些问题,需要以省域为切入点,深入挖掘碳排放影响因素和脱钩状态,制定科学合理的节能减排政策.本文采用多层对数平均迪氏分解模型和 LEAP 模型相结合的方法,结合脱钩理论和减污降碳协同效应模型,研究中国省域碳达峰路径,旨在为制定节能减排政策、规划碳排放达峰的路径提供参考依据.

1 材料与方法

本研究从历史发展趋势与未来模拟预测两个视角,采用对数平均迪氏分解模型和 LEAP 模型相结合的方法,模拟预测省域能源消费和碳排放情况.基

于模拟预测和影响因素分解分析,采用脱钩理论和减污降碳协同效应模型分析碳排放与经济发展和污染物排放之间的关系.通过节能减排措施的设置和不同情景的对比分析研究碳达峰路径,以制定科学合理的政策.本文分析框架如图 1 所示.

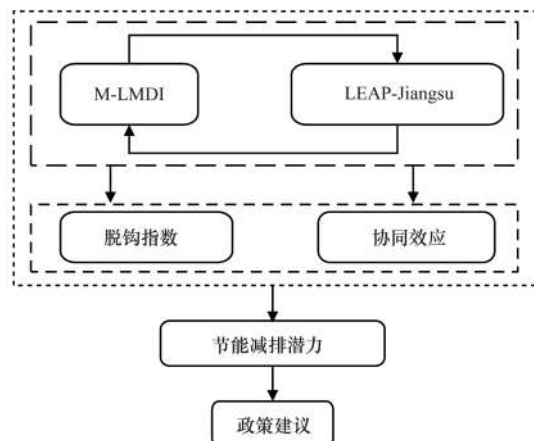


图 1 分析框架

Fig. 1 Analysis framework

1.1 碳排放量核算

《IPCC 国家温室气体清单指南》指出,能源活动产生的温室气体主要受燃料的活动水平和碳排放因子影响,通常采用公式(1)进行核算.

$$C_j = A_j \times EF_j \quad (1)$$

式中, C_j 表示能源活动中 j 能源的碳排放量, A_j 表示 j 能源的能源消耗量, EF_j 表示 j 能源的碳排放因子.

1.2 M-LMDI 模型

LMDI 模型的优势在于它能够对多个因素进行分解,可以有效解决传统线性回归模型所产生的残差项问题.传统的 LMDI 模型存在一些缺点,分解时通常采用一次能源强度,但在能源消费过程中只有终端能源强度是可观测的.因此,本研究对传统的对数平均迪氏分解模型进行改进,提出了多层对数平均迪氏分解模型(M-LMDI),如图 2 所示.改进后的多层对数平均迪氏分解模型不仅保留了传统模型的优点,也可以通过多层分解将终端能源消费结构纳入多层分解模型,从而更符合能源消费过程的实际情况.

改进的 M-LMDI 模型将一个区域的碳排放总量(C)分解为加工转换部门碳排放(C_T)、产业终端碳排放(C_I)和居民生活终端消费(C_R),其中转换部门碳排放包含火力发电碳排放(C_E)和化石能源供热碳排放(C_H).为避免碳排放的重复计算,加工转换过程中化石能源生产电力和热力时产生碳排放,炼焦和炼油过程只考虑能源转换效率;终端能源消费时,化石能源和煤油制品产生碳排放,电力和热力作

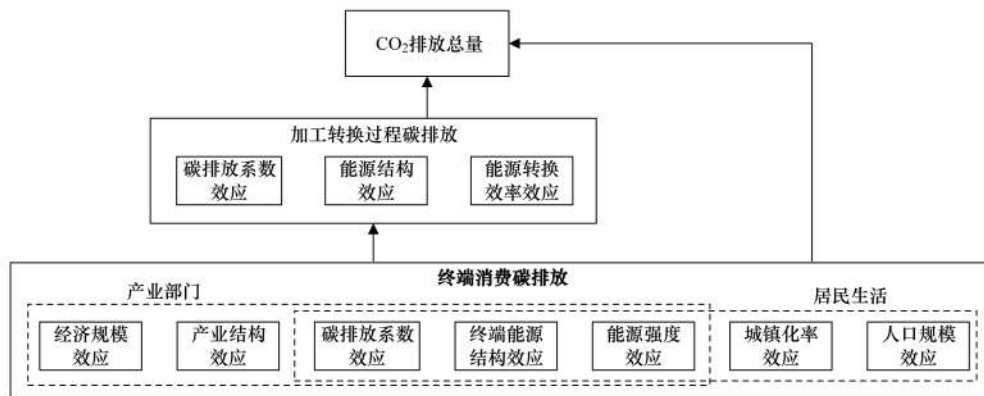


图2 多层对数平均迪式分解法示意

Fig. 2 Schematic diagram of the M-LMDI model

为清洁的二次能源不计碳排放。

$$C = C_T + C_I + C_R = C_E + C_H + C_I + C_R \quad (2)$$

依据 Kaya 恒等式原理,则:

$$C_E = \sum_j \frac{C_j^E}{E_j^E} \times \frac{E_j^E}{E^E} \times \frac{E^E}{W^E} \times \frac{W^E}{W} \times W$$

$$= \sum (TC \times TS \times TE \times TP \times W) \quad (3)$$

$$C_H = \sum_j \frac{C_j^H}{H_j^H} \times \frac{H_j^H}{H^H} \times \frac{H^H}{H} \times H$$

$$= \sum (HC \times HS \times HE \times H) \quad (4)$$

对于能源加工转换过程, C_j^E 、 E_j^E 和 E^E 分别表示使用 j 能源发电的碳排放量、用于发电的 j 能源的消费量、火力发电的化石能源消费总量; W^E 和 W 分别表示火力发电总量和总发电量; C_j^H 、 H_j^H 和 H^H 分别表示 j 能源供热的碳排放量、用于供热的 j 能源消费量和用于供热的化石能源消费总量; H^H 和 H 分别表示化石能源供热总量和总供热量。 $TC = C_j^E/E_j^E$ 表示能源碳排放系数; $TS = E_j^E/E^E$ 表示火力发电结构; $TE = E^E/W^E$ 表示能源发电转换效率; $TP = W^E/W$ 表示电力生产结构; W 表示总发电量; $HC = C_j^H/H_j^H$ 表示能源碳排放系数; $HS = H_j^H/H^H$ 表示热力生产结构; $HE = H^H/H$ 表示能源供热转换效率; H 表示总供热量。

$$C_I = \sum_i \sum_j \frac{C_{i,j}^I}{E_{i,j}^I} \times \frac{E_{i,j}^I}{E_i^I} \times \frac{E_i^I}{G_i^I} \times \frac{G_i^I}{G} \times G$$

$$= \sum (IC \times IS \times IE \times IY \times G) \quad (5)$$

对于产业终端能源消费, $C_{i,j}^I$ 、 $E_{i,j}^I$ 和 E_i^I 分别表示第 i 行业使用 j 能源的碳排放量、 i 行业使用 j 能源的能源消费量和 i 行业的能源消费总量; G_i^I 和 G 分别表示 i 行业的增加值和所有行业增加值总量。 $IC = C_{i,j}^I/E_{i,j}^I$ 表示产业终端部门的碳排放系数; $IS = E_{i,j}^I/E_i^I$ 表示产业终端产业部门的能源结构; $IE = E_i^I/G_i^I$ 表示终端产业部门的能耗强度; $IY = G_i^I/G$ 表

示产业结构。

$$C_R = \sum_k \sum_j \frac{C_{k,j}^R}{E_{k,j}^R} \times \frac{E_{k,j}^R}{E_k^R} \times \frac{E_k^R}{P_k^R} \times \frac{P_k^R}{P} \times P$$

$$= \sum (RC \times RS \times RE \times RU \times P) \quad (6)$$

对于居民生活能源消费, $C_{k,j}^R$ 、 $E_{k,j}^R$ 和 E_k^R 分别表示 k 居民生活使用 j 能源产生的碳排放总量、 k 居民使用 j 能源的能源消费总量和 k 居民生活的能源消费总量; P_k^R 和 P 分别表示 k 类居民人口和总人口。 $RC = C_{k,j}^R/E_{k,j}^R$ 表示居民生活碳排放系数; $RS = E_{k,j}^R/E_k^R$ 表示居民生活能源结构; $RE = E_k^R/P_k^R$ 表示人均能耗; $RU = P_k^R/P$ 表示城镇化率。

本研究利用 LMDI 的加法形式进行分解,则:

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_E + \Delta C_H + \Delta C_I + \Delta C_R \quad (7)$$

式中, ΔC 表示碳排放变化量; C^t 和 C^0 分别表示 t 年和基准年的碳排放量。

$$\Delta C = (\Delta TC + \Delta TS + \Delta TE + \Delta TP + \Delta W) +$$

$$(\Delta HC + \Delta HS + \Delta HE + \Delta H) +$$

$$(\Delta IC + \Delta IS + \Delta IE + \Delta IY + \Delta G) +$$

$$(\Delta RC + \Delta RS + \Delta RE + \Delta RU + \Delta P) \quad (8)$$

式中, ΔTC 、 ΔHC 、 ΔIC 和 ΔRC 表示碳排放系数效应; ΔTS 、 ΔHS 、 ΔIS 和 ΔRS 分别表示发电、供热、终端产业和居民生活等加工转换或消费过程的能源结构效应; ΔTE 和 ΔHE 分别表示发电和供热过程的能源转换效率效应; ΔIE 和 ΔRE 表示终端产业和居民生活的能源强度效应; ΔTP 表示电力生产结构效应, ΔIY 表示产业结构效应, ΔRU 表示城镇化率效应; ΔW 和 ΔH 分别表示总发电量和总供热量效应; ΔG 和 ΔP 分别表示经济规模效应和人口规模效应。

各效应的计算公式如下:

$$\Delta X = \sum_i \sum_j \frac{C_{i,j}^t - C_{i,j}^0}{\ln(C_{i,j}^t) - \ln(C_{i,j}^0)} \times \ln\left(\frac{X^t}{X^0}\right) \quad (9)$$

式中, X 表示公式(8)中的各个效应。对于各类能

源,碳排放系数是一个常数,因此相应的碳排放系数效应为零,即有 $\Delta TC = \Delta HC = \Delta IC = \Delta RC = 0$.

1.3 LEAP-Jiangsu 模型

本研究基于历史碳排放数据对江苏省的碳排放影响因素进行分解分析,以分析结果为参考依据,结合当前政策环境与远期规划目标,设定多种减排措施和发展情景.以驱动因素、资源输入、加工转换、终端部门、减排措施和情景设定共 6 个模块构建了 LEAP-Jiangsu 模型,模型示意图参考文献[18,37,38].其中,驱动因素是指人口、经济规模和城市化率等对终端需求起到关键影响的因素.资源输入模块主要体现江苏省的能源资源禀赋和与周边区域的互联互通情况,包括本地生产的一次、二次能源和能源进出口情况,本研究基于 2019 年江苏省能源平衡表将 28 个能源品种整合为 15 个能源品种.加工转换模块模拟该区域电力生产、热力生产、炼油和炼焦,即将一次能源转换为二次能源供给终端消费的过程.终端部门模块根据能源用途不同划分为农业、工业、建筑业、交通运输业、商业、其他行业和居民生活共 7 个终端能源消费部门,且本研究以产业部门和居民部门分别计算.其中,产业部门终端能源需求以行业增加值和单位增加值能耗的乘积计算,居民部门终端能源需求以总人口和人均能耗的乘积计算.减排措施模块是结合历史数据和因素分解结果,选取对节能减排有积极作用的可行性措施.情景设定模块是结合节能减排措施,依据当前政策环境与规划目标,综合设定用于模拟比较不同节能减排路径发展趋势的发展情景.在 LEAP-Jiangsu 模型中,能源消费总量和二氧化碳排放由加工转换过程和终端能源需求两部分组成,碳排放达峰预测结果可根据不同情景模拟求得.

1.4 Tapio 脱钩指数

本研究应用 Tapio 脱钩指数和分解因素脱钩指数,以分析江苏省历年经济发展与碳排放的脱钩状态,以及各分解驱动因素对经济发展与碳排放的脱钩状态的影响.

$$\varphi' = \frac{(C^t - C^0)/C^0}{(G^t - G^0)/G^0} = \frac{\Delta C/C^0}{\Delta G/G^0} \quad (10)$$

式中, φ' 表示脱钩指数, ΔC 和 ΔG 分别表示碳排放和 GDP 的变化量; G^t 和 G^0 分别表示 t 年和基准年的 GDP.将传统的脱钩模型[公式(10)],由 M-LMDI 模型的加法形式将脱钩指数进行拓展分解:

$$\begin{aligned} \varphi' &= \frac{(\Delta C_E + \Delta C_H + \Delta C_I + \Delta C_R)/C^0}{\Delta G/G^0} \\ &= \varphi'_E + \varphi'_H + \varphi'_I + \varphi'_R \end{aligned} \quad (11)$$

式中, φ'_E 、 φ'_H 、 φ'_I 和 φ'_R 分别表示火力发电脱钩指

数、化石能源供热脱钩指数、产业终端能源消费脱钩指数和居民生活消费脱钩指数.基于本研究所构建的 M-LMDI 模型,初步分解因素脱钩指数可以继续细分为碳排放强度脱钩指数、能源结构脱钩指数、能源强度脱钩指数、经济发展水平脱钩指数和人口规模脱钩指数等分解因素脱钩指数.首先计算省域的脱钩指数 φ' ,研究该区域历年及未来预测年的经济发展与碳排放的脱钩状态;基于脱钩指数计算各自模块的分解因素脱钩指数,以深入分析各分解因素对经济发展与碳排放的脱钩状态的影响.脱钩状态对照表参考文献[57].

1.5 减污降碳协同效应

由于温室气体和大气污染物多来自化石能源的燃烧,二者间的同源性表明碳减排措施很可能存在协同效应^[58,59],即减少温室气体排放的过程中也减少了其他大气污染物的排放.本研究利用减污降碳协同效应系数来分析不同减排措施和不同情景下的减污降碳协同效应.根据《中华人民共和国环境保护税法》的相关规定,大气污染物排放当量 E_{AP} 可以通过公式(12)进行核算,相关碳排放因子参考中华人民共和国生态环境部《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》.

$$E_{AP} = \alpha E_{SO_2} + \beta E_{NO_x} + \gamma E_{CO} + \varepsilon E_{CH_4} + \delta E_{VOCs} + \zeta E_{PM_{10}} \quad (12)$$

式中, E_{AP} 大气污染物排放当量; E_{SO_2} 表示 SO_2 排放量; E_{NO_x} 表示 NO_x 排放量, E_{CO} 表示 CO 排放量, E_{CH_4} 表示 CH_4 排放量, E_{VOCs} 表示挥发性有机物的排放量, $E_{PM_{10}}$ 表示可吸入颗粒物的排放量; α 、 β 、 γ 、 ε 、 δ 和 ζ 分别为其对应的当量值系数.

减污降碳协同效应系数可以定量描述温室气体与大气污染的协同减排效应.

$$S = (\Delta C/C)/(\Delta E_{AP}/E_{AP}) \quad (13)$$

公式(13)中, S 表示协同效应系数, E_{AP} 表示大气污染当量排放量, ΔE_{AP} 表示大气污染当量减排量.当 $S \leq 0$,表示减排措施不具有减污降碳协同效应;当 $S > 0$ 时,表示具有减污降碳协同效应.在温室气体和大气污染物同时减排的情况下,当 $0 < S < 1$ 时,表示减排措施对大气污染物的减排作用大于对二氧化碳等温室气体的减排作用; $S = 1$ 表示节能减排措施对温室气体和大气污染物具有同等程度的减排效果; $S > 1$ 表示减排措施对温室气体的减排效果大于对大气污染物的减排效果.

1.6 数据资源

本文采用所构建的 LEAP-Jiangsu 模型对江苏省 2019 ~ 2035 年能源需求和 CO_2 排放进行模拟和

预测分析. 其中,2019 ~2020 年为模型验证区间,数据来源于中国统计年鉴、中国能源统计年鉴和江苏统计年鉴. 2021 ~2035 年为模拟预测年,参数设置参考《“十四五”现代能源体系规划》、《工业能效提升行动计划》、《江苏省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》、《江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划》和《江苏省“十四五”制造业高质量发展规划》等规划文件. 2014 ~2020 年的碳排放历史数据主要来源于中国能源统计年鉴和江苏统计年鉴. 2021 ~2035 年的 M-LMDI 分解分析、Tapio 脱钩指数、减污降碳协同效应系数和节能减排潜力分析等数据来源于 LEAP-Jiangsu 模型的模拟预测结果.

2 结果与讨论

2.1 2015 ~2020 年能源消费碳排放

2.1.1 终端部门碳排放情况

2015 ~2020 年江苏省能源活动相关的碳排放如表 1 所示. “十三五”期间,江苏省能源活动的碳排放量从 2015 年的 721.66 Mt,增加到了 2020 年的 779.53 Mt. 工业部门终端能源消费碳排放,以及发电和供热加工转换工程的碳排放每年均在能源消费碳排放总量的 85% 以上. 因此,工业部门的节能减排和发电与供热加工转换工程的减排是 CO₂ 排放达峰的关键因素. 第一产业、商业与其他行业的碳排放处于相对稳定状态. 建筑业、交通运输业和居

表 1 2015 ~2020 年江苏省终端部门能源消费碳排放/Mt
Table 1 Carbon emissions of terminal sectors in Jiangsu Province from 2015 to 2020/Mt

年份	终端消费碳排放							加工转换过程碳排放	总量
	农业	工业	建筑业	交通业	商业	其他行业	居民		
2015	7.75	250.30	0.76	39.21	1.11	1.15	16.88	404.49	721.66
2016	7.62	249.68	0.78	40.32	0.88	0.65	17.53	425.59	743.04
2017	7.64	254.40	0.58	42.13	0.59	0.47	18.97	433.11	757.88
2018	7.87	251.74	0.55	44.69	0.44	0.45	20.38	437.93	764.05
2019	7.34	288.72	4.30	47.43	0.44	0.45	20.75	404.45	773.88
2020	7.84	267.99	4.95	50.98	0.48	0.51	21.80	424.99	779.53

民生活部门的碳排放增长速度较快,年均增长速度超过碳排放总量的增长速度.

2.1.2 碳排放因素分解

运用改进的多层对数分解模型 M-LMDI 分解分析江苏省 2015 ~2020 年的碳排放,以探索江苏省碳排放的主要影响因素指标. 由图 3 可知,对于 2015 ~2020 年,经济规模效应、总发电量效应、能源转换效率效应具有明显的 CO₂ 增排效果,且经济规模效应是碳排放增长的最大驱动因素,2015 ~2020 年累计增排贡献率约为 52.2%. 电力生产结构效应、产业终端能源结构效应、居民消费能源结构效应具有明显的碳减排效应,化石能源消费占比越低,减排效果越明显. 产业终端能耗强度效应也具有明显的减排效果,2015 ~2020 年共减少 83.08 Mt 的 CO₂ 排放. 产业结构效应主要表现为二氧化碳减排效应,随着产业结构的优化调整,第二产业的占比有所降低,第三产业的占比缓慢升高,碳排放强度将会呈现下降趋势. 在 2015 ~2020 年,人口规模效应、人均能耗效应和城镇化率效应对于碳排放量的变化影响较小. 由此可知电力生产结构、能源转换效率、终端能源消费结构、终端能源消耗强度和产业结构等都是江苏省碳排放的主要影响因素.

2.2 场景设置

LEAP-Jiangsu 模型以 2019 年为基准年,2035 年

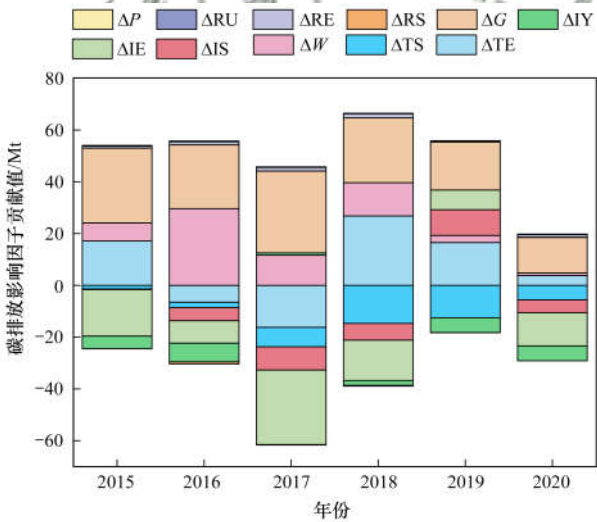


图 3 2015 ~2020 年江苏省碳排放影响因子贡献值
Fig. 3 Contribution value of carbon emission influencing factors from 2015 to 2020

为远期目标年. 以经济增长、人口规模、城市化率最为主要驱动因素,以当前中国及江苏省相关规划文件中所提目标、当前政策环境和 2015 ~2020 年 M-LMDI 因素分解结果为基础构建模型. 为了更为清晰地探索节能减排路径,本研究依据节能减排措施的推行力度设置了 6 个差异化的情景,对比分析不同的政策环境和减排措施对于能源消费和碳达峰路径的影响. 假设驱动因素符合江苏省 2035 年规划

目标,产业发展、能源消费和能源结构调整等顺应 2035 年规划目标.对于产业结构调整 and 开发风、光、水能等措施根据规划目标设定 2025 年和 2035 年的目标值,对于降低产值能耗和提高电气化水平等措施根据规划目标设定每个五年计划期间的平均增长率.设置的情景包括:基准情景(REF)、产业结构优化情景(ISO)、能效提升情景(EEI)、再电气化发展情景(REE)、高比例清洁能源发展情景(HPCE)和

综合发展情景(COM).其中,基础情景是当前稳定发展情景,综合发展情景是理想的快速发展强政策情景;其他 4 个情景在 REF 情景的基础上,每次模拟时只加强单一的节能减排措施实施力度.

根据《江苏省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》,LEAP-Jiangsu 模型中的驱动因素参数如表 2 所示,基准情景参数如表 3 所示.

表 2 LEAP-Jiangsu 模型中的驱动因素参数
Table 2 Driving factor parameters in LEAP-Jiangsu

驱动因素	2019 年	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
人口/万人	8 469.09	8 477.26	8 651.51	8 825.75	9 000
经济/万亿元	9.87	10.36	13.54	17.28	21.53
城镇化率/%	72.47	73.44	75	77.5	80

表 3 LEAP-Jiangsu 模型中基准情景参数
Table 3 Reference scenario parameters in LEAP-Jiangsu

年份	2019 年	2020 年	2025 年	2035 年
一产占比/%	4.6	4.6	4.6	4.4
二产占比/%	44.2	43.2	42	40
三产占比/%	51.2	52.2	53.4	55.6
产值能耗(以标煤计)/t·万元 ⁻¹	0.234	0.226	0.201	0.159
工业能耗(以标煤计)/t·万元 ⁻¹	0.51	0.49	0.45	0.37
人均能耗(以标煤计)/t·人 ⁻¹	0.244	0.254	0.308	0.453
终端电气化/%	29.6	30.4	34.1	41
清洁能源装机占比/%	24.3	28.6	41.4	56.8

基于 REF 情景的加强政策发展情景参数设置如表 4 所示.ISO 情景在参考情景的基础上进一步调整了产业结构.EEI 情景在 REF 情景的基础上降低了单位产值能耗和人均能耗.REE 情景在 REF 情景的基

础上提高了终端电能消费比重.HPCE 情景在 REF 情景的基础上加大了清洁能源转型力度.COM 情景在 REF 情景的基础上同时考虑了产业结构优化调整、能效提升、再电气化发展和清洁能源发展.

表 4 LEAP-Jiangsu 模型中的发展情景参数
Table 4 Development scenario parameters in LEAP-Jiangsu

情景	减排措施	2025 年	2030 年
ISO	调整产业结构(以三产占比计)/%	4.4、40 和 55.6	4、35 和 61
EEI	降低单位产值能耗(以标煤计)/t·万元 ⁻¹	0.191	0.144
	工业(以标煤计)/t·万元 ⁻¹	0.425	0.326
	居民人均能耗(以标煤计)/t·人 ⁻¹	0.294	0.392
REE	实施电能替代,提高终端电能消费水平/%	35.9	45.1
HPCE	大力发展清洁能源,提高清洁能源发电装机比例/%	43.6	65.2

2.3 能源需求与碳排放预测

2.3.1 能源需求预测

江苏省 2021 ~ 2035 年的一次能源需求总量预测如图 4 所示.从能源需求总量来看,在未来相当长的一段时间内,江苏省一次能源消费总量仍将保持稳定上升趋势.在 6 种不同的发展情景中,到 2035 年一次能源需求总量(以标煤计)分别为 474.6、443.6、435.7、474.5、468.1 和 401.2 Mt,分别为 2019 年能源消费总量的 1.33、1.24、1.22、1.33、1.31 和 1.13 倍.因此,2035 年江苏省一次能源需求总量(以标煤计)约为 401.2 ~ 474.6 Mt, 2021 ~

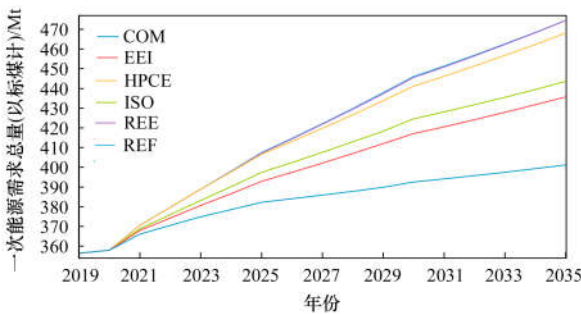


图 4 不同情景下江苏省一次能源需求总量预测
Fig. 4 Forecast of total primary energy demand in Jiangsu Province under different scenarios

2035 年均增长率约为 0.8%~1.8%。

根据模拟预测结果,江苏省 2021~2035 年的终端能源需求将处于稳定上升状态。预计到 2025 年,终端部门能源需求(以标煤计)约为 275.8~298.5 Mt;到 2035 年,终端能源需求约为 319.2~382.3 Mt。随着能源的清洁供应与消费和能源转换技术水平的提高,能源的综合利用效率正逐步提高。到 2035 年,能源的综合转换利用效率将达到 80% 左

右,极大地减少了能源转换过程中的损耗和浪费。2021~2035 年不同情景下各部门终端能源结构如图 5 所示。相比于 REF 情景,ISO 情景、EEI 情景和 COM 情景下的终端能源需求有了明显的降低,能源强度的降低、能源效率的提高和产业结构优化等节能减排措施有利于降低终端能源需求。REE 情景和 HPCE 情景下的终端电气化水平相比于 REF 情景有了很大的提高,这是因为能源供应侧高比例的清

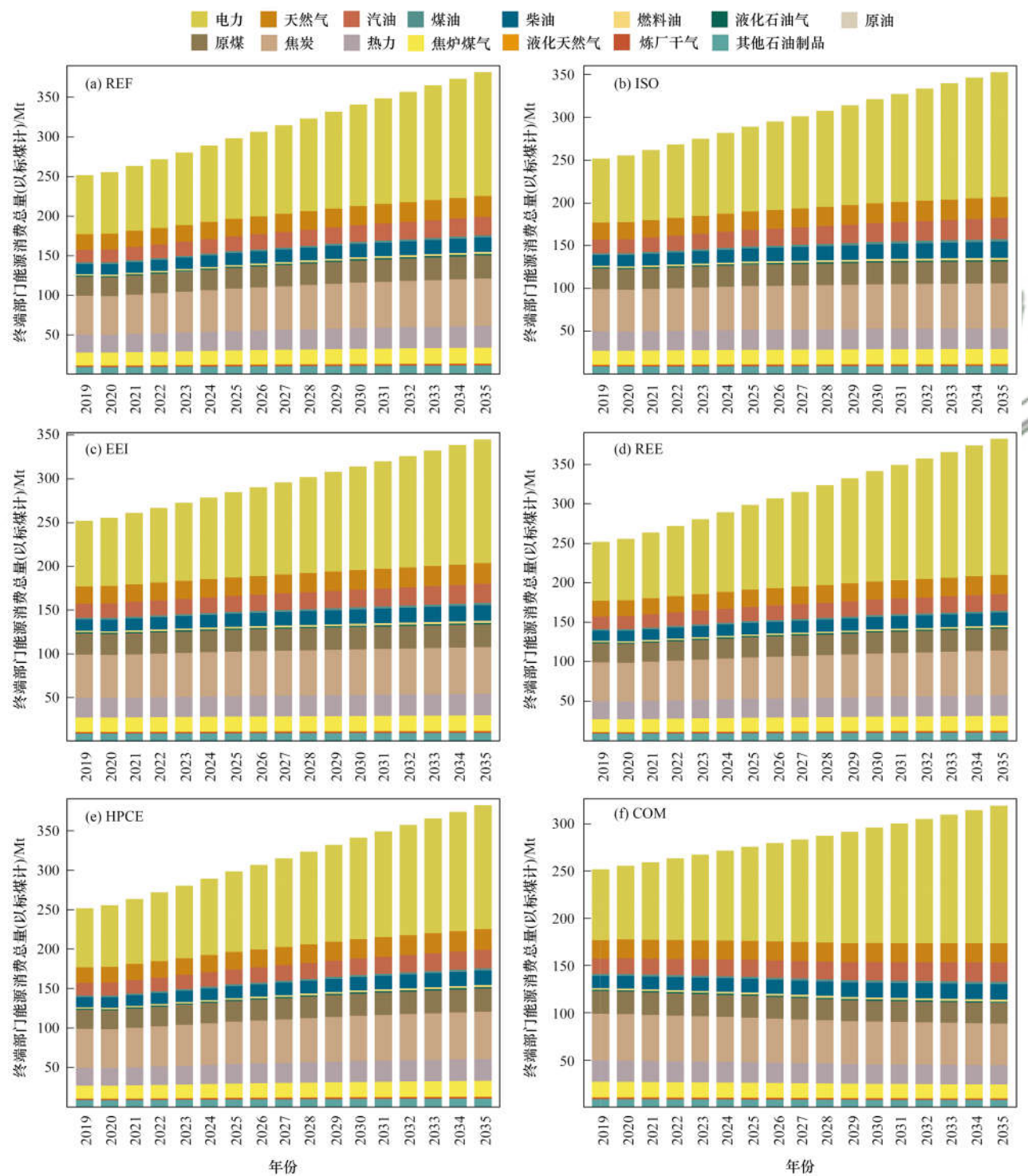


图 5 不同情景下的终端能源结构

Fig. 5 Terminal energy structure under different scenarios

能源发电和能源消费侧的电能替代措施所带来的能源生产和消费的高效清洁化效果.不同情景下的电能终端能源消费中的占比都在逐渐升高,预计到2035年终端电气化水平将达到41%~45.5%.

2.3.2 碳排放总量预测

不同情景下的江苏省碳排放预测如图6所示.从中可知,江苏省未来不同情景下CO₂排放先稳定增长达到峰值后缓慢下降.在基准情景下,江苏省将在2030年达到CO₂排放峰值,峰值(以CO₂-eq计)约为845.7 Mt.在ISO情景、EEI情景、REE情景和HPCE情景中,分别采取了一些积极的节能减排措施,加快了江苏省CO₂排放峰值的实现.4种情景下,江苏省在2025年达到CO₂排放峰值,峰值水平为815.3~833 Mt.在COM情景下,由于各种节能减排措施的强政策作用,江苏省将在2023年实现碳排放达峰的目标,碳排放峰值为789.6 Mt.基于本文的碳排放预测模型,江苏省将在2023~2030年实现碳达峰目标,碳排放峰值区间为789.6~845.7 Mt.

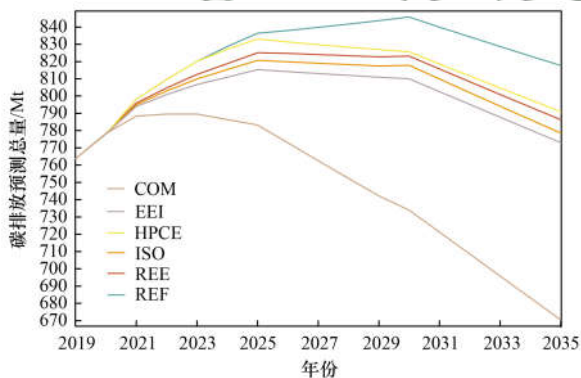


图6 不同情景下的碳排放总量

Fig. 6 Total carbon emission forecast under different scenarios

2.4 碳达峰影响因素分解

基于M-LMDI分解对各个情景下的碳排放影响因素进行分解分析,各效应的排放量贡献值如图7所示.由不同情景下的2021~2035年CO₂排放总量变化影响因素分解结果可知,各个情景下经济规模效应与发电量效应都是CO₂排放增长的主要影响因素,并且经济规模效应是增加碳排放的最大影响因素.在REF情景、ISO情景、EEI情景、REE情景、HPCE情景和COM情景的2021~2035年碳排放变化中,经济规模效应增加碳排放贡献率分别为:74.3%、73.4%、74.2%、72.2%、73.3%和72%.终端能源强度效应、发电量结构效应和终端能源结构效应是促进CO₂减排的主要影响因素,尤其在EEI情景、HPCE情景和再电气化发展情景中,三大效应的减排效果更加明显.在6个情景的2021~2035年

的碳减排总量变化中,终端能源强度效应的碳减排贡献率分别为:31.9%、32.4%、37.1%、28.7%、30.8%和38.5%;发电量结构效应的碳减排贡献率分别为:32.9%、29.4%、31%、32.5%、35.8%和28.3%;终端能源结构效应的碳减排贡献率分别为:14.7%、12.6%、13.1%、19.5%、14.2%和16.7%.

相比于REF情景,ISO情景的产业结构效应减排贡献率提高了7.6%,EEI情景的能源强度效应减排贡献率提高了5.6%,REE情景的终端能源结构效应减排贡献率提高了5.3%,HPCE情景的电力生产结构效应减排贡献率提高了2.9%.COM情景基于强政策环境和多项节能减排措施,相比于REF情景节能减排的优势明显.模拟结果表明2021~2035年可累计减少CO₂总排放量约1264.96 Mt.因此,产业结构优化调整、提高能源利用效率、设备的节能改造、实施电能替代、大力发展清洁能源等节能减排措施都具有很好的节能减排效果,可以加快实现江苏省碳达峰目标,降低碳排放峰值.

2.5 碳排放脱钩状态分析

经济增长与碳排放脱钩是实现碳达峰的必要条件.通过对江苏省历年的GDP与碳排放数据分析可知,江苏省2015~2020年处于弱脱钩状态.模拟预测区间的Tapio脱钩指数如图8所示.REF情景的脱钩指数在2030~2031年由正变负,COM情景的脱钩指数在2023~2024年由正变负,其他发展情景的脱钩指数均在2025~2026年由正变负.2021~2035年的模拟预测结果表明,江苏省将于2024~2031年间实现经济增长与碳排放从弱脱钩到强脱钩关系的转变.

结合多层对数分解模型M-LMDI和Tapio脱钩指数分析各分解因素对经济发展与碳排放脱钩状态的影响.不同情景下的脱钩指数分解为以火力发电为主的加工转换过程脱钩指数、终端产业部门脱钩指数和居民生活脱钩指数.各个情景下的对脱钩状态影响最大的因素均为加工转换工程脱钩指数,并且在2025年前后该脱钩指数最先由弱脱钩状态变为强脱钩状态;特别是HPCE情景和COM情景,该分解脱钩指数在2024年率先实现了弱脱钩到强脱钩的转变.相比于REF情景,ISO情景、EEI情景、REE情景和COM情景的终端产业部门脱钩指数有了明显的降低.在2021~2035年的模拟预测区间内,各个情景的居民生活脱钩指数均处于弱脱钩状态,并且该分解脱钩指数均有了明显的降低.通过分解因素脱钩指数分析,电力生产结构的变化是促进江苏省经济增长与碳排放强脱钩的关键因素.产业

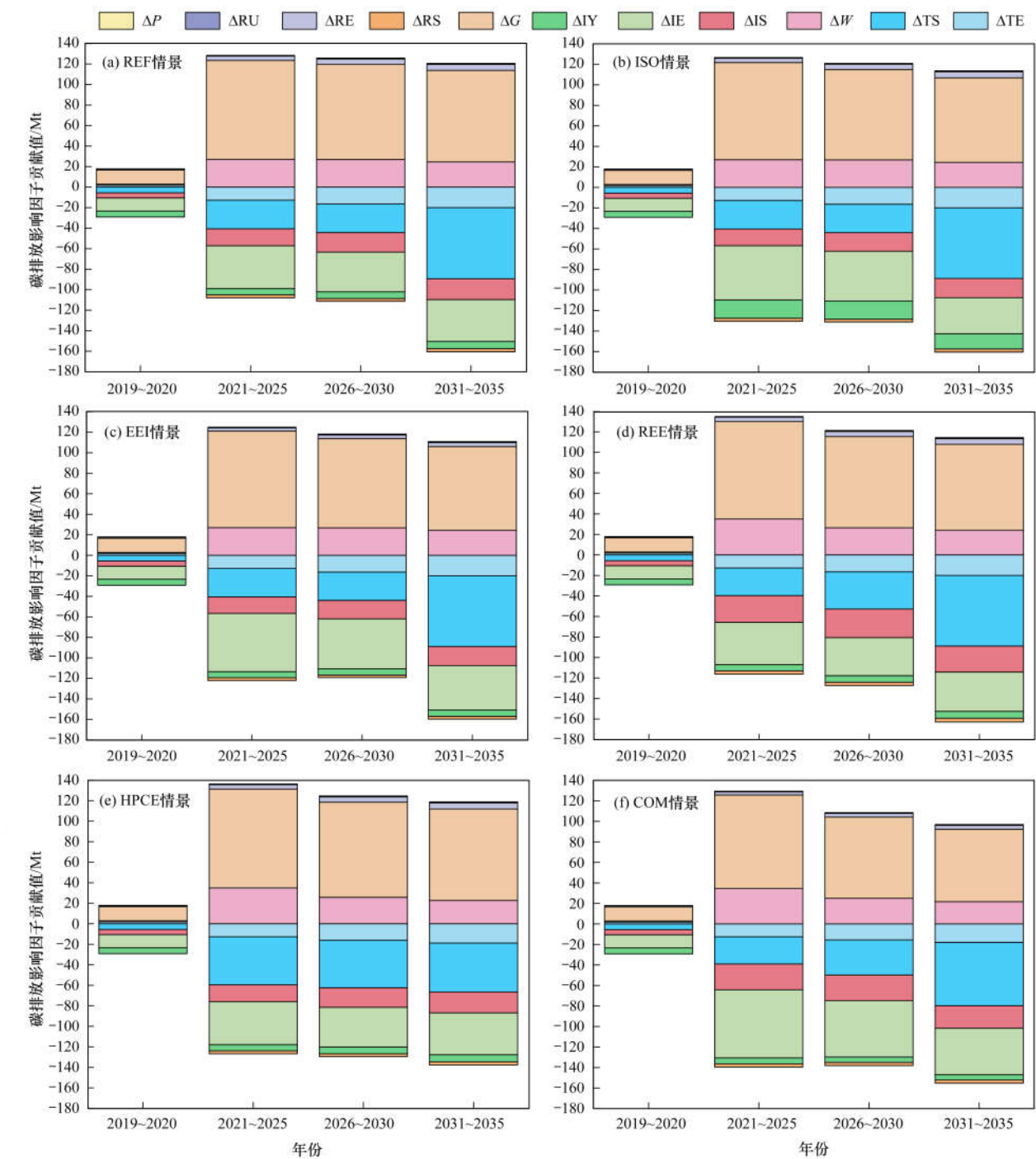


图7 不同情景下各个效应的排放量贡献值

Fig. 7 Carbon emission contribution of each effect under different scenarios

结构优化调整、能效提升和再电气化发展等节能减排措施可以加快终端产业部门的脱钩状态由弱脱钩向强脱钩的转变。

2.6 终端消费节能减排潜力

根据碳排放影响因素分解和脱钩状态分析,对于能源的消费与碳排放,能源供给侧和终端能源消费侧的节能减排是促进实现碳排放达峰目标的根本途径.在能源供给侧,可以通过大力发展清洁能源,提高清洁能源在一次能源消费结构中的比重来实现节能减排的效果;在终端能源消费侧,可以通过积

极落实优化产业结构、降低能源强度、调整终端能源结构等节能减排措施来实现.不同情景下终端消费部门减排潜力如图9所示.从终端能源消费部门来看,工业部门、交通运输部门和居民生活部门是节能减排潜力较大的部门,而农业、建筑业、商业和其行业部门碳排放量保持稳定.

从节能的角度,不同情景下的能源需求分析结果显示,能源消费强度的降低是最有效的节能措施.对于2021~2035的累计终端能源消费总量(以标煤计),EEI情景相比于参考情景可以节约能源314.4

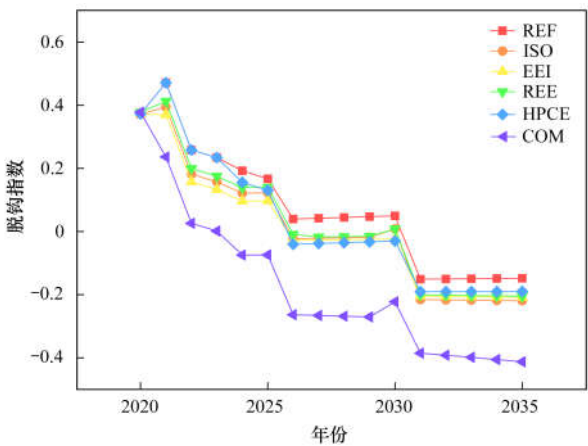


图8 不同情景下 2021 ~ 2035 年的 Tapio 脱钩指数

Fig. 8 Tapio decoupling index under different scenarios from 2021 to 2035

Mt. ISO 情景的第一产业和第二产业都实现了节能的目的,但是由于第三产业能源消费的增加,相比于 REF 情景可以节约能源约 234.1 Mt. COM 情景在多项措施的支撑下,可以累计节约能源约 525.9 Mt. 从减排的角度,ISO 情景相比于参考情景工业部门的碳排放有所降低,而交通运输部门的碳排放有一定程度的增加.这是由于产业结构的优化调整,使该情景中终端产业结构发生了变化所导致的. EEI 情景中的能源综合利用效率的提高,带来终端能源消费强度的下降.相比于 REF 情景,能源强度降低可以显著地减少终端部门的碳排放,尤其是工业部门与居民生活部门.再电气化发展情景中,工业部门、交通运输部门和居民生活部门的年度碳减排变化量均少于参考情景.这表明实施电能替代措施,提高终端能源消费中电能的比例可以有效地减少终端能源消费的碳排放. COM 情景中,产业结构优化调整、能源强度下降、电气化水平提高和清洁能源占比提高等多项减排措施共同影响下,碳排放总量相比于参考情景有了大幅度的下降.不同情景下 2021 ~ 2035 年累计减少碳排放量预测结果如表 5 所示.

表 5 不同情景下 2021 ~ 2035 年累计减少碳排放量(以 CO₂-eq 计)/Mt

情景	ISO	EEI	REE	HPCE	COM
累计减少量	338.5	418.9	265.9	191.9	1 265.2

以 REF 情景为基础,通过设置单一减排措施情景与多减排措施进行比较,分析减排措施的碳排放减少力度.基于本研究数据参数设置,产业结构优化、能源强度降低、提高终端电气化水平、提高清洁能源占比、其他减排措施的减排贡献率分别为 26.8%、33.1%、21%、15.2% 和 3.9%.其中,降低

能源强度与产业结构优化两项减排措施的碳减排贡献率达到了 60%.

2.7 减污降碳协同效应分析

不同情景下 2020 ~ 2035 年的协同效应系数如图 10 所示.对于 REF 情景,协同效应系数范围为 0.55 ~ 1.59,平均值为 1.03,说明 REF 情景减污降碳具有良好的协同效应. ISO 情景与 EEI 情景的协同效应系数平均值分别为 1.16 和 2.24,表明产业结构优化与能源强度降低这两种节能减排措施对温室气体的减排作用要大于对大气污染物的减排作用.对于 REE 情景和 HPCE 情景,模拟预测结果显示在 2026 ~ 2030 年碳减排与污染物减排没有协同效应,而在 2021 ~ 2025 年和 2031 ~ 2035 年具有良好的减污降碳协同效应.这主要是因为 2026 ~ 2030 年两种情景下的 CO₂ 排放达峰后的减排政策调整所引起的.对于综合发展情景,在碳排放达峰前,多项减排措施的综合效果对温室气体的减排作用要大于对大气污染物的减排作用;而在碳排放达峰后,协同效应系数范围为 0.9 ~ 1.1,表明该情景下减污降碳具有非常好的协同效应.综上分析,产业结构优化、能源强度降低、再电气化水平提高和能源结构调整等节能减排措施都具有良好的减污降碳协同效应.

3 政策建议

(1)推动终端部门节能降耗.根据江苏省碳排放模拟预测结果,终端产业能耗降低的强政策情景下的碳减排贡献率最大.因此,江苏省的碳达峰路径规划应以降低产业能耗作为优先考虑的减排措施.在终端产业方面,有序淘汰高耗能的落后产能,鼓励高新技术企业通过技术创新促进生产工艺清洁化,降低单位产值的能源消费与碳排放.在居民生活层面,深入贯彻绿色低碳的生活方式和消费理念,通过阶梯水价、电价、气价的运用来有效地引导居民生活的用能行为.发挥江苏省绿色交通岸电系统改造试点省份的优势,进一步降低货车和货船的能耗强度.

(2)加快产业结构优化调整.不同产业结构能源强度差异较大,根据江苏省能源消费预测情况,第三产业的能源消耗强度远低于第二产业.钢铁、水泥等高耗能产业单位产值能耗水平较高,并且主要能源需求以化石能源为主,是产业结构优化调整的主要领域.如淘汰沿江地区重化产能和落后产能,推动沿江化工钢铁煤电行业转型升级;在新材料、新医药、新能源、软件和节能环保等江苏省的优势产业中,大力推广节能低碳技术及其示范应用.在建筑

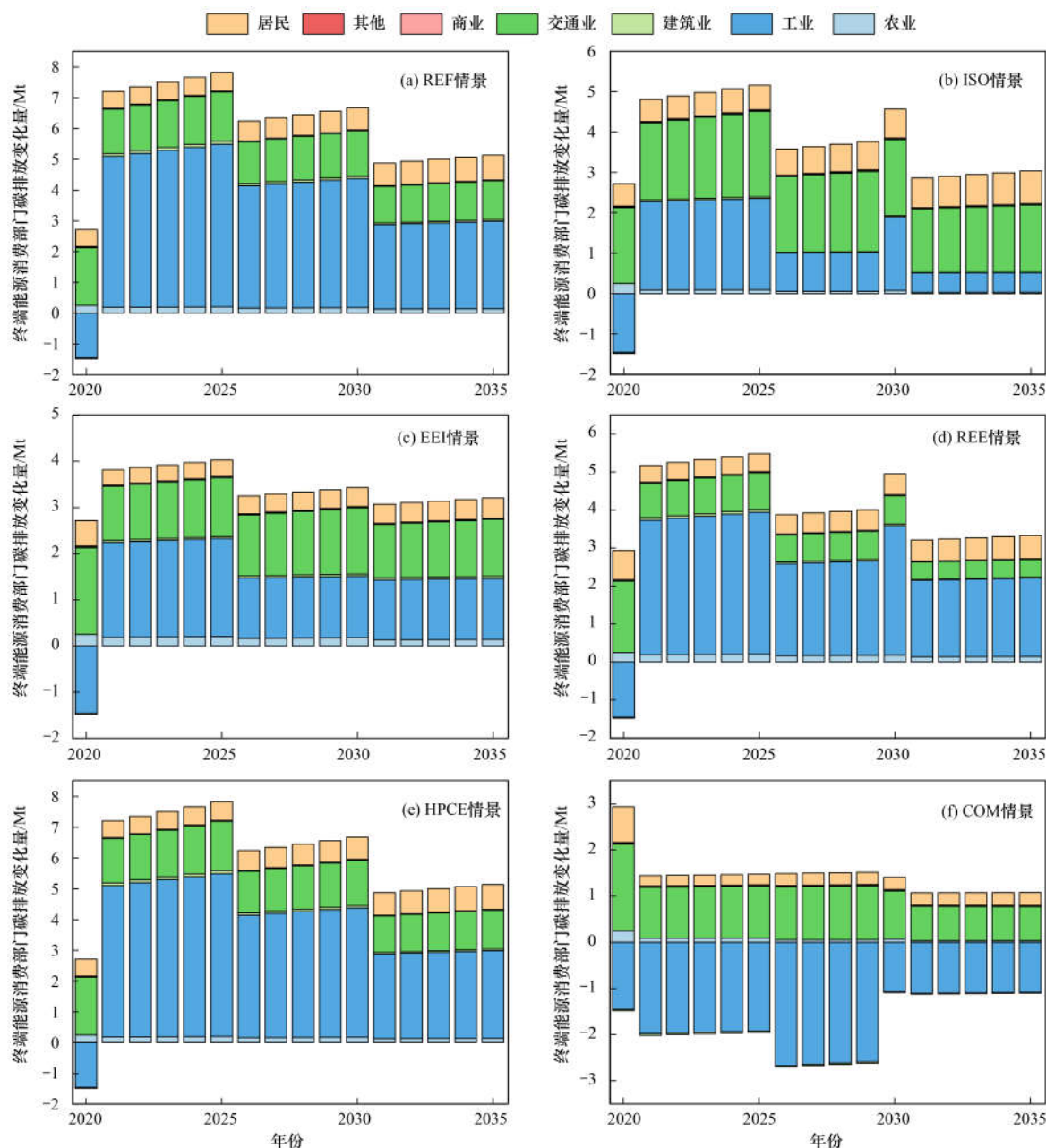


图9 不同情景下终端消费部门减排潜力

Fig. 9 Carbon emission reduction potential under different scenarios

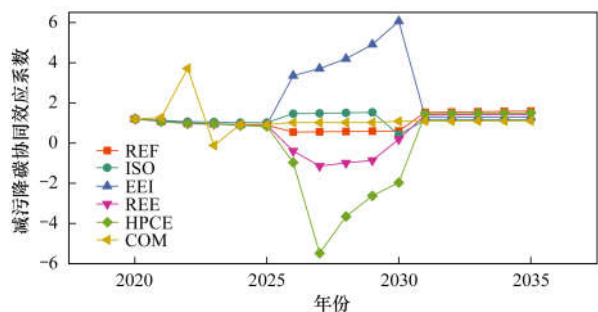


图10 不同情景下2020~2035年的协同效应系数

Fig. 10 Synergistic effect coefficients from 2020 to 2035

领域,以南京、苏州和南通等地的被动式建筑工程为示范,推进建筑节能改造,提高绿色建筑和被动式建筑的比例;在交通领域,发展新能源和清洁能源

汽车产业,实现每年新增和更新新能源公交车辆比例达到80%以上的目标。

(3)推动能源电力结构低碳转型。通过模拟分析,加工转换工程的火力发电是制约江苏省碳排放脱钩的主要因素,能源系统的低碳转型是关键。充分发挥江苏省海上风能资源丰富和成就显著的优势,加快近海海上风电项目规模化开发,积极探索远海海上风电示范项目。江苏省太阳能资源丰富,坚持分布式与集中式光伏发电并举,在工业园区、经济开发区、公共建筑等可利用屋顶面积充裕和电网接入条件较好的区域大力发展分布式光伏。统筹抽水蓄能发展与电源建设,加快句容和连云港等地抽水蓄能电站的建设。短期内煤电仍将是江苏省电力供应

的重要保障,应针对不同发展时期制定相适应的政策,保障煤电实现从基础电源到灵活备用功能的转变。

(4)实施再电气化发展政策。再电气化发展的关键路径是全面提升清洁能源的利用程度,在能源供给侧大规模开发利用清洁能源,在能源消费侧实施电能对化石能源的深度替代。从重点领域看,再电气化主要涉及终端能源消费的工业、交通和居民生活三大终端能源消费部门和作为平台枢纽实现能源转换的电力部门。根据江苏省能源消费情况,鼓励推广电动汽车、港口岸电、电制氢和电采暖等应用,提升终端消费电气化水平。

(5)完善能源市场体制机制。落实国家对可再生能源发展扶持政策,制定全国统一电力市场与碳交易市场顶层设计方案和实施路线图,通过市场机制激励促进可再生能源的消纳。依托于苏州工业园区、无锡江阴市和常州天宁区工业园等分布式发电市场化交易试点建设,探索电力交易机制和输配电价政策,建立适用的分布式发电的技术、市场和政策体系等。

4 结论

(1)通过本研究所构建的 M-LMDI 模型对江苏省 2015~2020 年的碳排放进行影响因素分解,结果表明经济规模效应、总发电量效应、能源转换效率效应具有明显的 CO₂ 增排效果,且经济规模效应是碳排放增长的最大驱动因素,2015~2020 年累计增排贡献率约为 52.2%。能源消费强度效应、产业结构效应、能源结构效应具有很大的节能减排潜力。

(2)根据本研究所构建的 LEAP-Jiangsu 模型的预测结果,2035 年江苏省一次能源需求总量(以标煤计)约为 401.2~474.6 Mt,终端能源需求量约为 319.2~382.3 Mt。江苏将在 2023~2030 年实现碳达峰目标,碳排放峰值(以 CO₂-eq 计)约为 789.6~845.7 Mt。最有可能在 2025~2030 年实现碳达峰目标,碳排放峰值为 815.3~845.7 Mt。

(3)结合 M-LMDI 模型和 LEAP-Jiangsu 模型的分析结果,经济规模效应是导致碳排放增加的关键因素,不同情景下的碳排放增加贡献率约为 72%~74.3%。终端能源强度效应、发电量结构效应、终端能源结构效应是促进 CO₂ 减排的主要因素,不同情景下的累计减排贡献率约为 84.2%~93.4%。

(4)采用 M-LMDI 模型和 Tapio 脱钩指数模型分解分析,江苏省 2015~2020 年处于弱脱钩状态,并且将于 2024~2031 年间实现经济增长与碳排放从弱脱钩到强脱钩关系的转变。电力生产结构是促

进江苏省经济增长与碳排放由弱脱钩向强脱钩转变的关键因素,同时产业结构优化、能源效率提升、再电气化发展等节能减排措施也是促进经济增长与碳排放脱钩的主要因素。

(5)从终端能源消费部门来看,工业部门、交通运输部门、居民生活部门是极具有节能减排潜力的部门。由减排措施模拟预测分析可知,降低能源强度与产业结构优化是两项最具减排潜力的措施,并且具有良好的减污降碳的协同效应。江苏省的碳达峰路径规划应把降低产业能耗和调整产业结构作为优先考虑的减排措施。提高终端电气化水平与能源结构优化 also 具有很大的节能减排潜力和良好的减污降碳协同效应。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李辉,庞博,朱法华,等. 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5294-5304.
Li H, Pang B, Zhu F H, et al. Comparative energy consumption structure and mode between china and major energy-consuming countries under the background of carbon emission reduction[J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5294-5304.
- [3] Wang C J, Wang F. China can lead on climate change[J]. Science, 2017, 357(6353): 764.
- [4] Xiao J, Li G H, Xie L, et al. Decarbonizing China's power sector by 2030 with consideration of technological progress and cross-regional power transmission[J]. Energy Policy, 2021, 150, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112150.
- [5] 周天军,陈晓龙.《巴黎协定》温控目标下未来碳排放空间的准确估算问题辨析[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(2): 216-229.
Zhou T J, Chen X L. Perspective on challenges in accurately estimating remaining carbon budget for climate targets of Paris Agreement[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(2): 216-229.
- [6] Mallapaty S. How china could be carbon neutral by mid-century: our special report examines the role of renewables, nuclear power and carbon capture in reaching this ambitious goal[J]. Nature, 2020, 586(7830): 482-483.
- [7] Li H N, Qin Q D. Challenges for China's carbon emissions peaking in 2030: a decomposition and decoupling analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 857-865.
- [8] Tao Y, Wen Z G, Xu L N, et al. Technology options: can Chinese power industry reach the CO₂ emission peak before 2030? [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 147: 85-94.
- [9] 张诗卉,李明煜,王灿,等. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 45-54.
Zhang S H, Li M Y, Wang C, et al. Carbon emission trend

- analysis of China's provinces and their differentiated peak strategy design [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, **31**(9): 45-54.
- [10] 韩梦瑶, 刘卫东, 谢漪甜, 等. 中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J]. *资源科学*, 2021, **43**(4): 710-721.
Han M Y, Liu W D, Xie Y T, *et al.* Regional disparity and decoupling evolution of China's carbon emissions by province[J]. *Resources Science*, 2021, **43**(4): 710-721.
- [11] Ye B, Jiang J L, Li C S, *et al.* Quantification and driving force analysis of provincial-level carbon emissions in China [J]. *Applied Energy*, 2017, **198**: 223-238.
- [12] 李辉, 孙雪丽, 庞博, 等. 基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5563-5573.
Li H, Sun X L, Pang B, *et al.* Emission reduction potential of air pollutants of thermal power industry based on carbon emission reduction target and emission standard constraint scenarios[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5563-5573.
- [13] Kwok T F, Xu Y, Liu X, *et al.* The impacts of economic structure on China's carbon dioxide emissions: an analysis with reference to other East Asian economies [J]. *Climate Policy*, 2018, **18**(10): 1235-1245.
- [14] Zheng J L, Duan H B, Zhou S, *et al.* Limiting global warming to below 1.5°C from 2°C: an energy-system-based multi-model analysis for China[J]. *Energy Economics*, 2021, **100**, doi: 10.1016/j.eneco.2021.105355.
- [15] Tang B J, Li R, Yu B Y, *et al.* How to peak carbon emissions in China's power sector: a regional perspective[J]. *Energy Policy*, 2018, **120**: 365-381.
- [16] Wu F, Huang N Y, Liu G J, *et al.* Pathway optimization of China's carbon emission reduction and its provincial allocation under temperature control threshold [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **271**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111034.
- [17] Yu S W, Zheng S H, Li X, *et al.* China can peak its energy-related carbon emissions before 2025: evidence from industry restructuring[J]. *Energy Economics*, 2018, **73**: 91-107.
- [18] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型[J]. *资源科学*, 2021, **43**(4): 639-651.
Hong J K, Li Y C, Cai W G. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model [J]. *Resources Science*, 2021, **43**(4): 639-651.
- [19] Sun Z R, Liu Y D, Yu Y N. China's carbon emission peak pre-2030: exploring multi-scenario optimal low-carbon behaviors for China's regions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **231**: 963-979.
- [20] Cheng R, Xu Z F, Liu P, *et al.* A multi-region optimization planning model for China's power sector[J]. *Applied Energy*, 2015, **137**: 413-426.
- [21] Burandt T, Xiong B, Löffler K, *et al.* Decarbonizing China's energy system-Modeling the transformation of the electricity, transportation, heat, and industrial sectors[J]. *Applied Energy*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113820.
- [22] Chen S Y, Liu P, Li Z. Low carbon transition pathway of power sector with high penetration of renewable energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, **130**, doi: 10.1016/j.rser.2020.109985.
- [23] 薛英岚, 张静, 刘宇, 等. “双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4392-4400.
Xue Y L, Zhang J, Liu Y, *et al.* Roadmap of coal control and carbon reduction in the steel industry under the carbon peak and neutralization target [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4392-4400.
- [24] 任晓松, 马茜, 刘宇佳, 等. 碳交易政策对工业碳生产率的影响及传导机制[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 5427-5437.
Ren X S, Ma Q, Liu Y J, *et al.* The impact of carbon trading policy on industrial carbon productivity and its transmission mechanism[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5427-5437.
- [25] Tan X C, Lai H P, Gu B H, *et al.* Carbon emission and abatement potential outlook in China's building sector through 2050[J]. *Energy Policy*, 2018, **118**: 429-439.
- [26] Li X, Yu B Y. Peaking CO₂ emissions for China's urban passenger transport sector[J]. *Energy Policy*, 2019, **133**, doi: 10.1016/j.enpol.2019.110913.
- [27] Wang H L, Ou X M, Zhang X L. Mode, technology, energy consumption, and resulting CO₂ emissions in China's transport sector up to 2050[J]. *Energy Policy*, 2017, **109**: 719-733.
- [28] Subramanyam V, Kumar A, Talaei A, *et al.* Energy efficiency improvement opportunities and associated greenhouse gas abatement costs for the residential sector[J]. *Energy*, 2017, **118**: 795-807.
- [29] Ma M D, Ma X, Cai W, *et al.* Low carbon roadmap of residential building sector in China: historical mitigation and prospective peak [J]. *Applied Energy*, 2020, **273**, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115247.
- [30] 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.
- [31] Zhou S, Wang Y, Yuan Z Y, *et al.* Peak energy consumption and CO₂ emissions in China's industrial sector [J]. *Energy Strategy Reviews*, 2018, **20**: 113-123.
- [32] Zhang X, Zhao X R, Jiang Z J, *et al.* How to achieve the 2030 CO₂ emission-reduction targets for China's industrial sector: retrospective decomposition and prospective trajectories [J]. *Global Environmental Change*, 2017, **44**: 83-97.
- [33] 杜涵蓓, 赵立君, 刘臣伟, 等. 基于 LEAP 模型和 KAYA 模型的主城区碳达峰预测及不确定性分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, **38**(8): 983-991.
Du H B, Zhao L J, Liu C W, *et al.* Prediction of peaking carbon dioxide emissions in main city areas based on LEAP model and KAYA model and analyses on its uncertainty [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(8): 983-991.
- [34] 许蕊, 黄贤金, 王佩玉, 等. 黄河流域国土空间碳中和度研究——以内蒙古段为例[J]. *生态学报*, 2022, **42**(23): 9651-9662.
Xu R, Huang X J, Wang P Y, *et al.* Territorial spatial carbon neutrality realization degree of the Yellow River Basin: a case study of the Inner Mongolia section[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(23): 9651-9662.
- [35] Guo Z W, Li T, Peng S T, *et al.* Environmental and economic consequences of the incentive policy on electric vehicle industry: a CGE based study in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, **169**, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105542.
- [36] 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 等. 基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1277-1286.
Liu M H, Yue Y Y, Liu S N, *et al.* Multi-dimensional analysis

- of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin based on the STIRPAT model [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1277-1286.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Yang D W, Liu D D, Huang A M, *et al.* Critical transformation pathways and socio-environmental benefits of energy substitution using a LEAP scenario modeling[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, **135**, doi: 10.1016/j.rser.2020.110116.
- [40] Lin J Y, Kang J F, Khanna N, *et al.* Scenario analysis of urban GHG peak and mitigation co-benefits: a case study of Xiamen City, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **171**: 972-983.
- [41] Wang Y, Zhang C, Lu A T, *et al.* A disaggregated analysis of the environmental Kuznets curve for industrial CO₂ emissions in China[J]. *Applied Energy*, 2017, **190**: 172-180.
- [42] Chen X, Shuai C Y, Wu Y, *et al.* Analysis on the carbon emission peaks of China's industrial, building, transport, and agricultural sectors[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135768.
- [43] Bauer N, Calvin K, Emmerling J, *et al.* Shared socio-economic pathways of the energy sector-quantifying the narratives [J]. *Global Environmental Change*, 2017, **42**: 316-330.
- [44] Zhang W, Wang N. Decomposition of energy intensity in Chinese industries using an extended LMDI method of production element endowment[J]. *Energy*, 2021, **221**, doi: 10.1016/j.energy.2021.119846.
- [45] Ang B W. LMDI decomposition approach: a guide for implementation[J]. *Energy Policy*, 2015, **86**: 233-238.
- [46] Niu S W, Liu Y Y, Ding Y X, *et al.* China's energy systems transformation and emissions peak [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **58**: 782-795.
- [47] Wang H K, Lu X, Deng Y, *et al.* China's CO₂ peak before 2030 implied from characteristics and growth of cities [J]. *Nature Sustainability*, 2019, **2**(8): 748-754.
- [48] Lin B Q, Xu B. Growth of industrial CO₂ emissions in Shanghai city: evidence from a dynamic vector autoregression analysis[J]. *Energy*, 2018, **151**: 167-177.
- [49] Xu G Y, Schwarz P, Yang H L. Adjusting energy consumption structure to achieve China's CO₂ emissions peak[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, **122**, doi: 10.1016/j.rser.2020.109737.
- [50] Cansino J M, Román R, Ordóñez M. Main drivers of changes in CO₂ emissions in the Spanish economy: a structural decomposition analysis[J]. *Energy Policy*, 2016, **89**: 150-159.
- [51] Liu K, Bai H K, Yin S, *et al.* Factor substitution and decomposition of carbon intensity in China's heavy industry[J]. *Energy*, 2018, **145**: 582-591.
- [52] 马晓君, 陈瑞敏, 董碧滢, 等. 中国工业碳排放的因素分解与脱钩效应[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3549-3557.
- Ma X J, Chen R M, Dong B Y, *et al.* Factor decomposition and decoupling effect of China's industrial carbon emissions [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3549-3557.
- [53] 岳立, 曹雨暄, 王宇. 能源政策的区域碳减排效应[J]. *资源科学*, 2022, **44**(6): 1105-1118.
- Yue L, Cao Y X, Wang Y. Effect of energy policies on regional carbon emission reduction [J]. *Resources Science*, 2022, **44**(6): 1105-1118.
- [54] 高原, 申珍珍. 绿色金融改革政策的碳减排效应[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(10): 4849-4859.
- Gao Y, Shen Z Z. The role of green finance reform policy in carbon reduction[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(10): 4849-4859.
- [55] Wang Z H, Yang L. Delinking indicators on regional industry development and carbon emissions: Beijing-Tianjin-Hebei economic band case[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 41-48.
- [56] Wang Q W, Hang Y, Zhou P, *et al.* Decoupling and attribution analysis of industrial carbon emissions in Taiwan [J]. *Energy*, 2016, **113**: 728-738.
- [57] 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 等. 长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1258-1266.
- Wu Y F, Xu Y, Tang Y B, *et al.* Temporal and spatial characteristics of net CO₂ emissions and decoupling analysis in Yangtze River Economic Belt[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1258-1266.
- [58] Liu L, Wang K, Wang S S, *et al.* Assessing energy consumption, CO₂ and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050 [J]. *Energy Policy*, 2018, **116**: 382-396.
- [59] Yu Y, Jin Z X, Li J Z, *et al.* Low-carbon development path research on China's power industry based on synergistic emission reduction between CO₂ and air pollutants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **275**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123097.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)