

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)
全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析	任晓松, 李昭睿 (1243)
京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式	田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)
太原市“十四五”规划大气污染防治政策的 CO ₂ 协同效益评估	肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)
湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同	李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)
“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径	张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)
郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益	邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)
长江中游城市群城市化对 PM _{2.5} 浓度的多尺度驱动机制	张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)
天山北坡城市群 PM _{2.5} 浓度时空分布特征及影响因素分析	王相男, 张喆, 刘方青 (1315)
天津市 PM _{2.5} 碳组分空间差异性来源解析	武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)
贵阳市花溪城区大气 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的变化特征及来源解析	桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)
新乡市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析	刘恒嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)
2017~2018 年冬季菏泽大气 PM _{2.5} 中金属元素特征及健康风险评估	杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)
北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析	潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)
南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析	罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)
苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化	吴也正, 张鑫, 顾钧, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)
长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源	卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张森霖, 黄张根 (1402)
基于 PCA-APCS-MLR 模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析	崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)
重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价	张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)
长江流域微塑料污染特征及生态风险评估	李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)
宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算	丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)
汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估	赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)
宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价	高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)
浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价	钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)
鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析	马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)
杭州湾南岸 20 a 水质净化功能变化及预测	王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)
不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例	代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)
长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素	刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)
富营养化湖泊藻华降解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应	张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛杰 (1539)
紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平	林涛, 苑宇杰 (1553)
再生水消毒副产物的检测、生成与控制	廖雨枫, 王正, 潘旸, 李爱民 (1561)
3 种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性	何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)
基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析	傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)
基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析	赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)
定量评估气候变化对长江中下游地区植被 GPP _{GS} 变化的影响	徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志成, 郭振东 (1615)
基于 Meta 分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响	李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)
连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响	鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)
4 种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响	丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)
不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系	邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)
黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征	王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)
覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响	宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)
秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响	胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)
耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响	陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)
基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测	王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)
广西贺州市典型矿区周边耕层土壤 Cd 通量特征	杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娥, 蔡贺清 (1739)
基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估	杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)
湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价	肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)
典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估	沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)
省级尺度土壤 As 迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例	董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)
谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应	易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)
EDDS 对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响	刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)
叶面调理剂对复合污染农田小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 累积的阻控效应	肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)
民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征	李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制	李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)
养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险	白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)
玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征	高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)
不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应	闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径

张静^{1,2}, 杨萌³, 张伟^{1,2}, 曹东^{1,2}, 赵静^{1,2}, 李勃^{1,2}, 薛英岚^{1,2,4*}, 蒋洪强^{1,2}

(1. 生态环境部环境规划院, 国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012; 2. 生态环境部环境规划院, 京津冀区域生态环境研究中心, 北京 100012; 3. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450052; 4. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190)

摘要: 电力行业实现二氧化碳排放尽早达峰并加快脱碳进度, 对河南省实现碳达峰碳中和目标具有重要意义。基于碳排放-能源集成模型(iCEM), 对河南电力行业“双碳”目标下控煤降碳路径开展情景研究。结果表明, 综合考虑电源结构优化和技术进步等措施, 河南省电力行业碳排放将于2028~2033年实现碳达峰, 电力行业煤炭消费量在“十四五”期间仍呈持续增长趋势, 达峰区间为2027~2031年。大力发展以风电和太阳能为主的清洁能源, 采用更多低碳零碳热源、提高外调电比例、加大煤电节能改造是碳达峰目标约束下河南省控煤主要措施。碳中和阶段, 布局内陆核电是缓解河南省控煤压力与实现“双碳”目标的重要路径之一, 需要提前开展论证研究。加速推进落后机组淘汰和现役机组节能改造、加速发展非化石能源发电、超前规划外调电, 并配套完善煤电退出和调峰的市场机制、增加系统灵活性、加快外引清洁能源保障等政策, 是河南省电力行业控煤降碳路径有效的政策保障。

关键词: 电力行业; 碳达峰; 碳中和; 控煤; 路径; 能源

中图分类号: X24; X322 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1285-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202303086

Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study

ZHANG Jing^{1,2}, YANG Meng³, ZHANG Wei^{1,2}, CAO Dong^{1,2}, ZHAO Jing^{1,2}, LI Bo^{1,2}, XUE Ying-lan^{1,2,4*}, JIANG Hong-qiang^{1,2}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. Center for Beijing-Tianjin-Hebei Regional Environment and Ecology, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 4. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Achieving peak carbon dioxide emissions and accelerating decarbonization progress in the power industry is of paramount significance to Henan Province's objective of achieving carbon peak and neutrality. In this study, the Carbon Emission-Energy Integrated Model (iCEM) was employed to conduct scenario studies on the coal reduction and carbon reduction paths under the "dual-carbon" goal of Henan's power industry. The results indicated that, by considering measures such as optimizing the power source structure and technological progress, Henan Province's power industry carbon emissions will reach their peak between 2028-2033, with coal consumption in the power industry continuing to grow during the "14th Five-Year Plan" period. With a peak range between 2027-2031, the peak value increased by 1881, 1592, and 11.48 million tce, respectively, compared with that in 2020. To control coal in Henan Province under the constraint of carbon peak goals, it is proposed to develop clean energy sources such as wind and solar power, use more low-carbon or zero-carbon heat sources, increase the proportion of external electricity supply, and enhance energy-saving transformation in coal-fired power plants. Accelerating the elimination of backward units and energy-saving transformation of existing units, accelerating non-fossil energy development, advanced planning for external electricity supply, improving market mechanisms for the exit of coal-fired power plants and peak regulation, increasing system flexibility, and accelerating external policies to ensure clean energy security are effective paths for controlling coal and reducing carbon emissions in Henan's power industry. Additionally, inland nuclear power layout is one of the crucial paths to alleviate coal control pressure in Henan Province and achieve "dual-carbon" goals during the carbon-neutral stage. Therefore, it is imperative to conduct research on demonstrations in advance. Henan Province is highly dependent on energy from other provinces, and the power supply and demand situation in Henan Province will become increasingly tense in the future. It is necessary to support Henan Province from the State Grid and coordinate the construction of inter-provincial and inter-regional power transmission channels.

Key words: power industry; carbon peaking; carbon neutrality; coal control; path; energy

2020年12月气候雄心峰会上中国宣布提高国家自主贡献度, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和的目标承诺^[1,2]。二氧化碳排放主要来自化石能源消费, 碳达峰和碳中和的关键是实施能源消费和能源生产革命, 减少化石能源消费^[3~5]。对于我国而言, 煤炭是化石能源消费的主体, 煤炭燃烧产生的二氧化碳占我国二氧化碳排放总量的70%以上^[6,7], 严格控制煤炭消费是我国近期能源结构转型的重点^[8~10]。

河南是我国人口大省、农业大省, 也是煤炭生产

和消费的重要省份之一, 在国家“双碳”战略中处于重要位置^[11,12]。河南产业结构偏重、能源结构偏煤, 长期以来煤电是河南电力供应的主力电源, 2020年河南电力装机容量达10 169万kW, 发电量达2 791亿kW·h, 煤电装机容量和发电量分别占全行业的64%和68%^[13]。河南电力行业煤炭消费占河南省能

收稿日期: 2023-03-09; 修订日期: 2023-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(22BJY070)

作者简介: 张静(1986~), 女, 副研究员, 主要研究方向为能源环境战略模拟, E-mail: zhangjing@caep.org.cn

* 通信作者, E-mail: xueyl@casid.cn

源消费总量的48%,电力行业二氧化碳排放量占全省能源碳排放量的40%左右.作为主要的煤炭消耗和碳排放部门,电力行业实现二氧化碳排放尽早达峰并加快脱碳进度^[14],对河南省实现碳达峰碳中和目标具有重要意义.

众多研究对电力行业碳达峰和碳中和路径在国家 and 区域层面进行了深入探讨.生态环境部环境规划院联合电力规划设计总院等14家行业协会和科研机构聚焦电力等重点行业,基于统一的方法体系和自主研发的排放路径模型(CAEP-CP模型)对中国碳达峰路径进行了讨论^[15~17],结果显示电力行业将在2030年左右实现达峰.舒印彪等^[18]采用GESp-V软件包进行优化分析,得到零碳情景将在2028年前后电力系统碳排放达峰;朱法华^[19]等认为中国电力行业的发展路径应贯彻以节能与掺烧为引领.Liu等^[20]开发了一个自下而上的能源系统模型(PECE-LIU)对中国未来燃煤电厂发展进行了分析,建议政府应将燃煤电厂投资计划纳入长期减排战略.煤炭总量控制研究方面,Lin等^[8]发现未来煤炭消耗增长来自于需要额外的煤炭发电来补充快速增长的用电需求,比如以改善城市空气质量和抵消石油进口高度依赖而扩大天然气供应的煤气化计划.Chen等^[21]发现建筑业的固定资本形成对所有主要煤炭密集型行业的煤炭消费都有显著的间接影响.Wei等^[22]发现能源密集型行业存在煤炭反弹效应,导致实际节煤量低于预期.刘晓龙等^[23]提出了全国煤炭消费总量控制路径.区域层面,分别对四川^[24]、河南^[25]、浙江^[26]、河北^[27]和山西^[28]等省份电力行业的脱碳路径、电力-氢能系统协同和碳达峰路径等进行了研究.

与全国的电力供需基本可达到均衡情况不同,河南省电力缺口较大^[29],新能源的开发与利用条件一般,油气、水、风和太阳能等赋存偏少^[30,31],全省目前没有核电,大型水电资源基本开发殆尽,气电受气源、气价影响可增空间不足,风光项目在地理条件、粮食安全和产业发展等因素的制约下可开发土地资源较为有限^[32,33].目前河南正处于工业化中期向后期转变阶段,随着未来经济持续增长,人民生活水平不断提高,未来河南电力消费需求增大,实现电力行业碳达峰、碳中和面临严峻挑战.探索构建河南省电力行业中长期控煤路径,是河南省碳达峰碳中和工作顶层设计的需要,对于推进河南省实现重点行业碳排放控制目标、推动行业生产方式与能源结构绿色转型具有指导意义.

1 材料与方法

1.1 iCEM模型及其电力行业模块

通过碳排放-能源集成模型(integrated carbon and energy model, iCEM)以行业发展需求、措施政策分析、能源消费、二氧化碳排放、经济分析为主要内容,涵盖了能源生产(电力)、工业(包括各行业)、建筑(包括生活和第三产业)、交通等全社会用能和碳排放部门,其机制由人口、GDP、国民经济部门等社会经济驱动因子决定各类能源(煤、石油、天然气、电力等)和原材料(粗钢、水泥等)需求,在不同情景下确定未来技术扩散率和技术组合,基于终端用能部门(或工序)的用能(耗煤、耗电等)强度和碳排放强度,以碳达峰碳中和为约束,以技术可达性和措施、经济可行性为条件,反复迭代优化,得到终端能源消费量和碳排放量^[34,35].

电力行业模块的基本框架如图1所示.在需求端,根据全社会各行业的用电规模和特征,结合各行业产品产量、电耗变化趋势及用电规律,综合采用产品单耗法、趋势外推法等预测不同部门的用电需求,自下而上汇总全社会用电需求.在供给端,从GDP增长和电力需求出发,以电力电量平衡为方法,结合能源模块和电源开发进度的约束,得出电力供应结构.综合考虑供电煤耗、CCUS等发电参数、末端碳捕集技术的影响,将节能降碳技术纳入模型.以“双碳”目标为约束,设置不同情景,对中长期河南电力行业煤炭消费控制和碳排放情况进行模拟分析,预测电力行业碳排放达峰时间和峰值,综合评估电力行业控煤的成本,作为河南省电力行业控煤路径选择的依据.

1.2 研究边界与核算方法

本研究范围包括河南省本地煤电、气电、水电、核电、生物质、风电和光伏发电等各种电源结构,以及热电联产的供热部分,以及从省外调入的电力.煤炭消费核算范围包括供电煤耗和供热煤耗,碳排放核算范围包括燃煤和燃气等火电厂(含企业自备电厂)化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放,含供热碳排放和外调电碳排放.本研究的基准年为2020年,时间跨度2021~2060年.电力行业煤耗和碳排放可表达为:

$$\begin{cases} CC_{\text{elec}} = Y_{\text{coal}} \cdot CI_{\text{coal}} + f(S_{\text{heat}}) \cdot CH_{\text{heat}} \\ EM_{\text{elec}} = CC_{\text{elec}} \cdot ef_{\text{coal}} + Y_{\text{gas}} \cdot CI_{\text{gas}} \cdot ef_{\text{gas}} + \sum OL_i \cdot ef_{i,\text{elec}} \end{cases}$$

式中, CC_{elec} 和 EM_{elec} 分别为电力行业的煤炭消费和碳排放; Y_{coal} 为煤电发电量; CI_{coal} 为单位供电耗煤系数; $f(S_{\text{heat}})$ 为电厂供热量,与集中供热面积增长成正相关

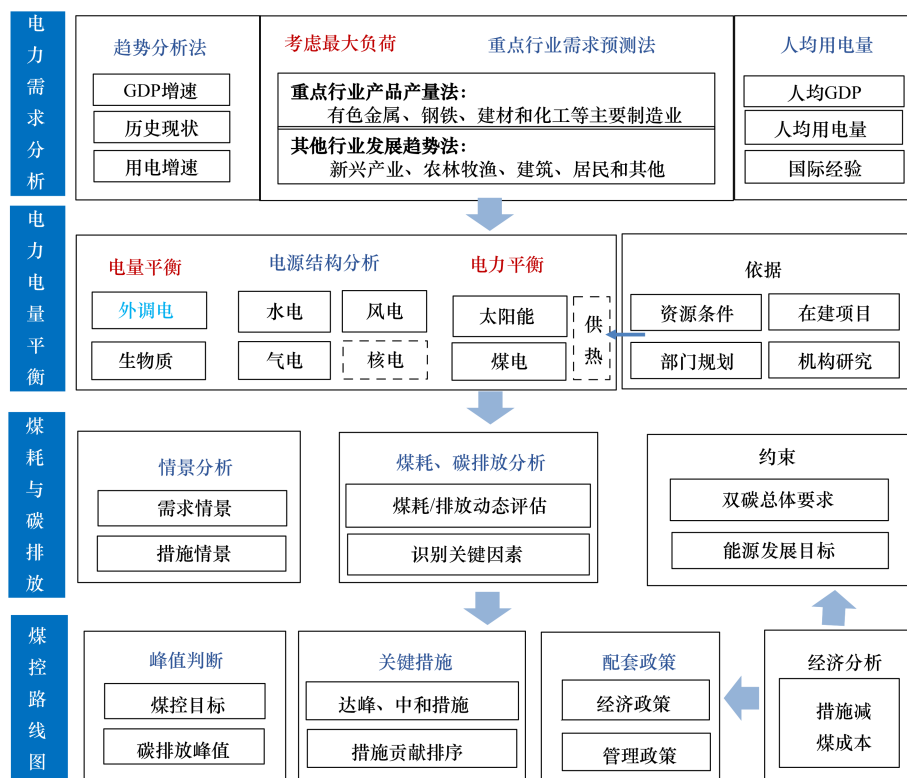


图1 iCEM模型电力模块结构

Fig. 1 Structure of the iCEM model power module

关系; S_{heat} 为电厂集中供热面积; CH_{heat} 为单位供热煤耗; Y_{gas} 为气电发电量; CI_{gas} 为单位发电耗气系数; ef_{coal} 和 ef_{gas} 分别为煤炭和天然气的碳排放系数; OL_i 为从 i 省外调电量, $ef_{i,\text{ele}}$ 为 i 省电网排放因子。

1.3 数据来源

本文中河南省社会经济方面的数据包括:现状年GDP、人口、装机容量、发电量、集中供热面积、单位发电煤耗和单位供热煤耗等,主要来自文献[13, 36, 37],未来河南省宏观经济、电力产业预测以及成本参数等主要参考《河南省国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》^[38]和《河南省“十四五”现代能源体系和碳达峰碳中和规划》^[32],结合我国电力行业发展趋势、《工业领域碳达峰实施方案》^[39]和《“十四五”现代能源体系规划》^[40]等国家规划,以及生态环境部环境规划院^[41]和国网河南省电力公司经济技术研究院的研究成果^[42, 43],省外调电量及省级电网排放因子主要来自于国家电网。

1.4 情景设定

考虑控煤降碳措施力度不同,依次设置常规、控煤和强化这3个情景,其设置条件如表1所示。各情景控煤降碳措施包括电源结构优化调整、加快新型储能发展、提高电力需求侧响应、积极扩大外电入豫规模、节能技术改造和热电联产供热低碳转型,不

同情景的控煤降碳路径通过设定各措施在不同阶段的发展水平来表征:常规情景按现有规划发展的情景,控煤情景以落实国家碳达峰刚性目标为导向,强化情景是争取的更高追求,提前实现碳达峰目标。

2 结果与讨论

2.1 电力需求预测

2020年全省全社会用电量实现3 392亿kW·h,同比增长0.8%。“十三五”期间,受产业结构优化调整、省内电解铝行业转移迁出、新冠肺炎疫情等因素影响,全省全社会用电量增速明显放缓,年均增长3.3%,较全国年均6.2%增速低近3个百分点。分阶段看,“十五”、“十一五”、“十二五”和“十三五”年均增速分别为13.4%、11.7%、4.1%和3.3%,增速呈现逐步放缓的趋势。

河南省电力需求和全社会最大负荷预测结果如图2所示。2030年前,河南省将持续加大产业结构优化升级,推动能源电力清洁低碳发展,尽早实现碳达峰。高耗能行业实施更加严格的节能改造,行业用电将呈现稳中有降态势,新兴行业为代表的新动能将成为拉动用电量增长的主要动力,预计“十四五”期间全省用电量将保持平稳增长,“十五五”之后,全省用电量增速将趋缓。预计2025、2030和2035年,河南省全社会用电量将分别达到4 670、5 527和6 242亿

表 1 情景设置
Table 1 Scenario settings

情景设置	常规情景	控煤情景	强化情景
情景描述	按现有规划发展的情景	与全国同步实现“双碳”目标	提前实现“双碳”目标
电源结构	风光按规划速度发展	风光加快发展	风光超常规发展
	煤电峰值维持到 2035 年开始下降, 2060 年保留 2 000 万 kW 的煤电, 并全部安装 CCUS	煤电峰值维持到 2030 年后开始下降, 2060 年保留还有能力运行的煤电 (1 000 万 kW), 并全部安装 CCUS	煤电 2025 年后, 旧机组正常退役, 2060 年保留少量煤电 (200 万 kW, 仅供热), 并全部安装 CCUS
	无核电	2040 年后新增核电	2035 年后新增核电
	水电 (含抽蓄) 一致		
储能	“十四五”参考河南省能源规划, 之后按新增风光装机的 10%~20% 考虑		
需求响应	2030 年前达到最大负荷的 5%, 2035 年达到最大负荷的 7%, 2060 年需求响应能力达到最大负荷的 12%		
省外来电	“十四五”、“十五五”和“十六五”分别新增第三、第四和第五直流	同常规情景	早于常规 1~2a
供电煤耗	到 2025、2030 和 2035 年, 供电标准煤耗为 $297 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	到 2025、2030 和 2035 年, 供电标准煤耗分别为 297、295 和 $293 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	到 2025、2030 和 2035 年, 供电标准煤耗分别为 297、294 和 $291 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$
热电联产供 热低碳转型	按现有趋势发展	采用更多工业余热, 减少热电联产的能耗	采用更多低碳和零碳热源

$\text{kW} \cdot \text{h}$. 2035~2060 年年均用电增速按照 1.9% 考虑, 2060 年河南省全社会用电量将达到 9 889 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ^[43].

河南省最大负荷增速高于用电量, 2020 年河南省全社会最大负荷 6545 万 kW, 受夏季凉爽多雨气候影响, 多年来首次出现负增长. 随着第三产业和居民生活用电比例上升, 全省用电负荷特性发生明显变化, 负荷增速高于电量增速. 预计到 2025 年, 全社会最大负荷将达到 9 800 万 kW. 2025 年后, 河南将逐步由工业化后期向后工业化阶段迈进, 新兴工业负荷大量涌现, 二产负荷占比继续下降, 三产和居民用电负荷比例将进一步上升, 考虑到分布式发电的普及、需求侧管理的实施和电动汽车及储能技术的大范围应用, 预计 2035 年河南省全社会用电负荷将达到 13 315 万 kW, 2060 年将达到 18 656 万 kW.

2.2 电力行业发展路径

“十三五”以来, 随着新能源发电、吸纳区外电量的迅速增长, 河南电源总体结构不断优化, 煤电装机

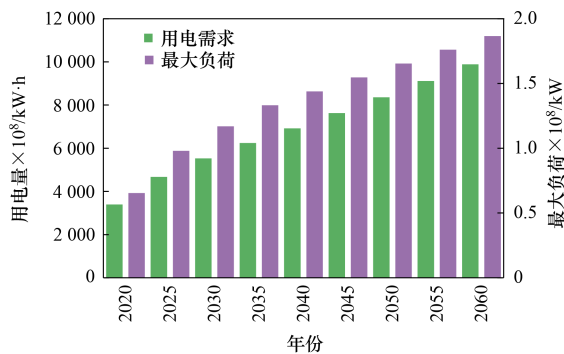


图 2 电力需求与全社会最大负荷预测结果

Fig. 2 Predicted results of electricity demand and maximum social load

占比、发电量占比逐年下降, 但煤电仍保持了省内电源主体地位. 清洁能源发电方面, “十三五”期间, 河南省清洁能源实现了跃升式发展, 风电光伏装机年均增速超过 80%, 远高于全国平均水平. 到 2020 年可再生能源装机占比超过 30%.

河南省 3 种情景下各类电源装机容量预测结果如图 3 所示. 考虑到目前国家的能源安全和煤电的基础地位, 未来煤电装机仍将有一定增长, 常规情景下, 煤电装机将在 2025 年左右达到峰值的 7217 万 kW, 之后煤电仍将发挥兜底保障作用, 煤电装机保持不变, 并一直保持到 2035 年. 考虑国际局势和地缘政治因素, 以及能源安全保障形势变化, 2060 年将保留 2 000 万 kW 的煤电, 并全部安装 CCUS. 控煤情景下煤电装机将在 2025 年左右达到峰值, 并一直维持到 2030 年我国碳达峰目标年, 2030 年后开始缓慢下降, 到 2060 年保留还有能力运行的煤电 (约 1 000 万 kW), 并全部安装 CCUS. 强化情景下加速推进落后机组淘汰, 煤电装机在 2025 年达峰后旧机组按正常退役年限退役, 2060 年河南省煤电装机保留少量, 约 200 万 kW, 仅用来供热和安全性保障, 占总装机不到 1%. 而河南省产业结构偏重、能源结构偏煤问题较为突出, 压控煤炭消费、降低碳排放需要供给侧、需求侧协同发力, 加速推进落后机组淘汰和现役机组节能改造, 科学利用煤电的调节和支撑作用, 完善煤电退出和调峰的市场机制, 增加系统灵活性^[44~47].

坚持集中式和分布式并举, 大力发展风能、太阳能、生物质能、地热等新能源和可再生能源是未来电力发展的重要途径. 3 种情景下, 风光发电均将成为未来新增电源主体. 常规情景下, 到 2030 年, 可再

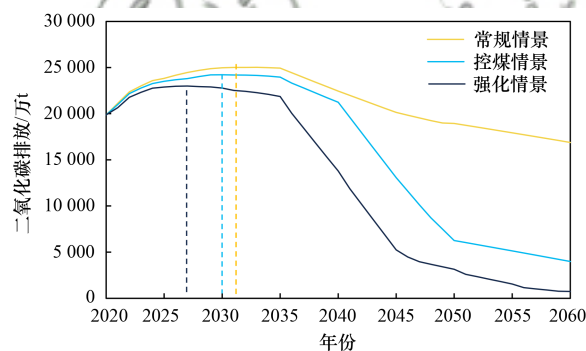
生能源发电量占本地发电量的比例达到 30%。控煤情景下,“十四五”风光装机年均新增量要达到 445 万 kW,生物质装机加速发展,“十四五”年均增长 50 万 kW。预计到 2030 年,风电和光伏发电装机总容量将达到 7 160 万 kW,风光装机年均新增 450 万 kW,新能源装机占比提升至 45%。外调电力是控煤降碳的影响关键因素之一,若 2030 年前第四直流不能投产,则需确保省内新能源发电装机年均增加 650 万 kW 以上。2040 年后开始布局核电。强化情景下核电发展早 5a。为保障新能源快速有序发展,需要出台可再生能源发电发展与消纳保障政策,积极创新可再生能源开发模式和路径,充分利用农村能源发展优势与试点建设经验,加大对生物质发电的政策支持力度,完善电价补贴政策等政策,保障可再生能源发电科学规划、实施与消纳。

河南能源资源禀赋决定了仅依靠河南自身难以保障能源供应,能源对外依存度高,未来电力供需形势趋紧,应积极推进规划已明确的跨省跨区输电通道前期工作,“十四五”时期加快推动陕电送豫直流工程等新增直流建设,其中可再生能源电量比例不低于 50%,提前谋划区外电力送豫工程,充分利用全网统一调度优势,科学制定跨省区电力平衡方案。之后应积极推进与金沙江和雅砻江流域“风光水储一体化”清洁能源基地的对接,持续扩大外电入豫规模,可再生能源电量比例达到 100%,并积极支持依托存量输电通道配套建设水电、风电和光伏发电基地,进一步提升输电通道输送效率。此外,河南省需要从国家层面给予河南支持,统筹规划建设跨省跨区输电通道,在全国(含区域)和省级电力规划编制过程中,结合送受端资源禀赋、电力供需及控煤降碳形势,规划建设跨省跨区输电通道,做好全国电力规划与地方性电力规划之间的有效衔接。

2.3 不同的控煤降碳路径

综合考虑省外来电规划、电源结构优化和技术进步等措施,不同情景下河南省电力行业煤炭消费

量和 CO₂ 排放预测结果分别如图 4 和图 5 所示。碳达峰阶段,常规、控煤和政策情景将分别在 2031 年、2029 年和 2027 年实现煤炭消耗达峰,峰值较 2020 年分别增加 1 881、1 592 和 1 148 万 t 标煤对应碳排放达峰年分别为 2033、2030 和 2028 年(含省外来电碳排放)。对比常规情景,控煤情景通过发展新能源、节能改造等措施,在 2021~2035 年累计实现减煤 3350 万 t 标煤(占常规情景的 2.5%),其中太阳能发电、风力发电、供热低碳转型、煤电节能改造、生物质发电和气电等措施分别贡献约 28%、27%、19%、18%、7% 和 1%。强化情景下各项措施力度增大,2021~2035 年累计实现减煤 9 765 万 t 标煤(占常规情景的 7.2%),其中风电和太阳能发电量增长贡献占比达到 34%,采用太阳能、风能、地热能、热泵及工业余热等清洁热源可以大幅降低煤炭消耗。供热低碳转型对减煤量的贡献达到 30%,应把供热低碳转型纳入构建以新能源为主体的新型能源系统统筹考虑,采用更多低碳、零碳热源,随着电力系统中零碳电力占比的提升,不断提高电热泵供热市场份额,从而减少供热系统碳排放。提高省外来电能力在河南电力系统中至关重要,对减煤量的贡献达到了 25%,河南应积极争取在国家电网系统的规划,同时加快完善建设本地电网系统,超前规划外调电,加快外引清洁能源保障。



虚线表示不同情景的峰值年

图4 不同情景下的含外调电的河南省电力行业碳中和和碳中预测
Fig. 4 Carbon neutrality prediction of Henan Province's power industry with external power adjustment under different scenarios

碳中和阶段,若生物质、水电、气电、风电和其他能源均按照规划的上限来发展,2060年需求侧响应能力达到最大负荷的 12%、2035~2060 年新增四条直流,则 2060 年风光装机至少要达到 3.6 亿 kW,布局核电 2 000 万 kW,剩余煤电、气电全部配备 CCUS(碳捕获、利用与封存)才能满足碳中和目标(控煤情景)。若未来无法增加核电(常规情景),2035 年后需要通过以下两种路径替代:一是进一步发展可再生能源,2035~2060 光伏装机年均增加量要达到 1 500 万 kW,2060 年光伏发电至少要增加到 4.4 亿 kW(按

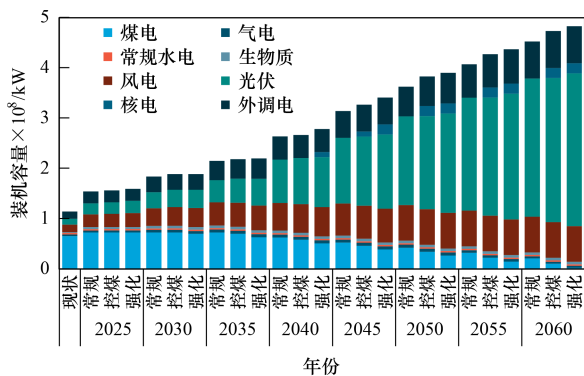


图3 各类电源装机容量预测
Fig. 3 Power capacity prediction

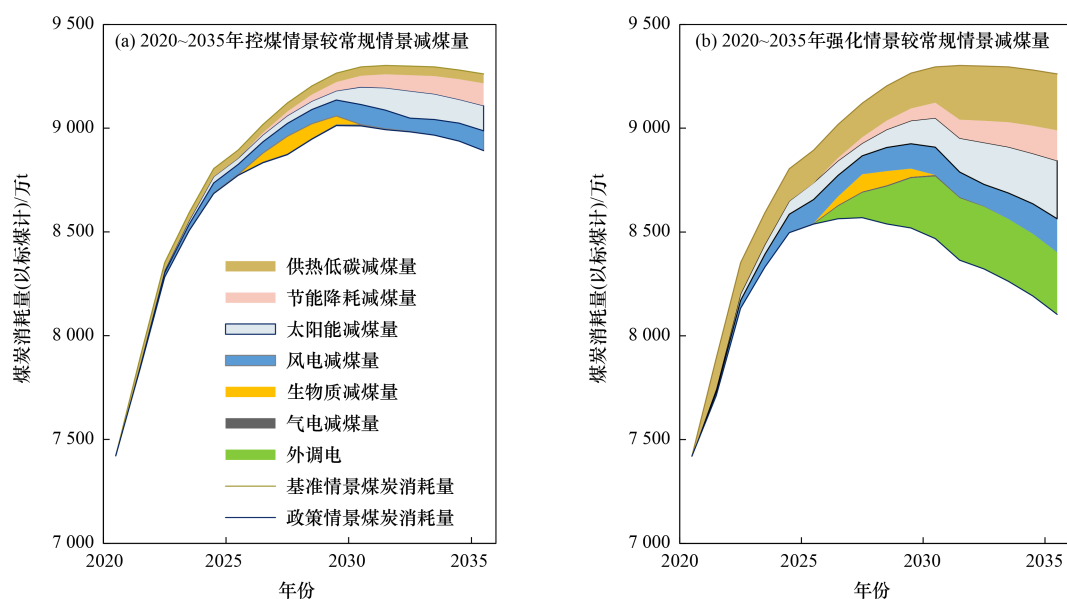


图5 控煤和强化情景较常规情景的减煤量

Fig. 5 Reduced coal consumption of intensified scenario and conventional scenario compared to conventional scenario

照滩涂、沼泽和屋顶面积的58%发展光伏)^[48];二是要加大力度引进清洁省外来电,2035~2060年共需引进8条省外来电,增加3 200亿kW·h的省外来电量。以上两种路径需要对剩余火力发电和生物质能发电全部配套CCUS技术。碳中和阶段,核电发挥了主要作用,控煤情景较常规情景的减煤量的84%由核电发电贡献,强化情景较常规情景减煤量的67%由核电贡献。

3 结论

(1)3种情景下河南省电力行业煤炭消费量在“十四五”期间均呈持续增长趋势,达峰区间为2027~2031年。综合考虑电源结构优化和技术进步等措施,常规、控煤和强化这3种情景下“十四五”河南省电力行业煤炭消费量将持续增长,并分别于2031、2029和2027年达到煤炭消费峰值,峰值较2020年分别增加1 881、1 592和1 148万t标煤。考虑外调电碳排放的情况下,河南省电力行业碳排放将于2033、2030和2028年实现碳达峰。

(2)大力发展以风电和太阳能为主的清洁能源,采用更多低碳零碳热源、提高外调电比例、加大煤电节能改造是碳达峰目标约束下河南省控煤主要措施。相比常规情景,控煤情景下通过发展新能源、节能改造各种措施,在2021~2035年煤炭消耗量较常规情景减少2.5%,其中风电和太阳能发电量增长贡献占比达到55%;强化情景下各项措施力度增大,2021~2035年累计减少煤炭7.2%,其中风电和太阳能发电量增长贡献占比达到34%,供热低碳转型、提高外调电能力贡献较大,分别达到30%和25%。碳中和阶

段,核电发挥了主要作用,67%~84%的减煤贡献由核电贡献。

(3)布局内陆核电是缓解河南省控煤压力与实现“双碳”目标的重要路径之一,需要提前开展论证研究。在布局2 000万kW核电的情况下,河南在2060年风光装机至少要达到3.6亿kW,剩余煤电、气电全部配备碳捕获、利用与封存(CCUS)的情况下才能满足碳中和目标。若未来无法或不考虑增加核电,则需要进一步加强可再生能源发展或加大力度引进清洁外调电,同时还应大力度发展生物质能结合碳捕集与封存(CCUS/BECCS),捕集电力碳排放。

(4)针对河南省减污降碳路径提出以下政策建议:一是科学利用燃煤发电,统筹煤电发展和能源保供,提高电力平衡支撑能力,推进煤电布局优化,完善煤电退出和调峰的市场机制。二是加强统一规划,推动可再生能源超常规发展保障政策实施。统筹推进新能源推广应用与生态环境保护、国土等部门的协调发展;大幅度加强财税金融支持,设立省级新能源发展专项基金;积极创新可再生能源开发模式和路径,充分利用河南省农村能源发展优势与试点建设经验。三是开展河南落地内陆核电研究,安全有序发展核能。尽快对河南省核电发展必要性、可行性、安全性做出科学研判,做好国家规划衔接。四是超前规划外调电,加快外引清洁能源保障。积极挖掘现有外电入豫通道送电能力,加快构建广泛互联的大电网平台,加强城网、农网改造力度,鼓励微电网、智能电网建设,提高电网末端地区的供电能力以及电网安全运行水平。五是增加系统灵活性,促进可再生能源消纳机制。以新的电力规划理念引导“源-网-荷-

储”灵活性资源发展的协调统一;建立公平的灵活性补偿机制并增加灵活性调节产品来完善电力市场机制,激励灵活性资源发展。

参考文献:

- [1] Liu Z, Deng Z, He G, *et al.* Challenges and opportunities for carbon neutrality in China [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, **3**(2): 141-155.
- [2] Duan H B, Zhou S, Jiang K J, *et al.* Assessing China's efforts to pursue the 1.5°C warming limit[J]. *Science*, 2021, **372**(6540): 378-385.
- [3] Han S, Chen H, Long R Y, *et al.* Peak coal in China: a literature review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, **129**: 293-306.
- [4] 袁润松, 丰超. 基于共同前沿生产理论的中国建筑业碳排放驱动因素分解: 2000—2020年[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, **33**(1): 161-170.
Yuan R S, Feng C. Decomposition analysis of driving factors of carbon emissions in China's construction industry based on meta-frontier-production theory: 2000-2020 [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, **33**(1): 161-170.
- [5] Ma X J, Wang C X, Dong B Y, *et al.* Carbon emissions from energy consumption in China: its measurement and driving factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 1411-1420.
- [6] 张福新, 白锋堂. 中长期煤炭消费碳排放与二氧化碳排放值预测[J]. *中国煤炭*, 2022, **48**(4): 36-40.
Zhang F X, Bai F T. Prediction of medium and long term carbon emission and carbon dioxide emission of coal consumption [J]. *China Coal*, 2022, **48**(4): 36-40.
- [7] Wang W S, Kao X X, Lin Z H, *et al.* Has China's coal consumption really peaked? -Prediction and scenario analysis of China's coal consumption peak under the double-carbon target[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**, doi: 10.3389/fenvs.2022.974763.
- [8] Lin J, Fridley D, Lu H Y, *et al.* Has coal use peaked in China: near-term trends in China's coal consumption[J]. *Energy Policy*, 2018, **123**: 208-214.
- [9] Qiao H, Chen S Y, Dong X C, *et al.* Has China's coal consumption actually reached its peak? National and regional analysis considering cross-sectional dependence and heterogeneity [J]. *Energy Economics*, 2019, **84**, doi: 10.1016/j.eneco.2019.104509.
- [10] 夏丹, 王向前. 中国工业各行业煤炭消费总量控制的环境效应: 基于 36 个工业行业的实证研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(2): 227-236.
Xia D, Wang X Q. Environmental effects of total coal consumption control in various industries in China: an empirical research based on 36 industries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(2): 227-236.
- [11] Dong J, Li C B, Wang Q Q. Decomposition of carbon emission and its decoupling analysis and prediction with economic development: a case study of industrial sectors in Henan Province[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **321**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129019.
- [12] Liu L, Wang K, Wang S S, *et al.* Exploring the driving forces and reduction potential of industrial energy-related CO₂ emissions during 2001-2030: a case study for Henan province, China[J]. *Sustainability*, 2019, **11**(4), doi: 10.3390/su11041176.
- [13] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [14] Jones D. Global electricity review 2021 [M]. London: EMBER, 2021.
- [15] 蔡博峰, 吕晨, 董金池, 等. 重点行业/领域碳达峰路径研究方法[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(2): 320-328.
Cai B F, Lü C, Dong J C, *et al.* Research method for carbon peaking pathway in key industries/sectors [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(2): 320-328.
- [16] 王丽娟, 张剑, 王雪松, 等. 中国电力行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(2): 329-338.
Wang L J, Zhang J, Wang X S, *et al.* Pathway of carbon emission peak in China's electric power industry [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(2): 329-338.
- [17] 严刚, 郑逸璇, 王雪松, 等. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(2): 309-319.
Yan G, Zheng Y X, Wang X S, *et al.* Pathway for carbon dioxide peaking in China based on sectoral analysis [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(2): 309-319.
- [18] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. *中国工程科学*, 2021, **23**(6): 1-14.
Shu Y B, Zhang L Y, Zhang Y Z, *et al.* Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, **23**(6): 1-14.
- [19] 朱法华, 王玉山, 徐振, 等. 中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J]. *电力科技与环保*, 2021, **37**(3): 9-16.
Zhu F H, Wang Y S, Xu Z, *et al.* Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's power industry [J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2021, **37**(3): 9-16.
- [20] Liu J L, Wang K, Zou J, *et al.* The implications of coal consumption in the power sector for China's CO₂ peaking target[J]. *Applied Energy*, 2019, **253**, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113518.
- [21] Chen X M, Liang Q M, Liu L C, *et al.* Critical structural adjustment for controlling China's coal demand [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **235**: 317-327.
- [22] Wei W, Mushtaq Z, Sharif M, *et al.* Evaluating the coal rebound effect in energy intensive industries of China [J]. *Energy*, 2020, **207**, doi: 10.1016/j.energy.2020.118247.
- [23] 刘晓龙, 葛琴, 姜玲玲, 等. 中国煤炭消费总量控制路径的思考[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, **29**(10): 160-166.
Liu X L, Ge Q, Jiang L L, *et al.* Consideration on the route of total coal consumption control in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, **29**(10): 160-166.
- [24] Bamisile O, Wang X K, Adun H, *et al.* A 2030 and 2050 feasible/sustainable decarbonization perusal for China's Sichuan Province: a deep carbon neutrality analysis and EnergyPLAN [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, **261**, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115605.
- [25] Wang K, Wang S S, Liu L, *et al.* Environmental co-benefits of energy efficiency improvement in coal-fired power sector: a case study of Henan Province, China[J]. *Applied Energy*, 2016, **184**: 810-819.
- [26] 文凡, 陈彦佐, 车佳辰, 等. “双碳”背景下区域电力-氢能系统协同优化规划[J]. *全球能源互联网*, 2022, **5**(4): 318-330.
Wen F, Chen Y Z, Che J C, *et al.* Collaborative optimal planning of regional power-hydrogen system towards carbon peak and neutrality [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, **5**(4): 318-330.
- [27] 王汉新, 王兆云, 张枫. “双碳”目标下河北电力行业碳达峰

- 路径的情景分析[J]. 河北地质大学学报, 2022, 45(6): 92-97.
- Wang H X, Wang Z Y, Zhang F. Scenario analysis of carbon peaking path of Hebei electric power industry under "Double Carbon" target[J]. Journal of Hebei GEO University, 2022, 45(6): 92-97.
- [28] 孙洲平, 万军, 候媛媛. 山西省电力热力行业碳达峰路径研究[J]. 山西电力, 2022, (5): 23-27.
- Sun Z P, Wan J, Hou Y Y. Study on carbon peaking scheme of electric power and heat industry in Shanxi[J]. Shanxi Electric Power, 2022, (5): 23-27.
- [29] Wang Y L. Research on the relationship between green energy use, carbon emissions and economic growth in Henan province[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9, doi: 10.3389/fenrg.2021.701551.
- [30] Yang F, Li S C, Gao Y, *et al.* Inconsistent carbon budget estimation using dynamic/static carbon density under land use and land cover change: a case study in Henan province, China[J]. Land, 2022, 11(12), doi: 10.3390/land11122232.
- [31] Sun B, Li Y F, Zeng Y, *et al.* The total social cost evaluation of two wind and PV energy development modes: a study on Henan of China[J]. Energy Reports, 2021, 7: 6565-6580.
- [32] 河南省人民政府. 河南省人民政府关于印发河南省“十四五”现代能源体系和碳达峰碳中和规划的通知[EB/OL]. <https://www.henan.gov.cn/2022/02-22/2402738.html>, 2022-02-22.
- [33] 河南省发展和改革委员会, 河南省财政厅, 河南省自然资源厅, 等. 关于印发《河南省新能源和可再生能源发展“十四五”规划》的通知[EB/OL]. <https://fgw.henan.gov.cn/2023/04-17/2726482.html>, 2023-04-17.
- [34] 曹东, 张静, 薛英岚, 等. 碳达峰碳中和目标约束下重点行业的煤炭消费总量控制路线图研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2023.
- [35] 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.
- [36] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 2020年河南省国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. <https://www.henan.gov.cn/2021/03-08/2104927.html>, 2021-03-07.
- [37] 河南省统计局. 河南统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [38] 河南省人民政府. 河南省人民政府关于印发河南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的通知[EB/OL]. https://www.henan.gov.cn/2021/04-13/2124914.html?_ivk_sa=1023197, 2021-04-13.
- [39] 工业和信息化部, 国家发展改革委, 生态环境部. 工业和信息化部 国家发展改革委 生态环境部关于印发工业领域碳达峰实施方案的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content_5703910.htm, 2022-08-01.
- [40] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm, 2022-03-23.
- [41] 张静, 薛英岚, 赵静, 等. 重点行业/领域碳达峰成本测算及社会经济影响评估[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 414-423.
- Zhang J, Xue Y L, Zhao J, *et al.* Evaluation of cost and economic impact of China's carbon peak pathway on key industries[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 414-423.
- [42] 魏澄宙, 谷建全, 刘湘莅, 等. 河南蓝皮书: 河南能源发展报告(2022)——碳达峰碳中和与能源绿色发展[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022.
- [43] 魏澄宙, 谷建全, 刘湘莅, 等. 河南蓝皮书: 河南能源发展报告(2021)——“十四五”与现代能源体系[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021.
- [44] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望2021[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [45] 王志平. 火电厂灵活性深度调峰改造技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [46] 袁家海, 徐燕, 雷祺. 电力行业煤炭消费总量控制方案和政策研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [47] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于开展全国煤电机组改造升级的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/03/content_5648562.htm, 2021-11-03.
- [48] 侯正猛, 熊鹰, 刘建华, 等. 河南省碳达峰与碳中和战略、技术路线和行动方案[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 23-36.
- Hou Z M, Xiong Y, Liu J H, *et al.* Strategy, technical route and action plan towards carbon peak and carbon neutrality in Henan Province[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 23-36.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i>	(1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-rui	(1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao	(1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i>	(1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i>	(1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i>	(1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i>	(1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i>	(1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing	(1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i>	(1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i>	(1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i>	(1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i>	(1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i>	(1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i>	(1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i>	(1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i>	(1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i>	(1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i>	(1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i>	(1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i>	(1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i>	(1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i>	(1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i>	(1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i>	(1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i>	(1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie	(1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i>	(1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, <i>et al.</i>	(1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing	(1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i>	(1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i>	(1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i>	(1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i>	(1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i>	(1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i>	(1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-lie, <i>et al.</i>	(1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i>	(1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i>	(1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming	(1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i>	(1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i>	(1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i>	(1781)
Effect of Silica Fertilizer(Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing	(1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i>	(1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i>	(1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i>	(1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i>	(1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i>	(1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i>	(1859)