

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 ..... 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 ..... 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 ..... 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O<sub>3</sub> 驱动因素挖掘 ..... 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 ..... 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O<sub>3</sub> 来源解析 ..... 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 ..... 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 ..... 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 ..... 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 ..... 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空变化及驱动机制多维探测 ..... 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM<sub>2.5</sub> 小时浓度估算 ..... 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM<sub>2.5</sub> 重污染过程输送和增长特性 ..... 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 ..... 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 ..... 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 ..... 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 ..... 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 ..... 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 ..... 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 ..... 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 ..... 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 ..... 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 ..... 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 ..... 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 ..... 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 ..... 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 ..... 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 ..... 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 ..... 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 ..... 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 ..... 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 ..... 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 ..... 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 ..... 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化水中有机微污染物 ..... 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 ..... 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 ..... 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 ..... 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 ..... 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 ..... 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 ..... 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 ..... 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 ..... 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 ..... 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 ..... 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 ..... 梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 ..... 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 ..... 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 ..... 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 ..... 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 ..... 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 ..... 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 ..... 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 ..... 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 ..... 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 ..... 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

# 基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径

向梦宇, 王深\*, 吕连宏, 张楠, 白梓函

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 当前我国同时面临改善生态环境质量和实现碳达峰碳中和两大战略任务, 协同推进减污降碳已成为我国经济社会发展全面绿色转型的必然选择, 电力部门在转型过程中将发挥重要作用. 面向不同的电力需求情景, 构建低成本实现碳达峰、碳中和的多目标模型, 求解得出减污降碳协同增效最优路径方案. 结果表明, 在如期实现碳达峰、碳中和目标的前提下, 减污和降碳协同性较好, 两者协同控制可高效助力低碳转型的实现; 优化电力部门发电结构是实现减污降碳协同增效的关键措施, 研究期火电占比不断下降, 清洁电力占比超过 92.5%; 不同电力需求下二氧化碳和主要大气污染物排放量有明显差异, 其中二氧化碳排放量受电力需求影响最大, 低电力需求、中等电力需求和高电力需求情景下峰值二氧化碳排放量分别为 94.16 亿、104.09 亿和 107.46 亿 t, 主要污染物二氧化硫、氮氧化物和颗粒物的排放同样表现出在低电力需求、中等电力需求和高电力需求情景下依次递增的趋势. 电力需求的提高仅增加了电力部门内部发电结构调整的压力, 未影响到其他部门的产量和活动水平, 即电力需求导致的电力部门减排压力未表现出部门间传递的趋势.

**关键词:** 碳达峰; 碳中和; 减污降碳; 多目标规划模型; 电力需求

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3637-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202207256

## Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China

XIANG Meng-yu, WANG Shen\*, LÜ Lian-hong, ZHANG Nan, BAI Zi-han

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Nowadays, China is faced with two strategic tasks: improving ecological environmental quality and realizing carbon neutrality and carbon peaking. Synergy to reduce pollution and carbon emissions has become an inevitable choice for the comprehensive green transition of economic and social development in China. The electric power sector will play an important role in the transition process. Based on different power demand scenarios, a multi-objective model was constructed to achieve carbon peaking and carbon neutrality at a low cost, and the optimal path scheme of carbon emission reduction synergy was obtained. The results showed that under the premise of achieving carbon peaking and carbon neutrality as scheduled, pollution reduction and carbon reduction had good synergies, and their synergistic control could effectively facilitate the realization of the low-carbon transition. Optimizing the power generation structure of the electric power sector was the key measure to achieving the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction. During the study period, the proportion of thermal power decreased continuously, and the proportion of clean power exceeded 92.5%. The emissions of carbon dioxide and major air pollutants were significantly different under different power demands. Carbon dioxide emissions were most affected by power demand. The peak carbon dioxide emissions under low power demand, medium power demand, and high power demand were 9.416 billion, 10.409 billion, and 10.746 billion t, respectively. The emissions of sulfur dioxide, nitrogen oxide, and particulate matter also showed an increasing trend in the low power demand, medium power demand, and high power demand scenarios. The increase in power demand only increased the pressure of power generation structure adjustment within the electric power sector, without affecting the output and activity level of other sectors, that is, the pressure of emission reduction in the electric power sector caused by power demand did not show the trend of transmission between sectors.

**Key words:** carbon peaking; carbon neutrality; reduce pollution and carbon emissions; multi-objective programming model; demand for electricity

工业革命后, 全球气温升高速度正在加快, 温室气体导致的气候变化问题成为了世界各国必须面对的重大非传统安全挑战<sup>[1]</sup>. 有研究认为温室气体浓度的增加主要由人类活动造成, 世界各国纷纷采取措施, 制定本国温室气体减排目标, 积极应对气候变化问题<sup>[2,3]</sup>. 从总量来看, 中国的二氧化碳排放量约占全球总排放量的 30.7%, 位于世界之首<sup>[4]</sup>, 中国的低碳转型迫在眉睫. 2020 年 9 月, 中国宣布了 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的目标, 将减碳纳入了中国的生态文明整体布局中, 是中国主动应对气候变化的战略之举, 也体现了中国负责任大国的担当.

不同于发达国家先解决污染问题再强化碳排放

控制的顺序<sup>[5]</sup>, 我国同时面临着减污和降碳两大环境任务. 当前我国正处于打好污染防治攻坚战的关键时期, 污染治理必须摆在生态环境治理的重要位置, 同时碳达峰碳中和目标的实现也面临着巨大的现实挑战<sup>[6]</sup>. 考虑到温室气体和主要大气污染物的排放有着同根、同源和同过程的特征<sup>[7]</sup>, 同时实现减污和降碳两大环保任务具有可操作性. 2020 年 7 月 30 日, 国民经济和社会发展“十四五”规划中明确提出“协同推进减污降碳”的要求. 这也意味着我国的生

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2022-10-08

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2021YSKY-07); 中央财政科技计划结余经费专项(2021-JY-29)

作者简介: 向梦宇(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为能源与环境经济, E-mail: xiangmycraes@163.com

\* 通信作者, E-mail: wshen1581@163.com

态环境保护进入了以降碳为重点,减污降碳协同治理的新阶段<sup>[8]</sup>。面对新阶段,我国各部门因能源结构和排放特点不同<sup>[9]</sup>,将应对不同的挑战。我国各部门中,电力部门是当前最主要能源消费部门,我国以煤炭为主的能源结构导致了以火电为主的电力结构,使其存在巨大的减排潜力。以钢铁和水泥行业为代表的工业部门结构相对稳定,减排潜力相对固定。建筑供热和交通部门正逐步向新能源转型。

一方面,电力部门的转型升级在生态环境治理中发挥着至关重要的作用。高煤耗的电力结构以及我国巨大的电力需求使得电力部门成为我国最主要的二氧化碳排放部门和大气污染物排放部门<sup>[10]</sup>。根据 IEA 报告,2020 年我国电力部门贡献了当年能源行业 47% 的二氧化碳排放量<sup>[11]</sup>。各部门用能电力化是未来的发展趋势,因此,电力部门在减污降碳协同增效的新治理阶段中发挥着重要作用。多个学者和机构从预测未来排放情景、部门能源结构转型和发展低碳技术等方面,对电力部门的低碳转型进行考察。郝鑫等<sup>[12]</sup>从电力供应方角度提出了电力行业低碳转型的路径。吴郢等<sup>[13]</sup>组合多种技术情景,对电力部门的低碳转型路径和转型成本收益进行了考察。李晖等<sup>[14]</sup>在碳中和目标下,对我国电力系统的未来发展进行研判。黄雨涵等<sup>[15]</sup>梳理了电力部门能源供给、消费侧碳减排和碳移除等技术,分析了电力部门低碳化技术的发展现状和应用前景。

另一方面,减污降碳协同增效的研究正在深入开展。现阶段关于“减污降碳协同增效”的研究已经认识到了污染减排措施和减碳措施的正负协同效应<sup>[16,17]</sup>,并对协同效应进行定量化评估<sup>[18,19]</sup>和实现机制分析<sup>[20,21]</sup>,评估减排潜力<sup>[22]</sup>以及由此产生的环境、健康和社会福利效应等<sup>[23]</sup>。国内研究对重点地区的减污降碳协同效应进行了评估分析<sup>[24~26]</sup>,也有研究考察了重点排放行业的减污降碳协同效果<sup>[27,28]</sup>,如周颖等<sup>[29]</sup>利用能源环境经济投入产出模型研究了水泥行业主要常规污染物和二氧化碳之间的协同减排方式。同时,注意到构建减污降碳协同治理制度体系的重要性<sup>[30]</sup>,李海生等<sup>[31]</sup>提出以制度建设为保障,从“源头-过程-末端”全过程一体化构建减污降碳协同制度体系。郑逸璇等<sup>[32]</sup>梳理了大气环境治理与碳减排的关键协同路径,并且针对性提出政策措施建议。

考虑电力部门的重要性,需要考察不同电力需求情景下减污降碳协同增效的路径。因此,本文设置不同电力需求情景,构建基于低成本碳中和、碳达峰路径的多目标模型,考察不同电力需求情景下,如何推进各部门调整的同时使经济增长保持合理速

度,并求出各情景下成本最低的减污降碳协同增效路径规划方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源和情景设定

全规划期为 2030 ~ 2060 年,包括 2030 年前碳达峰以及 2060 年前碳中和目标年份。数据来源于中国统计年鉴(人口、二氧化硫、氮氧化物、颗粒物、森林资源情况、能源消费总量及构成、万元国内生产总值能源消费量、不同类发电装机容量和工业产品产量等数据);各部门行业发展规划、电力集团公告报告、能源统计年鉴(分行业能源消费总量、人均电力消费量、能源折标准煤参考系数、分行业电力消费总量、消费与国内生产总值增长速度、人均能源生产量和消费量、人均生活用能量和分地区废气中主要污染物排放情况)、电力年鉴和中国低碳年鉴(森林资源面积)<sup>[33~37]</sup>。经过整理,本研究数据为跨度 30 a 的面板数据,来自不同文献的同类或同质性数据以中国统计年鉴为准,且数据全部来自 2020 年官方年鉴公布最新数据。

模型以减污降碳协同增效为目标,在各情景下对能源、交通、工业生产和居民生活等各部门产业结构进行优化,将资源在各个产业之间优化配置,实现各部门产业结构低成本绿色转型以及经济高质量增长。

首先依据人口总量、经济增长、能源结构和能源强度等与能源活动和污染物排放的关系,预测中国未来的能源活动和污染物排放情况,根据人口总量和经济总量与电力需求的关系来预测未来电力需求,具体预测方法详见文献<sup>[38]</sup>。进一步,以预测得出的电力需求结果上下浮动 10% 为标准<sup>[39]</sup>,本文设置了基于人口、能源活动和经济状况的高电力需求、中等电力需求和低电力需求 3 种需求情景,3 种情景之间的差异来源于对我国中长期经济发展速度的考虑。高需求代表的是中国未来保持较快的经济发展速度,中需求代表较为稳健的经济发展速度,低需求代表缓慢的经济发展速度。其中,中等电力需求情景主要预测指标取值如表 1 所示。

### 1.2 模型构建

在投入产出模型结果基础上,建立多目标规划模型,通过产业结构优化实现 GDP 稳定、各部门产业绿色转型成本最低、高能耗高排放产业减少、社会能源消费减少、污染物以及碳排放的减少等多个目标,为我国各部门结构调整提供不同情景下的优化路径。模型以我国 2030 年前碳达峰以及 2060 年前碳中和为研究目的设置相应约束条件,并设置不同电力需求以及各行业的用能新能源比例、污染物

表 1 主要预测指标取值  
Table 1 Value of main predictor

指标	取值		取值依据
	2030 年	2035 年	
人口总量	$14.5 \times 10^8$ 人	$14.5 \times 10^8$ 人	国务院《国家人口发展规划(2016~2030 年)》;2030 年人口总量达到 14.5 亿人左右
经济增长	2021~2025 年: 5% 2026~2030 年: 4.8%	4.7%	《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》:“国内生产总值年均增长保持在合理区间、各年度视情提出”,明确提出“中国到 2035 年实现经济总量或者人均收入翻一番”;“十三五”规划:到 2020 年实现国内生产总值和城乡居民人均收入比 2010 年翻一番;清华大学国情研究院:2020~2035 年,中国经济年度平均增速 4.8% 左右
能源结构	煤炭:石油:天然气:非化石能源 = 0.4:0.15:0.2:0.25	煤炭:石油:天然气:非化石能源 = 0.35:0.12:0.22:0.31	习总书记在气候雄心峰会明确:非化石能源占一次能源消费比重达到 25% 左右;《中国能源革命十年展望(2021~2030)》:2030 年不超过 60 亿 t 标准煤,煤炭需求占比降至 40% 左右,天然气和非化石能源供给量占能源供应总量的 45% 以上;中国国家发展改革委能源研究所首席顾问、原所长韩文科:到 2035 年,清洁能源比重重要大幅上升,到 2050 年中国非化石能源占一次能源消费比重达 50% 以上
能源强度	2021~2025 年:平均降低 2.7%; 2026~2030 年:平均降低 2.4%	2030~2035 年:平均降低 2%	国家发改委“十三五”规划纲要草案:“十三五”时期单位 GDP 能源消耗累计降低 15%;“十四五”规划纲要:“十四五”期间单位 GDP 能源消耗累积降低 13.5%

控制和碳排放控制等约束条件,以 GDP 稳定、各部门产业绿色转型成本最低、高能耗高排放产业减少、社会能源消费减少、污染物以及碳排放的减少

等为模型多目标.本研究思路如图 1 所示.为了避免重复计算问题,CO<sub>2</sub> 和污染物间接排放的计算均使用处理的排污系数.

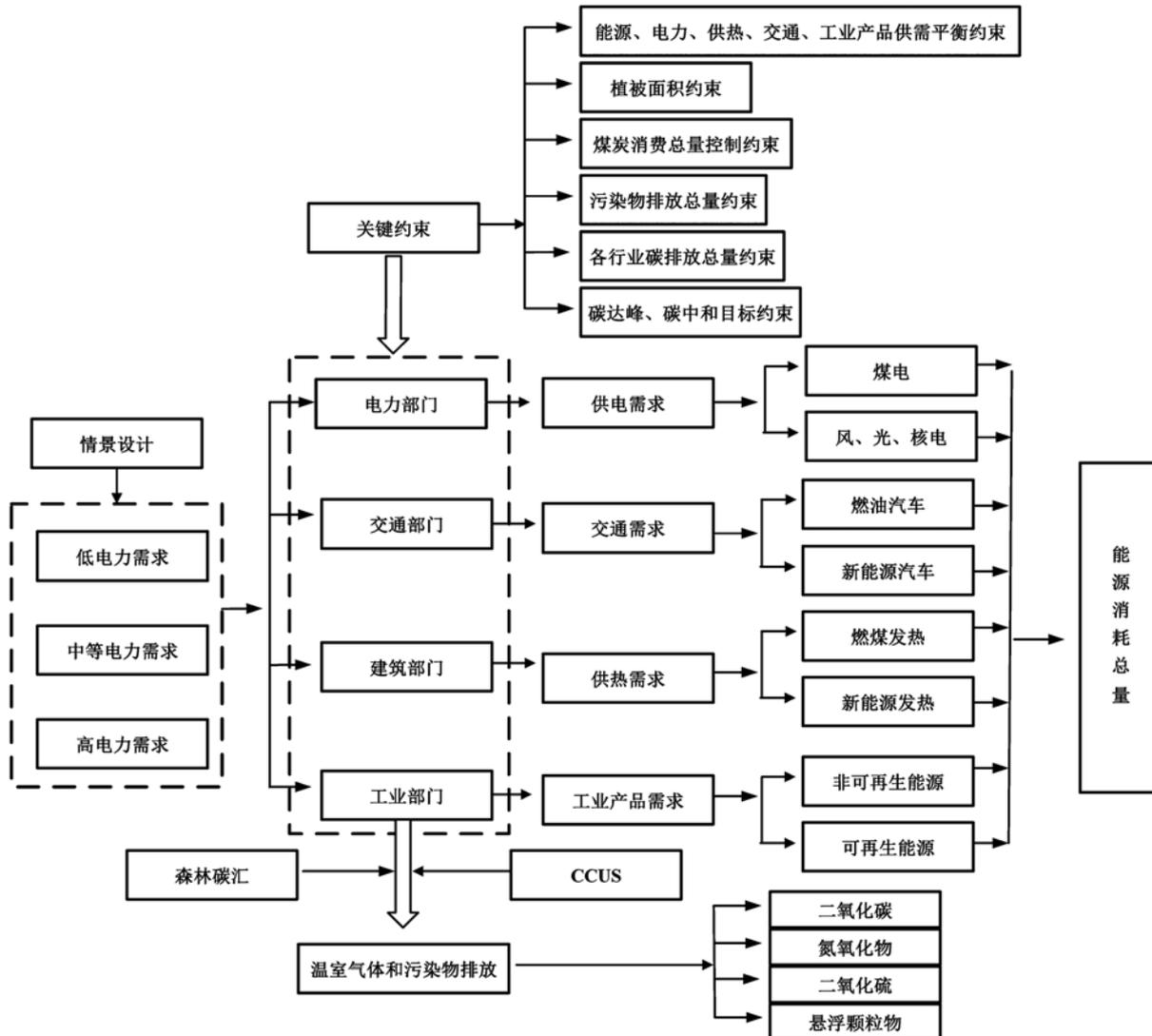


图 1 基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径研究思路

Fig. 1 Research ideas on synergistic paths of pollution reduction and carbon reduction based on different power demands in China

成本最小目标为:

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I E_{i,t} CE_{i,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J Q_{j,t} CQ_{j,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K H_{k,t} CH_{k,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^V TR_{v,t} CTR_{v,t} + \sum_{t=1}^T VE_t CV_t + \sum_{t=1}^T CCS_t CS_t + \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^I EN_{i,t} CEN_{i,t} + \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{j=1}^J QIN_{j,t} CQN_{j,t} + \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{k=1}^K HN_{k,t} CHN_{k,t} + \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{v=1}^V TRN_{v,t} CTRN_{v,t} + \sum_{t=1}^T VEN_t CVN_t \quad (1)$$

式中,  $t$  表示 2021~2060 年的跨度,  $t=1, \dots, 40$ ;  $i$  表示碳排放的主要产业, 其中  $i=1, \dots, 4$ ; 1、2、3 和 4 分别表示钢铁、化工、建材和其他用煤产业;  $j$  表示发电方式, 其中  $j=1, \dots, 4$ ; 1、2、3、4 和 5 分别代表火电、核电、水电、风电和太阳能;  $k$  表示供热方式, 其中  $k=1, 2$ , 1 和 2 分别表示燃煤供热和非燃煤供热;  $v$  表示交通方式, 其中  $v=1, 2$ , 1 和 2 分别表示汽油车和新能源汽车;  $E_{i,t}$  表示各行业产业能耗量, t;  $CE_{i,t}$  表示行业单位能耗成本, 万元·t<sup>-1</sup>;  $Q_{j,t}$  表示发电量, kW·h;  $CQ_{j,t}$  表示各发电方式的发电成本, 万元·(kW·h)<sup>-1</sup>;  $H_{k,t}$  表示供热量, 10<sup>9</sup> J;  $CH_{k,t}$  表示供热成本, 万元·(10<sup>9</sup> J)<sup>-1</sup>;  $TR_{v,t}$  表示交通运输能耗量, 汽油车为 L, 电动汽车为 kW·h;  $CTR_{v,t}$  表示单位车辆能源成本, 汽油车为万元·L<sup>-1</sup>, 电动汽车为

万元·(kW·h)<sup>-1</sup>;  $VE_t$  表示森林面积, m<sup>2</sup>;  $CV_t$  表示森林养护成本, 万元·m<sup>-2</sup>;  $CCS_t$  表示碳捕集量, t;  $CS_t$  表示单位碳捕集量的建设以及运行成本, 万元·t<sup>-1</sup>;  $EN_{i,t}$  表示新增产业的生产能耗量, t;  $CEN_{i,t}$  表示各行业新增生产量单位耗能配套设施建设成本, 万元·t<sup>-1</sup>;  $QIN_{j,t}$  表示电力系统新增装机容量, kW;  $CQN_{j,t}$  表示电力系统新增装机容量成本, 万元·kW<sup>-1</sup>;  $HN_{k,t}$  表示新增供热量, 10<sup>9</sup> J;  $CHN_{k,t}$  表示单位新增供热量建设成本, 万元·10<sup>9</sup> J<sup>-1</sup>;  $TRN_{v,t}$  表示新增交通工具能耗量, 汽油车为 L, 电动汽车为 kW·h;  $CTR_{v,t}$  表示单位新增交通能源成本, 汽油车为万元·L<sup>-1</sup>, 电动汽车为万元·(kW·h)<sup>-1</sup>;  $VEN_t$  表示新增植树造林面积, m<sup>2</sup>;  $CVN_t$  表示植树造林成本, 万元·m<sup>-2</sup>.

污染物排放最小目标为:

$$\min g = \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I E_{i,t} PE_{i,t,p} + \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J Q_{j,t} PQ_{j,t,p} + \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K H_{k,t} PH_{k,t,p} + \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^V TR_{v,t} PTR_{v,t,p} \quad (2)$$

式中,  $p$  表示污染物种类,  $p=1, 2$ , 其中 1 和 2 分别表示二氧化硫和氮氧化物;  $PE_{i,t,p}$  表示单位各行业产业生产量排污系数;  $PQ_{j,t,p}$  表示单位发电量排污

系数;  $PH_{k,t,p}$  表示单位供热量排污系数;  $PTR_{v,t,p}$  表示单位交通量排污系数.

碳排放最小目标为:

$$\min h = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I E_{i,t} CNE_{i,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J Q_{j,t} CNQ_{j,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K H_{k,t} CNH_{k,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^V TR_{v,t} CNTR_{v,t} - \sum_{t=1}^T VE_t \beta_t - \sum_{t=1}^T CCS_t \quad (3)$$

式中,  $CNE_{i,t}$  表示单位各行业产业生产量二氧化碳排放系数;  $CNQ_{j,t}$  表示单位发电量二氧化碳排放系数;  $CNH_{k,t}$  表示单位供热量二氧化碳排放系数;  $CNTR_{v,t}$  表示单位交通量二氧化碳排放系数;  $\beta_t$  表示森林单位面积的二氧化碳汇集量, t·m<sup>-2</sup>.

约束条件如下.

产业能源需求供应约束为:

$$E_{i,t} \geq DE_{i,t} \quad (4)$$

$$E_{i,t} = E_{i,t-1} + EN_{i,t-1} - EN_{i,t} \quad (5)$$

$$EN_{i,t} \geq 0 \quad (6)$$

$$EO_{i,t} \geq 0 \quad (7)$$

式中,  $DE_{i,t}$  表示各行业产业生产能源需求量, t;  $EO_{i,t}$  表示各行业产业生产自然淘汰量能耗, t.

电力需求供应约束为:

$$\sum_{j=1}^J Q_{j,t} \geq DQ_{j,t} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{j,t} \leq QI_{j,t} T \quad (9)$$

$$QI_{j,t} = QI_{j,t-1} + QIN_{j,t-1} - QIO_{j,t-1} - QIN_{j,t-1} \quad (10)$$

$$QIN_{j,t} \geq 0 \quad (11)$$

$$QIO_{j,t} \geq 0 \quad (12)$$

$$QID_{j,t} \geq 0 \quad (13)$$

$$QIN_{j,t} \sum_{j=2}^J Q_{j,t} / \sum_{j=1}^J Q_{j,t} \geq \eta_t \quad (14)$$

式中,  $DQ_{j,t}$  表示需求发电量, kW·h;  $QI_{j,t}$  表示实际电力系统装机量, kW;  $QIO_{j,t}$  表示自然淘汰发电装机量 kW;  $QID_{j,t}$  表示非自然拆除装机量, kW;  $T$  表示单位年电力系统机组运行时长, h;  $\eta_t$  表示新能源比例.

供热需求平衡为:

$$\sum_{k=1}^K H_{k,t} \geq DH_t \quad (15)$$

$$H_{k,t} = H_{k,t-1} + HN_{k,t-1} + HO_{k,t-1} \quad (16)$$

$$HN_{k,t} \geq 0 \quad (17)$$

$$HO_{k,t} \geq 0 \quad (18)$$

$$\sum_{k=2}^K H_{k,t} / \sum_{k=1}^K H_{k,t} \geq \sigma \quad (19)$$

式中,  $DH_t$  表示供热需求, PJ;  $HN_{k,t}$  表示新增供热量, PJ;  $HO_{k,t}$  表示自然淘汰供热量, PJ;  $\sigma$  表示新能

源供热比例。

交通能源供需约束为:

$$TR_{v,t} \geq DTR_{v,t} \quad (20)$$

$$TR_{v,t} = TR_{v,t-1} + TRN_{v,t-1} - TRO_{v,t-1} \quad (21)$$

$$TRN_{v,t} \geq 0 \quad (22)$$

$$TRO_{v,t} \geq 0 \quad (23)$$

式中,  $DTR_{v,t}$  表示交通能源需求, 汽油车和新能源汽车的交通能源需求单位分别为 L 和  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $TRN_{v,t}$  表示新增交通能源消费量, 汽油车和新能源汽车的交通能源需求单位分别为 L 和  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $TRO_{v,t}$  表示自然淘汰交通能源消费量, 汽油车和

$$\sum_{i=1}^I E_{i,t} CAE_{i,t} + \sum_{j=1}^J Q_{j,t} CAQ_{j,t} + \sum_{k=1}^K H_{k,t} CAH_{k,t} + \sum_{v=1}^V TR_{v,t} CNTR_{v,t} \leq CAM_t \quad (28)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J Q_{j,t} CAQ_{j,t}}{\sum_{i=1}^I E_{i,t} CAE_{i,t} + \sum_{j=1}^J Q_{j,t} CAQ_{j,t} + \sum_{k=1}^K H_{k,t} CAH_{k,t} + \sum_{v=1}^V TR_{v,t} CNTR_{v,t}} \leq \psi_t \quad (29)$$

式中,  $CAE_{i,t}$  表示单位各行业产业生产量煤炭消费量,  $t$ ;  $CAQ_{j,t}$  表示单位发电量煤炭消费量,  $t$ ;  $CAH_{k,t}$  表示单位供热量煤炭消费量,  $t$ ;  $CAM_t$  表示年煤炭消费总量上限值,  $t$ ;  $\psi_t$  表示电力系统煤炭消耗规划占比。

污染物排放总量限制为:

$$\sum_{i=1}^I E_{i,t} PE_{i,t,p} + \sum_{j=1}^J Q_{j,t} PQ_{j,t,p} + \sum_{k=1}^K H_{k,t} PH_{k,t,p} + \sum_{v=1}^V TR_{v,t} PTR_{v,t,p} \leq PM_{t,p} \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^I E_{i,t} PE_{i,t,p} \leq PEM_{t,p} \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{j,t} PQ_{j,t,p} \leq PQM_{t,p} \quad (32)$$

$$\sum_{k=1}^K H_{k,t} PH_{k,t,p} \leq PHM_{t,p} \quad (33)$$

$$\sum_{v=1}^V TR_{v,t} PTR_{v,t,p} \leq PTRM_{t,p} \quad (34)$$

式中,  $PM_{t,p}$  表示各大气污染物总量控制上限,  $t$ ;  $PEM_{t,p}$  表示产业大气污染物总量控制上限,  $t$ ;

$$\sum_{i=1}^I E_{i,t} CNE_{i,t} + \sum_{j=1}^J Q_{j,t} CNQ_{j,t} + \sum_{k=1}^K H_{k,t} CNH_{k,t} + \sum_{v=1}^V TR_{v,t} CNTP_{v,t} - VE_t \beta_t - CCS_t \leq \sum_{i=1}^I E_{i,10} CNE_{i,10} + \sum_{j=1}^J Q_{j,10} CNQ_{j,10} + \sum_{k=1}^K H_{k,10} CNH_{k,10} + \sum_{v=1}^V TR_{v,10} CNTP_{v,10} - VE_{10} \beta_{10} - CCS_{10}, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (39)$$

$$\sum_{i=1}^I E_{i,t} CNE_{i,t} + \sum_{j=1}^J Q_{j,t} CNQ_{j,t} + \sum_{k=1}^K H_{k,t} CNH_{k,t} + \sum_{v=1}^V TR_{v,t} CNTP_{v,t} - VE_t \beta_t - CCS_t > \sum_{i=1}^I E_{i,t+1} CNE_{i,t+1} + \sum_{j=1}^J Q_{j,t+1} CNQ_{j,t+1} + \sum_{k=1}^K H_{k,t+1} CNH_{k,t+1} + \sum_{v=1}^V TR_{v,t+1} CNTR_{v,t+1} - VE_{t+1} \beta_{t+1} - CCS_{t+1}, \quad t = 1, 2, \dots, T-1 \quad (40)$$

2060 年碳中和约束为:

新能源汽车的交通能源需求单位分别为 L 和  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

植被面积约束为:

$$VE_t \geq DVE_t \quad (24)$$

$$VE_t = VE_{t-1} + VEN_{t-1} \quad (25)$$

$$VEN_t \geq 0 \quad (26)$$

$$VE_t \gamma_t \geq CNV_t \quad (27)$$

式中,  $DVE_t$  表示植被需求,  $\text{m}^2$ ;  $VEN_t$  表示新增植树造林;  $\gamma_t$  表示单位面积植被蓄积量的碳汇量,  $\text{t} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $CNV_t$  表示碳汇量下限值,  $t$ 。

煤炭消费总量控制约束为:

$PQM_{t,p}$  表示电力系统大气污染物总量控制上限,  $t$ ;  $PHM_{t,p}$  表示供热系统大气污染物总量控制上限,  $t$ ;  $PTRM_{t,p}$  表示交通大气污染物总量控制上限,  $t$ 。

各行业碳排放总量控制约束为:

$$\sum_{i=1}^I E_{i,t} CNE_{i,t} \leq CEM_t \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{j,t} CNQ_{j,t} - CCS_t \leq CQM_t \quad (36)$$

$$\sum_{k=1}^K H_{k,t} CNH_{k,t} \leq CHM_t \quad (37)$$

$$\sum_{v=1}^V TR_{v,t} CNTR_{v,t} \leq CTM_t \quad (38)$$

式中,  $CME_t$  表示产业二氧化碳总量控制上限,  $t$ ;  $CQM_t$  表示电力系统二氧化碳总量控制上限,  $t$ ;  $CHM_t$  表示供热系统二氧化碳总量控制上限,  $t$ ;  $CTM_t$  表示交通系统二氧化碳总量控制上限,  $t$ 。

上述所涉及的约束条件取值均利用 kaya 方程的扩展形式所得。

2030 年碳达峰约束为:

$$\sum_{i=1}^I E_{i,40} \text{CNE}_{i,40} + \sum_{j=1}^J E_{j,40} \text{CNQ}_{j,40} + \sum_{k=1}^K H_{k,40} \text{CNH}_{k,40} + \sum_{v=1}^V \text{TR}_{v,40} \text{CNTP}_{v,40} - \text{CCS}_{40} \leq \text{VE}_{40} \beta_{40} \quad (41)$$

## 2 结果与讨论

构建多目标规划模型,计算得出在3种电力需求情景下,二氧化碳和主要大气污染物减排路径,在保证行业需求,满足各项约束情景下得出电力、钢铁、水泥、建筑和交通为代表的各行业结构优化路径。

### 2.1 重点行业

以钢铁和水泥为代表的工业部门通过强产能控制,优化生产制造流程,走高质量和减量化的发展道路.钢铁部门的粗钢生产量和水泥生料的生产量在3种电力需求情景下表现一致,都呈现出下降趋势(图2),说明钢铁和水泥为代表的工业部门产量相对独立,基本不受电力需求量影响.2030、2035、2040、2045、2050、2055和2060年粗钢生产量分别为:12.98亿、11.57亿、10.92亿、10.24亿、9.46亿、8.52亿和5.86亿t.2030、2035、2040、2045、2050、2055和2060年水泥生料生产量分别为:27.17亿、23.99亿、22.55亿、21.01亿、16.46亿、14.22亿和10.09亿t.

钢铁和水泥等传统工业部门结构稳定,电力需求的变化对其产量和活动水平没有造成明显影响,

因此工业部门依靠调整产量和结构转型应对电力需求变化的潜力有限,优化用能结构提高终端电力水平是实现工业部门减污降碳的根本途径.结合已有研究,保证产量的情况下,促进能源结构转型有望使工业部门2050年排放量减少5亿t<sup>[40]</sup>,其中,对于钢铁部门而言,短流程电炉炼钢可在2030年贡献减排量59%~72%<sup>[41]</sup>.

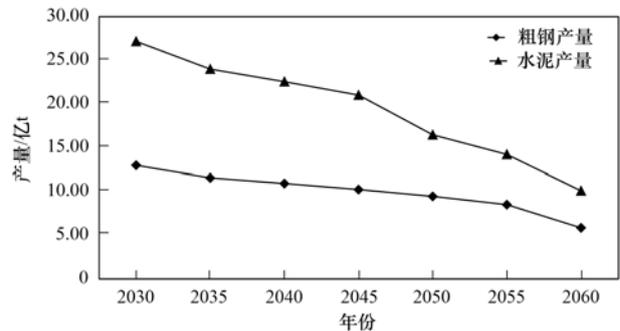


图2 重点年份粗钢产量、水泥产量

Fig. 2 Crude steel output and cement output in key years

电力部门的低碳转型是实现碳中和的重要抓手,随着主要能源需求部门的电气化水平提高,零碳电力的实现是能源系统零碳转型的重中之重<sup>[42]</sup>.电力部门在用电需求构成方面发生了很大变化(图3).本文考察了不同电力需求情景下对于火电、核

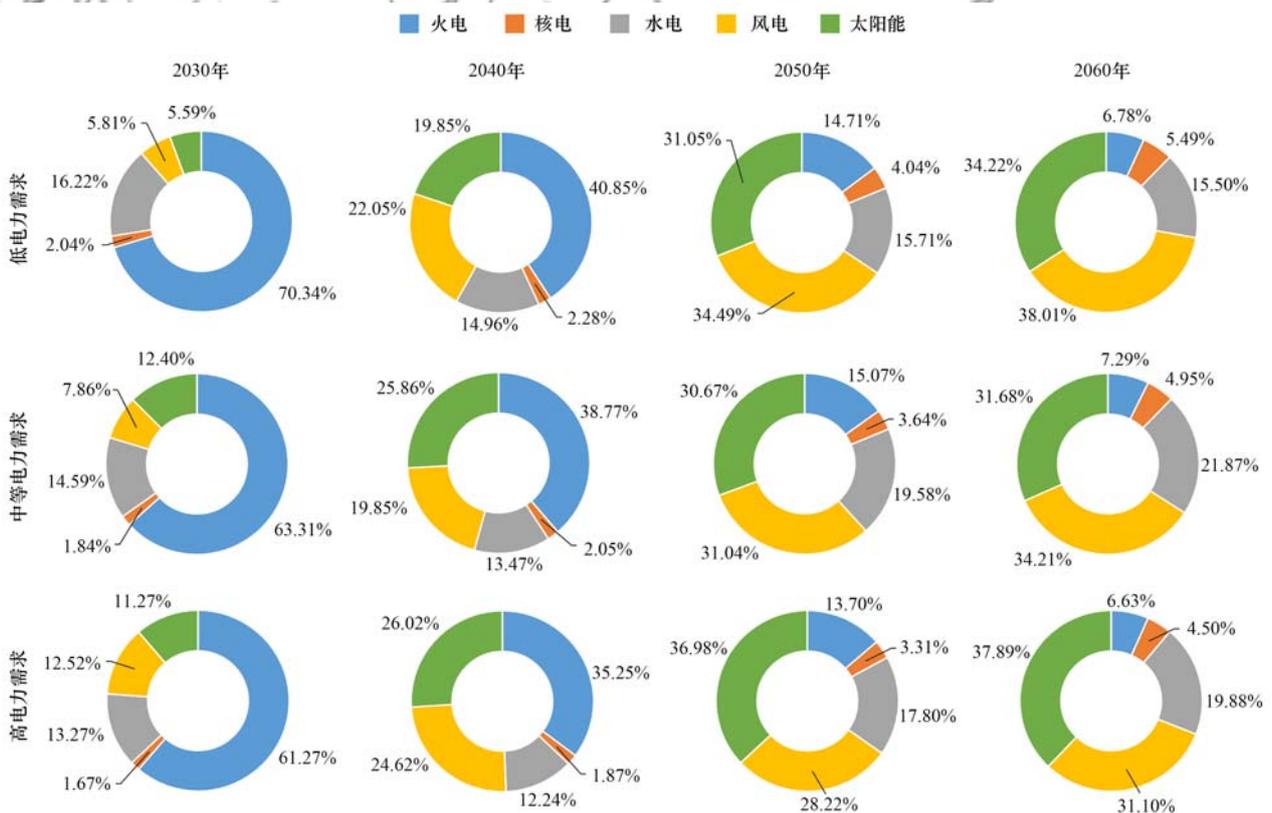


图3 重点年份发电结构

Fig. 3 Power generation structure in key years

电、风电、水电和太阳能发电规划发电量的数量和比例变化趋势。燃煤发电是电力部门碳排放的主要来源,碳中和情景下,应该严格控制常规煤电项目的建设,保证燃煤发电所占比例逐渐降低。

低电力需求情景下,火电规划发电量从 2030 年的 60 627.21 亿 kW·h 下降为 2060 年的 4 350.15 亿 kW·h,同时火电规划发电量所占比例逐步下降,由 70.34% 下降至 6.78%。在中等电力需求的情景下,2030~2060 年,火电规划发电量从 2030 年的 6 0627.21 亿 kW·h 下降为 2060 年的 5 199.68 亿 kW·h,火电规划发电量所占比例分别为 63.31%、52.01%、38.77%、25.34%、15.07%、10.18% 和 7.29%。高电力需求情景下,火电规划发电量在 2030~2035 年间先略有上升,而后显著下降,从 2030 年的 64 545.29 亿 kW·h 下降为 2060 年的 5 199.68 亿 kW·h,2030、2035、2040、2045、2050、2055 和 2060 年火电规划发电量分别为:64 545.29 亿、65 120.52 亿、41 929.85 亿、24 112.07 亿、11 594.21 亿、7 477.62 亿和 5 199.68 亿 kW·h,火电规划发电量所占比例分别由 61.27% 下降为 6.63%。

2030~2060 年是电力部门碳排放快速下降和实现碳中和的阶段<sup>[43]</sup>,电力生产侧可再生能源的发电量和装机占比不断增加,灵活电网技术基本成熟。电力部门的碳排放量随着高比例可再生能源的应用而显著下降。碳中和目标下,核电、风电、水电和太阳能发电规划发电量的数量和比例变化明显,低电力需求情景下,核电规划发电量从 2030 年的 1 762.45 亿 kW·h 上升为 2060 年的 3 524.90 亿 kW·h,水电规划发电量在前期略微上升,但在 2045 年后下降。风电规划发电量和太阳能发电规划发电量在前期大幅度上升,2045~2050 年略有下降而后缓慢上升。核电规划发电量所占比例较为稳定;水电规划发电量所占比例有所波动,但总体趋势比较稳定。风电和太阳能发电规划发电量所占比例有大幅度增加,其中风电规划发电量所占比例从 2030 年的 5.81% 上升至 2060 年的 38.01%,太阳能发电规划发电量所占比例由 2030 年的 5.59% 上升至 2060 年的 34.22%。

中等电力需求情景下,核电规划发电量从 2030 年的 1 762.45 亿 kW·h 上升为 2060 年的 3 524.90 亿 kW·h。水电规划发电量从 2030 年的 13 975.77 亿 kW·h 上升为 2060 年的 15 589.72 亿 kW·h。风电规划发电量和太阳能发电规划发电量在前期大幅度上升,2045 年后略有下降。核电规划发电量所占比例较为稳定,略有上升;水电规划发电量所占比例有

所波动,但总体而言略有上升。风电和太阳能发电规划发电量所占比例有大幅度增加,其中风电规划发电量所占比例从 2030 年的 7.86% 上升至 2060 年的 34.21%,太阳能发电规划发电量所占比例由 2030 年的 12.4% 上升至 2060 年的 31.68%。

高电力需求情景下,核电规划发电量略有上升,从 2030 年的 1 762.45 亿 kW·h 上升为 2060 年的 3 524.90 亿 kW·h。水电规划发电量略微上升,从 2030 年的 13 975.77 亿 kW·h 上升为 2060 年的 15 589.72 亿 kW·h。风电和太阳能发电规划发电量在前期大幅度上升,2045 年后略有下降。核电规划发电量在总用电需求中所占比例较小,并且有小幅度上升,从 2030 年的 1.67% 上升为 2060 年的 4.5%;水电规划发电量所占比例有所波动,但总体占比有所上升。风电规划发电量所占比例在 2030~2035 年间略有下降,随后大幅度上升,太阳能发电规划发电量所占比例有大幅度增加,其中风电规划发电量所占比例从 2030 年的 12.52% 上升至 2060 年的 31.10%,太阳能发电规划发电量所占比例有 2030 年的 11.27% 上升至 2060 年的 37.89%。

在建筑部门的建筑供热方面(图 4),北方冬季的供暖和供热是建筑部门主要的碳排放来源。碳达峰碳中和目标下,建筑供热进行电力化和清洁化改造,燃煤供热量不断下降而新能源供热量不断增加。从总量来看,在 2045 年,新能源供热量为 6 494.65 亿 kW·h 超过供热量为 5 944.7 亿 kW·h 的燃煤供热量。从燃煤供热和新能源供热所占比例来看,燃煤供热所占比例不断下降而新能源供热所占比例不断上升,在 2045 年,新能源供热所占比例为 52%,超过所占比例为 48% 的燃煤供热,成为主要供热来源。

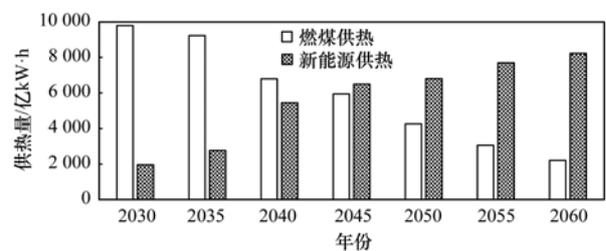


图 4 重点年份建筑供热构成

Fig. 4 Building heating composition in key years

在交通方面(图 5),客货运周转量与国民经济有着密切的相关关系<sup>[44]</sup>,交通需求量的增加要求从燃料替代、交通运输结构优化和降低能耗这 3 个方面入手,实现交通部门低碳转型。其中,电气化是交通运输的重要减排手段,电动汽车能效比传统汽车高出一半<sup>[45]</sup>,新能源汽车尤其是电动汽车的推广对交通业的二氧化碳减排贡献最为显著,到 2030 年可

贡献 55% 的碳减排量<sup>[46]</sup>. 3 种情景下, 燃油汽车与新能源汽车能耗量和能耗所占比例不断变化. 受碳达峰目标约束, 燃油汽车能耗量于 2030 年实现达峰, 燃油汽车能耗量(以标准煤计, 下同)在 2040 年前呈现下降趋势, 2030 年为 3.62 亿 t, 2035 年为 3.24 亿 t, 在 2040 年以后稳定在 0.8 亿 t; 同时新能源汽车作为传统燃油汽车的替代品, 其能耗量在 2030~2060 年间不断上升, 能耗量所占比例不断上升, 而燃油汽车能耗量所占比例不断下降.

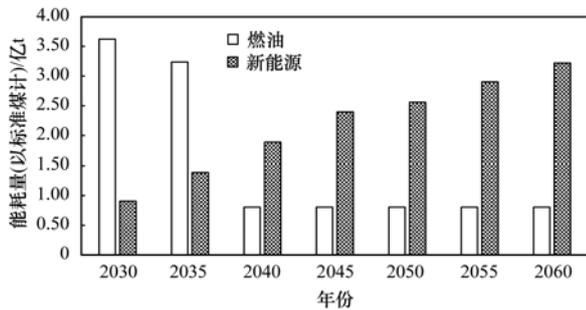


图 5 重点年份交通能耗构成

Fig. 5 Composition of transportation energy consumption in key years

各部门结构差异较大, 考虑部门联动效应可发现, 电力需求的增加造成了一定程度的二氧化碳排放量和主要大气污染物的增加, 但因电力部门内部结构调整以及减污降碳协同控制措施, 污染物排放可控制在合理的范围内, 二氧化碳和大气污染物排放量增加的压力并没传递到别的部门, 因此保证了部门间减排压力的相对独立, 减排问题的复杂性与难度也保持在可控范围内.

## 2.2 大气污染物排放特征

人类的能源生产和消费活动是大气污染物的主要排放来源. 不同电力需求情景下能源使用数量与结构的差别使得大气污染物呈现出不同排放路径.

从二氧化硫排放量来看(图 6), 低电力需求情景下, 二氧化硫排放量呈现下降趋势, 并在 2040~2045 年间出现大幅度下降. 2030、2035、2040、2045、2050、2055 和 2060 年的二氧化硫排放量分别为: 383.73 万、363.34 万、330.57 万、179.06 万、149.79 万、130.41 万和 98.47 万 t. 中等电力需求和高电力需求情景下, 二氧化硫排放量同样呈现下降趋势, 并在 2040~2045 年间出现大幅度下降. 逐年排放量略高于低电力需求情景下排放量.

在氮氧化物排放中(图 7), 工业源排放占比为 42%, 交通源排放占比为 35%, 火力发电排放占比为 19%, 民用源排放占比为 4%. 3 种电力需求情景下氮氧化物排放量均在 2045 年前呈现快速下降趋势, 在 2045~2060 年呈现平稳下降趋势. 不同电力需求对于氮氧化物的排放量影响较小, 2050 年后, 3

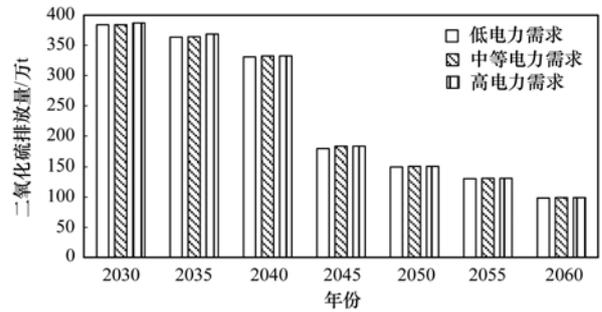


图 6 二氧化硫排放量

Fig. 6 Sulfur dioxide emissions

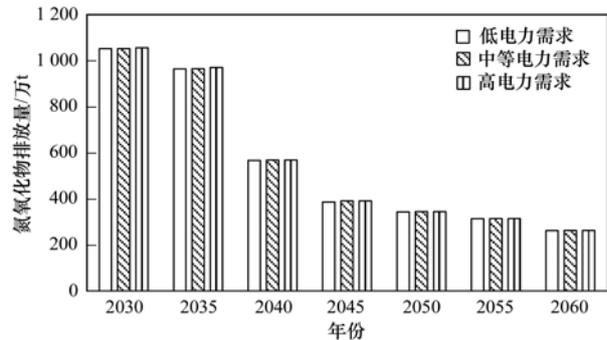


图 7 氮氧化物排放量

Fig. 7 Nitrogen oxide emissions

种电力需求下氮氧化物排放量的差距不超过 1 万 t.

从颗粒物排放量来看(图 8), 3 种情景下颗粒物排放量呈现出相同下降趋势, 并在 2040~2045 年间出现大幅度下降, 大气污染物末端治理技术的成熟使得污染物排放量下降幅度增加. 如在低电力需求情景下, 2030、2035、2040、2045、2050、2055 和 2060 年颗粒物排放量分别为: 857.55 万、813.08 万、775.14 万、381.17 万、326.03 万、292.35 万和 227.09 万 t. 但比较而言, 电力需求情景下的颗粒物排放量差距较小, 最大差距不超过 2.5 万 t, 在减排后期, 差距不足 0.5 万 t, 电力需求影响可忽略不计.

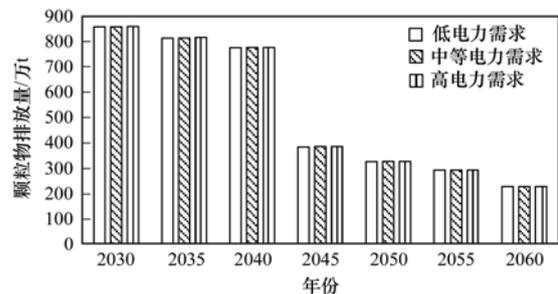


图 8 颗粒物排放量

Fig. 8 Particulate emissions

## 2.3 二氧化碳排放特征

从二氧化碳排放量来看(图 9), 在低电力需求的情景下, 2030~2060 年期间, 二氧化碳排放量呈现明显的下降趋势, 2030、2035、2040、2045、2050、2055 和 2060 年的二氧化碳排放量分别为: 94.16

亿、87.50 亿、73.58 亿、52.18 亿、37.01 亿、27.88 亿和 21.68 亿 t。在中等电力需求的情景下,二氧化碳排放量呈现明显的下降趋势,2030、2035、2040、2045、2050、2055 和 2060 年的二氧化碳排放量分别为:104.09 亿、97.91 亿、73.58 亿、52.18 亿、37.01 亿、30.29 亿和 22.02 亿 t。高电力需求的情景下,二氧化碳排放量呈现明显的下降趋势,2030、2035、2040、2045、2050、2055 和 2060 年的二氧化碳排放量分别为:107.46 亿、103.00 亿、73.58 亿、52.18 亿、37.01 亿、30.29 亿和 22.02 亿 t。根据多阶段混合主导型碳中和实现模式碳中和目标实现过程分解(MMCN)<sup>[47]</sup>,可将 2020~2060 年按照减排特征划分为 3 个阶段,其中可将本文研究期间划分为 2 个阶段,2031~2045 阶段的目标是快速大幅降低碳排放量,2046~2060 阶段目标是深度脱碳和低碳,本研究结果显示前期阶段受到电力需求的影响明显大于后期阶段,因此应抓住前期减排关键期,控制合理电力需求。

3 种电力需求情景下二氧化碳排放量均在 2030 年到达顶峰后,随后可实现平稳下降,避免了断崖式下降现象的出现,证明我国 2030 年、2060 年的碳达峰、碳中和时间节点设定合理。本文得出峰值碳排放量为 94.16~107.46 亿 t,对比已有研究和报告,结果比较一致,皆认为中国可在 2025~2030 年间实现碳达峰,峰值碳排放量在 94~110 亿 t 之间<sup>[48~50]</sup>,到 2060 年剩余碳排放量为 21.68~22.02 亿 t<sup>[51,52]</sup>,考虑各项负排放技术,中国可以在承诺年份实现全社会碳中和。

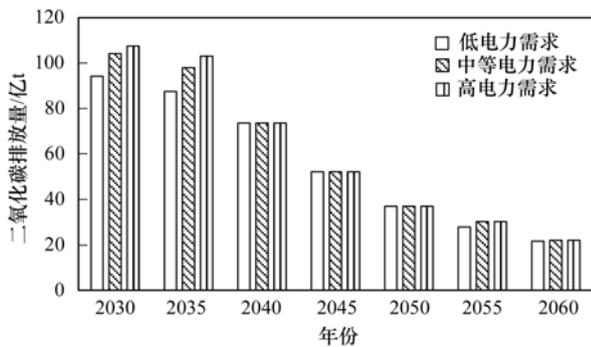


图 9 二氧化碳排放量

Fig. 9 Carbon dioxide emissions

### 3 结论

(1)减污和降碳协同效果较好,减碳目标约束下,二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物和颗粒物的排放都呈现出明显的下降趋势,减污和降碳具有协同治理的巨大潜力。其中二氧化碳排放量受电力需求影响最大,受电力需求影响最为显著的阶段是碳中

和前期阶段,此阶段的目标是大幅度降低碳排放量。由于减污工作起步较早,减污技术发展成熟,不同电力需求情景下其他大气污染物排放量差距不大。因此应该将减污降碳协同增效的重点放在降碳环节。

(2)减污降碳协同增效的关键举措在于优化电力部门能源结构。减污和降碳目标下,用电需求结构发生很大变化,火电规划发电量明显下降,到 2060 年,低电力需求情景下,火电规划发电量占比由 70.34% 下降至 6.78%,中等电力需求情景下,火电规划发电量占比由 63.31% 下降至 7.29%。高电力需求情景下,火电规划发电量占比由 61.27% 下降至 6.63%。3 种情景下清洁电力规划发电量占比均超过 92.5%,低电力需求情景下,清洁电力规划发电量占比为 93.22%,中等电力需求情景下,清洁电力规划发电量占比为 92.71%,高电力需求情景下,清洁电力规划发电量占比为 93.37%,其中太阳能发电和风电是主要的清洁电力来源。

(3)电力部门的低碳转型对于碳排放和大气污染物总量控制起着较大作用。低电力需求情景下峰值二氧化碳排放量为 94.16 亿 t,中等电力需求情景下峰值二氧化碳排放量为 104.09 亿 t,高电力需求情景下峰值二氧化碳排放量为 107.46 亿 t。因此,控制用电总量和改善发电结构是控制污染物排放的关键影响因素,且电力行业转型技术成熟,电力结构转型可行性高。减污降碳需形成以电力转型为主的规划路径。

(4)各部门结构差异较大,电力需求的增加造成了一定程度的二氧化碳排放量和主要大气污染物排放量的增加,对于电力部门而言,部门内部发电能源结构调整可行性大,电力部门需要及时调整发电结构来分散电力需求增加造成的减污降碳压力。观察不同情景下其他部门的产量和活动水平,工业、建筑和交通部门结构稳定,减排潜力有限,电力需求的变化对于工业、建筑和交通等部门活动基本没有造成影响,因此可认为部门间减排压力独立性较强,本文研究的电力需求变化幅度造成的电力部门减排压力没有传导给其他部门。因此,在满足人口变化和发展的电力需求的前提下,想要保证减污降碳,可优先考虑由电力部门承担相应减排压力。

#### 参考文献:

- [1] 李政,张东杰,潘玲颖,等。“双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议[J]. 动力工程学报, 2021, 41(11): 905-909, 971.
- Li Z, Zhang D J, Pan L Y, et al. Low-carbon transition of China's energy sector and suggestions with the 'carbon-peak and carbon-neutrality' target[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(11): 905-909, 971.
- [2] 张楠,吕连宏,王斯一,等。基于文献计量分析的碳中和研

- 究进展[J]. 环境工程技术学报, 2023, **13**(2): 464-472.
- Zhang N, Lü L H, Wang S Y, *et al.* Analysis of research progress in carbon neutrality based on bibliometrics[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, **13**(2): 464-472.
- [3] 邓明君, 罗文兵, 尹立娟. 国外碳中和理论研究与实践发展述评[J]. 资源科学, 2013, **35**(5): 1084-1094.
- Deng M J, Luo W B, Yin L J. A systematic review of international theory, Research and Practice on Carbon Neutrality [J]. Resources Science, 2013, **35**(5): 1084-1094.
- [4] BP. Statistical review of world energy[EB/OL]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>, 2022-05-10.
- [5] 熊华文. 减污降碳协同增效的能源转型路径研究[J]. 环境保护, 2022, **50**(1-2): 35-40.
- Xiong H W. The study on energy transformation path of achieving synergizing the reduction of pollution and carbon emissions[J]. Environmental Protection, 2022, **50**(1-2): 35-40.
- [6] 张楠, 张保留, 吕连宏, 等. 碳达峰国家达峰特征与启示[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(4): 1912-1921.
- Zhang N, Zhang B L, Lü L H, *et al.* Peaking characteristics and enlightenment based on carbon peak countries [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(4): 1912-1921.
- [7] 顾斌杰, 赵海霞, 骆新燎, 等. 基于文献计量的减污降碳协同减排研究进展与展望[J]. 环境工程技术学报, 2023, **13**(1): 85-95.
- Gu B J, Zhao H X, Luo X L, *et al.* Research progress and prospect of collaborative emissions reduction of pollution and carbon dioxide emissions based on bibliometrics[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, **13**(1): 85-95.
- [8] 于雷, 牛韧, 薛强, 等. “三线一单”减污降碳协同管控的基本思路与建议[J]. 环境影响评价, 2022, **44**(2): 28-33, 38.
- Yu L, Niu R, Xue Q, *et al.* Fundamental considerations and suggestions of synergetic control of the “three lines one permit” and pollution and carbon reduction [J]. Environmental Impact Assessment, 2022, **44**(2): 28-33, 38.
- [9] Zhang N, Lv L H, Zhao M X, *et al.* A comparative study of stage characteristics and factorial decomposition of CO<sub>2</sub> emissions between China and the USA [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(32): 48769-48783.
- [10] 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.
- [11] IEA. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China [EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>, 2022-06-12.
- [12] 郝鑫, 孔英. 电力行业碳中和的实现路径与对策[J]. 开放导报, 2021, (5): 28-36.
- Hao X, Kong Y. Path and solution of carbon neutralization in electric power industry[J]. China Opening Journal, 2021, (5): 28-36.
- [13] 吴娜, 余碧莹, 邹颖, 等. 碳中和愿景下电力部门低碳转型路径研究[J]. 中国环境管理, 2021, **13**(3): 48-55.
- Wu Y, Yu B Y, Zou Y, *et al.* The path of low-carbon transformation in China's power sector under the vision of carbon neutrality[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, **13**(3): 48-55.
- [14] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, **41**(18): 6245-6258.
- Li H, Liu D, Yao D Y. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, **41**(18): 6245-6258.
- [15] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, **41**(S1): 28-51.
- Huang Y H, Ding T, Li Y T, *et al.* Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, **41**(S1): 28-51.
- [16] 郑佳佳, 孙星, 张牧吟, 等. 温室气体减排与大气污染控制的协同效应——国内外研究综述[J]. 生态经济, 2015, **31**(11): 133-137.
- Zheng J J, Sun X, Zhang M Y, *et al.* Review of researches on the synergistic effect of GHGs mitigation and air pollution control at home and abroad[J]. Ecological Economy, 2015, **31**(11): 133-137.
- [17] 叶芳羽, 单汨源, 李勇, 等. 碳排放权交易政策的减污降碳协同效应评估[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2022, **36**(2): 43-50.
- Ye F Y, Shan M Y, Li Y, *et al.* An evaluation of the synergistic effect of air pollutants and carbon reduction of the carbon emissions trading policy[J]. Journal of Hunan University (Social Sciences), 2022, **36**(2): 43-50.
- [18] Liu T L, Song Q J, Lu J Q, *et al.* An integrated approach to evaluating the coupling coordination degree between low-carbon development and air quality in Chinese cities[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, **12**(5): 710-722.
- [19] 贾璐宇, 王艳华, 王克, 等. 大气污染防治措施二氧化碳协同减排效果评估[J]. 环境保护科学, 2020, **46**(6): 19-26, 43.
- Jia L Y, Wang Y H, Wang K, *et al.* Evaluation of carbon dioxide coordination emission reduction based on national air pollution control plan [J]. Environmental Protection Science, 2020, **46**(6): 19-26, 43.
- [20] 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 等. 中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4408-4418.
- Bai Z H, Lü L H, Zhao M X, *et al.* Pollution and carbon reduction effect of OFDI in China and its mechanism [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4408-4418.
- [21] 田丹宇, 常纪文. 大气污染物与二氧化碳协同减排制度机制的建构[J]. 法学杂志, 2021, **42**(4): 101-107.
- Tian D Y, Chang J W. Construction on collaborative emission reduction of air pollutants and carbon dioxide[J]. Law Science Magazine, 2021, **42**(4): 101-107.
- [22] 谢元博, 李巍. 基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 2057-2064.
- Xie Y B, Li W. Synergistic emission reduction of chief air pollutants and greenhouse gases based on scenario simulations of energy consumptions in Beijing [J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 2057-2064.
- [23] 毛显强, 曾桢, 胡涛, 等. 技术减排措施协同控制效应评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, **21**(12): 1-7.
- Mao X Q, Zeng A, Hu T, *et al.* Study of coordinate control effect assessment of technological measures for emissions reduction[J]. China Population, Resources and Environment,

- 2011, **21**(12): 1-7.
- [24] 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.
- [25] 俞珊, 张双, 张增杰, 等. 北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 1998-2008.  
Yu S, Zhang S, Zhang Z J, *et al.* Scenario simulation and effects assessment of co-control on pollution and carbon emissions reduction in Beijing[J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 1998-2008.
- [26] 唐湘博, 张野, 曹利珍, 等. 中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(10): 2252-2263.  
Tang X B, Zhang Y, Cao L Z, *et al.* Spatio-Temporal characteristics and influencing mechanism of synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(10): 2252-2263.
- [27] Zhou K L, Yang S L, Shen C, *et al.* Energy conservation and emission reduction of China's electric power industry [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, **45**: 10-19.
- [28] Uherek E, Halenka T, Borken-Kleefeld J, *et al.* Transport impacts on atmosphere and climate: land transport [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(37): 4772-4816.
- [29] 周颖, 张宏伟, 蔡博峰, 等. 水泥行业常规污染物和二氧化碳协同减排研究[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(12): 164-168.  
Zhou Y, Zhang H W, Cai B F, *et al.* Synergetic reduction of local pollutants and CO<sub>2</sub> from cement industry [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **36**(12): 164-168.
- [30] 姜华, 高健, 阳平坚. 推动减污降碳协同增效建设人与自然和谐共生的美丽中国[J]. 环境保护, 2021, **49**(16): 17-19.  
Jiang H, Gao J, Yang P J. Promote co-control of air pollutants and GHGs to build a beautiful China with harmonious coexistence between human and nature[J]. Environmental Protection, 2021, **49**(16): 17-19.
- [31] 李海生, 陈胜, 吴丰成, 等. 协同创新科技助力打赢蓝天保卫战[J]. 环境保护, 2021, **49**(7): 8-11.  
Li H S, Chen S, Wu F C, *et al.* Collaborative innovations and technological boost to beat air pollution [J]. Environmental Protection, 2021, **49**(7): 8-11.
- [32] 郑逸璇, 宋晓晖, 周佳, 等. 减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J]. 中国环境管理, 2021, **13**(5): 45-51.  
Zheng Y X, Song X H, Zhou J, *et al.* Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: pathway and policy [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, **13**(5): 45-51.
- [33] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2020.
- [34] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2020.
- [35] 《中国电力年鉴》编辑委员会. 中国电力年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005-2020.
- [36] 《中国低碳年鉴》编委会. 中国低碳年鉴[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2005-2020.
- [37] 国家电网公司. 国家电网有限公司社会责任报告[EB/OL]. <http://www.sgcc.com.cn/html/files/2022-07/21/20220721120427708767768.pdf>, 2022-04-20.
- [38] 王深, 吕连宏, 张保留, 等. 基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(9): 2044-2055.  
Wang S, Lü L H, Zhang B L, *et al.* Multi objective programming model of low-cost path for China's peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(9): 2044-2055.
- [39] 邱波, 赵勇, 夏清. 我国中长期电力需求增长趋势研究[J]. 中国能源, 2018, **40**(11): 21-27.  
Qiu B, Zhao Y, Xia Q. Research on the growth trend of medium and long-term power demand in China [J]. Energy of China, 2018, **40**(11): 21-27.
- [40] 刘俊伶, 夏侯沁蕊, 王克, 等. 中国工业部门中长期低碳发展路径研究[J]. 中国软科学, 2019, (11): 31-41, 54.  
Liu J L, Xiahou Q R, Wang K, *et al.* Study on mid-and long-term low carbon development pathway of China's industry sector [J]. China Soft Science, 2019, (11): 31-41, 54.
- [41] 汪旭颖, 李冰, 吕晨, 等. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(2): 339-346.  
Wang X Y, Li B, Lü C, *et al.* China's iron and steel industry carbon emissions peak pathways [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(2): 339-346.
- [42] 丁甜甜, 李玮. 经济增长与减排视角下电力行业碳达峰预测[J]. 科技管理研究, 2019, **39**(18): 246-253.  
Ding T T, Li W. Peak forecast of carbon emissions in the power industry from the perspective of economic growth and emission reduction [J]. Science and Technology Management Research, 2019, **39**(18): 246-253.
- [43] Wang C, Sun R S, Zhang J T. Supportive technologies and roadmap for China's carbon neutrality [J]. China Economist, 2021, **16**(5): 32-70.
- [44] 刘建翠. 中国交通运输部节能潜力和碳排放预测[J]. 资源科学, 2011, **33**(4): 640-646.  
Liu J C. Energy saving potential and carbon emissions prediction for the transportation sector in China [J]. Resources Science, 2011, **33**(4): 640-646.
- [45] 袁志逸, 李振宇, 康利平, 等. 中国交通部门低碳排放措施和路径研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2021, **17**(1): 27-35.  
Yuan Z Y, Li Z Y, Kang L P, *et al.* A review of low-carbon measurements and transition pathway of transport sector in China [J]. Climate Change Research, 2021, **17**(1): 27-35.
- [46] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 等. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(2): 385-393.  
Huang Z H, Ji L, Yin J, *et al.* Peak pathway of China's road traffic carbon emissions [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(2): 385-393.
- [47] 李勇, 高岚. 中国“碳中和”目标的实现路径与模式选择[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2021, **20**(5): 77-93.  
Li Y, Gao L. Implementation path and mode selection of China's carbon neutralization goal [J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2021, **20**(5): 77-93.
- [48] 中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组. 中国碳中和与清洁空气协同路径(2021)[EB/OL]. <http://www.ccapp.org.cn/dist/reportInfo/276>, 2022-05-30.
- [49] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, **30**(11): 1-25.
- [50] 全球能源互联网发展合作组织. 《中国2060年前碳中和研究

- 报告][EB/OL]. [https://www.geidco.org.cn/html/qqnyhlw/zt20210120\\_1/index.html](https://www.geidco.org.cn/html/qqnyhlw/zt20210120_1/index.html), 2022-05-30.
- [51] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界, 2022, 38(1): 35-51.  
Zhang X L, Huang X D, Zhang D, *et al.* Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality [J]. Journal of Management World, 2022, 38(1): 35-51.
- [52] WRI. 零碳之路:“十四五”开启中国:绿色发展新篇章[EB/OL]. <https://wri.org.cn/research/accelerating-net-zero-transition-strategic-action-for-china%E2%80%99s-14th-five-year-plan>, 2022-06-17.

## 欢迎订阅 2023 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE;Scopus;化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

## CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region .....	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China .....	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance .....	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O <sub>3</sub> Based on Explainable Machine Learning .....	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology .....	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O <sub>3</sub> Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model .....	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM .....	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province .....	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China .....	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020 .....	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021 .....	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM <sub>2.5</sub> Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model .....	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM <sub>2.5</sub> Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei .....	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers .....	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles .....	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer .....	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area .....	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an .....	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei .....	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area .....	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City .....	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang .....	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin .....	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River .....	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River .....	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction .....	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas .....	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region .....	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches .....	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region .....	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River .....	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River .....	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons .....	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite .....	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> and Oxidize Organic Micropollutants in Water .....	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid) .....	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics .....	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China .....	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing .....	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province .....	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi .....	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review .....	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review .....	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis .....	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil .....	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation .....	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta .....	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA .....	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area .....	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province .....	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i> .....	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk .....	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period .....	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong .....	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning .....	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)