

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
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	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析

刘春景, 吕建焱*, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳

(华北电力大学环境科学与工程系, 河北省燃煤电站烟气多污染物协同控制重点实验室, 保定 071003)

摘要: 为了研究“双碳”目标模式下我国发电行业发展前景及带来的环境效益, 建立了饱和“S”状灰色模型计算了按照旧有发电模式——非“双碳”模式下 2021~2060 年发电行业装机容量和发电量, 并基于“中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望报告”计算获得了“双碳”模式下 2021~2060 年发电行业装机容量和发电量, 对比研究了两种模式下中国未来发电行业的发展情景。通过物料衡算法和火电行业排放绩效构建了 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子以及减排因子, 定义了用于衡量污染物减排量的 4 种环境效益 $A_1 \sim A_4$ 。结果表明, 在“双碳”模式下, 火电机组将于 2026 年实现碳达峰, 之后年均降低 0.28 亿 kW, 同时要求可再生能源发电机组于 2020 年后年均增加 1.54 亿 kW 以实现碳中和。与非“双碳”模式相比, “双碳”模式下火力发电装机容量将大幅度减少, 可再生能源发电装机容量将大量增加, 由此产生巨大的环境效益 A_1 和 A_2 。未来 40 年 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的火电发电污染物累积减排量 A_1 分别为 6.64×10^{10} 、 1.54×10^7 、 1.55×10^7 、 3.18×10^6 、 1.71×10^6 和 2.23×10^5 t, 可再生能源发电污染物累积减排量 A_2 分别为 5.77×10^{10} 、 1.64×10^7 、 1.42×10^7 、 2.86×10^6 、 1.54×10^6 和 2×10^5 t。“双碳”模式下, 与燃煤发电相比, 由可再生能源发电和核电的相对清洁性产生的环境效益 A_3 和 A_4 表明, 未来 40 年 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的清洁能源发电累计减排量 ($A_3 + A_4$) 分别为 3.014×10^{11} 、 7.292×10^7 、 7.119×10^7 、 1.454×10^7 、 7.827×10^6 和 1.018×10^6 t。

关键词: 火力发电; 可再生能源发电; 碳达峰; 碳中和; 环境效益

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3375-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110144

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China

LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi*, ZHAO Wen-chang, XU Qing, JIN Yu-jia

(Hebei Key Laboratory of Power Plant Flue Gas Multi-Pollutants Control, Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to study the impact of the “carbon peak and neutrality” mode on future power generation and the environment in China, a Verhulst gray model was established to predict the development of the power generation industry from 2021 to 2060 under the non-“carbon peak and neutrality” mode. In addition, based on the “China 2030 Energy and Power Development Planning Research and 2060 Outlook Report,” the development of the power generation industry from 2021 to 2060 under the “carbon peak and neutrality” mode was obtained, and the development scenarios of the future power generation industry in China under two models were compared and studied. The emission factors and emission reduction factors of CO_2 , SO_2 , NO_x , PM, PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ were constructed through the conservation of elements and the generating performance standard, and then four environmental benefits $A_1 \sim A_4$ were defined. The results showed that the installed capacity of thermal power will reach the carbon peak in 2026 under the “carbon peak and neutrality” mode. To achieve the carbon neutralization, the installed capacity of thermal power will be reduced by an average of 28 million kilowatts per year after 2026, and the installed capacity of renewable energy generated is required to increase by 154 million kilowatts per year after 2020. Compared with that in the non-“carbon peak and neutrality” mode, the installed capacity of thermal power generation will be greatly reduced, and the installed capacity of renewable energy power generation will be greatly increased under the “carbon peak and neutrality” mode, resulting in huge A_1 and A_2 environmental benefits. In the next four decades, the cumulative emission reductions in CO_2 , SO_2 , NO_x , PM, PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ thermal power generation A_1 are predicted to be 6.64×10^{10} tons, 1.54×10^7 tons, 1.55×10^7 tons, 3.18×10^6 tons, 1.71×10^6 tons, and 2.23×10^5 tons, respectively. The cumulative emission reductions of renewable energy power generation A_2 will be 5.77×10^{10} tons, 1.64×10^7 tons, 1.42×10^7 tons, 2.86×10^6 tons, 1.54×10^6 tons, and 2×10^5 t tons, respectively. Under the “carbon peak and neutrality” mode, compared with those from coal-fired power generation, the environmental benefits A_3 and A_4 produced by the relative cleanliness of renewable energy and nuclear power indicated that the cumulative emission reductions ($A_3 + A_4$) in clean energy power generation of CO_2 , SO_2 , NO_x , PM, PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ in the next four decades will be 3.014×10^{11} tons, 7.292×10^7 tons, 7.119×10^7 tons, 1.454×10^7 tons, 7.827×10^6 tons, and 1.018×10^6 tons, respectively.

Key words: thermal power generation; renewable energy power generation; carbon peak; carbon neutralization; environmental benefits

实现“碳达峰和碳中和”目标是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。根据世界资源研究所 (WRI) 数据显示, 2018 年中国火电行业所产生的温室气体排放占全国总排放的 43%。如果在 2030 年前电力行业没有实现“碳达峰”, 全国“碳达峰”目

标将难以实现。在“双碳”模式下, 未来我国将会构

收稿日期: 2021-10-19; 修订日期: 2021-11-26

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (3202029)

作者简介: 刘春景 (1997~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力能源与环境保护, E-mail: lcj725@126.com

* 通信作者, E-mail: lujianyi@tsinghua.org.cn

建以新能源为主的新型电力系统. 预计到 2060 年, 我国太阳能发电和风电装机容量将分别成为第一和第二大电源^[1]. 然而, 我国电力行业如果继续按照“双碳”目标之前的旧有模式——非“双碳”模式发展, 那么我国的能源结构将依旧以高污染的煤电为主^[2, 3]. 因此, 我国发电行业在这两种模式下的发展情况将会有巨大的差异, 由此产生巨大的环境效益. 国内外学者在与发电相关的环境效益方面做了一些研究, 包括煤电超低排放的环境效益^[4~8], 基于控制措施的燃煤电厂 PM_{2.5}减排潜力^[9, 10], 基于碳减排目标的火电减排潜力^[11], 生物质耦合燃煤发电环境效益^[12]等.

然而, 上述研究中对于发电行业在“双碳”模式和非“双碳”模式对比下产生的环境效益和可再生能源发电环境效益的报道相对较少. 本文拟以饱和“S”状灰色模型对我国 2010~2018 年各发电类型装机容量进行模拟, 并用 2019 年和 2020 年两年数据验证模型预测精度, 对 2021~2060 年各发电类型装机容量按照旧有发展模式进行预测, 作为非“双碳”模式下发电行业的发展情况; 然后基于全球能源互联网发展合作组织 (GEIDCO) 发布的“中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望报告”^[13]中的部分数据, 通过插值获得我国在“双碳”模式下发电行业的未来发展情况; 之后构建 CO₂、SO₂、NO_x、PM、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放因子、减排因子, 定义 4 种环境效益 A₁~A₄; 最后对比研究中国 2021~2060 年在两种模式下的电力行业发展情况和“双碳”模式下的环境效益.

1 材料与方法

1.1 数据获取和处理方式

本文调查并收集了我国 2010~2020 年各种发电模式的装机容量和发电量以及全国煤电供电煤耗, 数据来源于文献^[14~23]. 由于发电量等于装机容量乘以发电设备年利用小时数和电力损耗, 而且同一和不同发电设备年利用小时数差异很大. 为了找到装机容量和发电量之间的关系, 本文对我国 2010~2020 年火电、可再生能源发电、核电、水电、风电、太阳能发电和生物质发电这 7 种发电类型的装机容量和发电量进行了拟合.

本文用表 1 所示的方法对文献^[13]中 2020、2025、2030、2050 和 2060 年这 5 a 煤电、气电、核电、水电、风电、太阳能发电和生物质发电的装机容量进行了插值处理, 获得了 2021~2060 年 7 种发电方式的装机容量, 该数据用于研究我国在“双碳”模式下未来发电行业的发展情况. “双碳”模式下的

发电情景是从战略全局认识和把握“双碳”目标任务, 以推动电力系统以清洁能源为主的根本性变革为目标, 逐步实现煤电功能布局转变. 除此以外, 本文还收集了 2000 年和 2020 年 SO₂、NO_x 和 PM 的排放绩效 (用于校核排放因子和减排因子) 以及 2018 年和 2019 年火力发电 CO₂、SO₂、NO_x 和 PM 的排放量 (用于验证污染物排放模型可行性), 数据来源于文献^[24~26].

表 1 不同发电方式装机容量的插值方法

Table 1 Interpolation method for installed capacity of different power generation modes

发电方式	插值方法	发电方式	插值方法
煤电	3 次样条插值	风电	Akima 样条插值
气电	Akima 样条插值	太阳能发电	Akima 样条插值
核电	3 次样条插值	生物质发电	Akima 样条插值
水电	3 次样条插值		

1.2 Verhulst 灰色模型

Verhulst 灰色模型^[27]常用于人口预测、生物生长、繁殖预测和产品经济寿命预测等. 普通的 GM (1, 1) 灰色模型主要用来预测具有指数增长规律的序列, 而 Verhulst 模型是用来描述具有饱和“S”状态过程, 即个体数量呈指数增长, 但会受到周围环境的限制, 增长速度逐渐放慢, 最终稳定在一个固定值. 图 1 是 2010~2020 年我国火力发电装机容量和可再生能源发电装机容量的增长率变化情况. 从中可知我国火力发电装机容量和可再生能源发电装机容量的变化趋势经历了 3 个阶段: 高速增长期、增速放缓期和增长停滞期, 发展趋势呈现近似于饱和状“S”形特征. 除此以外, 与火力发电相比, 我国可再生能源发电起步比较晚, 具有典型的小数据特征. 因此, 本文以 2010~2018 年我国火电装机容量和可再生能源发电装机容量为建模初始数据建立了 Verhulst 模型并检验了模型的模拟误差, 然后以 2019 年和 2020 年的数据作为预留数据检验了 Verhulst 模型的预测误差, 最后预测了我国在非“双碳”模式下 2021~2060 年火电装机容量、可再生能源发电装机容量.

1.3 排放因子、减排因子和环境效益

自 2014 年以来, 中国针对火电燃煤机组制定了超低排放改造的政策, 目标限值水平即 PM (烟尘)、SO₂ 和 NO_x 排放浓度分别不高于 10、35 和 50 mg·m⁻³, 计划于 2020 年前完成改造 5.8 亿 kW 煤电机组, 占 2014 年总装机容量的 71%. 理想的排放因子指的是单位煤燃烧产生的污染物直接排放到环境中, 用 E 表示, 单位是 g·kg⁻¹ (以污染物/标准煤计). 实际的排放因子指的是在满足超低排放条件

下单位煤燃烧产生的污染物经脱除排放到环境中。生物质发电和其他可再生能源发电不同,生物质燃烧也会产生大量污染物,因此把燃煤发电和生物质发电的实际排放因子分别定义为 E_C 和 E_B 。火电行业的排放绩效标准(generating performance standard, GPS)指的是每生产 1 kW·h 电所排放的污染物的量,GPS 反映了单位电量的污染物排放强度,是一项综合反映火电机组发电过程中能源利用率与污染物排放情况的重要指标^[28]。用 2000 年的排放绩效为基准可以得到其他年份全国火力发电污染物的脱除效率平均值。以 2019 年为例,2019 年 SO₂ 的排放绩效为 0.187 g·(kW·h)⁻¹,仅为 2000 年 7.9 g·(kW·h)⁻¹ 的 2.37%,相当于当年全国火力发电

SO₂ 脱除效率平均值为 97.63%^[29]。假设截至到 2020 年底,我国火力发电厂已全部实现超低排放改造。本文以 2000 年的排放绩效为基准,用 2020 年各污染物的排放绩效计算火力发电满足超低排放改造条件下各污染物的脱除效率平均值。

E_C 和 E_B 的核算使用了物料衡算法,由于我国煤炭分布不均,质量参差不齐,其质量对于发电设备的影响较大,因此本文对 10 个煤样的元素分析和工业分析^[30, 31]进行了平均,旨在最大程度减小煤种对研究结果的影响。煤样包括了无烟煤、高阶烟煤、亚烟煤、褐煤和焦煤各两种,如表 2 所示。同样的,对我国主要的 8 种的生物质的元素分析和工业分析^[32]进行了平均,如表 3 所示。

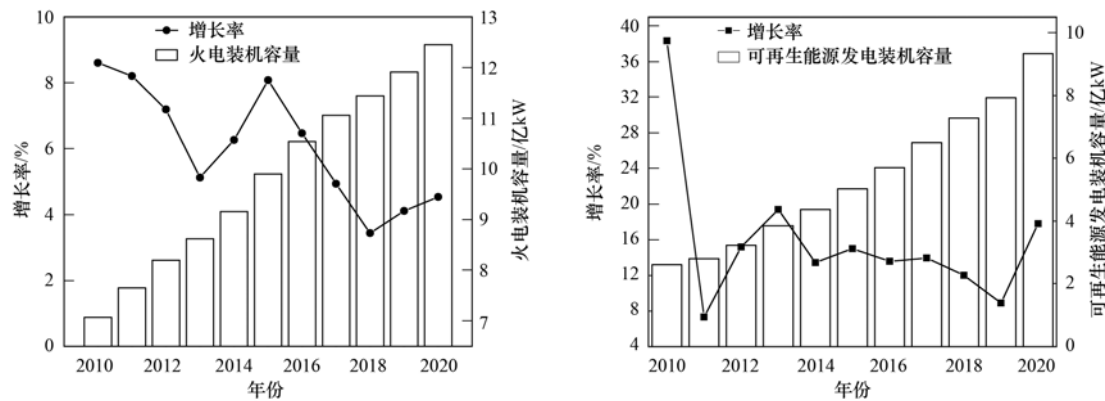


图1 火力发电装机容量和可再生能源发电装机容量增长率

Fig. 1 Growth rate of installed capacity of thermal power generation and renewable energy power generation

表2 煤样工业分析和元素分析

Table 2 Industrial analysis and ultimate analysis of coal samples

编号	灰分/%	挥发分/%	C 含量/%	H 含量/%	O 含量/%	N 含量/%	S 含量/%
无烟煤 1	5.01	7.33	89.07	3.53	1.49	0.69	0.20
无烟煤 2	4.65	13.35	86.63	4.15	1.90	1.07	1.61
高阶烟煤 1	5.36	29.69	82.88	4.85	3.72	1.13	2.07
高阶烟煤 2	8.52	23.42	81.00	4.57	3.14	0.97	1.80
亚烟煤 1	7.12	36.09	78.32	5.12	8.19	0.97	0.29
亚烟煤 2	6.68	30.87	79.28	4.92	6.03	1.33	1.75
褐煤 1	8.71	35.90	67.66	4.71	15.88	1.13	1.92
褐煤 2	5.58	40.84	69.74	5.19	17.22	1.19	1.08
焦煤 1	29.41	29.80	78.82	4.58	15.26	1.35	4.65
焦煤 2	22.78	38.86	79.60	5.30	13.78	1.32	1.64
平均值	10.38	28.62	79.30	4.69	8.66	1.12	1.70

表3 生物质样品工业分析和元素分析

Table 3 Industrial analysis and ultimate analysis of biomass samples

项目	水分/%	灰分/%	挥发分/%	C 含量/%	H 含量/%	N 含量/%	S 含量/%
玉米秸秆	6.10	4.70	76.00	49.30	6.00	0.70	0.11
高粱秸秆	4.71	8.91	68.90	48.63	6.09	0.36	0.01
棉花秸秆	6.78	3.97	68.54	49.80	5.70	0.69	0.22
麦秸秆	4.39	8.90	67.36	49.60	6.20	0.61	0.07
稻草	3.61	12.20	67.80	48.30	5.30	0.81	0.09
玉米芯	4.87	5.93	71.95	47.20	6.00	0.48	0.01
杨木	6.70	1.50	80.30	51.60	6.00	0.60	0.02
柳木	3.50	1.60	78.00	49.50	5.90	0.42	0.04
平均值	5.08	5.96	72.36	49.24	5.90	0.58	0.07

1.3.1 SO₂ 排放因子

理想状况下,如果 S 完全转化为 SO₂ 气体,则 SO₂ 的排放因子为:

$$E_{\text{SO}_2} = 1000 \times \frac{64}{32} S^{\text{ar}} = 2000S^{\text{ar}} \quad (1)$$

式中, E_{SO_2} 为 SO₂ 的理想排放因子,1000 为 1 kg 煤,64 为 SO₂ 的分子量,32 为 S 的分子量, S^{ar} 为 S 含量.而在现实情况下,燃煤电厂煤粉燃烧过程中 S 向烟气中 SO₂ 的转化率约为 90%^[33].2020 年 SO₂ 的排放绩效为 0.16 g·(kW·h)⁻¹,全国火力发电 SO₂ 脱除效率平均值为 97.97%,所以对式(1)修正如下:

$$\begin{aligned} E_{\text{CSO}_2} &= E_{\text{SO}_2} \times 90\% \times (1 - 97.97\%) \\ &= 36.54S^{\text{ar}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, E_{CSO_2} 为燃煤发电时 SO₂ 的实际排放因子, S^{ar} 为不同煤的 S 含量平均值.在燃烧生物质的条件下,生物质只有 0.7% 的硫转化成了 SO₂ 气体,99.3% 的 S 转移到了灰分中^[34].假设生物质发电厂都应用的是石灰石-石膏法脱硫,其脱硫效率可达 95%,由此可得:

$$\begin{aligned} E_{\text{BSO}_2} &= E_{\text{SO}_2} \times 0.7\% \times (1 - 95\%) \\ &= 0.7S^{\text{ar}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, E_{BSO_2} 为燃烧生物质发电时 SO₂ 的实际排放因子,此时的 S^{ar} 为不同生物质的 S 含量平均值.

1.3.2 CO₂ 排放因子

理想状况下,如果 C 完全转化为 CO₂ 气体,则 CO₂ 的排放因子为:

$$E_{\text{CO}_2} = 1000 \times \frac{44}{12} C^{\text{ar}} = 3700C^{\text{ar}} \quad (4)$$

式中, E_{CO_2} 为 CO₂ 的理想排放因子,1000 为 1 kg 煤,44 为 CO₂ 的分子量,12 为 C 的分子量, C^{ar} 为 C 含量.而在现实情况下,燃煤时存在不完全燃烧损失,其中机械燃烧损失约占 1%~10%,设该部分损失为 8.5%.则式(4)可修正为:

$$E_{\text{CCO}_2} = E_{\text{CO}_2} \times (1 - 8.5\%) = 3385.5C^{\text{ar}} \quad (5)$$

式中, E_{CCO_2} 为燃煤发电时 CO₂ 的实际排放因子, C^{ar} 为不同煤的 C 含量平均值.对于生物质发电,目前大多数生物质发电厂未应用 CCUS 技术,二氧化碳排放基本不受限制,设其排放因子等于理想条件下的排放因子.可得:

$$E_{\text{BCO}_2} = E_{\text{CO}_2} = 3700C^{\text{ar}} \quad (6)$$

式中, E_{BCO_2} 为燃烧生物质发电时 CO₂ 的实际排放因子,此时的 C^{ar} 为不同生物质的 C 含量平均值.

1.3.3 NO_x 的排放因子

理想条件下,如果 N 完全转化为挥发分 N,而且

挥发分 N 完全转化为 NO,则 NO_x 的排放因子为:

$$E_{\text{NO}_x} = 1000 \times (30/14)N^{\text{ar}} \quad (7)$$

式中, E_{NO_x} 为 NO_x 的理想排放因子,1000 为 1 kg 煤,30 为 NO 的分子量,14 为 N 的分子量, N^{ar} 为 N 含量.现实情况下,挥发分 N 并不能完全转化成 NO_x,即使在氧气过量的条件下,挥发分 N 也只是部分转化成 NO_x.不论煤种、颗粒大小和燃烧温度如何,约(57±5)% 的挥发分 N 转化为 NO_x,其余均转化成无害的 N₂^[35].设煤和生物质中的 N 向 NO_x 气体的转化率为 62%.2020 年 NO_x 的排放绩效为 0.179 g·(kW·h)⁻¹,全国火力发电 NO_x 脱除效率平均值为 95.77%,生物质和煤中的 N 含量差距不大,而且超低排放条件下选择催化还原法脱硝技术脱硝效率不低于 89.78%^[36].因此设生物质发电厂对 NO_x 的脱除效率也是 95.77%,所以对式(7)修正如下:

$$\begin{aligned} E_{\text{BNO}_x} &= E_{\text{CNO}_x} = E_{\text{NO}_x} \times \\ &62\% \times (1 - 95.77\%) = 56.2N^{\text{ar}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, E_{CNO_x} 为燃煤发电 NO_x 的实际排放因子, N^{ar} 为不同煤的 N 含量平均值, E_{BNO_x} 为燃烧生物质发电时 NO_x 的实际排放因子,此时的 N^{ar} 为不同生物质的 N 含量平均值.

1.3.4 PM、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的排放因子

生物质发电和燃煤发电锅炉中有一部分灰分会进入底灰^[37],设这部分为 88.85%.2020 年 PM 的排放绩效为 0.032 g·(kW·h)⁻¹,全国火力发电 PM 脱除效率平均值为 98.89%.一般情况下,PM_{2.5} 占 PM 的 7% 左右,占 PM₁₀ 的 13% 左右^[38].相关排放因子的计算如下:

$$\begin{aligned} E_{\text{CPM}} &= E_{\text{BPM}} = 1000 \times A^{\text{ar}} \times (1 - 88.85\%) \times \\ &(1 - 98.89\%) = 1.23765A^{\text{ar}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{CPM}_{2.5}} &= E_{\text{BPM}_{2.5}} = E_{\text{CPM}} \times 7\% = 0.08664A^{\text{ar}} \\ &\quad (10) \end{aligned}$$

$$E_{\text{CPM}_{10}} = E_{\text{BPM}_{10}} / 13\% = 0.66643A^{\text{ar}} \quad (11)$$

式中, E_{CPM} 、 $E_{\text{CPM}_{10}}$ 和 $E_{\text{CPM}_{2.5}}$ 分别为燃煤发电时 PM、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的实际排放因子, A^{ar} 为不同煤的灰分平均值, E_{BPM} 、 $E_{\text{CPM}_{10}}$ 和 $E_{\text{CPM}_{2.5}}$ 分别为燃烧生物质发电时 PM、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的实际排放因子,此时的 A^{ar} 为不同生物质的灰分平均值.

1.3.5 减排因子

减排因子是指在满足超低排放条件和在单位煤热值相同的情况下,可再生能源发电相对于燃煤发电单位煤燃烧产生的某一污染物经脱除后的减排量,用 R 表示,单位为 g·kg⁻¹ (以污染物/标准煤计).设水力发电、风力发电、太阳能发电和核能发

电的减排因子为 R_A , 生物质发电的减排因子为 R_B . 由于水力发电、风力发电、太阳能发电和核力发电都不会产生污染物, 因此可得:

$$R_A = E_C \tag{12}$$

$$R_B = E_C - E_B \tag{13}$$

本文一共定义了 4 种环境效益, 分别用 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 表示. 前两种环境效益是由于“双碳”政策的制定, 火电装机将会在 2030 年前达峰之后快速下降, 清洁能源将会被大量开发和利用. 这将会导致, “双碳”模式下的火电厂污染物排放量将低于非“双碳”模式下的火电厂污染物排放量, 此两种模式下污染物的减少量即定义为 A_1 ; 同理, “双碳”模式下的可再生能源发电过程污染物减排量高于非“双碳”模式下的可再生能源发电过程污染物减排量, 由此产生的污染物减排量即定义为 A_2 . 后两种环境效益指的是可再生能源发电和核电相较于火电在满足超低排放 (ULE) 标准条件下对 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的折算减排量, 分别定义为 A_3 和 A_4 . $A_1 \sim A_4$ 的计算式如下所示:

$$A_1 = \text{非“双碳”模式下火电折合标煤量} \times E_C - \text{“双碳”模式下火电折合标煤量} \times E_C \tag{14}$$

$$A_2 = \text{“双碳”模式下可再生能源发电折合标煤量} \times R_A - \text{非“双碳”模式下可再生能源发电折合标煤} \times R_A \tag{15}$$

$$A_3 = \text{水力、风力、太阳能发电折合标煤量} \times R_A + \text{生物质能发电折合标煤量} \times R_B \tag{16}$$

$$A_4 = \text{核力发电折合标煤量} \times R_A \tag{17}$$

式中, 折合标煤量为发电量和近 10 年供电煤耗平均

值的乘积, 发电量的单位是 $kW \cdot h$, 近 10 年供电煤耗平均值为 $0.3167 \text{ kg} \cdot (kW \cdot h)^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 两种模式下 2021 ~ 2060 年中国发电行业发展情况

表 4 为我国火电装机容量和可再生能源发电装机容量的模拟误差和预测误差, 其综合误差分别是 0.57% 和 2.93%. 查阅灰色预测模型的性能等级参照表可知, 两种模型的误差等级接近一级, 可以用于预测. 图 2 是 2021 ~ 2060 年两种模式下我国火电和可再生能源发电装机容量发展情况. 从中可知, 在非“双碳”模式下火电装机容量随着时间的增长逐渐升高且增速逐渐变缓, 到 2060 年增加到了 16.56 亿 kW; 而在“双碳”模式下火电装机容量于 2026 年达峰后逐步下降且下降的速度逐渐变快. 到 2060 年, 煤电退出发电行业, 火力发电主要由气电和油电构成. 在非“双碳”模式下可再生能源发电随着时间的推移增长变缓, 到 2060 年只增长到了 33.34 亿 kW, 这很难满足未来我国全社会用电量需求; 而在“双碳”模式下可再生能源发电在 2030 年前快速发展, 在 2030 ~ 2050 年高速发展并于 2050 年后增速逐渐变缓, 到 2060 年, 我国可再生能源发电装机可达 72.4 亿 kW, 是非“双碳”模式的 2.17 倍. 在“双碳”模式下, 火电装机容量将于 2026 年实现碳达峰, 之后年均降低 0.28 亿 kW, 同时要求可再生能源发电装机容量于 2020 年后年均增加 1.54 亿 kW 以实现碳中和.

表 4 灰色模型模拟误差和预测误差

Table 4 Simulation error and prediction error of Verhulst gray model

年份	火电装机容量/亿 kW	Verhulst 灰色模型模拟值	相对误差 /%	可再生能源发电装机容量/亿 kW	Verhulst 灰色模型模拟值	相对误差 /%
2010	7.07	— ¹⁾	—	2.609	—	—
2011	7.65	7.632	0.24	2.800	2.998	7.07
2012	8.20	8.199	0.00	3.225	3.438	6.61
2013	8.62	8.769	1.72	3.850	3.935	2.21
2014	9.16	9.333	1.89	4.367	4.493	2.88
2015	9.90	9.888	0.13	5.022	5.116	1.88
2016	10.54	10.428	1.06	5.703	5.809	1.85
2017	11.06	10.949	1.00	6.498	6.573	1.16
2018	11.44	11.448	0.07	7.278	7.411	1.83
2019	11.91	11.922	0.10	7.925	8.326	5.03
2020	12.45	12.368	0.66	9.335	9.308	0.29
模拟误差/%	—	—	0.76	—	—	3.19
预测误差/%	—	—	0.38	—	—	2.66

1) “—”表示本文中没有相关数据

表 5 为我国各种发电类型装机容量和发电量的关系, Pearson 系数都在 0.9 以上, 表明了各种发电类型的装机容量和发电量呈强正相关关系, 可以通

过装机容量和拟合方程求取各种发电类型的发电量. 图 3 是 2021 ~ 2060 年“双碳”模式下我国各种发电类型装机容量、发电量和占比情况. 从中可知,

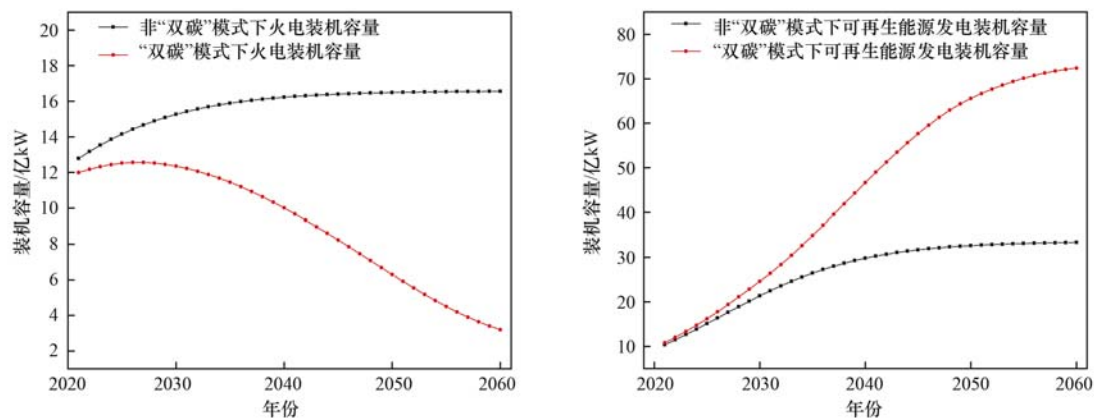


图2 2021~2060年两种模式下我国火电和可再生能源装机容量对比

Fig. 2 Comparison of installed capacity of thermal power and renewable energy in China under two modes from 2021 to 2060

2021~2060年,我国燃煤发电装机容量和发电量先增后减,于2024年达到峰值后加速减少.如果要实现这个规划目标,2030年前,我国煤电需要控制总量、转变定位和优化布局,为清洁能源发展腾出空间;2030年后,煤电需加快转型,逐步有序退出.目前,我国“富煤、贫油和少气”的资源禀赋,使得能源消费对煤炭的依赖难以减轻,再加上我国能源需求持续增长、电气化率持续攀升、电力市场过剩、新能源竞争冲击和高煤价低电价等多种因素综合作用,造成了火电行业转型难度大^[39, 40].针对煤电的清洁煤技术和CCUS技术都存在应用成本过高的问题,为使其可以大规模应用于燃煤电厂,可以考虑同时实行低碳技术创新研发和激励政策保障落实;水力发电装机容量逐年上升,但是其装机容量占比逐渐减少,未来40年其发电量占比基本稳定在18%左右.水电是可再生能源发电的主干之一,在水能资源丰富地区建设大型水电站是污染物减排的有力措施,然而大型水库不易建设而且会受到降水限制.因此水力发电的后续建设应该发挥水电基础保障作用,可以考虑以大量建设小型水电站为主;风

力发电和太阳能发电装机容量、发电量和其占比随着时间的增加逐渐增加,到2060年,我国可再生能源发电将主要是风电和太阳能发电.然而,风电和太阳能发电都有地域条件限制和天气限制,而且风、光资源丰富地区不普遍,土地资源占用较多.所以未来我国可以考虑大力发展陆上风电,稳步推进海上风电,加快西部北部大型风电基地、东南沿海海上风电基地和东中部分散式风电建设,通过集中式和分布式协同发展来促进太阳能发电,加快西部北部大型太阳能发电基地、东中部分布式光伏建设;我国核电和气电装机容量逐年上升,核电和气电装机容量占比基本保持在3%和5%左右,其发电量逐年上升,并于2060年稳定于10%和15%.由此可见,核电将在未来能源系统中占有重要地位,安全有序的发展核电是必要的,而气电则承担调峰作用;生物质发电装机容量逐渐上升,装机容量占比和发电量占比基本稳定在2%和5%左右.生物质能是仅次于煤炭、石油和天然气的第4大能源,利用效率也高于太阳能和风能,我国需因地制宜地用好生物质能源.

表5 各种发电类型的装机容量及发电量的关系

Table 5 Relationship between installed capacity and power generation of various power generation types

发电方式	公式 ¹⁾	Pearson 系数
火电	$y = 14\,905.597\,48 + 2\,902.219\,52x$	0.939 71
核电	$y = -14.353\,02 + 6\,847.388\,19x$	0.986 61
水电	$y = -1\,880.678\,51 + 4\,108.816\,28x$	0.991 50
风电	$y = -198.407\,65 + 1\,867.322\,55x$	0.983 47
太阳能发电	$y = -74.535\,45 + 1\,049.559\,88x$	0.991 62
生物质发电	$y = 74.373\,22 + 4\,388.170\,3x$	0.983 47
可再生能源发电	$y = 2\,672.923\,92 + 2\,180.689\,63x$	0.994 09

1) y 表示发电量,单位为kW·h, x 表示装机容量,单位为 kW

2.2 两种模式下 2021~2060 年中国发电行业环境效益

表6 是根据 1.3 节计算出的各污染物的排放因

子和减排因子.截至 2017 年底,我国已成功对 5.9 亿 kW 现有煤电机组进行了超低排放改造,提前超额完成了政策目标^[4].因此本文用 2018 年和 2019

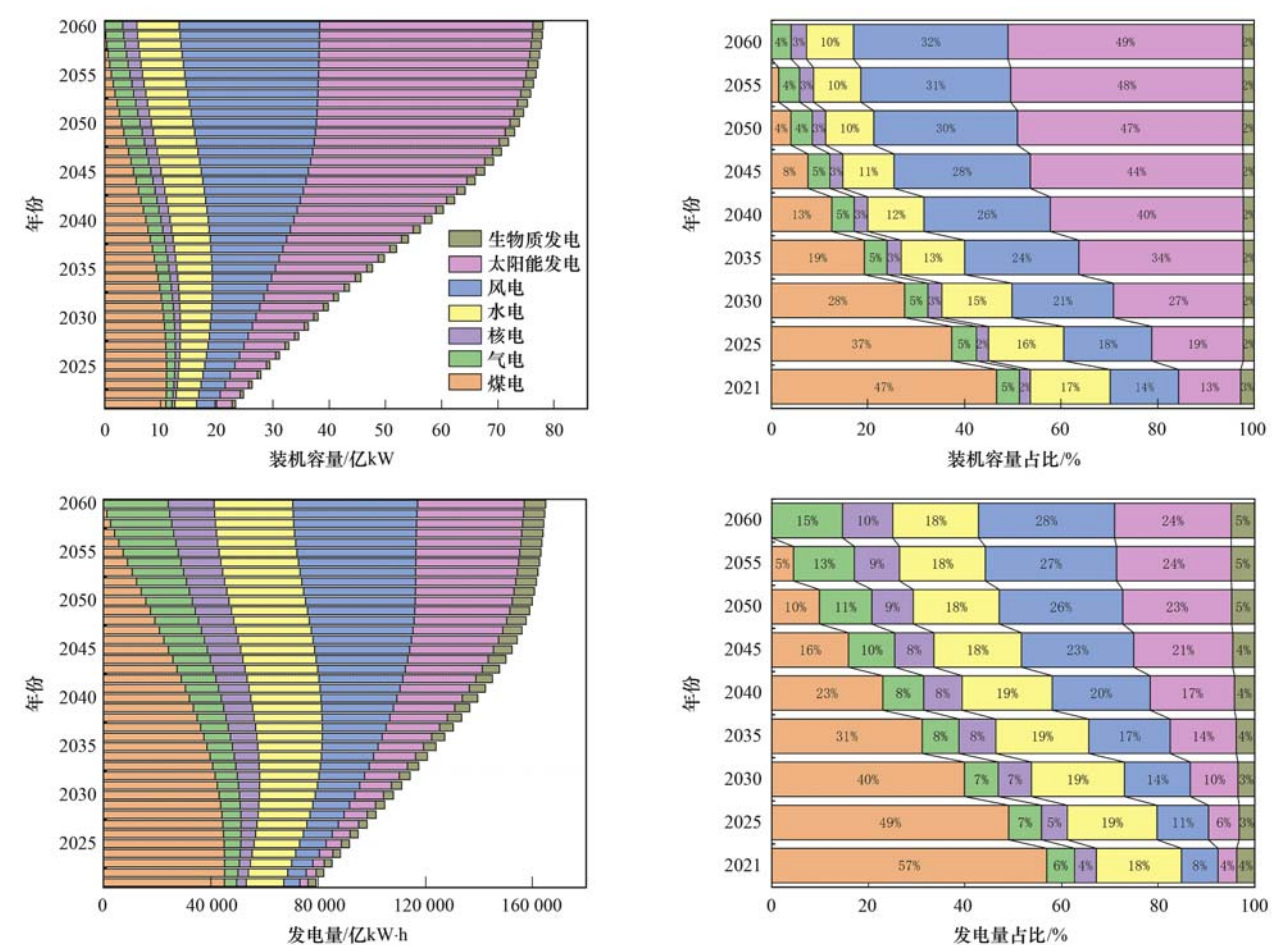


图3 “双碳”模式下2021~2060年我国各种发电类型装机容量、发电量及其占比

Fig. 3 Under the “carbon peak and neutrality” mode, the installed capacity, power generation capacity, and its proportion of various power generation types in China from 2021 to 2060

年火力发电各污染物排放量验证了本模型的精确度,如图4所示,2018年CO₂、SO₂、NO_x和PM排放量模型相对误差分别是1.09%、0.99%、2.86%和3.62%,2019年CO₂、SO₂、NO_x和PM排放量模型相对误差分别是1.44%、2.81%、0.73%和4.92%,所有污染物的模拟误差控制在5%以内。

表6 CO₂、SO₂、NO_x、PM、PM₁₀和PM_{2.5}的排放因子和减排因子

Table 6 Emission factors and emission reduction factors of CO ₂ , SO ₂ , NO _x , PM, PM ₁₀ , and PM _{2.5}						
项目	SO ₂	NO _x	PM	CO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
<i>E_C</i>	0.621 545	0.626 630	0.128 493	2 684. 702 0	0.008 995	0.069 189
<i>E_B</i>	0.000 499	0.328 068	0.073 810	1 821. 926 0	0.005 167	0.039 744
<i>R_A</i>	0.621 545	0.626 630	0.128 493	2 684. 702 0	0.008 995	0.069 189
<i>R_B</i>	0.621 047	0.298 563	0.054 682	862. 775 3	0.003 828	0.029 445

图5是两种模式下的火力发电环境效益(*A*₁)和可再生能源发电环境效益(*A*₂)。 *A*₁ 随时间持续增加,各污染物的变化趋势相似且接近于线性,表明了两种模式下火力发电排放量的差距以匀速的方式被逐渐拉大。 *A*₂ 于2021~2026年先下降,然后于2027~2060年依次分别经历了快速增长、匀速增长和缓慢增长,整体趋势接近于“S”型。2021~2032年,CO₂、NO_x、PM、PM₁₀和PM_{2.5}的*A*₂为负值,表明了在这段时间里非“双碳”模式下可再生能源发电减排量高于“双碳”模式下可再生能源发电减排量,2032年后,“双碳”模式下可再生能源发电污染物减排量更多,“双碳”政策对可再生能源的促进作用和对环境的正向作用随时间也越来越明显。 *A*₁ 和*A*₂ 中,CO₂、SO₂和NO_x是所有污染物中减排量最多的3种污染物,这也就意味着火电的快速转型和清洁能源的大力开发利用将会大幅度促进我国早日实现“双碳”目标,还会有效降低酸雨、光化学烟雾和近地层的臭氧等。除此以外,2021~2060年这40a的CO₂、SO₂、NO_x、PM、PM₁₀和PM_{2.5}的*A*₁累积量分别为6.64×10¹⁰、1.54×10⁷、1.55×10⁷、3.18

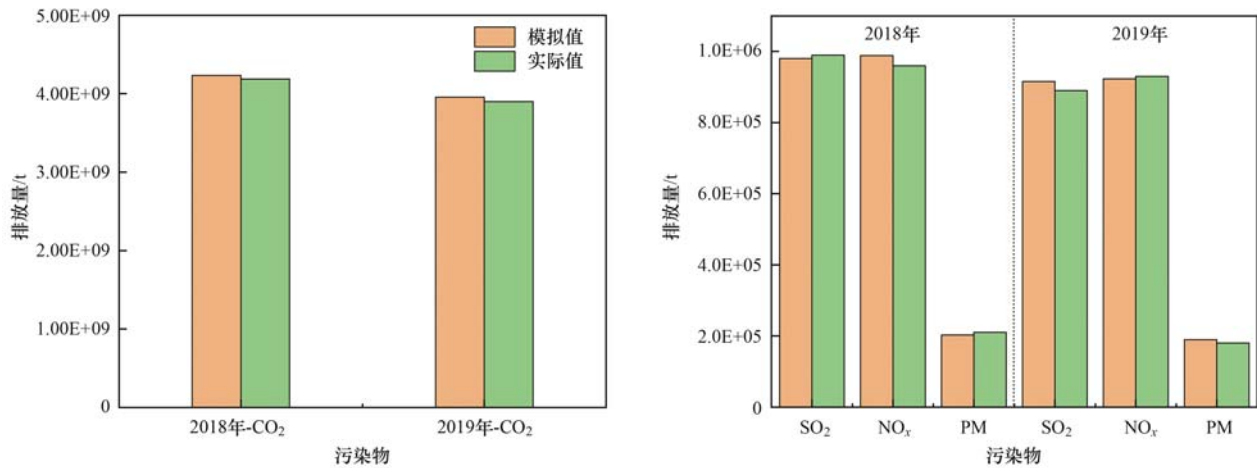
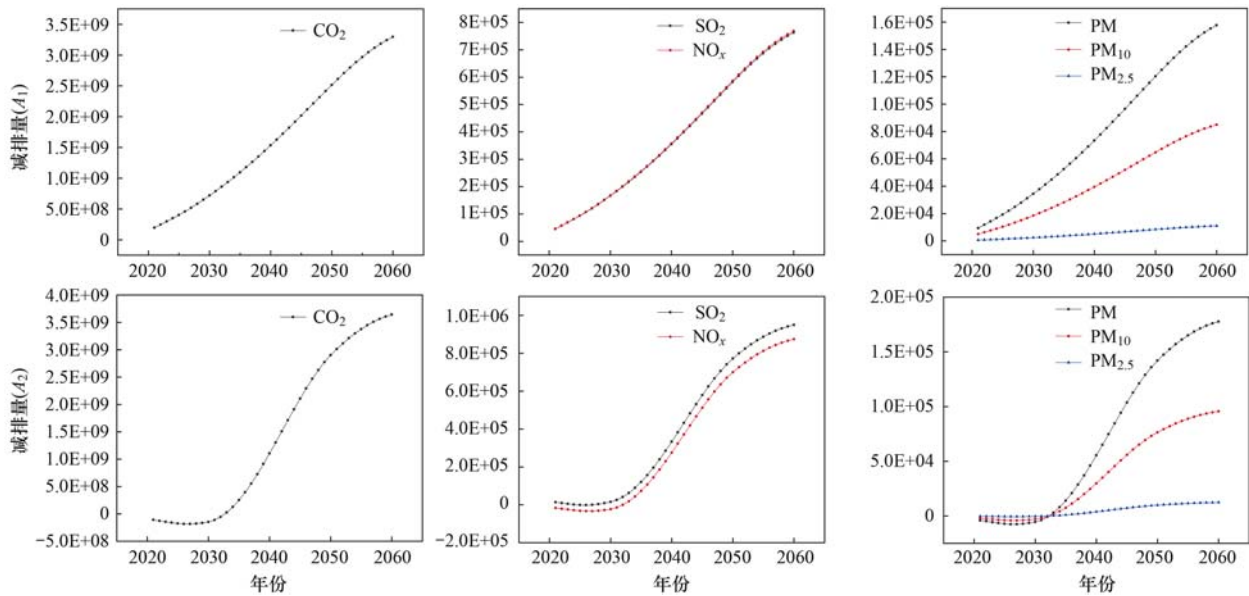


图4 2018年和2019年我国各种污染物排放量实际值和模型计算值比较

Fig. 4 Comparison of actual and calculated values of various pollutants in China in 2018 and 2019

图5 两种模式下火力发电环境效益(A_1)和可再生能源发电环境效益(A_2)Fig. 5 Environmental benefits of thermal power generation (A_1) and renewable energy power generation (A_2) under two modes

$\times 10^6$ 、 1.71×10^6 和 2.23×10^5 t, A_2 累积量分别为 5.77×10^{10} 、 1.64×10^7 、 1.42×10^7 、 2.86×10^6 、 1.54×10^6 和 2×10^5 t.

由于无法预测非“双碳”模式下 2021~2060 年可再生能源发电中各种发电类型的装机容量发展细节. 因此本文结合式(16)和式(17)计算并研究了“双碳”模式下 2021~2060 年我国的火电排放量(火电折合标煤量 $\times E_c$)、可再生能源发电减排量(A_3)和核电减排量(A_4),如图6所示. 2021~2060 年我国火力发电排放量先增后减, CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 于 2026 年达到排放峰值. 到 2060 年, CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量降至最低, 分别为 2.06×10^9 、 4.76×10^5 、 4.8×10^5 、 9.84×10^4 、 5.3×10^4 和 6.89×10^3 t, 比 2021 年减少了 51.33%. 未来 40 年, 我国火力发电 CO_2 、 SO_2 、

NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放累积量分别为 1.4×10^{11} 、 3.23×10^7 、 3.26×10^7 、 6.69×10^6 、 3.6×10^6 和 4.68×10^5 t. 可再生能源发电和核电减排量随着时间增长逐步上升, 到 2060 年, 可再生能源发电和核电 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的总减排量(核电减排量 + 可再生能源发电减排量)可达 1.15×10^{10} 、 2.77×10^6 、 2.71×10^6 、 5.54×10^5 、 2.98×10^5 和 3.88×10^4 t. 未来 40 年, 我国可再生能源发电 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 减排累积量分别为 2.65×10^{11} 、 6.45×10^7 、 6.27×10^7 、 1.28×10^7 、 6.89×10^6 和 8.96×10^5 t, 核电减排累积量分别为 3.64×10^{10} 、 8.42×10^6 、 8.49×10^6 、 1.74×10^6 、 9.37×10^5 和 1.22×10^5 t. 在火电排放量达峰的 2026 年, 电力行业 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的总排放量(火力发电排放量 + 核电减排量 +

可再生能源发电减排量)分别为 8.29×10^8 、 1.52×10^5 、 1.84×10^5 、 3.84×10^4 、 2.07×10^4 和 2.69×10^3 t, 随着清洁能源的大力开发应用, 电力行业于 2029 年可以首次实现 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的负排放, 总排放量分别为 -4.25×10^7 、

-5.65×10^4 、 -2.07×10^4 、 -3.52×10^3 、 -1.89×10^3 和 -2.46×10^2 t. 到 2060 年, 电力行业 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的总排放量可达 -9.45×10^9 、 -2.29×10^6 、 -2.23×10^6 、 -4.56×10^5 、 -2.45×10^5 和 -3.19×10^4 t.

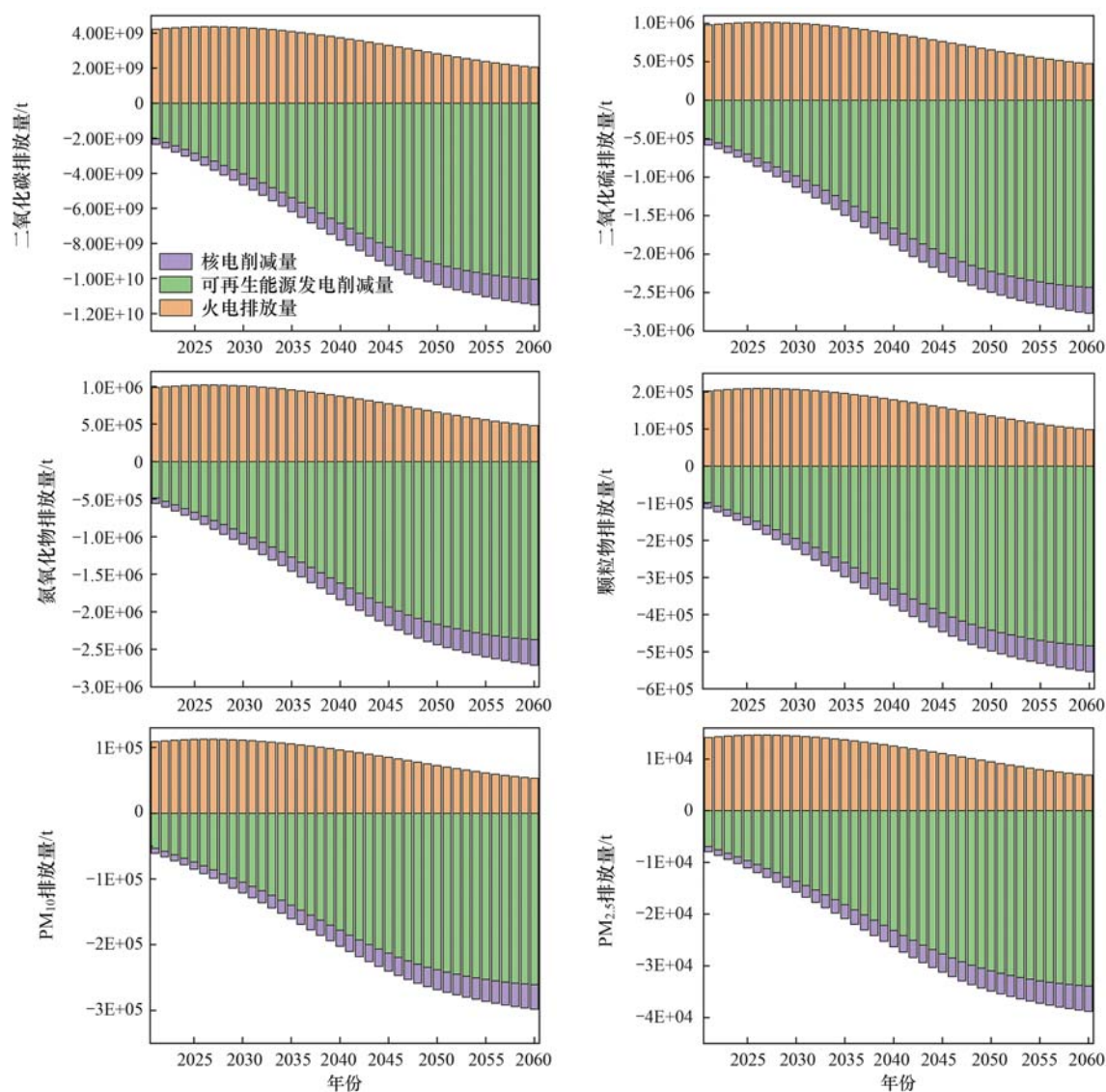


图6 “双碳”模式下我国火电污染物排放量、核电减排量(A_3)和可再生能源发电减排量(A_4)对比

Fig. 6 Comparison of pollutant emissions of thermal power, nuclear power emission reduction (A_3), and renewable energy power generation emission reduction (A_4) in China under the “carbon peak and neutrality” mode

3 结论

(1)“双碳”模式下,火电装机容量将于 2026 年实现碳达峰,之后平均每年降低 0.28 亿 kW,同时要求可再生能源发电装机容量于 2020 年后年均增加 1.54 亿 kW 以实现碳中和.

(2)“双碳”模式下,2024 年,煤电达到峰值.2025~2030 年新增电力需求全部由清洁能源满足,2030 年,我国电源总装机容量达到 38.04 亿 kW,其中,可再生能源发电装机容量 24.61 亿 kW,占比

64.7%,可再生能源发电量 5 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 占比 46.23%. 到 2050 年,风电和太阳能装机容量成为电源装机容量增量主体,风电和太阳能发电装机容量总占比超过 75%,发电量总占比超过 48%. 2060 年,我国电源总装机 78.1 亿 kW,其中可再生能源装机 72.4 亿 kW,占比 92.7%. 风电、太阳能装机容量和发电量进一步扩大,装机容量总占比 80.67%,发电量总占比 52.33%.

(3)两种模式下火力发电排放量的差距以匀速的方式逐渐被拉大,远期“双碳”模式下可再生能源

发电的减排作用更明显. 与非“双碳”模式相比,“双碳”目标将会带来巨大的环境效益,将会为减少温室效应、酸雨、光化学烟雾等现象作出巨大贡献.

(4)“双碳”模式下我国火力发电 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 于2026年达到排放峰值,电力行业于2029年可以首次实现 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、PM、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的负排放.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 蒋敏华,黄斌. 燃煤发电技术发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(29): 1-8.
Jiang M H, Huang B. Prospects on coal-fired power generation technology development[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(29): 1-8.
- [3] 杨倩鹏,林伟杰,王月明,等. 火力发电产业发展与前沿技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3787-3794.
Yang Q P, Lin W J, Wang Y M, et al. Industry development and frontier technology roadmap of thermal power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3787-3794.
- [4] Tang L, Qu J B, Mi Z F, et al. Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards[J]. Nature Energy, 2019, 4(11): 929-938.
- [5] 王临清,朱法华,赵秀勇. 燃煤电厂超低排放的减排潜力及其 $\text{PM}_{2.5}$ 环境效益[J]. 中国电力, 2014, 47(11): 150-154.
Wang L Q, Zhu F H, Zhao X Y. Potential capabilities of pollutant reduction and environmental benefits from ultra-low emissions of coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2014, 47(11): 150-154.
- [6] 朱法华,王临清. 煤电超低排放的技术经济与环境效益分析[J]. 环境保护, 2014, 42(21): 28-33.
Zhu F H, Wang L Q. Analysis on technology-economy and environment benefit of ultra-low emission from coal-fired power units[J]. Environmental Protection, 2014, 42(21): 28-33.
- [7] 帅伟,李立,崔志敏,等. 基于实测的超低排放燃煤电厂主要大气污染物排放特征与减排效益分析[J]. 中国电力, 2015, 48(11): 131-137.
Shuai W, Li L, Cui Z M, et al. Analysis of primary air pollutant emission characteristics and reduction efficiency for ultra-low emission coal-fired power plants based on actual measurement[J]. Electric Power, 2015, 48(11): 131-137.
- [8] 刘艳梅,闫静,徐文帅,等. 超低排放改造后燃煤电厂常规大气污染物排放特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 1967-1975.
Liu Y M, Yan J, Xu W S, et al. Emission characteristics of conventional air pollutants in coal-fired power plants after ultra-low emission transformation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(6): 1967-1975.
- [9] 莫华,朱法华,王圣. 火电行业大气污染物排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献及减排对策[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 1-6.
Mo H, Zhu F H, Wang S. Contribution to $\text{PM}_{2.5}$ of atmospheric pollutant emission from thermal power sector and emission reduction countermeasures[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 1-6.
- [10] 孙现伟,邓双,朱云,等. 我国燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 减排潜力预测与分析[J]. 环境科学研究, 2016, 29(5): 637-645.
Sun X W, Deng S, Zhu Y, et al. $\text{PM}_{2.5}$ emissions reduction potential from coal-fired power plants in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(5): 637-645.
- [11] 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.
- [12] 云慧敏,代建军,李辉,等. 生物质耦合燃煤发电经济环境效益评估[J/OL]. 化工学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1946.tq.20211103.1715.016.html>, 2021-11-13.
Yun H M, Dai J J, Li H, et al. Economic and environmental assessment of biomass coupled coal-fired power generation[J/OL]. CIESC Journal. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1946.tq.20211103.1715.016.html>, 2021-11-13.
- [13] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021.
- [14] 北极星电力网新闻中心. 2010—2015年电力装机容量、发电量及用电量[EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20160818/763836.shtml>, 2016-08-18.
- [15] 国家能源局. 2016年全国6000千瓦及以上电厂发电设备平均利用小时情况[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c_136014619.htm, 2017-01-26.
- [16] 国家能源局. 2017年全国电力工业统计数据[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2018-01/22/c_136914154.htm, 2018-01-22.
- [17] 国家能源局. 国家能源局发布2018年全国电力工业统计数据[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2019-01/18/c_137754977.htm, 2019-01-18.
- [18] 国家能源局. 国家能源局发布2019年全国电力工业统计数据[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_138720881.htm, 2020-01-20.
- [19] 国家能源局. 国家能源局发布2020年全国电力工业统计数据[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm, 2021-01-20.
- [20] 北极星垃圾发电网. 2020年中国生物质能发电行业发展现状分析累计装机容量突破2000万千瓦[EB/OL]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20200723/1091489.shtml>, 2020-07-23.
- [21] 国家能源局. 太阳能光伏发电发展情况概述[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2012-02/06/c_131393353.htm, 2012-02-06.
- [22] 国家能源局. 2013年光伏发电统计数据[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2014-04/28/c_133296165.htm, 2014-04-28.
- [23] 国家能源局. 2014年光伏发电统计信息[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2015-03/09/c_134049519.htm, 2015-03-09.
- [24] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2019[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2019.
- [25] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2020[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2020.
- [26] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2021

- [R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2021.
- [27] Zhou D Q. A new hybrid grey neural network based on grey verhulst model and BP neural network for time series forecasting [J]. *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*, 2013, **5**(10): 114-120.
- [28] 杨涛. 发电企业大气污染排放与治理策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2008.
- [29] 朱法华, 许月阳, 孙尊强, 等. 中国燃煤电厂超低排放和节能改造的实践与启示[J]. *中国电力*, 2021, **54**(4): 1-8.
Zhu F H, Xu Y Y, Sun Z Q, *et al.* Practice and enlightenment of ultra-low emission and energy-saving retrofit of coal-fired power plants in China[J]. *Electric Power*, 2021, **54**(4): 1-8.
- [30] Yi L, Feng J, Qin Y H, *et al.* Prediction of elemental composition of coal using proximate analysis [J]. *Fuel*, 2017, **193**: 315-321.
- [31] 陈思涵. 煤中形态硫化物特性机理研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
- [32] 生物质工业分析及元素组成[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/ea47834fe518964bcf847cad.html>, 2011-06-16.
- [33] 吴忠标, 应洪仓. 电厂煤粉炉燃煤二氧化硫转化率研究[J]. *重庆环境科学*, 2001, **23**(1): 35-36.
Wu Z B, Ying H C. Translation rate of sulfur dioxide from fuel coal for fine coal boilers in power plants [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2001, **23**(1): 35-36.
- [34] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [35] Wendt J O L. Mechanisms governing the formation and destruction of NO_x and other nitrogenous species in low NO_x coal combustion systems [J]. *Combustion Science and Technology*, 1995, **108**(4-6): 323-344.
- [36] 计建洪. 电厂大气污染物超低排放技术改造[J]. *四川化工*, 2017, **20**(2): 55-57.
Ji J H. Technological reform of ultra-low air pollutant emission of power plants [J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2017, **20**(2): 55-57.
- [37] 楼晟荣. 中小燃煤锅炉 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特征实测研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3119-3125.
Lou S R. Emission characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ from medium and small capacity coal-fired boilers in service [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3119-3125.
- [38] 沈欣军, 郑钦臻, 宁致远, 等. 燃煤电厂电除尘 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放控制 IV: 采用二维 PIV 除尘 [J]. *科技导报*, 2014, **32**(33): 43-50.
Shen X J, Zheng Q Z, Ning Z Y, *et al.* PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants IV: investigations on electrostatic precipitation by means of 2D PIV technique [J]. *Science & Technology Review*, 2014, **32**(33): 43-50.
- [39] 赵兵, 景杰. “碳达峰、碳中和”目标下火力发电行业的转型与发展[J]. *节能与环保*, 2021, (5): 32-33.
Zhao B, Jing J. Transformation and development of thermal power industry under the goal of "carbon peaking and carbon neutralization" [J]. *Energy Conservation and Environmental Protection*, 2021, (5): 32-33.
- [40] 赵春生, 杨君君, 王婧, 等. 燃煤发电行业低碳发展路径研究[J]. *发电技术*, 2021, **42**(5): 547-553.
Zhao C S, Yang J J, Wang J, *et al.* Research on low-carbon development path of coal-fired power industry [J]. *Power Generation Technology*, 2021, **42**(5): 547-553.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)