

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

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

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期  
Vol.42 No.12

目次(卷终)

|                                                                    |                                                                |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 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 .....                                 | 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)                                |
| 汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 .....                                         | 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)                               |
| 西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 .....                                           | 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)                                    |
| 新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 .....                                        | 陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)                                       |
| 基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM <sub>2.5</sub> 浓度估算 .....              | 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖逍 (5602)                             |
| 《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子特征 .....              | 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)                            |
| 洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 .....                                         | 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)                              |
| 北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 .....                                         | 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)                               |
| 天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 .....                                 | 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)                                 |
| 沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 .....                                           | 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)                             |
| 典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 .....                                  | 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)                           |
| 南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 .....                                    | 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)                                 |
| 基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例 .....                          | 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)                                    |
| 我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 .....                                     | 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)                             |
| VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 .....                                 | 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)                                     |
| 山东省 O <sub>3</sub> 时空分布及影响因素分析 .....                               | 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)                            |
| 2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 .....                                      | 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)                  |
| 基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 .....                               | 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747) |
| 三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 .....                                 | 张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)                                            |
| 长江流域总氮排放量预测 .....                                                  | 丁肇慰, 郑华 (5768)                                                 |
| 1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 .....                              | 姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)                                           |
| 黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 .....                                             | 韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)                                   |
| 基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 .....                                       | 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)                                  |
| 水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 .....                                          | 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)                    |
| 达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 .....                                      | 李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)                                   |
| 尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 .....                               | 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)                                  |
| 武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 .....                                | 张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)                          |
| 上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 .....                        | 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)                                    |
| 曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 .....                                          | 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)                        |
| 水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 .....                                     | 赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)                                            |
| 木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 .....                                      | 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)                                        |
| 黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 .....                                    | 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)                                |
| 玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 .....                                          | 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)                                 |
| 饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 .....                                     | 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)                                        |
| 污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 .....                                           | 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)                                   |
| 阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 .....                              | 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)                                  |
| 典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 .....                                     | 李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)                               |
| 我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 .....                                    | 王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)                               |
| 浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 .....                                     | 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)           |
| 北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 .....                                       | 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)                                   |
| 典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 .....                            | 强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)                         |
| 雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 .....                                | 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)                        |
| 铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 .....                                        | 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)                                    |
| 干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响 .....                                      | 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)                             |
| 铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 .....                                   | 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建建, 叶新新 (6006)           |
| 稻田灌溉河流 CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放特征及影响因素 .....          | 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)                    |
| 节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放的影响 ..... | 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)                                       |
| 有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N <sub>2</sub> O 的排放特征及微生物特性 .....                 | 王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)                       |
| 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 .....                              | 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)                          |
| 氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 .....                                         | 杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)                                 |
| 化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 .....                                  | 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)                    |
| 浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 .....                                   | 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)                 |
| 《环境科学》第42卷(2021年)总目录 .....                                         | (6091)                                                         |
| 《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)             |                                                                |

# 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

李辉<sup>1,2</sup>, 孙雪丽<sup>2</sup>, 庞博<sup>3</sup>, 朱法华<sup>1,2</sup>, 王圣<sup>1</sup>, 晏培<sup>4</sup>

(1. 国电环境保护研究院有限公司国家环境保护大气物理模拟与污染控制重点实验室, 南京 210031; 2. 国家能源集团科学技术研究院有限公司, 南京 210023; 3. 中国气象局科技与气候变化司, 北京 100081; 4. 湖南中环领航环保科技有限公司, 长沙 410011)

**摘要:** 从我国“十四五”及2035年远景目标经济发展预测出发, 结合碳减排战略目标下的既有与强化政策情景, 基于弹性系数法预测电力需求, 测算在不同污染物排放标准约束情景下火电大气污染物排放情况及减排潜力, 结果表明, 在不同的政策和排放标准约束情景下, 我国火电行业烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放水平变化呈现出不同的趋势, 到2035年, 在2016年水平上的减排潜力分别在45.97%~85.37%、52.61%~84.90%和33.80%~71.08%之间, 来自碳减排目标下政策因素带来的减排潜力, 较不同污染物排放标准约束条件带来的减排潜力更为明显, 在强化政策情景下, 采取保持模式标准约束的污染物减排潜力已与超低模式基本相当, 甚至超过或接近既有政策下采取收严模式标准约束的效果, 通过强化实施能源和电力优化政策, 加快实现火电发电量达峰, 合理引导高污染排放水平火电机组优先退出生产, 同样可使火电大气污染物排放得到有效控制, 还可避免环保改造投资的浪费和损失。

**关键词:** 排放标准; 火电行业; 减排潜力; 碳达峰与碳中和; 情景分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5563-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202102167

## Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios

LI Hui<sup>1,2</sup>, SUN Xue-li<sup>2</sup>, PANG Bo<sup>3</sup>, ZHU Fa-hua<sup>1,2</sup>, WANG Sheng<sup>1</sup>, YAN Pei<sup>4</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Physical Modeling and Pollution Control, National Environmental Protection Research Institute for Electric Power, Nanjing 210031, China; 2. China Energy Investment Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, China; 3. Department of Science & Technology and Climate Change, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 4. Hunan Zhonghuan Linghang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410011, China)

**Abstract:** Based on the economic development forecast of China's "14<sup>th</sup> five year plan" and 2035 long-term goals, combined with the existing and strengthened policy scenarios under the strategic goal of carbon emission reduction, the power demand was predicted based on the elastic coefficient method, and the pollutant emission situation and emission reduction potential of the thermal power industry were calculated according to the development trend of pollutant emission standards. The results indicated that under different policy scenarios and emission standards, the emission levels of PM, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> in China's thermal power industry show different trends; by 2035, the emission reduction potential at the 2016 level is predicted to be 45.97%-85.37%, 52.61%-84.90%, and 33.80%-71.08%, respectively. The emission reduction potential brought about by policy factors under carbon emission reduction targets is more apparent than that brought about by different emission standards. Under the strengthened policy scenario, the pollutant emission reduction potential of the maintaining model standard constraint scenario is essentially equal to that of the ultra-low model, even more than or close to the effect of the tightening model standard constraint scenario under the existing policy. By strengthening the implementation of energy and power development policies, speeding up the peak of thermal power generation, and reasonably guiding thermal power units with high pollution emission levels to withdraw from production, the air pollutant emission of thermal power can also be effectively controlled, and the waste and loss of environmental protection transformation investment can be avoided.

**Key words:** emission standard; thermal power industry; emission reduction potential; carbon peaking and carbon neutralization; scenario analysis

长期以来,火电行业一直是我国烟尘、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和氮氧化物(NO<sub>x</sub>)等大气污染物排放的主要来源。经多年努力,火电厂大气污染物减排总量可观,但是随着经济发展,因各行各业各类污染源排放的各种大气污染物,形成复合污染的危害仍然存在,环境形势依然严峻<sup>[1,2]</sup>。

2014年,所有现有火电厂均已全部执行被称为“史上最严”的火电厂大气污染物排放标准(GB 13223-2011)<sup>[3,4]</sup>,2015年全面实施燃煤电厂超低

排放和节能改造工作方案(环发[2015]164号)<sup>[5]</sup>发布,标志着我国燃煤发电行业正式踏入“超低排放时代”,一大批火电企业积极响应,率先进行了超低排放改造,全国火电行业烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的排放量以及排放绩效均出现显著下降,随着超低排放

收稿日期: 2021-02-25; 修订日期: 2021-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208102)

作者简介: 李辉(1985~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力环境保护技术与管理, E-mail: lihui850627@126.com

的全面推进,在随后几年中,火电大气污染物总体排放水平保持着持续下降的趋势<sup>[6~9]</sup>。

然而,在习近平新时代中国特色社会主义思想和“绿水青山就是金山银山”理论指导下,继续加强大气污染防治,未来电力行业究竟还有多少减排潜力,在碳达峰与碳中和的国家战略下,火电厂污染物排放标准又将如何发展等问题,在政府管理部门、电力与污染治理行业和科研机构,以及社会公众等各方面都受到广泛关切<sup>[10~17]</sup>。本研究以超低排放开始全面推行的2016年火电行业烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放水平为基准,从我国“十四五”及2035年远景目标经济发展<sup>[18]</sup>预测出发,结合碳减排战略目标下能源与电力发展的既有与强化政策情景<sup>[19,20]</sup>,基于弹性系数法<sup>[21]</sup>预测电力需求,根据污染物排放标准约束要求的发展趋势,测算火电大气污染物排放情况及减排潜力,对火电厂污染物排放标准限值的修订进行探讨。

1 材料与方法

1.1 预测模型的建立

影响火电行业大气污染物的排放的因素主要包括:社会经济发展及其对电力的需求程度、电力产业结构、大气污染防治科技支撑能力、环保产业发展与污染治理工程水平,以及大气污染防治政策实施、监督执法等环境管理措施等。综上,火电行业大气污染物的减排,是在全国电力需求1个增项和通过结构减排、科技减排、工程减排、管理减排这4个减项的综合作用下来实现,其中电力需求的增项又分解为经济增长及其对电力增长的需求度两个指标,即:

$$\Delta E_i = f(E_0, Elc, G, e, S, ST, EN, M) \quad (1)$$

式中,Δ*E<sub>i</sub>*为第*i*年电力行业某大气污染物相对于基准年的减排量,*E<sub>0</sub>*为基准年电力行业某大气污染物排放量,Elc为基准年电力行业火电发电量,*G*为经济增长率(GDP因素),*e*为电力消费弹性系数(经济增长对电力增长的需求度,其值为年度电力

消费增长率与当年GDP增长率之比),*S*为结构减排因素,ST为科技减排因素,EN为工程减排因素,*M*为管理减排因素。

其中,依靠科技进步,采取经济、技术、工程和法律等手段来减少污染物产生与排放,即科技、工程和管理减排最终均以执行更低的污染物排放标准并实现达标排放来体现,其转化为可量化的污染物排放强度指标,即公式(1)中的ST、EN和*M*综合转化为排放绩效(ep),预测某年某大气污染物排放总量可表述为:

$$E_i = Elc_{i-1} \times (G_i \times e_i + 1) \times S_i \times ep_i \quad (2)$$

式中,*E<sub>i</sub>*为第*i*年电力行业某大气污染物预测排放量,Elc<sub>*i-1*</sub>为第*i-1*年电力消费量;*G<sub>i</sub>*为预测第*i*年GDP增速,*e<sub>i</sub>*为预测第*i*年电力弹性系数,*S<sub>i</sub>*为预测第*i*年火电发电量占发电总量的比例,ep<sub>*i*</sub>为预测第*i*年某污染物排放绩效。

某年某大气污染物相对于基准年的减排潜力表述为:

$$\Delta E_i = E_0 - E_i \quad (3)$$

1.2 经济增长因素的确定

我国经济在经过改革开放后30多年的高速增长后进入经济发展新常态阶段<sup>[22~24]</sup>,由过去单一追求GDP数量向追求GDP数量和质量协调发展方向转变,在经济结构调整<sup>[25]</sup>上主要体现为对高耗能落后产业的不断淘汰,逐步改变传统的不平衡、不协调和不可持续的粗放增长模式,低能耗环保友好可持续发展的新兴产业得到发展。转向新常态不是短期的调整,而是中央对当前中国经济增长阶段变化规律更加深刻认识,而确定的我国今后经济发展的阶段特征。因此,本文以经济发展新常态为基本立足点,预测我国“十四五”乃至今后更长时间段的经济增长速度。现以2019年和2020年<sup>[26]</sup>为基础,预设“十四五”至2035年期间低速、中速和高速这3种GDP增长情景如表1所示。

表1 GDP增速、电力消费弹性系数和火电比重情景预测

Table 1 Scenario prediction of GDP growth, electricity consumption elasticity coefficient, and thermal power proportion

| 项目      | GDP增速/% |      |      | 电力消费弹性系数 |      | 火电比重/%    |           |
|---------|---------|------|------|----------|------|-----------|-----------|
|         | 低速情景    | 中速情景 | 高速情景 | 既有政策     | 强化政策 | 既有政策      | 强化政策      |
| 2019年   | 6.1     | 6.1  | 6.1  | 0.72     | 0.72 | 69.6      | 69.6      |
| 2020年   | 2.3     | 2.3  | 2.3  | 0.97     | 0.97 | 67.7      | 67.7      |
| “十四五”期间 | 5.0     | 6.0  | 7.0  | 0.76     | 0.81 | 66.3~60.8 | 65.8~58.3 |
| “十五五”期间 | 4.5     | 5.5  | 6.5  | 0.59     | 0.69 | 59.4~53.8 | 55.9~46.3 |
| “十六五”期间 | 4.0     | 5.0  | 6.0  | 0.50     | 0.65 | 52.4~46.8 | 42.9~29.3 |

1.3 电力消费弹性系数的确定

1.3.1 电力消费弹性系数历史规律

电力消费弹性系数<sup>[21]</sup>是指一段时间内电力消费增长速度与国民生产总值增长速度的比值,用以

评价电力与经济发展之间的总体关系。在同一国家的不同发展阶段,电力消费弹性系数会出现较大的差别,其受到能源结构、产业结构、居民生活水平和科技进步等多个因素的综合影响,反映出社会经济

发展对电力工业和电力生产需求的宏观特征. 经查国家统计局年度数据<sup>[27]</sup>, 图 1 展示了我国自 2001 年以来我国电力消费弹性系数的变化情况.

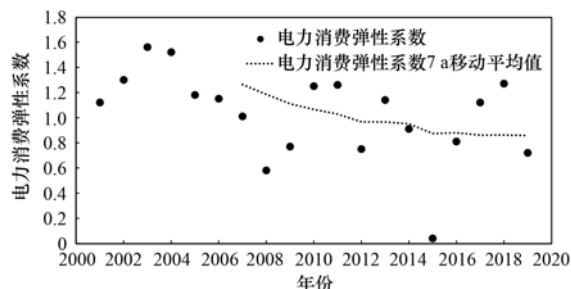


图 1 我国 2001 ~ 2019 年电力消费弹性系数

Fig. 1 Electricity consumption elasticity coefficient of China from 2001 to 2019

本世纪初期,在经济持续高速增长和电力工业、电气化水平快速发展的背景下,以电力消费拉动经济增长的现象明显<sup>[16,28~31]</sup>. 从图 1 中可以看出,在进入 21 世纪的前几年,我国电力消费快速增长,其增速大于 GDP 增速,电力消费弹性系数最高达 1.56,随后回落至 1 以下,2009 年后又再次出现升高-回落-升高的现象,呈现出以 7 a 为周期的波动规律,但随着经济结构不断优化调整,我国国民经济发展对电力需求增长的依赖逐步减小,尤其是进入经济新常态后,总体上呈逐渐下降趋势,2012 ~ 2019 年间电力需求弹性系数平均值降至 0.79 左右,经济社会发展与电力消费的关联性逐渐趋于弱化. 本文对 2001 年以来电力消费弹性系数 7 a 移动平均值采用线性回归模型建模,经模型比较发现样本数据显示出良好的半对数线性关系,构建模型为:

$$Y = \alpha_1 + \alpha_2 \ln X + \mu \quad (4)$$

式中,  $Y$  为自 2001 年起第  $X$  个 7 年移动平均电力消费弹性系数;  $X$  取自然数列 1, 2, 3, ..., 如 2007 年  $X$  取 1、2008 年  $X$  取 2,以此类推;  $\mu$  为误差项.

通过模型计算,  $\alpha_1 = 1.2889$ ,  $\alpha_2 = -0.172$ , 模型的样本相关系数  $R^2 = 0.98$ , 预测平均误差  $\mu = \pm 0.02$ , 进一步对模型进行总体相关性  $t$ -检验, 令:

$$t = R \sqrt{n-2} / \sqrt{1-R^2} \quad (5)$$

式中,  $t$  为  $t$ -检验统计量;  $R^2$  为模型样本相关系数;  $n$  为样本量, 本文取 13.

经计算得到预测模型  $t$  值为 23.58, 大于在 0.01 显著性水平下的  $t_{0.01}(13) = 3.01$ , 预测模型通过了总体的线性相关性检验.

### 1.3.2 既有政策情景下的趋势预测

随着经济结构调整的持续深入及能源利用效率的提高,在不改变既有的能源、电力发展政策,即本文所称“既有政策”的情况下,我国电力需求弹性系

数将进一步降低,且保持如 1.3.1 节所预测的相对稳定的周期性变化规律,假设该周期性规律可持续到 2030 年前后,利用公式(4)的模型预测出 2001 年后第  $X$  个 7 a 移动平均电力消费弹性系数后,可计算出 2020 年及以后逐年电力消费弹性系数,再计算得到“十四五”和“十五五”期间平均电力消费弹性系数,并假设“十六五”期间继续延续前两个 5 a 阶段的平均变化趋势(如表 1).

### 1.3.3 碳减排强化政策情景下的趋势修正

2020 年 9 月 22 日,习近平主席在第 75 届联合国大会一般性辩论上郑重宣布<sup>[19]</sup>,中国  $\text{CO}_2$  排放力争在 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和,在 12 月 12 日的气候雄心峰会上进一步宣布到 2030 年<sup>[20]</sup>,单位国内生产总值  $\text{CO}_2$  排放将比 2005 年下降 65% 以上. 在此宏伟的碳达峰碳中和目标下,我国在能源、电力发展领域将采取一系列政策调整,即本文所称“强化政策”,能源消费结构必然将发生重大变化<sup>[32~34]</sup>,居民生活、交通运输和工业生产等方方面面将迎来新一轮的去碳化和电气化发展高潮,社会经济发展将再次提高与电力消费的密切关联. 在碳达峰与碳中和强化政策情景下,预测我国电力消费弹性系数需在 1.3.2 节预测基础上进行适当修正,居民生活和交通运输领域的电气化和去碳化过程将率先进行,其他工业行业也将逐步加快进程,本文假设“十四五”、“十五五”和“十六五”期间平均电力消费弹性系数在 1.3.2 节预测基础上分别提高 0.05、0.10 和 0.15(如表 1).

### 1.4 火电发电量占比的确定

#### 1.4.1 火电发电量占比历史规律

经查国家统计局年度数据<sup>[35]</sup>,统计出如图 2 所示的自 2001 年以来我国火电发电量占发电总量比例的变化情况. 在 21 世纪的前 10 a,火电发电量占比长期稳定在 80% 以上,到 2010 年后出现了明显的逐年下降趋势. 电源结构的调整带动电量结构的变化,近年来我国非化石能源发电比重持续上升<sup>[36]</sup>,火电发电量占比年均下降约 1.2%,2012 年开始火电比重降至 80% 以下,并保持着稳定的降幅,根据我国“十三五”能源发展规划和电力发展规划,非化石能源发电加快发展,煤电规划进一步优化建设时序,加快淘汰落后产能,促进煤电清洁高效发展,到 2020 年煤电装机规模实际达成了控制在 11 亿 kW 以内的目标. 本文以 2011 年后火电发电量占比采用线性回归模型建模:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X + \mu \quad (6)$$

式中,  $Y$  为  $X$  年度我国火电发电量占全国发电总量的比例;  $X$  取自然数列 2011, 2012, 2013, ...,  $\mu$  为

误差项。

通过模型计算,  $\beta_1 = 2891.7$ ,  $\beta_2 = -1.398$ , 模型相关系数  $R^2 = 0.96$ , 预测平均误差  $\mu = \pm 0.84$ , 预测模型同样通过了如 1.3 节所述的总体线性相关性  $t$ -检验, 计算  $t$  值为  $12.98 > 3.25 [t_{0.01}(9)]$ 。

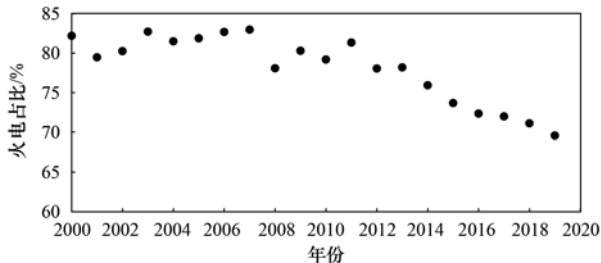


图2 我国2000~2019年火电发电量占发电总量的比例

Fig. 2 Proportion of thermal power generation in total power generation in China from 2000 to 2019

#### 1.4.2 既有政策情景下的趋势预测

在当前电力结构发展形势及既有政策情景下,“十四五”至2035年期间,火电建设将进一步放缓,大量老旧小火电机组退役,火电发电量占发电总量的比例预计将以相对稳定的线性速度逐年降低,利用公式(6)的模型预测出2020年以后逐年火电发电量占比,到“十四五”、“十五五”和“十六五”期末将分别降至60.8%、53.8%和46.8%(如表1)。

#### 1.4.3 碳减排强化政策情景下的趋势修正

习近平主席在2020年气候雄心峰会上提出“到2030年中国非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右”和“风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿kW以上”等提高国家自主贡献力度的具体政策和措施。能源消费结构的变化必须建立在能源生产结构变化的基础上,电力生产势必要率先进入去碳化的重大调整轨道<sup>[37]</sup>,以清洁可再生的低碳、零碳电力推动全社会生产生活活动的电气化、去碳化进程加速。因此,在碳达峰与碳中和强化政策情景下,我国火电发电量占比预测也需在1.4.2节的预测基础上进行适当修正,通过清洁可再生电力优先上网与加快风电和光伏发电<sup>[38]</sup>等大规模建设投运等措施,本文假设“十四五”、“十五五”和“十六五”期间火电发电量占比将在1.4.2节预测基础上分别以每年0.5、1.0和2.0个百分点的累积速度加速降低,到“十四五”、“十五五”和“十六五”期间期末将分别降至58.3%、46.3%和29.3%(如表1)。

#### 1.5 污染物排放绩效的确定

污染物排放绩效是用于衡量火电行业大气污染控制水平重要的综合性指标,是对国家及地方污染防治政策约束及行业、企业污染防治技术水平最直观地体现。

根据文献[5]的要求,到2020年,全国所有具备改造条件的燃煤电厂力争实现超低排放(在基准氧含量6%条件下,烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放浓度分别不高于10、35和50 mg·m<sup>-3</sup>,此限值对燃煤机组SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的要求已与《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)燃气机组一致,对燃煤机组烟尘的限值虽比燃气机组高,但实际控制水平已基本相当,且部分省份发布的地方标准中对燃煤机组烟尘的限值也进一步降低至5 mg·m<sup>-3</sup>(与燃气机组一致),其中东部地区2017年前总体完成,中部地区力争在2018年前基本完成,西部地区在2020年前完成,全国总共完成改造5.8亿kW。对此,各地积极落实,河南、天津、河北和江苏等省市均提前1~2 a完成全部具备条件机组的超低排放改造,截至2019年底,全国已累计完成超低排放改造8.9亿kW<sup>[39]</sup>,远超原计划2020年的改造目标,已达到占全国煤电机组的75%左右,建成了全球最大清洁煤电供应体系<sup>[40]</sup>。河北、上海、河南、山东、山西、天津和浙江等省市发布了地方火电厂大气污染物排放标准,将超低排放限值确定为法定排放标准,上述省市火电污染物排放绩效明显优于北京以外的其他地区。

根据上述分析,到2020年底全国实现超低排放煤电机组容量将占全部煤电装机容量的80%以上,估算全国火电发电量的80%以上为超低排放机组贡献,其余发电量至少满足火电厂大气污染物排放标准(GB 13223-2011)要求或保持各地现有平均水平,其中:①已发布执行地方排放标准的地区(天津、河北、山西、山东、浙江、上海和河南等)煤电装机全部实现超低排放;②东部沿海及重点地区(北京、辽宁、江苏、福建、广东和海南等)煤电装机全部实现超低排放;北方地区煤电大省及中部地区(内蒙古、吉林、黑龙江、安徽、湖北、湖南、江西、陕西、甘肃、宁夏和新疆等)2016年现有全部煤机容量的80%实现超低排放,新增装机全部按超低要求建设;③其他地区(四川、重庆、贵州、云南、西藏和广西等)2016年现有全部煤机容量的70%实现超低排放,新增装机全部按超低要求建设。

2020年之后排放要求分3种标准约束情景进行分析,如下。

(1)约束情景一 保持模式,即保持2020年现状,但若根据1.2~1.4节关于火电发电量的预测,火电发电量在预测期内达到峰值,之后则优先减少在该情景下非执行最严排放限值机组发电量。

(2)约束情景二 超低模式,即继续推动超低排放,将超低排放限值确定为国家排放标准,并分步执行,若在电量达峰后若仍有未执行该情境下最严

排放限值的,该类机组发电量优先退出:①2025 年之前,对“十三五”期间仍未进行超低改造的机组进行 70% 以上的替代关停或改造;②2030 年全国所有火电机组全部实现超低排放,烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放浓度分别不高于 10、35 和 50 mg·m<sup>-3</sup>,排放绩效分别约为 0.03、0.11 和 0.15 g·(kW·h)<sup>-1</sup>,2020 年以前达到超低及以下水平的,排放水平保持。

(3)约束情景三 收严模式,即进一步强化减排,参照本项目调研的已于 2017 年完全实现超低排放的中部地区某省燃煤机组实际排放情况,以其 80% 机组可达到的水平为参考,设定至 2030 年烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 国家排放标准逐步收严至 5、25 和 40 mg·m<sup>-3</sup>,并分步执行,若在电量达峰后若仍有未执行该情境下最严排放限值的,该类机组发电量优先退出:①2025 年,全国所有火电机组全部实现超低排放,烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放浓度分别不高于 10、35 和 50 mg·m<sup>-3</sup>,排放绩效分别约为 0.03、0.11 和 0.15 g·(kW·h)<sup>-1</sup>;②2030 年,全国所有火电机组烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放浓度分别不高于 5、25 和 40 mg·m<sup>-3</sup>,即排放绩效分别降至约 0.015、0.075 和 0.130 g·(kW·h)<sup>-1</sup>。

通过设定的上述 3 种排放限值约束情景,预测各省(自治区、直辖市)在目标年可能达到的排放绩效水平,同时设定各地区火电发电量在全国总量中的比例基本维持稳定,将预测目标年全国火电电量分解到各地区,由此可测算目标年各省排放量及全国排放总量,并以此计算得全国平均排放绩效,计算

公式如下:

$$ep_i = \frac{\sum Elc_j' \times ep_{ij}}{\sum Elc_j'} \quad (7)$$

式中,  $ep_i$  为某年全国火电大气污染物  $i$  的平均排放绩效,单位为  $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ ;  $Elc_j'$  为当年  $j$  省(自治区、直辖市)火电发电量,单位为  $kW \cdot h$ ;  $ep_{ij}$  为当年  $j$  省(自治区、直辖市)火电大气污染物  $i$  的平均排放绩效,单位为  $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ 。

## 2 我国火电大气污染物排放预测

### 2.1 我国火电大气污染物排放现状

根据文献[41],因大量超低排放机组改造完成投入运行,2016 年全国火电大气污染物排放总量显著下降,烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量分别约为 35 万、170 万和 155 万 t,平均排放绩效分别约 0.08、0.39 和 0.36 g·(kW·h)<sup>-1</sup>。而根据 2016 年全国火电行业大气污染源在线监测浓度数据估算纳入统计的火电厂烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放总量分别约为 27 万、110 万和 123 万 t,平均排放绩效分别为 0.06、0.25 和 0.28 g·(kW·h)<sup>-1</sup>,折算为排放浓度分别约为 18.6、75.4 和 84.5 mg·m<sup>-3</sup>,总体离超低排放水平仍有较大差距。同时,随着火电行业大气污染防治技术水平的整体提升,已逐步显示出投资效益的边界效应,进一步通过工程技术手段降低污染物排放水平将面临巨大的改造投资和运行成本<sup>[42, 43]</sup>。2000 年~2019 年我国火电行业烟尘、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量与排放绩效变化情况见图 3。

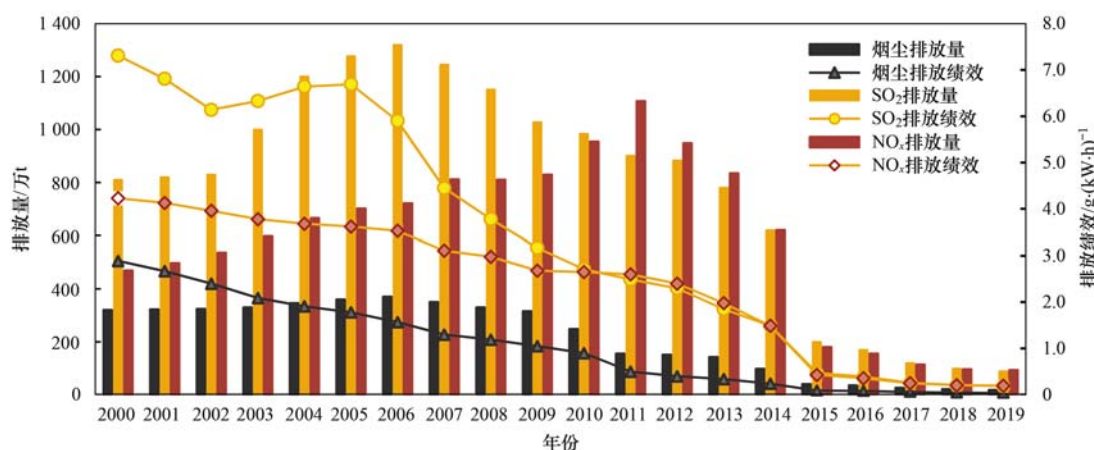


图3 我国火电行业烟尘排、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量与排放绩效

Fig. 3 Emissions and performance of PM, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> in China's thermal power industry

### 2.2 我国火电行业发展预测

根据电力工业统计快报<sup>[44]</sup>,2019 年底全国全口径发电装机容量 20.1 亿 kW,全口径发电量 72 253 万亿 kW·h,同比增长 4.7%,全社会用电量 72 255 万亿 kW·h。全国全口径火电装机 11.9 亿

kW,火电发电量 50 450 万亿 kW·h。根据 1.2~1.4 节的预设及预测模型计算,我国火电发电量变化情况如图 4 所示。

在既有政策情景下,我国火电发电量占比稳定下降,2035 年降至约 46.8%,发电量在经济中、低速

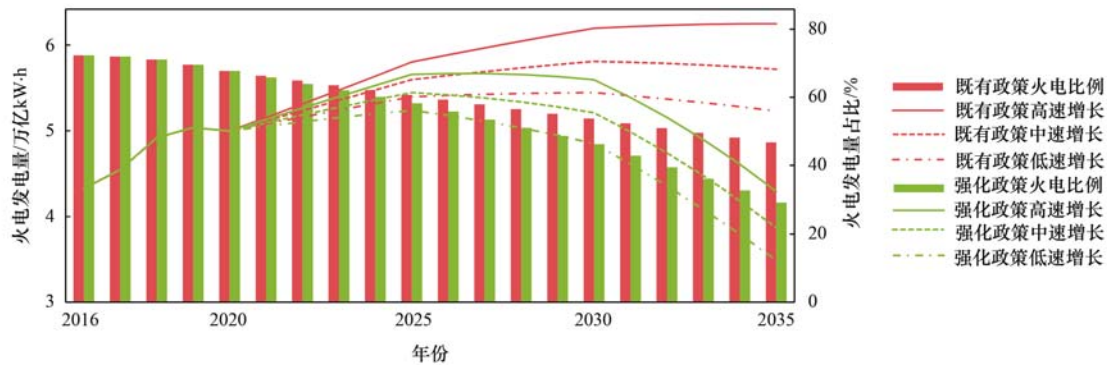


图4 2016~2035年我国GDP总量与火电发电量需求预测

Fig. 4 Forecast of GDP and demand for thermal power generation from 2016 to 2035 in China

增长时可在2030年前后达到峰值,到2035年分别回落至5.73万亿kW·h和5.24万亿kW·h,而在经济高速增长时2030年后仍将持续缓慢增长,2035年升高至6.26万亿kW·h;在实施碳减排的强化政策情景下,火电发电量占比将加速下降,2035年降至30%以下,发电量在经济高、中、低速增长时均可在2025年前后达到峰值,到2035年分别降至4.30万亿、3.87万亿和3.49万亿kW·h。

### 2.3 污染物排放绩效预测

根据1.5节预设的3种排放标准约束情景,预测2020~2035年全国火电排放绩效在既有政策及强化政策情景下的变化趋势如图5所示。

由于大规模煤电机组超低排放环保设施的改造,2020年燃煤火电厂3种主要大气污染物排放绩效值与2016年比较均有较大幅度地下降。2020年后,在设定的政策情景、经济发展和排放标准约束情景模式下,煤电大气污染物排放绩效值将呈现出不同的发展趋势。

在超低和收严模式的标准约束下,经济增速对3种污染物排放绩效的影响无差异,为避免图中线条重叠影响,图4和图5均只以低GDP增速下的情景进行对比分析,而既有政策和强化政策对3种污染物排放绩效的影响也无差异,其中:超低模式下,先以较明显的趋势下降到2025年,随后放慢下降速度并持续到2030年,之后基本趋于稳定,烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放绩效将分别在2020年水平基础上继续降低约19%、20%和11%;收严模式下将以更明显的幅度持续下降至2030年,之后以显著低于2020年的水平保持稳定,烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放绩效较2020年水平降低约51%、43%和22%。

在保持模式的标准约束下,既有政策和强化政策对3种污染物排放绩效变化趋势的差异将在电量达峰时开始显现:在既有政策模式下火电电量达峰晚(经济高速增长情况下未达峰),高污染物排放机组的发电量退出较少,甚至未退出,污染物排放绩效

将基本保持2020年水平;而在强化政策模式下,因高污染物排放的电量退出更早、累积退出量更大,到2035年,火电污染物排放绩效将趋于接近采取超低模式的水平,在经济高速增长情况下,烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放绩效将分别较2020年水平降低约15%、17%和10%,在经济中、低速增长情况下下降幅度会更加明显地接近,甚至于达到超低模式下的水平;同时还可看出,既有政策和强化政策也可通过对电量结构的影响来实现对污染物排放绩效的影响。

### 2.4 火电大气污染物排放量预测

根据上述分析,通过公式(2)可估算“十四五”至2035年火电行业烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>在我国既有政策及采取碳减排强化政策情景、经济发展不同增速,以及不同污染物排放标准约束情景下的排放量,如图6~8所示。

从图6~8可看出,因煤电机组超低排放改造的大规模实施,2020年火电厂烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放总量较2016年大幅降低,但之后,在设定的不同情景下污染物排放量的变化趋势呈现出显著差异。通过2.2节及2.3节的分析,政策情景与标准约束情景分别通过影响火电发电量结构与污染物排放绩效来影响火电污染物排放量,而在保持模式的排放标准约束下,政策情景模式同样通过对火电发电量结构的变化产生了降低污染物排放绩效的效果,进而影响污染物排放量。

在既有政策情景下:经济高速增长时火电发电量将持续缓慢增长,标准约束采取保持模式将无法控制污染物排放总量的增长,超低模式降低的排放绩效也无法抵消电量增长带来的排放量增长,即使采取收严模式,在2030年后排放绩效不再持续降低时,污染物排放量仍会略微反弹;只有在经济中、低速增长时,3种污染物的排放总量才能够得到有效控制,随着火电发电量在2030年达峰,采取保持模式标准约束污染物排放量可在经历二次反弹后在2030年再次达峰后转而下降,而在超低和收严模式

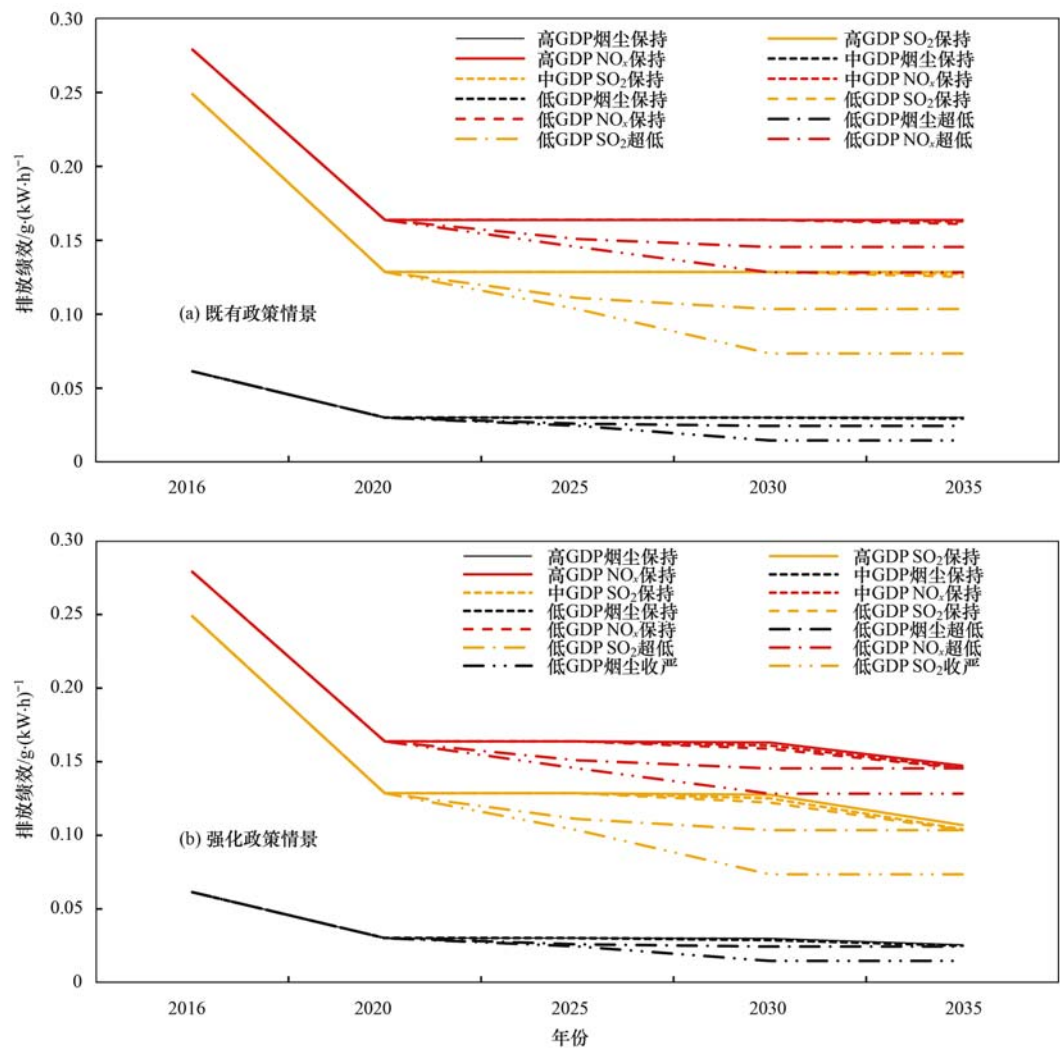


图5 不同情景模式下大气污染物平均排放绩变化趋势

Fig. 5 Variation trend of average emission performance of air pollutants under different scenarios

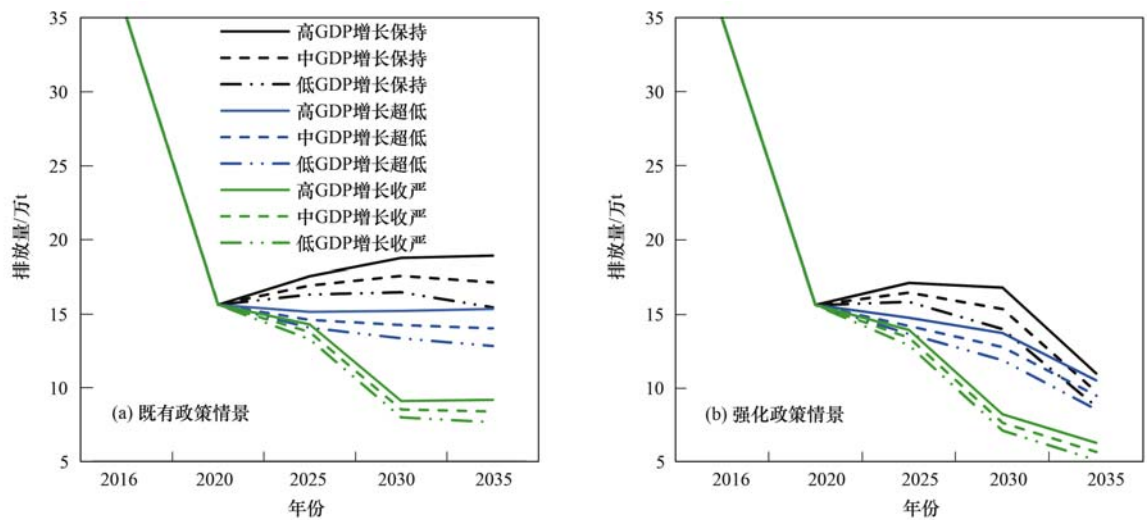
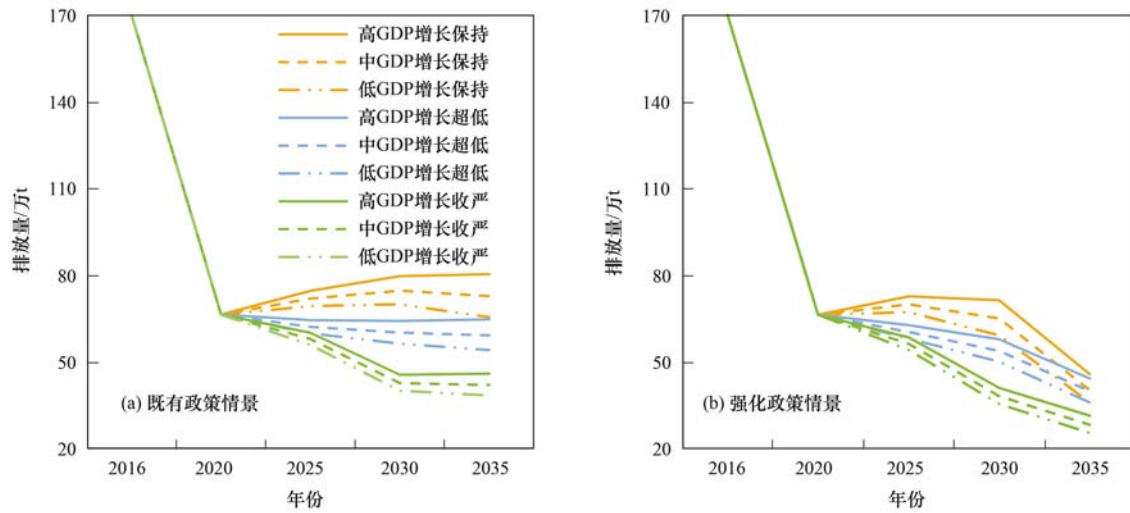
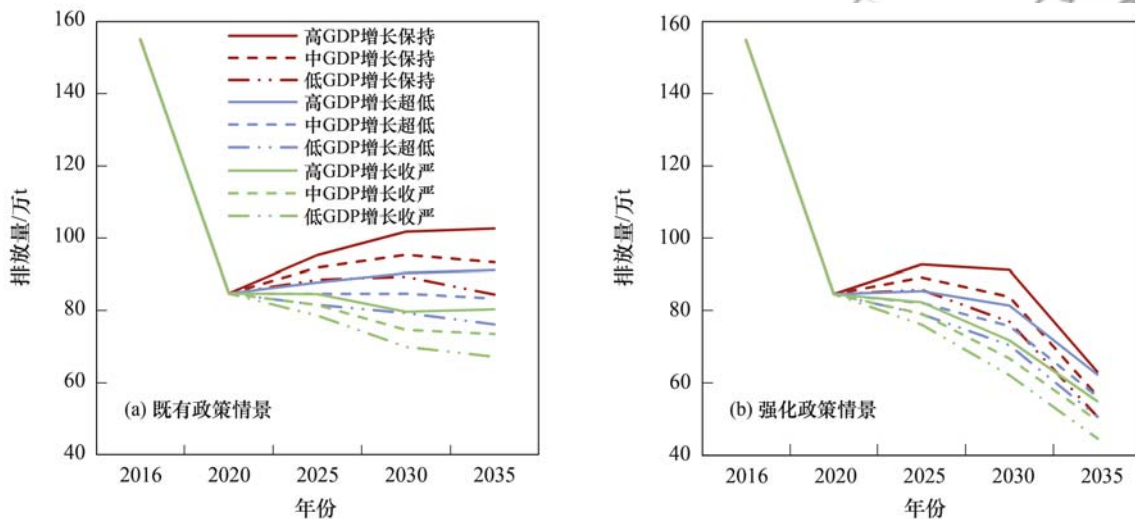


图6 不同情景模式下烟尘排放总量变化趋势

Fig. 6 Variation trend of total PM emission under different scenarios

下,除 NO<sub>x</sub> 排放量会在 GDP 中速增长超低模式下反弹到 2030 年达峰之外,其余情况下 3 种污染物排放量均呈现出持续下降趋势。

在强化政策情景下:GDP 高、中、低速增长情况下火电发电量都可在 2025 年前后达峰,若采取超低和收严模式的标准约束,除 NO<sub>x</sub> 排放量会在 GDP

图7 不同情景模式下  $\text{SO}_2$  排放总量变化趋势Fig. 7 Variation trend of total  $\text{SO}_2$  emission under different scenarios图8 不同情景模式下  $\text{NO}_x$  排放总量变化趋势Fig. 8 Variation trend of total  $\text{NO}_x$  emission under different scenarios

高、中速增长时 2020 年后仍略有反弹,到 2025 年再次达峰外,其余情况下 3 种污染物排放量均以明显的幅度持续下降;即使标准约束采取保持模式,3 种污染物排放量也都将随火电发电量的达峰而再次达峰后转而下降,并随着高污染排放机组发电量的逐步退出,到 2035 年,污染物排放量将逐步趋于接近超低模式的标准约束情景。

### 3 我国火电大气污染物减排潜力分析

结合上述分析,从图 6~8 可以看出,以 2016 年为基准年,无论在何种情景下,到“十四五”期末及 2035 年,火电行业烟尘、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放量均有所下降,但减排趋势和幅度在不同情景模式下呈现出显著的差异。

在既有政策情景下:根据预设的不同经济增速和排放标准约束条件,2025 年相对于 2016 年烟尘

可减排 17.45 万~21.21 万 t,  $\text{SO}_2$  减排 95.22 万~114.01 万 t,  $\text{NO}_x$  减排 59.75 万~76.33 万 t; 到 2030 年烟尘可减排 16.25 万~27.00 万 t,  $\text{SO}_2$  减排 90.12 万~129.91 万 t,  $\text{NO}_x$  减排 53.26 万~85.00 万 t; 到 2035 年烟尘可减排 16.09 万~27.32 万 t,  $\text{SO}_2$  减排 89.44 万~131.49 万 t,  $\text{NO}_x$  减排 52.39 万~87.76 万 t。

在强化政策情景下:2025 年相对于 2016 年烟尘可减排 17.89 万~22.10 万 t,  $\text{SO}_2$  减排 97.10 万~115.67 万 t,  $\text{NO}_x$  减排 62.14 万~78.65 万 t; 到 2030 年烟尘可减排 18.20 万~27.88 万 t,  $\text{SO}_2$  减排 98.47 万~134.32 万 t,  $\text{NO}_x$  减排 63.62 万~92.69 万 t; 到 2035 年烟尘可减排 24.01 万~29.88 万 t,  $\text{SO}_2$  减排 124.09 万~144.33 万 t,  $\text{NO}_x$  减排 91.77 万~110.18 万 t。

图 9~11 展示了到 2035 年,在不同政策情景与

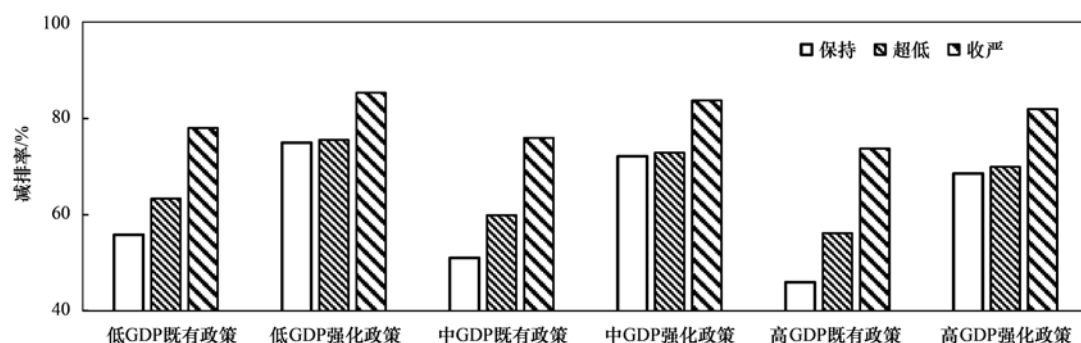
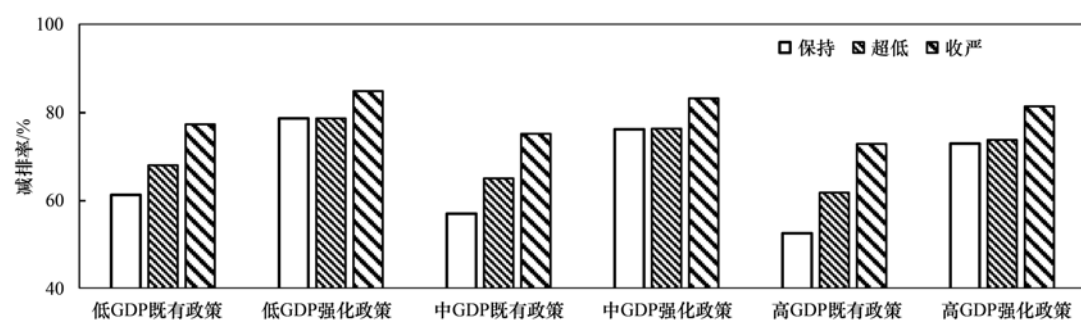
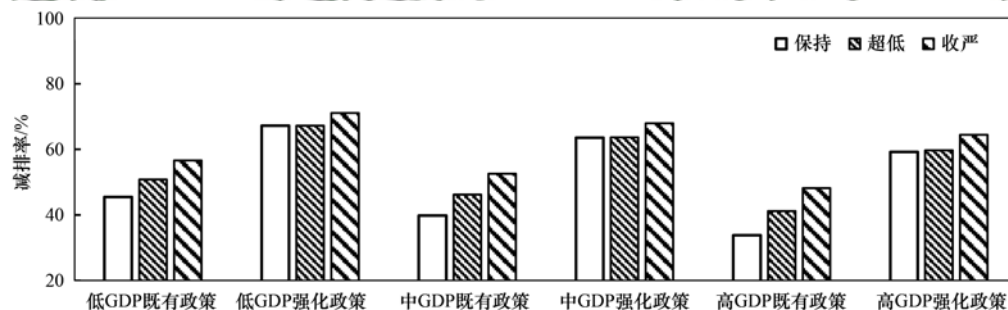


图9 不同情景模式下2035年较2016年的烟尘减排率

Fig. 9 PM emission reduction rate in 2035 compared with that in 2016 under different scenarios

图10 不同情景模式下2035年较2016年的SO<sub>2</sub>减排率Fig. 10 SO<sub>2</sub> emission reduction rate in 2035 compared with that in 2016 under different scenarios图11 不同情景模式下2035年较2016年的NO<sub>x</sub>减排率Fig. 11 NO<sub>x</sub> emission reduction rate in 2035 compared with that in 2016 under different scenarios

污染物排放标准约束情景下,预测火电行业烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放量在2016年基础上的减排率。

从图9~11可以看出,在相同的政策模式和经济发展情景下,收严的标准约束对3种污染物都具有最大的减排潜力,对烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的减排潜力分别可达73.76%~85.37%、72.79%~84.90%和48.14%~71.08%,较超低模式的标准约束情景烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>减排潜力差异分别在9.81~17.59、6.18~11.07和3.87~6.94个百分点之间,较保持模式的标准约束情景差异分别在10.37~27.79、6.18~20.31和3.87~14.34个百分点之间。值得注意的是在强化政策模式下,采取保持模式标准约束情景下的污染物减排潜力已与超低模式基本相当,尤其是对SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的减排潜力甚至超过

了既有政策下采取收严模式的标准约束效果,对烟尘的减排潜力也仅低2.95~5.16个百分点,此差异相对于全国排放总量而言影响微弱,由此不难看出来自碳达峰与碳中和战略目标下政策因素带来的减排潜力,较不同污染物排放标准约束情景带来的效果更为明显。在深入推进生态文明建设,加快实现碳达峰碳中和的战略目标背景下,坚持以降碳为总抓手<sup>[45]</sup>,统筹能源、电力行业应对气候变化与大气污染防治的协调,实现绿色低碳发展对生态环境质量改善协同增效的发展策略将是必然选择。

#### 4 结论

(1)通过全面推行超低排放,到2020年,全国火电行业烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放绩效和排放量较

2016 年均显著下降,2020 年后,在不同的政策情景和排放标准约束情况下,3 种大气污染物排放水平变化呈现出不同的趋势,到 2035 年,在 2016 年水平上具有减排潜力分别在 45.97%~85.37%、52.61%~84.90% 和 33.80%~71.08% 之间,其中在强化政策、采取收严模式的标准约束情景下,且在低 GDP 增速时减排潜力最大。

(2) 标准约束情景通过直接影响污染物排放绩效来降低火电污染物排放量,政策情景主要通过影响电力结构来实现,但也可通过优化火电发电量结构,即火电发电量需求达峰后,来自高污染物排放水平机组的发电量优先退出,来达到降低平均排放绩效的效果,进而进一步影响污染物排放量,尤其是在保持模式的排放标准约束下,其影响效果尤其明显。

(3) 在强化政策情景下,采取保持模式标准约束情景的污染物减排潜力已与超低模式基本相当,而对  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的减排潜力甚至超过了既有政策下采取收严模式的标准约束效果,而相对于强化政策、收严模式下烟尘、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的减排潜力也仅分别低 10.37~13.41、6.18~8.44 和 3.87~5.24 个百分点,对全国烟尘、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放总量减排贡献度有限。

(4) 来自碳减排目标下政策因素带来的减排潜力,较不同污染物排放标准约束情景带来的减排潜力更为明显,进一步收严火电厂污染物排放标准所带来的社会环境效益并不理想,反而将面临工程技术手段上可能存在的技术瓶颈和巨大的建设投资、运行成本,通过强化实施能源、电力发展政策,调整电力生产结构,在加快提升清洁可再生电力比重的同时,科学、合理引导高污染排放水平的火电机组优先退出生产,同样可使火电大气污染物排放得到有效控制,还可避免因火电需求达峰后关停机组造成环保改造投资的浪费和损失。

#### 参考文献:

- [1] 魏巍贤,马喜立. 能源结构调整与雾霾治理的最优政策选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(7): 6-14.  
Wei W X, Ma X L. Optimal policy for energy structure adjustment and haze governance in China[J]. China Population Resources and Environment, 2015, 25(7): 6-14.
- [2] 郦建国,朱法华,孙雪丽. 中国火电大气污染防治现状及挑战[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 1-10.  
Li J G, Zhu F H, Sun X L. Current status and challenges of atmospheric pollution prevention and control of thermal power plants in China[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 1-10.
- [3] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [4] 朱法华,王圣,赵国华,等. GB13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》解读[M]. 北京:中国电力出版社, 2013. 24-28.
- [5] 环境保护部,国家发展和改革委员会,国家能源局. 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知[EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215\\_319170.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm), 2015-12-11.
- [6] 国家能源局. 能源清洁发展 超低排放异军突起 节能改造稳步推进[EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2017-10/17/c\\_136685136.htm](http://www.nea.gov.cn/2017-10/17/c_136685136.htm), 2017-10-17.
- [7] 国家能源局. 清洁能源消纳难题明显缓解[EB/OL]. <http://finance.people.com.cn/n1/2017/1227/c1004-29730884.html>, 2017-12-27.
- [8] 朱法华. 超低排放:国家专项行动下的技术突破[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 9-10.
- [9] 朱法华. 火电厂污染防治技术手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2017. 74-97, 189-197.
- [10] 王圣. 我国“十四五”煤电发展趋势及环保重点分析[J]. 环境保护, 2020, 48(3): 61-64.  
Wang S. Analysis on development trend of coal power and key points of environmental protection in China's 14th five-year plan[J]. Environmental Protection, 2020, 48(3): 61-64.
- [11] 张旭,孙根年. 中国电力工业环境学习曲线与节能减排潜力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2008, 10(4): 89-95.  
Zhang X, Sun G N. Analysis of the environment learning curve and the potentials of saving energy and reducing emission in Chinese electric power industry[J]. Journal of HIT (Social Science Edition), 2008, 10(4): 89-95.
- [12] 吴智泉,张世平,马美倩,等. 北京市能源需求预测与污染物排放量变化趋势分析[J]. 能源技术经济, 2011, 23(11): 41-45, 52.  
Wu Z Q, Zhang S P, Ma M Q, et al. Energy demand forecast and pollution emission tendency in Beijing[J]. Electric Power Technologic Economics, 2011, 23(11): 41-45, 52.
- [13] 张根年,李静,魏艳旭,等. 环境学习曲线与我国碳减排目标的地区分解[J]. 环境科学研究, 2011, 24(10): 1194-1202.  
Zhang G N, Li J, Wei Y X, et al. Environmental learning curves and the allocation of carbon mitigation targets among different provinces in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(10): 1194-1202.
- [14] 刘三省,黄国和,王冰,等. 基于电力结构调整的上海市电力行业大气污染物排放总量研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(11): 95-99.  
Liu S X, Huang G H, Wang B, et al. Research of total air pollutants estimations of electric industry in Shanghai based on electric industry structure adjustment[J]. Environmental Pollution and Control, 2014, 36(11): 95-99.
- [15] 翟羽佳. 基于 LEAP 模型的未来大同市环境污染物排放预测[J]. 环境保护科学, 2018, 44(5): 30-35.  
Zhai Y J. Prediction of future environment pollutants emission in Datong city based on LEAP[J]. Environmental Protection Science, 2018, 44(5): 30-35.
- [16] 汪斌. 基于电力需求分析和结构调整的京津冀地区能源调控策略[D]. 北京:北京科技大学, 2018. 21-57.  
Wang B. Energy regulation strategy for Beijing-Tianjin-Hebei region based on power demand analysis and structure adjustment[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018. 21-57.
- [17] 王文熹,于渤. 基于环境学习曲线的工业大气污染物排放强度下降潜力测算[J]. 经济问题, 2018, (12): 68-76.  
Wang W X, Yu B. Measurement of the reduction potential of industrial air pollutants intensity based on environmental learning Curves[J]. On Economic Problems, 2018, (12): 68-76.
- [18] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央关于制定国民经济

- 和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content\\_5556991.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm), 2020-11-03.
- [19] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content\\_5546169.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546169.htm), 2020-09-22.
- [20] 中华人民共和国中央人民政府. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content\\_5570055.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5570055.htm), 2020-12-12.
- [21] 单葆国, 张成龙, 王向, 等. 中国电力弹性系数与工业化阶段关系[J]. 中国电力, 2020, **53**(7): 1-6.
- Shan B G, Zhang C L, Wang X, *et al.* Relationship between electricity elasticity coefficient and industrialization stage in China [J]. Electric Power, 2020, **53**(7): 1-6.
- [22] 何鹏. 经济新常态与我国产业结构转型升级[J]. 知识经济, 2019, (16): 15-16.
- [23] 张树阳. 新常态下我国产业经济结构转型升级研究[J]. 现代经济信息, 2020, (14): 14-15.
- [24] 张伟, 朱启贵, 高辉. 产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展[J]. 经济研究, 2016, **51**(12): 62-75.
- Zhang W, Zhu Q G, Gao H. Upgrading of industrial structure, optimizing of energy structure, and Low carbon development of industrial system [J]. Economic Research Journal, 2016, **51**(12): 62-75.
- [25] 李敏辉, 廖程浩, 常树诚. 大气污染排放格局优化方法及案例[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1679-1687.
- Li M H, Liao C H, Chang S C. Optimization method and case study of air pollution emission spatial pattern [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1679-1687.
- [26] 中华人民共和国中央人民政府. 2.3%! 2020 年中国经济逆势增长 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/18/content\\_5580785.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/18/content_5580785.htm), 2021-01-18.
- [27] 国家统计局. 年度数据-能源-能源弹性系数 [EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2021-02-10.
- [28] 汪行, 范中启, 张瑞. 基于 VAR 的我国能源效率与能源结构关系的实证分析[J]. 工业技术经济, 2016, **35**(9): 128-134.
- Wang H, Fan Z Q, Zhang R. Empirical analysis on the relationship between energy efficiency and energy structure of VAR [J]. Industrial Technology Economy, 2016, **35**(9): 128-134.
- [29] 郭晶, 王涛. 中国能源消费与经济增长关系的实证分析[J]. 统计与决策, 2017, (4): 138-141.
- [30] 杨春桃. 制度创新、结构调整和电力低碳发展[J]. 经济与管理研究, 2016, **37**(7): 37-46.
- Yang C T. System Innovation, Structural adjustment and low carbon power development [J]. Research on Economics and Management, 2016, **37**(7): 37-46.
- [31] 熊长虹, 王丽丽. 从电力数据看地区经济结构调整[J]. 大众用电, 2017, **32**(10): 7-8.
- [32] 江亿. 我国可尝试直接向电气化时代转型[J]. 中国石油企业, 2020, (10): 11-12.
- [33] 姜克隽, 向翩翩, 贺晨旻, 等. 零碳电力对中国工业部门布局影响分析[J]. 全球能源互联网, 2021, **4**(1): 5-11.
- Jiang K J, Xiang P P, He C M, *et al.* Impact analysis of zero carbon emission power generation on China's industrial sector distribution [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, **4**(1): 5-11.
- [34] 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 等. 基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1705-1714.
- Hao X, Wang H W, Li H F, *et al.* Analysis of PHEV CO<sub>2</sub> emission based on China's grid structure and travelling patterns in mega cities [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1705-1714.
- [35] 国家统计局. 年度数据-能源-电力平衡表 [EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2021-02-10.
- [36] 王圣. 我国非化石能源发电现状及存在问题探析[J]. 环境保护, 2017, **45**(21): 52-54.
- Wang S. Analysis on the current situation and existing problems about non-fossil fuels power in China [J]. Environmental Protection, 2017, **45**(21): 52-54.
- [37] 陈怡, 田川, 曹颖, 等. 中国电力行业碳排放达峰及减排潜力分析[J]. 气候变化研究进展, 2020, **16**(5): 632-640.
- Chen Y, Tian C, Cao Y, *et al.* Research on peaking carbon emissions of power sector in China and the emissions mitigation analysis [J]. Climate Change Research, 2020, **16**(5): 632-640.
- [38] 中国气象局风能太阳能资源中心. 2019 年中国风能太阳能资源年景公报 [R]. 北京: 中国气象局风能太阳能资源中心, 2020. 13-19.
- CMA, Wind and Solar Energy Resources Center. China wind and solar energy resources bulletin [R]. Beijing: CMA, Wind and Solar Energy Resources Center, 2020. 13-19.
- [39] 国务院新闻办公室. 国新办举行“十三五”生态环境保护工作新闻发布会 [EB/OL]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/42311/44005/index.htm>, 2020-10-21.
- [40] 国家能源局. 我国已建成全球最大清洁煤电供应体系 [EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2019-02/12/c\\_137815509.htm](http://www.nea.gov.cn/2019-02/12/c_137815509.htm), 2019-02-12.
- [41] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告-2017 [M]. 北京: 中国市场出版社, 2017. 78-83, 175-177.
- [42] 廖国权, 李皎, 张文龙, 等. 燃煤电厂烟气深度治理探讨 [J]. 电力科技与环保, 2019, **35**(3): 28-30.
- Liao G Q, Li J, Zhang W L, *et al.* Discussions on deep treatment of flue gas from coal-fired power plant [J]. Electric Power Environmental Protection, 2019, **35**(3): 28-30.
- [43] 顾欣, 施刚夜, 侯新建, 等. 超超低排放技术工程设计方案研究[J]. 电力科技与环保, 2020, **36**(1): 6-11.
- Gu X, Shi G Y, Hou X J, *et al.* Research on engineering design scheme of ultra-ultra-low emission technology [J]. Electric Power Environmental Protection, 2020, **36**(1): 6-11.
- [44] 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](http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_138720881.htm), 2020-01-20.
- [45] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院新闻办就落实五中全会精神以高水平保护促进绿色发展举行发布会 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-12/22/content\\_5572378.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-12/22/content_5572378.htm), 2020-12-22.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios .....                   | LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)                   |
| Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy .....                                                           | WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)               |
| Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City .....                                                                                                       | GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)                |
| Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak .....                                                                                   | CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)        |
| Estimation of PM <sub>2.5</sub> Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest .....                                 | WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)                  |
| Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan .....     | LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)        |
| Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang .....                                                              | SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)             |
| Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing .....                                                                                                 | CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)            |
| Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer .....                                                                 | WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)     |
| Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang .....                                                                                              | DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)            |
| Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones .....                                                                            | GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)                   |
| Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter .....                                                                  | ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)       |
| Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone .....                                                         | REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)                     |
| VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China .....                                                   | GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)       |
| WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies .....                                                                  | WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)           |
| Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province .....                                                                                         | ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)                 |
| Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020 .....                                                            | QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)            |
| Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement .....                                               | HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)        |
| Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity .....                                 | ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)                    |
| Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin .....                                                                                                                        | DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)                                     |
| Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015 .....                                                               | YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)                    |
| Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River .....                                                      | HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)                 |
| Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values .....                                       | XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)            |
| Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir .....                                                                  | ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)      |
| Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake .....                                                                           | LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)             |
| Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River .....                                           | WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)       |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan .....                                                                        | ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)             |
| Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China .....      | XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)                     |
| Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland .....                                                                                 | LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)        |
| Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands .....                                                                 | ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)                       |
| Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil .....                                  | MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)         |
| Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers .....                                                       | WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)                |
| Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem .....                                                                                                      | NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)   |
| Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants .....                                                | ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)              |
| Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis .....                                                                                             | CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)         |
| Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge .....                                                                           | GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)               |
| Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites .....                                                                | LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)             |
| Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China .....                                                       | WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938) |
| Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province .....                                            | WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)          |
| Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China .....          | GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)               |
| Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area .....                                     | QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)                |
| Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District .....                                                            | ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)   |
| Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren .....                                                                                            | ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)           |
| Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar .....                                                                 | HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)  |
| Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L. ....                                                         | WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)        |
| Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China .....                       | WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)      |
| Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission in Single Cropping Paddy Field ..... | WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)           |
| Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N <sub>2</sub> O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid .....                          | WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)                    |
| Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil .....                                      | KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)              |
| Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland .....                                                                                | YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)      |
| Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils .....                                  | XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)          |
| Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower .....                                     | WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)       |