

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析·····	肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐遨,陈魁,邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征·····	尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)
宿迁市PM _{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析·····	马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布·····	李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析·····	林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)
西安市冬季PM _{2.5} 中WSOC的光谱特性和来源解析·····	杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测·····	杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析·····	崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛丞,曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析·····	王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案·····	严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征·····	屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征·····	赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选·····	赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源·····	韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素·····	张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制·····	崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析·····	李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素·····	季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析·····	李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响·····	康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析·····	刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征·····	孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响·····	周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价·····	廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异·····	叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)
奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟·····	李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验·····	张佳炜,李田,张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输·····	李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制·····	石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含苯磺酸废水·····	章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响·····	刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能·····	缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能·····	刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨·····	郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例·····	吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价·····	张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力·····	张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期·····	胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾纭,刘俊,廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率·····	郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果·····	段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响·····	杨彩迪,卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应·····	王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响·····	理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响·····	张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应·····	李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响·····	程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系·····	尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性·····	王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附·····	刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊嘉,彭晶,铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法·····	梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061)	
《环境科学》征稿简则(4132)	
信息(4233, 4293, 4304)	

超低改造下中国火电排放清单及分布特征

屈加豹¹, 王鹏^{1,2}, 伯鑫^{1*}, 薛晓达^{1,3}, 董广霞⁴, 崔磊⁵, 康明雄⁶, 王彤⁷, 汤铃^{3,8}, 朱法华⁹, 李时蓓^{1*}

(1. 生态环境部环境工程评估中心, 北京 100012; 2. 北京化工大学数理学院, 北京 100029; 3. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191; 4. 中国环境监测总站, 北京 100012; 5. 中圣环境科技发展有限公司, 西安 710000; 6. 福建省环境保护设计院有限公司, 福州 350012; 7. 陕西省环境调查评估中心, 西安 710000; 8. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029; 9. 国电环境保护研究院, 南京 210031)

摘要: 本研究基于2018年火电在线监测和环境统计等数据, 自下而上编制了中国高分辨率火电行业排放清单, 并核算了排放浓度、排放因子和排放量。结果表明超低排放政策效果显著: 2018年火电SO₂、NO_x和烟尘平均排放浓度分别为37.57、56.71和7.41 mg·m⁻³, 比2015年分别下降58.71%、43.12%和60.79%; 中国燃煤机组的SO₂、NO_x和烟尘平均排放因子分别为0.30、0.48和0.06 g·kg⁻¹, 比2015年分别下降55.2%、36.84%和62.5%; 中国火电SO₂、NO_x、烟尘和PM_{2.5}总排放量分别为72.14、118.38、14.90和13.59万t·a⁻¹, 比2015年分别下降41.32%、19.29%、48.12%和40.39%。

关键词: 连续在线监测系统(CEMS); 排放清单; 超低; 排放因子; 火电

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-3969-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001042

Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction

QU Jia-bao¹, WANG Peng^{1,2}, BO Xin^{1*}, XUE Xiao-da^{1,3}, DONG Guang-xia⁴, CUI Lei⁵, KANG Ming-xiong⁶, WANG Tong⁷, TANG Ling^{3,8}, ZHU Fa-hua⁹, LI Shi-bei^{1*}

(1. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 2. College of Mathematics and Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China; 5. Zhongsheng Environmental Technology Development Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 6. Fujian Environmental Protection Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350012, China; 7. Shaanxi Environmental Investigation and Assessment Center, Xi'an 710000, China; 8. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 9. State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing 210031, China)

Abstract: This study updates a bottom-up high-resolution emission inventory and estimates the concentrations, emission factors, emissions, and performance values of China's power plants, based on the data from continuous emission monitoring systems and environmental statistics in 2018. The results show that the ultra-low emission policy has significant effects: the average concentrations of SO₂, NO_x, and PM in thermal power plants were 37.57, 56.71, and 7.41 mg·m⁻³, respectively in 2018, which were 58.71%, 43.12%, and 60.79% lower than those in 2015. The average emission factors of SO₂, NO_x, and PM from coal-fired units in China were 0.3, 0.48, and 0.06 g·kg⁻¹, respectively, which were 55.2%, 36.84%, and 62.5% lower than those in 2015. The total emissions of SO₂, NO_x, PM, and PM_{2.5} in thermal power plants were 72.14, 118.38, 14.90, and 13.59 kt·a⁻¹, respectively, down by 41.32%, 19.29%, 48.12%, and 40.39% from 2015.

Key words: continuous emission monitoring systems; emission inventory; ultra-low emission; emission factors; thermal power

2018年中国火电行业装机容量占中国总装机容量的60.2%, 发电量占比达到70.4%^[1]. 作为主要大气污染源, 2015年期间, 其SO₂、NO_x和烟尘排放量占中国总排放量的占比分别约为28%、30%和11%^[2]. 为有效控制火电行业大气污染物排放, 中国对火电行业进行超低排放改造^[3~5], 其中要求中部地区在2018年前完成. 为打赢蓝天保卫战, 2018年推进火电等重点行业的全面达标排放^[6], 因此, 开展2018年中国火电排放清单研究, 可定量评估火电行业超低改造的减排效果, 精确反映当前污染物

排放特征.

国内外研究者开展了系列中国火电排放清单研究. Kurokawa等^[7]建立了2000~2008年的REAS (regional emission inventory in Asia) 污染源, 有学者

收稿日期: 2020-01-05; 修订日期: 2020-03-23

基金项目: 清华大学环境学院重点学术机构2015年度开放基金项目; 生态环境部环境工程评估中心创新科研项目(2019-10); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208101); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209-07, DQGG0304-07)

作者简介: 屈加豹(1993~), 硕士, 工程师, 主要研究方向为排放清单编制及空气质量数值模拟, E-mail: qujb@acee.org.cn

* 通信作者, E-mail: boxin@acee.org.cn; lisb@acee.org.cn

构建了 2012~2016 年的 MEIC 清单 (multi-resolution emission inventory for China, <http://meicmodel.org/index.html>)^[8], 上述排放清单中的火电排放因子多采用传统的抽样检测方法, 采样样本数量相对少, 时间多为 2016 年以前, 排放特征无法反映出火电大规模超低改造后的情况. 基于火电污染源在线监测数据 (continuous emission monitoring systems, CEMS) 的火电排放清单, 可有效评估火电超低改造减排效果. 例如, 文献[9~20]基于火电污染源在线监测数据、环境统计和总量减排等数据, 建立了基于 CEMS 的 2014~2017 年中国火电排放清单, Liu 等^[20]对中国能源集团 38 个发电机组的 CEMS 数据进行检验, 发现超低排放改造后, SO_2 、 NO_x 和 PM 的排放因子降低了 1~2 个数量级. 在线监测数据具有极高的时间分辨率, 基本覆盖我国所有火电机组, 在我国超低排放改造进程中, 可客观评价我国火电行业的排放变化, 在已有研究中已有大量应用.

本研究使用 2018 年中国火电行业的在线监测数据, 结合环境统计数据中的活动水平, 自下而上建立了 2018 年中国高分辨率火电行业大气污染源排放清单 (high resolution power plant emission inventory for China, HPEC), 讨论了中国各省火电主要污染物 (SO_2 、 NO_x 和烟尘) 排放浓度、排放因子和排放量的情况, 并与 2015 年中国火电清单做了对比, 分析了 2018 年各省火电行业超低排放改造的最新进程, 以期打赢蓝天保卫战以及空气质量达标规划等提供坚实的基础数据.

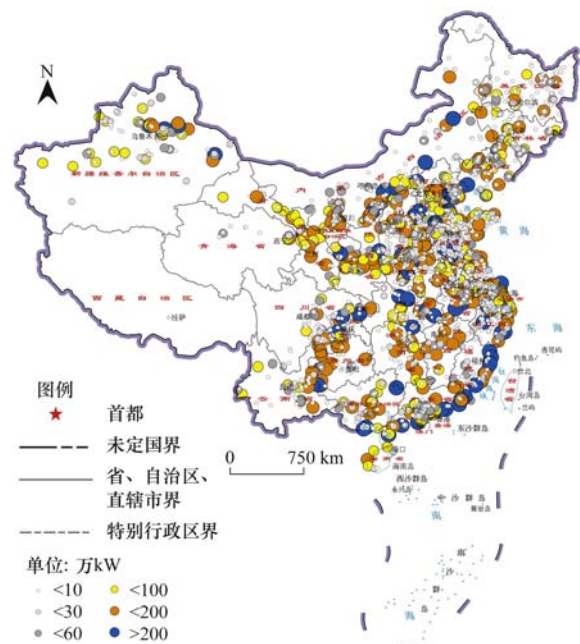
1 材料与方法

1.1 研究区域与对象

本研究以 2018 为基准年, 区域包括中国大陆 30 个省、自治区及直辖市 (中国香港、澳门、台湾和西藏地区暂不考虑), CEMS 来自生态环境执法局 (包括 2 110 家火电企业, 原始数据未公开); 环境统计数据来源于中国环境监测总站 (火电企业 3 124 家, 原始数据未公开), 机组覆盖装机总量约 11.1 亿 kW, 占全国总装机容量的 97.4%. 将各类燃料折合标煤后约 19 亿 t, 较 2015 年增加约 20.87%, 虽然中国电力行业天然气机组近年来比例大幅增加, 但总体结构仍以煤电为主. 从图 1 可以看出, 火电机组主要分布在东部沿海地区、西部煤电基地和北部煤电基地.

1.2 清单编制方法

基于 CEMS 和环境统计的火电行业排放清单编制方法, 已在多个项目得到了应用^[12~15], 取得了很好的效果. 主要方法流程如公式 (1)^[15], 根据 2018



审图号: GS(2019)1815号 自然资源部 监制

中国香港、澳门、台湾和西藏地区资料暂缺, 下同

图 1 2018 年中国火电企业分布示意

Fig. 1 Distribution of China's power plants in 2018

年在线监测污染物年均浓度数据和燃料理论烟气量, 获得每个火电企业的排放因子如公式 (3), 结合环境统计企业的燃料消耗量, 自下而上得到每个火电企业的排放量. 对于没有安装 CEMS 的企业, 该企业的排放浓度由相同类型机组且执行相同标准的统计特征值来表征.

$$E_m = \sum_n \sum_i AC_{n,i} \times EF_{n,i} \quad (1)$$

$$C_{AVG_{n,i}} = \frac{\sum_j \sum_h C_{j,h}}{\sum_j Oph_j} \quad (2)$$

$$EF_{n,i} = C_{AVG_{n,i}} \times V_{n,i} \quad (3)$$

式中, E_m 为排放量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; EF 为排放因子, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; AC 为环境统计燃料消耗量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; n 区分不同省份; i 区分不同电厂; C_{AVG} 为排放浓度统计均值, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; $C_{j,h}$ 为在线监排口污染物浓度小时均值, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; j 为排口编号; h 为运行小时数; Oph 为纳入分析的监测小时数; V 为理论烟气量, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (其他燃料的烟气量估算由查《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》获得).

2 结果与讨论

2.1 火电排放浓度时空特征分析

2.1.1 空间分析

由图 2 可知, 2018 年全国各省火电 SO_2 、 NO_x 和烟尘平均排放浓度范围为 2.47~197.70、21.35

~129.11 和 1.63 ~ 20.08 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 其均值分别为 37.57、56.71 和 7.41 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 2015 年^[15]相比, 分别下降了 58.71%、43.12% 和 60.79%。

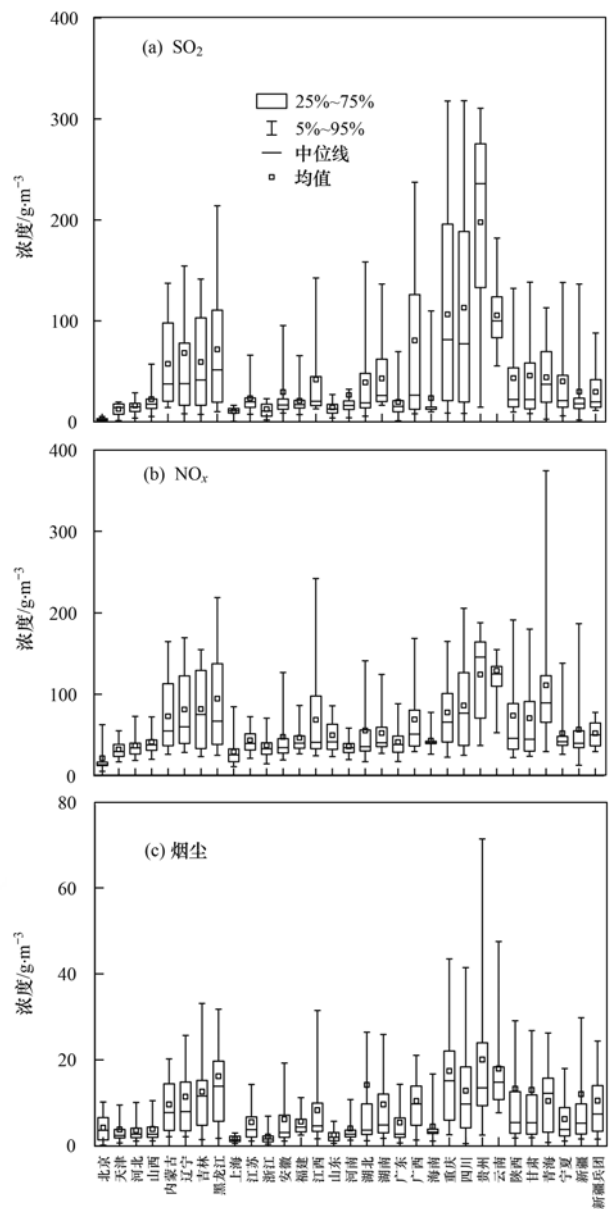


图2 基于在线监测分析得出的火电排放浓度分布

Fig. 2 Distribution of emission concentrations for power plants in each province based on CEMS

北京、天津和河北等 15 个地区的火电烟气 SO_2 平均排放浓度基本达到超低排放 $35 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 限值要求; 江西、湖北和湖南等 7 个地区的排放均值在 $40.04 \sim 45.76 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 基本达到《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)^[21] 的特别排放限值要求 ($50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$); 平均排放浓度最高的是西南地区 (高硫煤质地区), GB 13223-2011 明确要求贵州和云南等地的现有与新建火电燃煤锅炉分别执行 $400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

北京和天津等 13 个地区电厂烟气 NO_x 排放均值达到超低排放 $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 限值要求; 江西和湖北

等 15 各地区 NO_x 排放浓度均值基本达到特别排放限值要求, 平均浓度为 $52.09 \sim 94.43 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 平均排放浓度高的省份为贵州和云南, 平均浓度在 $120 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。

中国火电行业烟尘排放, 整体表现较好, 基本达到 GB 13223-2011 的特别排放限值要求 ($20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$); 北京、天津和河北等 17 个地区的排放均值达到超低排放限值要求 ($10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

根据 2018 年中国各企业 SO_2 、 NO_x 和烟尘的平均排放浓度, 表征企业是否达到超低标准. 结果显示, 2018 年中国火电行业装机容量超低排放覆盖率已超过 74.1%, 提前达到 2020 年完成 5.8 亿 kW ^[5] 机组超低排放改造的任务。

2.1.2 月度分析

2018 年中国火电行业大气污染物月均排放浓度基本保持下降趋势 (图 3), 2018 年 1 月, 火电行业 SO_2 、 NO_x 和烟尘平均浓度为 38.59、60.45 和 $7.78 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 2018 年 12 月火电行业 SO_2 、 NO_x 和烟尘月均浓度下降到 33.77、55.86 和 $7.62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 比 1 月分别下降了 12.5%、7.6% 和 2.0%。图 3 结果显示, 2018 年中国火电行业 SO_2 、 NO_x 和烟尘排放浓度月变化规律与火电发电量^[22] (国家统计局 1~2 月发布数据为累计发电量, 本研究暂不分析 1~2 月发电量) 月变化规律没有显著的相关性. 但是, 随着对燃煤电厂排放限制提出更高标准^[21], 行业的执行标准对排放浓度的导向性影响已显著高于煤质参数等工况因素, 从图 3 中可以明显看出, 4 月和 10 月等发电负荷较低的月份, 氮氧化物排放浓度均值明显稍高, 这可能与低负荷脱硝技术的投运及达标稳定性有关^[23], 氮氧化物受整体负荷的影响高于烟尘和二氧化硫。

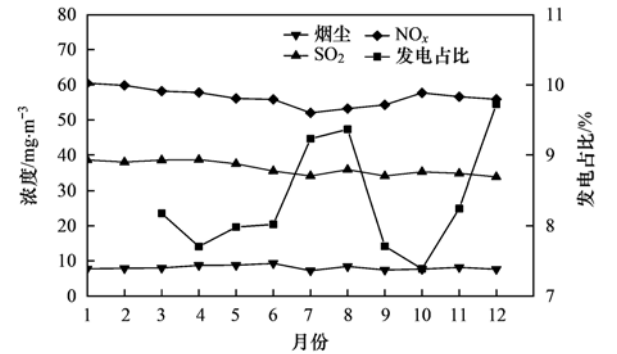


图3 2018 年中国火电行业排放浓度的月度变化分布

Fig. 3 Distribution of monthly emission concentrations in China's thermal power industry in 2018

2.2 煤电排放因子分析

2018 年中国燃煤发电机组 SO_2 排放因子为 $0.01 \sim 2.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 95% 分位数 $0.07 \sim 0.97$

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (比 2015 年下降了 55.2%); NO_x 排放因子为 $0.03 \sim 2.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 95% 分位数 $0.23 \sim 0.98 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (比 2015 年下降了 36.84%); 烟尘的排放因子为 $0.002 \sim 1.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 95% 分位数 $0.01 \sim 0.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (比 2015 年下降了 62.5%)。

由表 1, 各省煤电排放因子有一定的地域差异。 SO_2 平均排放因子较大的省是贵州 ($1.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$); NO_x 平均排放因子较大的省是贵州 ($0.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$); 烟尘平均排放因子较大的省是重庆 ($0.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。西南地区 (贵州和云南等地) 排放因子较高, 这主要是由于西南地区属于高硫煤地区, 火电排放浓度较高, 导致排放因子较高。

表 1 “煤电”污染物的年均排放因子¹⁾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Annual average emission factors of coal-fired power plants in each province/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

地区	SO_2		NO_x		烟尘	
	本研究均值 (HPEC, 2018 年)	2015 年研究均值 (HPEC, 2015 年)	本研究均值 (HPEC, 2018 年)	2015 年研究均值 (HPEC, 2015 年)	本研究均值 (HPEC, 2018 年)	2015 年研究均值 (HPEC, 2015 年)
北京	0.04	0.12	0.13	0.51	0.06	0.05
天津	0.14	0.33	0.38	0.77	0.05	0.16
河北	0.13	0.33	0.29	0.47	0.04	0.08
山西	0.20	0.64	0.36	0.73	0.04	0.12
内蒙古	0.50	0.73	0.68	0.69	0.09	0.18
辽宁	0.49	0.76	0.66	0.95	0.11	0.24
吉林	0.49	0.66	0.64	1.03	0.12	0.20
黑龙江	0.52	1.00	0.71	1.28	0.13	0.31
上海	0.09	0.31	0.21	0.46	0.01	0.05
江苏	0.19	0.45	0.36	0.59	0.05	0.11
浙江	0.11	0.45	0.31	0.57	0.02	0.09
安徽	0.26	0.47	0.42	0.69	0.05	0.14
福建	0.20	0.40	0.44	0.52	0.06	0.12
江西	0.38	1.02	0.58	0.84	0.06	0.19
山东	0.11	0.67	0.40	0.85	0.02	0.15
河南	0.16	0.69	0.32	0.81	0.04	0.14
湖北	0.35	0.67	0.55	0.93	0.06	0.13
湖南	0.37	0.90	0.45	0.94	0.10	0.38
广东	0.20	0.39	0.42	0.49	0.07	0.10
广西	0.86	1.57	0.63	0.83	0.11	0.37
海南	0.21	0.95	0.40	0.69	0.04	0.12
重庆	1.10	1.53	0.80	0.83	0.20	0.44
四川	0.85	1.15	0.63	0.68	0.09	0.10
贵州	1.20	1.45	0.86	0.91	0.14	0.18
云南	0.83	1.03	0.83	0.72	0.13	0.18
陕西	0.36	0.86	0.56	0.96	0.11	0.21
甘肃	0.36	0.73	0.56	0.91	0.07	0.24
青海	0.38	0.56	0.82	1.87	0.15	0.26
宁夏	0.29	0.82	0.42	0.73	0.06	0.14
新疆	0.25	0.63	0.54	0.83	0.08	0.27
新疆兵团	0.32	0.85	0.48	0.85	0.12	0.20
平均值	0.30	0.67	0.48	0.76	0.06	0.16

1) 2015 年数据来自本研究团队 2015 年火电排放清单^[15]; 中国香港、澳门、台湾和西藏地区资料暂缺, 下同

2.3 非燃煤机组排放因子分析

非燃煤发电机组的排放因子结果如表 2 所示, 由于样本较少, 未进行分省统计。2018 年非燃煤发电机组的排放因子整体小于 2015 年的结果^[15]。由于我国燃油发电规模近年持续减少, 而生物质发电和燃气发电规模不断上涨, 非煤机组排放因子的下降说明了我国生物质和燃气发电的管控效果显著。

2.4 火电排放绩效值及排放量分析

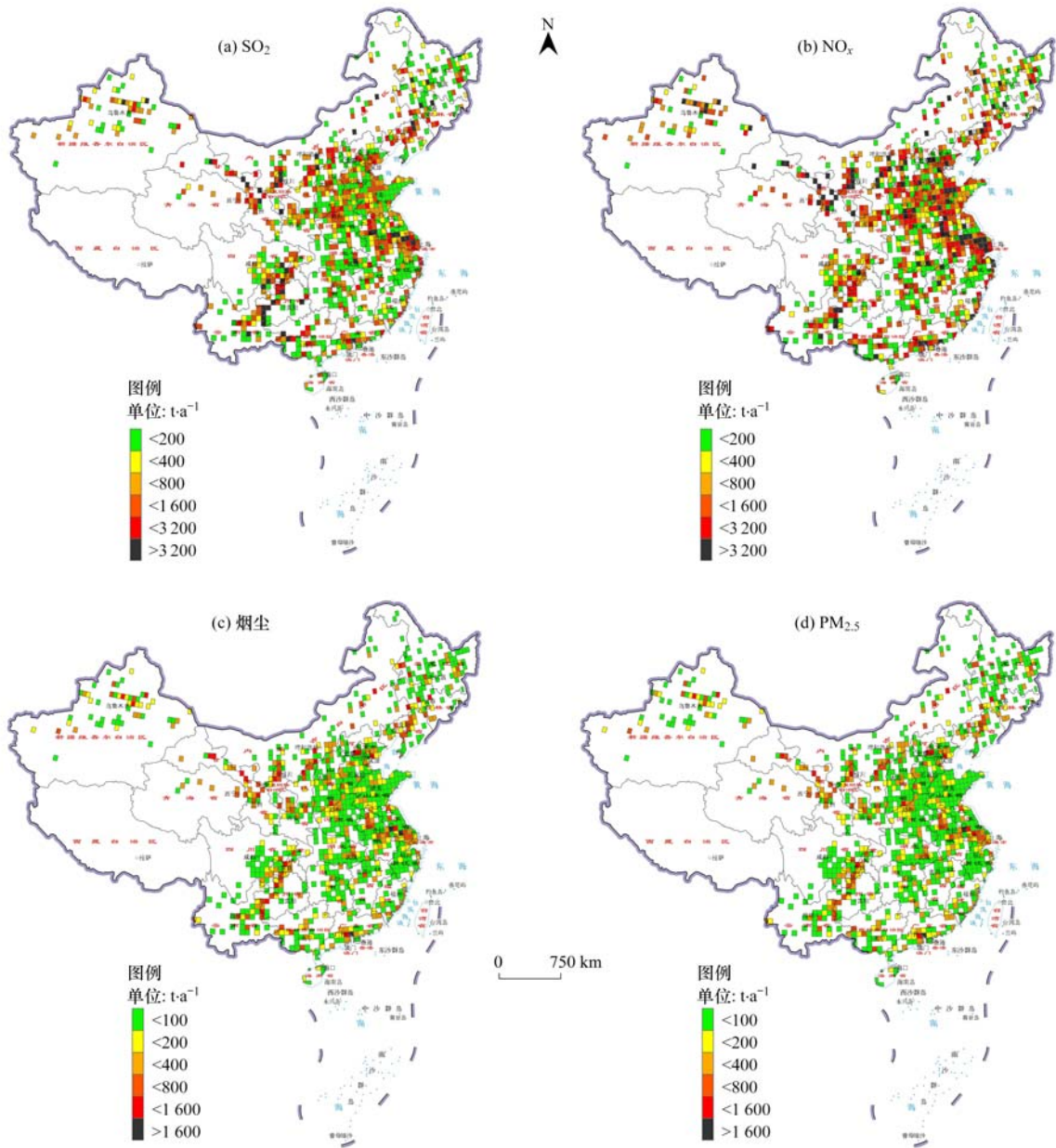
表 3 和图 4 结果显示, 2018 年中国火电

SO_2 、 NO_x 、烟尘和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量分别为 72.14、118.38、14.90 和 13.59 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 与 2015 年^[15]相比, 排放量分别下降了 41.32%、19.29%、48.12% 和 40.39%; 其中内蒙古火电 SO_2 、 NO_x 、烟尘和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量最高, 分别为 9.86、13.76、1.73 和 1.60 万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 这主要是由内蒙古自治区大型煤电基地燃煤活动强度较高且全区控制水平弱于东部发达地区导致。

SO_2 、 NO_x 、烟尘和 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放绩效值分别

表 2 不同燃料机组污染物的平均排放因子

项目	SO ₂		NO _x		烟尘	
	Average emission factors of thermal power using varied fuels					
	2018 年均值	2015 年均值	2018 年均值	2015 年均值	2018 年均值	2015 年均值
燃气/g·m ⁻³	0.09	0.18	0.44	0.78	0.04	0.06
燃油/g·kg ⁻¹	1.91	7.5	1.37	2.22	0.67	1.7
生物质/g·kg ⁻¹	0.23	0.55	0.5	0.87	0.09	0.1



审图号: GS(2019)1815号 自然资源部 监制

图 4 2018 年中国火电大气污染物排放量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of air pollutants emissions from thermal power, 2018

为 0.16、0.26、0.033 和 0.03 g·(kW·h)⁻¹,与 2015 年相比,排放绩效值分别下降了 50%、33.3%、62.5% 和 50%^[15]. SO₂ 排放绩效值范围为 0.03 ~ 0.75 g·(kW·h)⁻¹, NO_x 排放绩效值范围为 0.06 ~ 0.85 g·(kW·h)⁻¹,烟尘排放绩效值范围为 0.01 ~ 0.12 g·(kW·h)⁻¹.

与文献[8,15,24,25]的排放量对比如图 5 所示,相同年份,火电排放清单(HPEC)SO₂、NO_x 和烟尘排放量低于其它研究者排放量,一方面数据统计口径存在 2%~5% 的偏差,如中电联主要覆盖了全国 6 000 kW·h 及以上电厂约 11.3 亿 kW·h 的机组数据;而在计算方法方面,本研究使用大量高频小时

表3 各省火电大气污染物排放量和排放绩效值¹⁾
Table 3 Provincial thermal power air pollutant emissions
and performance values

地区	SO ₂	NO _x	烟尘	PM _{2.5}
北京	0.09(0.02)	0.29(0.06)	0.02(0.004)	0.02(0.004)
天津	0.48(0.06)	1.15(0.13)	0.16(0.02)	0.15(0.02)
河北	2.23(0.03)	4.62(0.06)	0.53(0.01)	0.5(0.01)
山西	3.21(0.12)	6.3(0.24)	0.58(0.02)	0.55(0.02)
内蒙古	9.86(0.3)	13.76(0.42)	1.73(0.05)	1.6(0.05)
辽宁	3.72(0.29)	5.32(0.41)	0.79(0.06)	0.7(0.05)
吉林	2.33(0.23)	3.29(0.32)	0.56(0.05)	0.49(0.05)
黑龙江	3.2(0.40)	4.88(0.61)	0.82(0.10)	0.71(0.09)
上海	0.41(0.04)	1.01(0.10)	0.09(0.01)	0.07(0.01)
江苏	4.72(0.11)	8.93(0.21)	1.17(0.03)	1.07(0.03)
浙江	1.77(0.07)	4.8(0.19)	0.28(0.01)	0.26(0.01)
安徽	2.46(0.09)	4.4(0.17)	0.47(0.02)	0.44(0.02)
福建	1.26(0.08)	2.88(0.19)	0.36(0.02)	0.33(0.02)
江西	1.27(0.13)	1.95(0.19)	0.23(0.02)	0.21(0.02)
山东	3.07(0.07)	9.3(0.22)	0.45(0.01)	0.42(0.01)
河南	2.63(0.09)	4.8(0.17)	0.53(0.02)	0.5(0.02)
湖北	1.5(0.11)	2.62(0.19)	0.31(0.02)	0.3(0.02)
湖南	1.2(0.15)	1.62(0.2)	0.24(0.03)	0.22(0.03)
广东	2.7(0.07)	6.18(0.17)	0.89(0.02)	0.8(0.02)
广西	3.04(0.4)	2.59(0.34)	0.4(0.05)	0.37(0.05)
海南	0.21(0.07)	0.46(0.16)	0.04(0.02)	0.04(0.01)
重庆	2.44(0.44)	2.12(0.39)	0.49(0.09)	0.45(0.08)
四川	2.01(0.08)	1.86(0.07)	0.22(0.01)	0.19(0.01)
贵州	4.81(0.73)	3.41(0.52)	0.58(0.09)	0.53(0.08)
云南	1.86(0.75)	2.1(0.85)	0.29(0.12)	0.27(0.11)
陕西	2.24(0.13)	3.92(0.22)	0.71(0.04)	0.64(0.04)
甘肃	1.57(0.14)	2.32(0.21)	0.35(0.03)	0.32(0.03)
青海	0.41(0.19)	0.93(0.43)	0.16(0.08)	0.15(0.07)
宁夏	2.1(0.15)	3.37(0.24)	0.41(0.03)	0.34(0.02)
新疆	2.43(0.12)	5.48(0.27)	0.75(0.04)	0.67(0.03)
新疆兵团	0.89(0.10)	1.7(0.19)	0.29(0.03)	0.27(0.03)
总和	72.14(0.16)	118.38(0.26)	14.90(0.033)	13.59(0.03)

1) 括号外为排放量 (万 t·a⁻¹); 括号内为排放绩效值 [g·(kW·h)⁻¹]

数据,基于实时在线监测数据计算,对时间尺度上的响应远超传统的排放因子法,这是导致清单结果差异的主要因素。HPEC(2015年)的SO₂、NO_x和烟尘排放量比中电联分别低39.0%、18.3%和27.5%^[15],尽管2018年中国火电发电量相比2016年增加了12.22%,但HPEC(2018)的SO₂、NO_x和烟尘排放量比2016年中电联排放量分别降低63.5%、29%和62.8%,2018年中国火电行业装机容量超低排放覆盖率已达74.1%,这说明2018年中国火电超低改造减排效果显著。

2.5 不确定性分析

本研究清单的不确定性主要来源于在线监测数据对全国火电排放浓度进行分析,数据样本存在一定的不确定性,对于部分数据样本较少的省份,结果可能存在较大的偏差。本研究通过采用蒙特卡罗方法对CEMS浓度在日维度数据基础上,依照各企业

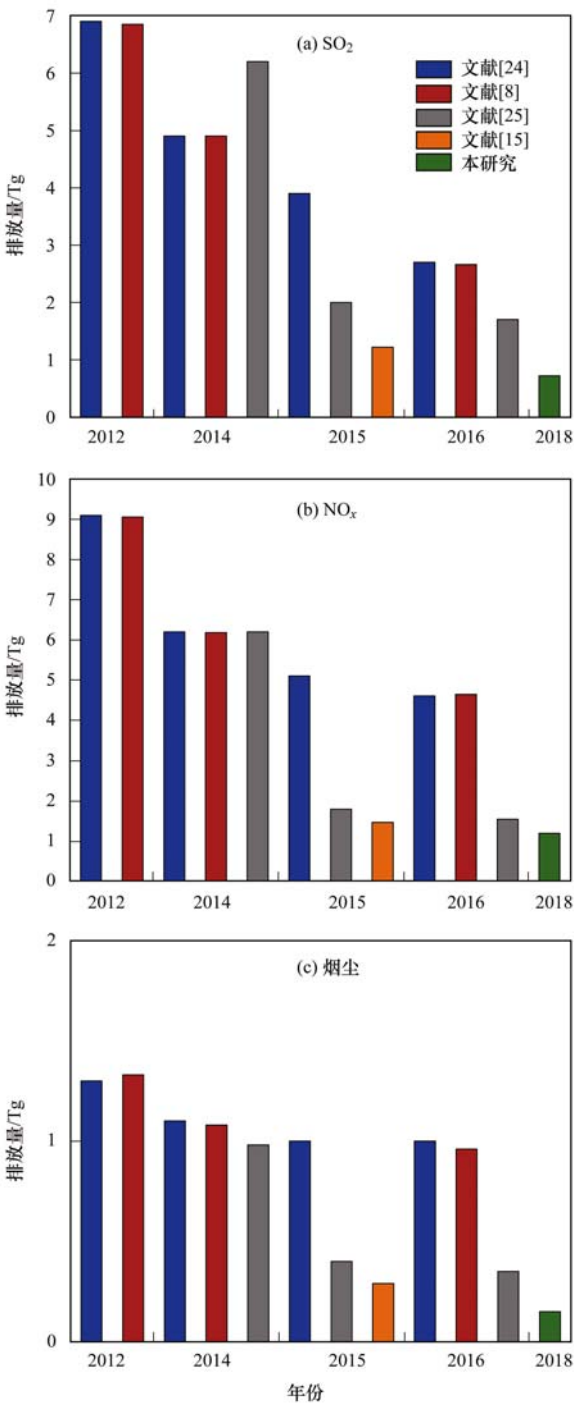


图5 与其他研究者排放量对比
Fig. 5 Comparison of emissions with other studies

的概率分布,随机生成数值,并进行了10 000次模拟,估计了火电污染物排放量的误差范围。分析结果表明,本研究清单的SO₂、NO_x和烟尘排放量误差在±1.09%以内。

3 结论

(1)以高时间分辨率的在线监测数据可客观反映火电行业排放现状,结果显示,当前超低排放政策效果显著,2018年,中国火电行业超低排放覆盖率已达74.1%,超低改造取得重大进展,提前完成

2020 年改造目标。2018 年,火电行业 SO_2 、 NO_x 、烟尘和 $\text{PM}_{2.5}$ 总排放量分别为 72.14、118.38、14.90 和 13.59 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2)除煤电行业外、生物质及燃气发电同样得到了有效治理。经济较为发达的区域(“2+26”城市、长三角地区),排放浓度均值明显低于其他地区,其中北京、上海和天津等 13 个地区的火电排放浓度基本达到超低排放要求;而东北地区和西南地区的污染物浓度偏高,其中贵州省和云南省排放浓度整体较高,超低改造有待论证。

(3)中国火电行业不同省份和区域的 SO_2 、 NO_x 和烟尘的排放量有一定的差异,主要集中在东部和北部地区。虽然平均排放浓度水平和排放绩效值相对较低,但是各项污染物排放量相对较高,这主要是相关省份和区域的活动强度较高。在时间尺度上,氮氧化物在低负荷条件下的排放情况稍差于其他时段,受发电负荷的影响仍旧比较明显,二氧化硫及烟尘治理相对稳定。

参考文献:

- [1] 刘斯颖. 坚持底线思维 创新管理方式 推进协同共享 确保电力生产安全、稳定、高效运行——在 2019 年全国电力行业设备管理工作会议暨中国电力设备管理协会一届五次会员代表大会上的工作报告(摘要)[J]. 电力设备管理, 2019, (3): 18-39.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境统计年报·2015[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [3] 中华人民共和国环境保护部, 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020 年)[EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-09/19/content_2753137.htm, 2014-09-19.
- [4] 中华人民共和国环境保护部, 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/W020151215366215476108.pdf>, 2015-12-11.
- [5] 中华人民共和国国务院. “十三五”节能减排综合工作方案[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm, 2017-01-05.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 2018 中国生态环境状况公报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201905/P020190619587632630618.pdf>, 2019-05-22.
- [7] Kurokawa J, Ohara T, Morikawa T, et al. Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008; Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(21): 11019-11058.
- [8] 清华大学. 中国多尺度排放清单模型(MEIC)[EB/OL]. <http://meicmodel.org/index.html>, 2017-02-07.
- [9] 戴佩虹. 基于 CEMS 数据的火电厂 SO_2 和 NO_x 排放因子建立与不确定性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [10] 伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 京津冀地区火电企业的大气污染影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 364-373.
Bo X, Wang G, Wen R, et al. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2015, 35(2): 364-373.
- [11] Zhao Y, Wang S X, Nielsen C P, et al. Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(12): 1515-1523.
- [12] 张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 等. 基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2775-2783.
Zhang Y J, Kong S F, Tang L L, et al. Analysis on emission inventory and temporal-spatial characteristics of pollutants from key coal-fired stationary sources in Jiangsu province by on-line monitoring data[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2775-2783.
- [13] 伯鑫, 赵春丽, 吴铁, 等. 京津冀地区钢铁行业高分辨率排放清单方法研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2554-2560.
Bo X, Zhao C L, Wu T, et al. Emission inventory with high temporal and spatial resolution of steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. China Environmental Science, 2015, 35(8): 2554-2560.
- [14] 伯鑫, 何友江, 商国栋, 等. 基于 CEMS 全国污染源清单数据库系统开发与应用[J]. 环境工程, 2014, 32(8): 105-108, 113.
Bo X, He Y J, Shang G D, et al. Development and application of the national pollutant emission inventory database system with CEMS[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(8): 105-108, 113.
- [15] 崔建升, 屈加豹, 伯鑫, 等. 基于在线监测的 2015 年中国火电排放清单[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2062-2074.
Cui J S, Qu J B, Bo X, et al. High resolution power emission inventory for China based on CEMS in 2015[J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2062-2074.
- [16] 阚慧, 伯鑫, 屈加豹, 等. 2015 年海南省火电行业大气环境影响研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 428-439.
Kan H, Bo X, Qu J B, et al. Air quality impacts of power plant emissions in Hainan Province, 2015[J]. China Environmental Science, 2019, 39(1): 428-439.
- [17] 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.
- [18] 伯鑫, 屈加豹, 田军, 等. 全国火电排放清单研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- [19] Zhang Y, Bo X, Zhao Y, et al. Benefits of current and future policies on emissions of China's coal-fired power sector indicated by continuous emission monitoring[J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 415-424.
- [20] Liu X, Gao X, Wu X B, et al. Updated hourly emissions factors for Chinese power plants showing the impact of widespread ultralow emissions technology deployment[J]. Environmental science & technology, 2019, 53(5): 2570-2578.
- [21] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=A01>, 2019-12-15.
- [23] 赵雪, 程茜, 侯俊先. 脱硫脱硝行业技术发展综述[J]. 中国环保产业, 2018, (9): 14-22.
- [24] Zheng B, Tong D, Li M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(19): 14095-14111.
- [25] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2018[M]. 北京: 中国市场出版社, 2018.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)