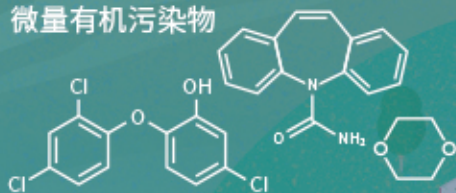


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

工业大气污染源排放绩效定量评价及应用

李廷昆, 冯银厂, 吴建会*, 毕晓辉, 张裕芬

(南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350)

摘要: 工业源治理是改善环境空气质量的重要途径, 而如何开展精准治污仍然是目前亟需回答的问题. 以天津市西青区为例, 基于第二次全国污染源普查数据, 对工业企业开展污染物排放绩效定量评价, 并深入探究排放绩效评价应用于工业源精细化管理治理的意义、可行性以及存在的问题. 结果发现, 西青区各行业的排放绩效水平差异较大. 污染物排放绩效水平与行业企业的自身属性、发展规模和管理水平有较为密切的关系. 整体来看, 家具制造业、金属制品业、黑色金属冶炼和压延加工业等生产工艺本身产污量大且中小型企业居多的行业排放绩效水平偏差, 而以计算机通信和其他电子设备制造业、汽车制造业为代表的高端行业排放绩效水平整体偏好. 各行业不同企业排放绩效差异也较大, 其中金属机械制造业行业中绩效最差的 11 家企业工业产值对行业贡献 0.06%, 而 PM 排放量贡献达到 8.50%; 橡胶和塑料制品业中绩效最差的 19 家企业工业产值对全行业贡献 4.76%, 而 VOCs 排放量贡献却达到 43.59%. 同时, 分别参照生态环境部相关技术指南和绩效评价结果设计减排方案, 发现后者在减排同等规模污染物排放量时, 减排成本最高可低于前者约 90%. 各行业、企业污染物排放绩效的差距, 经济效益和环境成本的不协调, 以及排放绩效评价对于精准减排的重要指引作用, 充分证明开展排放绩效评价的必要性. 结果表明污染物排放绩效评估可有效支撑宏观产业结构调整和中观、微观的工业企业环境治理, 为精准治污提供重要参考路径.

关键词: 排放绩效; 工业源; 环境治理; 减排; 污染源普查

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2740-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010059

Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources

LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui*, BI Xiao-hui, ZHANG Yu-fen

(State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Treatment of industrial atmospheric emission sources is an important way to improve air quality, but accurate pollution control remains still an urgent challenge. Taking Xiqing District of Tianjin as an example, based on the second national pollution source census, this study carried out a quantitative evaluation of the pollutant emission performance of industrial enterprises and explored the significance, feasibility, and challenges facing emission performance evaluation. The results show that the emission performance of various industries in Xiqing District vary greatly. The pollutant emission performance level is closely related to an industry's own attributes, development scale, and management level. On the whole, the emission performance level of industries with high production process emission coefficients and a high proportion of small and medium-sized enterprises (such as furniture manufacturing, the metal products industry, ferrous metal smelting, and the rolling processing industry) is worse, while the emission performance of high-end industries represented by computer communication and other electronic equipment manufacturing and automobile manufacturing is generally better. The emission performance of different enterprises in the same industry also varies greatly. For example, the 11 enterprises with the worst performance in the metal machinery manufacturing industry only contributed 0.06% of industrial output yet their PM emission contribution reached 8.50%. The 19 worst-performing enterprises in the rubber and plastic industry contributed 4.76% of industrial output yet their VOCs emissions accounted for 43.59% of the total. At the same time, this study presents an emissions reduction plan according to the relevant technical guidelines of the Ministry of Ecology and Environment. Based on this, the cost of emissions reduction could be cut by as much as 90% when the pollutant emissions reductions of the same scale are reduced. The gap in the pollutant emissions performance of various industries and enterprises, the incongruity between economic benefits and environmental costs, and the important guiding role of emission performance evaluation for emissions reductions demonstrate the necessity of performance evaluation. Overall, this research shows that pollutant emission performance evaluation can effectively support macro-industrial structure adjustment and the environmental governance of meso-micro industrial enterprises, providing an important reference for pollution control interventions.

Key words: emission performance; industrial source; environmental governance; emission reduction; pollution source census

工业企业是二氧化硫、氮氧化物和颗粒物等废气污染物的重要排放源, 对环境空气污染有较大贡献. 以当前我国广大地域面临的颗粒物污染为例, 根据各地公布的源解析结果, 工业源对北京、天津、南京、杭州、上海和广州等我国主要城市环境空气

收稿日期: 2020-10-11; 修订日期: 2020-11-20

基金项目: 天津市科技计划项目(18ZXSZF00160); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0201)

作者简介: 李廷昆(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染防治. E-mail: Tingkunli1986@mail.nankai.edu.cn

* 通信作者, E-mail: envwujh@nankai.edu.cn

$\text{PM}_{2.5}$ 贡献率能达到 12%~30% 的水平^[1~6]. 一些排放清单研究也指出,工业源对京津冀、长三角、珠三角和四川省等区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量贡献比例达到 30%~60% 的水平^[7~10]. 因此,工业企业管控治理一直是“总量减排”和“重污染天气应急减排”中的重点. 但不同行业、采用不同工序工艺的不同工业企业在清洁生产水平、末端治理及管控水平上可能存在极大差异,并且甚至部分高耗能、高排污企业可能对特定地区的社会经济和民众就业起着重要的支撑作用. 因此,对工业企业实行差异化管控,是精准治污的关键环节,也是引导企业自觉自愿逐步提升清洁化生产水平和促进绿色发展的重要手段. 如何开展工业企业差异化管控,在最小程度影响社会效益和经济效益的同时最大程度保障环境效益,是当前工业源治理所面临并亟待解决的重要问题,而排放绩效在污染源精细化管控中的应用正当其时.

“绩效”概念来源于管理学,在人类社会的各个领域中被广泛用于衡量组织、团队或个人在一定条件下完成任务的出色程度. 在环境领域,排放绩效有多种定义方式,其在目前应用最为广泛的电力领域指每生产 1 kW·h 电所排放的污染物的量^[11,12],其综合衡量了企业生产技术、燃料质量、发电效率、污染治理状况以及污染物排放量等多方面因素,并且指标简单且易于计算. 排放绩效最先应用于美国大气污染防治中,其在总量控制的基础上被引入作为促进电力企业减排、实现电力工业可持续发展的一项重要举措^[13]. 自 1996 年开始,排放绩效法作为建议或规定采用的技术方法被先后写入多项美国环保法案当中,用于 SO_2 和 NO_x 等污染物排放权的总量分配,并取得了显著的成效^[14,15]. 我国从 2006 年开始引入排放绩效法开展 SO_2 总量分配工作,并

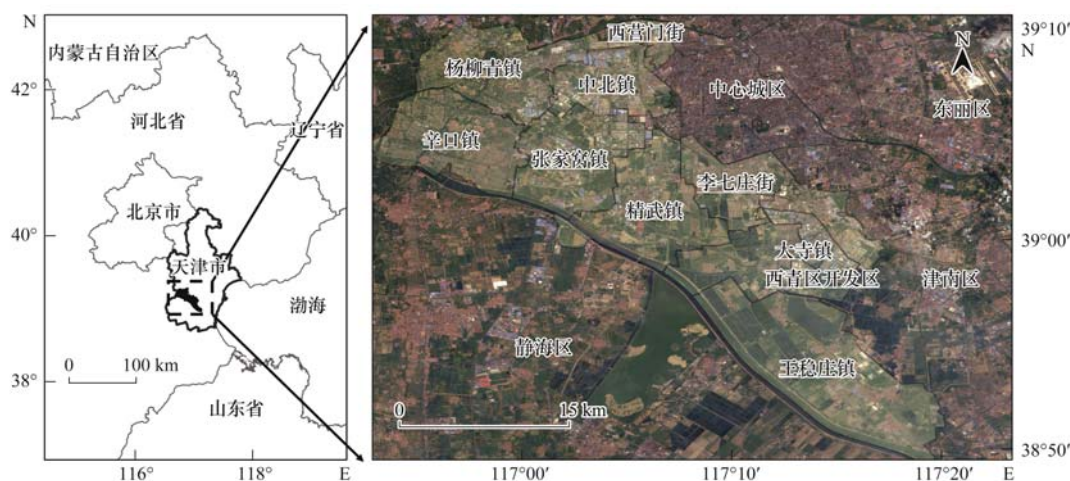
在后续通过相关环保标准的编制逐渐延伸到水泥、造纸和印染等行业. 而在重污染天气应急减排方面,我国生态环境部于 2019 年首次提出重污染天气期间重点行业要实施绩效分级和差异化管控,并发布了相关指导文件^[16]. 排放绩效法的应用和推广,为我国污染物总量指标分配、排污许可证发放和重污染天气应急减排等环境管理工作提供了重要技术支撑^[13]. 如何使用排放绩效方法来应对大气污染精准治理的难题,目前受到了研究人员的广泛关注和深入探讨,但还少有案例可供参考.

本文以天津市西青区小尺度研究区域为例,在污染源普查数据基础上,以实现工业源精细化治理为目标,提出应用一种污染物排放绩效计算方法,定量评价各行业和特定企业污染物排放绩效,深入探究该方法应用于工业源精细化管控治理的意义、可行性以及存在的问题,以便于为未来在大、中尺度区域的应用提供有益的参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域与研究范围

天津市为我国大气污染物传输通道“2+26”城市之一,近年来环境空气质量改善存在一定压力,在生态环境部公布的 168 个重点城市空气质量排名中长期靠后,位于 124~135 名之间(2015~2019 年),并以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物. 西青区为天津市环城四区之一,位于中心城区西南(如图 1),常规六项污染物浓度近年来也均超过全市平均水平^[17~19]. 同时,西青区近年来社会经济快速发展,全区生产总值和工业生产总值分别为 963.22 亿元和 578.49 亿元^[20],位列全市各区第 4 和第 2. 西青区工业行业门类齐全,高中低端行业并存. 在保有一定规模金属机械制造、食品服装



下划线字段为西青区下辖街、镇和开发区

图 1 西青区地理位置及行政区划

Fig. 1 Geographical location and administrative divisions of Xiqing District

制造等中低端行业的同时,也聚集了一批如汽车制造和集成电路制造等技术含量高、产品附加值高、生产工艺先进、治理设施完善和管理水平高的高端行业. 工业发展规模和工业生产总值可对标山西省晋城、晋中和临汾^[21],河北省廊坊和沧州^[22]等周边省份多个地级市,具有较高的研究价值.

1.2 排放绩效核算方法

现今环境领域排放绩效主要应用于总量控制工作中,自上而下对行政区和排放源分配污染物排放指标. 常见绩效指标包括基于物料投入的绩效指标和基于产出的绩效指标,即消耗单位原料/燃料污染物排放量^[23]、生产单位产品污染物排放量^[24,25]和生产单位产品原料消耗量^[26]等. 以上指标主要兼顾能源利用效率和污染物排放,以便于促进企业的清洁化发展,但仅局限于特定行业内对比,不适用于行政区内各行业综合比较. 本研究采用单位生产总值污染物排放量($\text{kg}\cdot\text{万元}^{-1}$)作为绩效指标^[27],一方面可自下而上对辖区内工业企业进行跨行业对比,另一方面加强了对行政区开展大气污染防治工作时所面对主要问题(环境成本与经济效益的矛盾)的针对性. 同时,该指标代表环境业绩变量与财务业绩变量的比率,符合可持续发展委员会(Commission on Sustainable Development, CSD)提出的“生态效率”概念内涵^[28]. 该绩效指标计算简单,易于操作,公平公正,使所有工业企业遵循同等的环境管理要求,可为工业企业提供有效的竞争机制,以便于促进工业企业不断改造升级,绿色发展.

1.3 数据来源

污染物排放量和经济产值是行业、企业开展排放绩效计算的重要参数. 本研究中所使用西青区工业源所有污染物排放量和产值数据来自于第二次全国污染源普查. 数据以 2017 年为基准年,涵盖范围为《国民行业经济分类》(GB/T 4754-2017)名录中行业代码在 06~46 区间所有涉及产排污的工业行业,主要包括各类制造行业,以及电力、热力生产和供应业. 核算污染物包括 SO_2 (二氧化硫)、 NO_x (氮氧化物)、PM(颗粒物)和 VOCs(挥发性有机物).

工业源数据共计纳入 2193 家工业企业信息,其中运行企业 1276 家,全年停产企业 209 家,关闭企业 708 家(即 2017 年存在生产,之后关闭). 由于停产企业在基准年无产排污,关闭企业数据准确性难以保障,因此本研究仅针对运行企业进行分析.

2 结果与分析

2.1 各行业排放与绩效情况

西青区 2017 年共有运行企业 1 276 家,产值

1 099.07 亿元,排放 SO_2 491.83 t、 NO_x 2 503.54 t、PM 1 148.39 t 和 VOCs 2 671.39 t. 全区工业源各行业基本情况、污染物排放量及排放绩效如表 1 所示. 计算机通信和其他电子设备制造业、汽车制造业和金属制品业是西青区工业产值的前三支柱行业,合计产值占比达到全区的 46.26%. 金属制品业、黑色金属冶炼和压延加工业、非金属矿物制品业、橡胶和塑料制品业是 PM 和 VOCs 的主要排污行业,电力热力生产和供应业是 SO_2 和 NO_x 的主要排污行业. 而从企业数量规模来看,金属制品业、橡胶和塑料制品业、通用设备制造业是西青区工业的主要组成行业,企业数据合计占比达到全区 36.76%.

SO_2 、 NO_x 、PM 和 VOCs 平均绩效分别为 0.04、0.23、0.10 和 0.24 $\text{kg}\cdot\text{万元}^{-1}$. 电力热力生产和供应业是全区 SO_2 和 NO_x 主要排放行业,也是 SO_2 和 NO_x 排放绩效唯一超过全区平均标准的行业,分别为 0.63 $\text{kg}\cdot\text{万元}^{-1}$ 和 3.10 $\text{kg}\cdot\text{万元}^{-1}$. 全区共有 8 个行业 PM 排放绩效超过全区平均标准,包括木材家具制造、非金属矿物制品制造、文教工美体育及娱乐用品制造、金属机械制品加工制造和电力热力等行业门类,绩效范围在 0.12~2.62 $\text{kg}\cdot\text{万元}^{-1}$. 全区共有 8 个行业 VOCs 排放绩效超过全区均值,主要包括金属机械加工制造、家具制造等涉及有机溶剂使用的行业,以及橡胶和塑料制品制造行业,绩效范围在 0.45~1.90 $\text{kg}\cdot\text{万元}^{-1}$.

由此可见,各行业的污染物排放绩效与行业自身属性有比较密切的联系,如占据极大能源消耗比例, SO_2 和 NO_x 排放量必然较大的电力热力生产和供应业,以及从事水泥制品、混凝土混合搅拌和运输储存,PM 排放量本身较高的非金属矿物制品业,由于生产工艺的原因,特定污染物的排放绩效难以避免劣于其他多数行业,而以计算机通信和其他电子设备制造业为代表的高端制造行业,科技含量高,排放绩效水平整体偏好. 同时,各行业的污染物排放绩效也与企业发展规模和管理水平有关,如技术集成度较高和发展规模一般较大的汽车制造业、专用设备制造业相对于通用设备制造业和金属制品业,虽然生产工艺大致相同,但前者的 PM 排放绩效较大程度优于后者.

西青区工业发展具有“工业企业门类众多和高端产业并存”的特点. 辖区内开办了一批主营芯片、半导体等高端产品大型制造企业,以及集成化较高的汽车制造企业,这些企业数量不多,但科技含量高和产品附加值高,对西青区工业产值有重要贡献. 同时,西青区也存在大量从事金属材料、机械设

备及其零部件制造的小微型企业,以金属机械制造类行业(包括金属制品业、通用设备制造业、专用设备制造业、汽车制造业、铁路船舶航空航天和其他运输设备制造业等 5 个行业,下同)为例,企业数量占全区 41.30%、产值占比达到 36.60%,对于

PM、VOCs 排放也有较大贡献.另外,西青区内分布了燃煤电厂、燃气电厂各一座,以及一定数量燃煤供热站,使得电力热力生产和供应业作为西青区主要的燃煤和天然气消耗行业,贡献了 SO₂ 和 NO_x 排放量的绝大部分比例.

表 1 工业源各行业企业数量、污染物排放量及排放绩效

Table 1 Number, pollutant discharge, and emission performance of enterprises in various industries

编号 行业类别	数量 /家	产值 /亿元	SO ₂		NO _x		PM		VOCs	
			排放 /t	绩效 /kg·(万元) ⁻¹	排放 /t	绩效 /kg·(万元) ⁻¹	排放 /t	绩效 /kg·(万元) ⁻¹	排放 /t	绩效 /kg·(万元) ⁻¹
13 农副食品加工业	25	16.20	2.80	0.02	41.18	0.25	10.11	0.06	5.46	0.03
14 食品制造业	33	13.10	0.18	—	5.85	0.04	0.41	—	0.59	—
15 酒、饮料和精制茶制造业	3	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0
17 纺织业	19	12.03	0.76	0.01	28.72	0.24	1.79	0.01	95.20	0.79
18 纺织服装、服饰业	8	1.17	0.01	—	0.41	0.04	0	0	0.04	—
19 皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	5	16.55	0.01	—	0.58	—	1.93	0.01	3.05	0.02
20 木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	4	0.62	0	0	0.25	0.04	16.25	2.62	0.02	—
21 家具制造业	13	1.71	0	0	0.12	0.01	20.32	1.19	20.57	1.20
22 造纸和纸制品业	41	29.86	0.32	—	12.18	0.04	25.37	0.08	48.76	0.16
23 印刷和记录媒介复制业	36	7.57	0.01	—	1.14	0.02	0.04	—	73.66	0.97
24 文教、工美、体育和娱乐用品制造业	14	0.79	—	0	0.01	—	0.95	0.12	0.18	0.02
25 石油、煤炭及其他燃料加工业	1	0.10	—	0	0.02	0.02	0	0	1.90	1.90
26 化学原料和化学制品制造业	48	63.55	5.41	0.01	20.68	0.03	40.60	0.06	80.23	0.13
27 医药制造业	30	34.25	3.92	0.01	28.16	0.08	0.33	—	153.54	0.45
29 橡胶和塑料制品业	144	78.89	0.38	—	17.69	0.02	37.23	0.05	521.90	0.66
30 非金属矿物制品业	109	29.46	25.00	0.08	46.77	0.16	199.76	0.68	62.21	0.21
31 黑色金属冶炼和压延加工业	12	58.05	21.20	0.04	121.35	0.21	137.06	0.24	823.66	1.42
32 有色金属冶炼和压延加工业	4	5.16	1.73	0.03	2.32	0.04	5.18	0.10	0.05	—
33 金属制品业	186	120.11	1.31	—	51.82	0.04	348.31	0.29	580.52	0.48
34 通用设备制造业	139	29.53	0.03	—	2.61	0.01	64.86	0.22	5.86	0.02
35 专用设备制造业	107	39.19	0.03	—	2.95	0.01	13.85	0.04	13.72	0.04
36 汽车制造业	82	192.60	0.36	—	14.16	0.01	113.76	0.06	94.10	0.05
37 铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	13	17.54	0.04	—	1.97	0.01	6.03	0.03	7.50	0.04
38 电气机械和器材制造业	79	55.51	0.09	—	2.59	—	3.24	0.01	10.85	0.02
39 计算机、通信和其他电子设备制造业	48	195.78	0.27	—	10.53	0.01	0.32	—	9.00	—
40 仪器仪表制造业	28	5.17	—	0	0.27	0.01	2.95	0.06	3.73	0.07
41 其他制造业	4	2.64	—	0	0.05	—	0	0	2.54	0.10
42 废弃资源综合利用业	3	0.37	0.02	0.01	1.10	0.30	0.18	0.05	0.10	0.03
43 金属制品、机械和设备修理业	10	3.88	—	0	0.46	0.01	0.19	—	0.85	0.02
44 电力、热力生产和供应业	27	67.41	427.95	0.63	2 087.58	3.10	97.38	0.14	51.60	0.08
46 水的生产和供应业	1	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	1 276	1 099.07	491.83	0.04	2 503.54	0.23	1 148.39	0.10	2 671.39	0.24

1) “—”表示数字太小,无法显示;编号为行业代码

2.2 排放绩效企业对比

各行业排放绩效差异较大,可通过各行业乃至不同企业之间的排放绩效对比,以及与其他地区同行业之间的排放绩效对比来评估本地区特定行业和企业先进性.对于排放绩效较差的行业、企业有针对性地开展整改提升,可在有效提高环保治理工作效率的同时降低经济成本.排放绩效超过全区平均标准的行业中,金属机械制造类行业、橡胶和塑料制品制造业分别是 PM 和 VOCs 的主要排放行业,且企业数量较多,是工业治理的主要方向,其排

放绩效分布相比其他行业对于研究区域有更高研究价值.本研究以这两个行业为例进行排放绩效深入研究,行业内各企业 PM 和 VOCs 排放绩效分布如图 2 和表 2 所示.

金属机械制造类行业涉及颗粒物排放的 413 家企业中,绝大多数企业排放绩效居于 0 ~ 5 kg·万元⁻¹,包括行业内全部的大中型企业,而少数企业排放绩效居于 5 ~ 30 kg·万元⁻¹,有 2 家企业排放绩效大于 75 kg·万元⁻¹.橡胶和塑料制品业涉及的 127 家行业中,绝大多数企业排放绩效居于 0 ~ 2

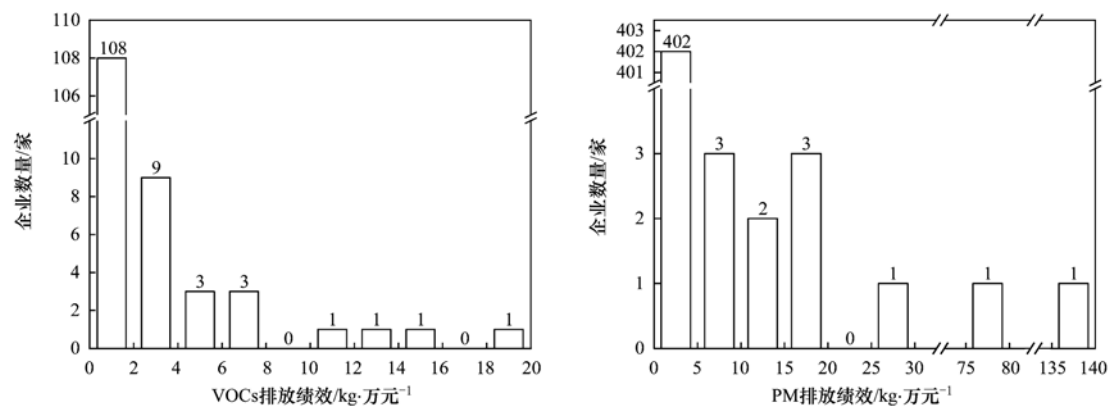


图 2 典型行业内工业企业 VOCs 和 PM 排放绩效分布

Fig. 2 Emission performance distribution of VOCs and PM in typical industries

表 2 典型行业内工业企业 VOCs 和 PM 排放绩效分级

Table 2 Emission performance rating of VOCs and PM in typical industries

行业 (污染物)	绩效 分类	绩效标准 /kg·(万元) ⁻¹	企业数量(家)				产值 /亿元	排放量 /t
			总数	大型	中型	小型 微型		
橡胶和塑料制品业 (VOCs)	较好	0~2	108	0	11	60	72.04	294.42
	一般	2~10	15	0	0	8	2.62	81.07
	较差	10~20	4	0	0	3	0.98	146.40
金属机械制造类 行业(PM)	较好	0~5	402	6	32	220	386.29	500.30
	一般	5~30	9	0	0	1	0.21	30.04
	较差	>75	2	0	0	1	0.02	16.46

kg·万元⁻¹,有少数企业排放绩效居于2~10 kg·万元⁻¹,有4家企业排放绩效大于10 kg·万元⁻¹.

本研究将金属机械制造类行业和橡胶和塑料制品业中各企业排放绩效划分为较好、一般和较差这3个等级.根据统计分析可见,金属机械制造类行业绩效一般和较差的11家企业工业产值为0.23亿元,对行业仅贡献0.06%,但排放量却为46.50 t,对全行业贡献达到8.50%.橡胶和塑料制品业中绩效一般和较差的19家企业工业产值合计为3.6亿元,对全行业贡献4.76%,但VOCs排放量达到227.47 t,对全行业贡献达到43.59%.可见排放绩效较差的企业产生的经济效益和环境效益较大程度不协调,而如果将这批企业列为节能减排和环境治理等各项工作的重点关注对象,则可以在最小程度影响经济发展的情况下最大程度削减污染物排放量.同时,本研究也发现金属机械制造类行业、橡胶和塑料制品业当中绩效一般和较差的企业全部为产值数十万元到数百万元的小微型企业,而大中型企业绩效一般处于中等位置或者较好.其中前者行业大型和中型企业绩效分别在0~0.88 kg·万元⁻¹和0~2.27 kg·万元⁻¹范围内,后者行业中中型企业绩效在0.01~0.54 kg·万元⁻¹范围内.可见排放绩效与企业生产规模、产品技术集成度和产品附加值有较为密切的联系,同时也表明小微型企业是管理的薄弱

之处.

2.3 污染物减排应用

污染物减排是工业企业环境管理工作的重要目标之一.西青区自2019年开始,在秋冬季参照生态环境部相关技术指南^[16,29]对涉及重点行业工序的企业开展绩效评级并限定减排措施,以求达到全社会SO₂、NO_x、PM和VOCs排放量在红色、橙色和黄色预警天气分别降低30%、20%、10%的目标.基于此,本研究设计两种减排方案进行对比:方案一,直接参照技术指南^[29]计算相关行业在不同预警级别下污染物减排量与减排成本;方案二,基于工业企业绩效评价排名结果,采用“末位淘汰”的办法从最差绩效企业开始停产,核算与方案一同等减排量下的减排成本.

对两种减排方案的对比研究做出如下限定:

- ①由于西青区工业源SO₂和NO_x主要由电力热力行业排放,但管理部门会将该行业纳入民生保障行列而协调其免于停产限产,因此本研究仅以PM、VOCs为例核算减排量;
- ②由于西青区工业企业涉及重点行业较多、较散,本研究仅以VOCs、PM排放量占比较大的橡胶和塑料制品业、金属机械制造类行业为例开展应用研究,其中前者部分企业涉及“橡胶制品制造”重点行业,后者部分企业涉及“工业涂装”重点行业;
- ③地方政府根据民生保障、国家战略、产业发展等多种需要会对部分企业进行豁

免减排,本研究暂不考虑此因素;④由于技术指南^[29]中对重点行业绩效评价要求指标较多,为便于比较,本研究根据西青区绝大多数企业为 C 级以及一定比例为 D 级的现实情况,将两类重点行业全部按照 C 级标准进行减排;⑤两类重点行业 C 级企业减排措施如表 3 所示,非重点工序按照政府通常要求的红色、橙色、黄色预警级别分别减排 50%、40% 和 30% 的标准执行。

表 3 重点行业重污染天气减排措施

Table 3 Emission reduction measures for heavy pollution in key industries		
重点行业类别	预警级别	减排措施
橡胶制品制造	黄色及橙色预警 ¹⁾	混炼和硫化工序停产 50%
	红色预警 ¹⁾	混炼、硫化等涉 VOCs 排放工序停产
	黄色预警 ²⁾	不限制生产
	橙色预警 ²⁾	限产 30%
	红色预警 ²⁾	配料、浸渍、氯洗和硫化等工序停产
工业涂装	黄色预警	使用溶剂型原辅材料的涂装生产单元限产 30%
	橙色预警	使用溶剂型原辅材料的涂装生产单元限产 60%
	红色预警	涂装生产单元停产

1) 指轮胎制品制造(含轮胎翻新),橡胶板管带制造,橡胶零件制造,运动场地用塑料制造,其他橡胶制品制造;2) 指日用及医用橡胶制品制造

不同预警级别下,两种减排方案的结果如表 4 所示.参照技术指南^[29]实施减排,则橡胶和塑料制品业 127 家企业,金属机械制造类企业 413 家企业全部参与减排,而参照绩效排名减排,则影响的企业要少许多.同时,各预警级别下,两种方案同等减排量下的减排成本也差距较大.减少同等规模的 VOCs 排放量,方案 2 相比于方案 1,橡胶和塑料制品业在红色、橙色和黄色预警级别下减排成本分别减少 83.92%、83.96% 和 93.88%,金属机械制造类行业减排成本分别减少 57.88%、89.73% 和 90.15%.减少同等规模的 PM 排放量,方案 2 相比于方案 1,金属机械制造业类行业减排成本分别减少 38.55%、40.98% 和 64.99%.

技术指南^[29]综合考虑多种指标对工业企业进行定性评级,不同等级采取差异化减排方案相比于过去“一刀切”的管理模式已经实现较大的进步,但差异化管理的程度必然是不同于本研究中采用的定量评价(或排序)方式.因此,在两种方案对比中可见,方案二相比于方案一在同等减排目标下,能够更大程度降低减排成本.当然,需要指出的是,方案二中纳入减排的已经有部分生产规模较大的企业,而大中型企业的停产对其产业发展、地方经济,乃至市场产业链(特别是高端产业)的影响是比较大的,因此地方政府往往会对其进行豁免减排.由于难以判定哪些企业需要豁免,本研究未考虑此因素,仅以两种方案的对比举例说明绩效评价的应用价值.

表 4 典型行业不同减排方案结果对比

Table 4 Comparison of results of different emissions reduction schemes in typical industries							
行业类别	预警级别	污染物	参照 技术指南 ^[29] 减排		参照绩效排名减排		
			减排量/t	减排成本/万元	减排企业/个	减排量/t	减排成本/万元
橡胶和塑料制品业	红色	VOCs	1 746.01	2 352.79	27	1 845.16	378.24
	橙色	VOCs	1 209.74	1 551.09	5	1 219.57	93.71
	黄色	VOCs	802.19	990.49	3	913.93	60.66
金属机械制造类行业	红色	VOCs	6 183.64	766.94	66	6 352.9	323
	橙色	VOCs	3 307.56	477.24	10	3 328.25	49
	黄色	VOCs	1 727.33	314.59	7	2 097.94	31
	红色	PM	3 221.69	576.06	79	3 227.42	354
	橙色	PM	2 577.35	460.85	62	2 574.62	272
	黄色	PM	1 933.02	345.64	8	1 976	121

3 讨论

污染物排放绩效的有效应用对于工业企业数据的准确性有着极高的要求,需要尽可能准确核算污染物排放量,获取工业产值信息.特别是在大、中尺度空间区域开展应用时,要尤为注意加强数据质量控制工作.对于污染物排放量核算,由于不同行业、

不同企业和不同工序工艺之间排放特征存在的差异性,优先推荐监测法核算污染物排放量.而在研究对象太多,或者存在无组织排放,不便于开展污染物排放监测,只能使用系数法时,在采集污染源活动水平和选取产排污系数时也需要更加科学严谨,以便于后期开展管控治理工作更加具有公正性.

为保证工业企业数据的准确性,本研究在污染

源普查工作中大力加强“质控”环节,采用“自下而上”的方式,所有数据全部通过现场入户调查填表获得,并在随后开展了多轮人工审核。审核过程中,企业填报数据与企业工艺流程、环评材料、原辅料采买记录和产品产销记录等佐证材料进行比对,严格参照污染源普查各类技术规定和制度^[30,31]。同时,将工业源名录、活动水平统计数据 and 污染物排放量数据等与当地其他管理数据对比,并与环保和统计等相关部门开展联合会商,以确定调查数据的完整性和准确性。因此,本研究的活动水平基本还原了2017年西青区运行企业的实际运营状况,不确定性较小。而本研究所使用排放系数来自于第二次全国污染源普查工作办公室,通过现场实测及专家审核获得,虽然非本地实测,但具有一定的行业代表性。

在排放绩效评估方法的应用过程中,本研究所采用的“单位生产产值污染物排放量”绩效指标可直接量化各级政府最为关心的环境成本和经济效益,从而为环境管理提供最优方案。但为更好和更快推进我国工业高质量和可持续发展,在本研究基础上,充分考察工艺先进性、有组织排放、无组织排放、企业管理水平、纳税和员工数量等经济、环境和社会综合效益,建立更为完善和全面的绩效指标体系及对应的评价方法是必要且急迫的。

4 结论

(1)西青区2017年共有运行企业1 276家,工业生产总产值1 099.07亿元,排放SO₂ 491.83 t、NO_x 2 503.54 t、PM 1 148.39 t、VOCs 2 671.39 t。计算机通信其他电子设备制造业和汽车制造业、金属制品业是主要支柱产业;金属制品业、黑色金属冶炼和压延加工业、非金属矿物制品业、橡胶和塑料制品业是PM和VOCs的主要排污行业,电力热力生产和供应业是SO₂和NO_x的主要排污行业。

(2)西青区各行业的排放绩效水平差异较大。污染物排放绩效水平与行业自身属性、科技集成程度、发展规模和管理水平有较为密切的关系。整体来看,家具制造业、金属制品业、黑色金属冶炼和压延加工业等生产工艺本身产污量大和科技集成程度较低的行业排放绩效水平偏差,而以计算机通信和其他电子设备制造业、汽车制造业为代表的高端行业排放绩效水平整体偏好。

(3)各行业中不同企业排放绩效差异也较大。金属机械制造类行业中存在对行业产值贡献0.06%的一批企业对PM排放量贡献达到8.50%,橡胶和塑料制品业存在对行业贡献4.76%的一批

企业对VOCs排放量贡献达到43.59%,经济效益和环境效益极大不协调,充分证明了开展绩效评价的必要性。同时也发现,发展规模较大的企业排放绩效一般较好,而排放绩效较差的企业中以小、微型企业为主。

(4)绩效评价可较好实现差异化管理,为污染物减排提供技术支撑。相较于现有减排方案,基于排放绩效定量评价结果进行减排可极大程度减少经济成本。充分证明应用排放绩效定量评价方法可有效区分高效益和低效益的行业、企业,便于产业调整宏观规划和中观、微观的针对性环境治理,本研究结果表明该方法可以作为实现精准治污的重要参考路径。

(5)精准的污染源数据对于开展准确的排放绩效评估具有基础性和关键性的意义,对于数据采集有极高的要求,需要特别注意加强数据质量控制工作。同时,排放绩效评估方法还需要不断发展,建立更为全面和完善的绩效指标体系及评价方法,以推进我国工业高质量发展。

参考文献:

- [1] 北京市生态环境局. 最新科研成果新一轮北京市PM_{2.5}来源解析正式发布[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/zfxgk43/fdzdgkn2/xwfb/832588/index.html>, 2018-05-14.
- [2] 天津市生态环境监测中心. 天津市颗粒物源解析[EB/OL]. <http://www.tjeme.org.cn/html/1/75/87/769.html>, 2018-05-05.
- [3] 南京市生态环境局. 2014年南京市环境状况公报[EB/OL]. http://cn.chinagate.cn/environment/2015-06/30/content_35944418.htm, 2015-06-05.
- [4] 杭州市生态环境局. 2014年杭州市环境状况公报[EB/OL]. https://hzdaily.hangzhou.com.cn/hzrb/html/2015-06/05/content_1982673.htm, 2015-06-05.
- [5] 中国环境报. 上海公布大气颗粒物源解析结果[EB/OL]. http://49.5.6.212/html/2015-01/09/content_23025.htm, 2015-01-09.
- [6] 广州市生态环境局. 2018年度广州PM_{2.5}来源解析结果公布[EB/OL]. http://sthjj.gz.gov.cn/hbyd/zjhjb/content/post_5295405.html, 2019-11-30.
- [7] Qi J, Zheng B, Li M, et al. A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **170**: 156-168.
- [8] Fu X, Wang S X, Zhao B, et al. Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **70**: 39-50.
- [9] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [10] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5344-5358. Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, et al. Emission Inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12):

- 5344-5358.
- [11] 许艳玲, 杨金田, 蒋春来, 等. 排放绩效在火电行业大气污染物排放总量分配中的应用[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(6): 108-111.
- Xu Y L, Yang J T, Jiang C L, *et al.* Application of generation performance standard in total emissions allocation of air pollutants in thermal power industry [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(6): 108-111.
- [12] 张玮, 白金. 排放绩效在火电行业大气污染物排放总量核定中的应用分析[J]. 环境与发展, 2015, 27(2): 11-14.
- Zhang W, Bai J. The application and discussion of performance method of coal fired power generation industry in pollutant emission calculating[J]. Environment and Development, 2015, 27(2): 11-14.
- [13] 沈海萍, 刘寒梅, 范海燕, 等. 基于总量控制的火电行业主要污染物排放绩效标准研究[J]. 能源工程, 2018, (6): 44-50.
- Shen H P, Liu H M, Fan H Y, *et al.* Research on generating performance standard of thermal power industry based on total amount control[J]. Energy Engineering, 2018, (6): 44-50.
- [14] 王北星. 美国的能源战略及其启示[J]. 中外能源, 2010, 15(6): 12-17.
- Wang B X. US energy strategy and enlightenment [J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(6): 12-17.
- [15] 井鹏, 岳涛, 李晓岩, 等. 火电厂氮氧化物控制标准、政策分析及研究[J]. 中国环保产业, 2009, (4): 19-23.
- Jing P, Yue T, Li X Y, *et al.* Control standards, policy analysis and research on nitrogen oxides in thermal power plants [J]. China Environmental Protection Industry, 2009, (4): 19-23.
- [16] 生态环境部. 关于加强重污染天气应对夯实应急减排措施的指导意见[EB/OL] <http://hbj.xjbt.gov.cn/c/2019-09-23/7284286.shtml>, 2019-07-26.
- [17] 天津市生态环境局. 2018年天津市生态环境状况公报[EB/OL]. <http://sthj.tj.gov.cn/>, 2019-06-05.
- [18] 天津市生态环境局. 2017年天津市环境状况公报[EB/OL]. <http://sthj.tj.gov.cn/>, 2018-06-05.
- [19] 天津市生态环境局. 2016年天津市环境状况公报[EB/OL]. <http://sthj.tj.gov.cn/>, 2017-06-05.
- [20] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 天津统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [21] 山西省统计局, 国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [22] 河北省人民政府. 河北经济年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [23] 周威. 基于排放绩效的火电行业氮氧化物控制机制研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2010.
- Zhou W. Study on GPS-based nitrogen oxides control mechanism in thermal power sector [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2010.
- [24] 葛察忠, 周颖, 高树婷, 等. 排放绩效标准: 让电力行业“换个活法”[J]. 环境经济, 2004, (3): 35-38.
- [25] 徐继先, 倪吴忠, 林阳春. 基于排放绩效的浙江省火电行业NO_x总量控制研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(6): 696-698.
- Xu J X, Ni W Z, Lin Y C. Research on NO_x total emission control in thermal power industry in Zhejiang Province based on emission performance [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(6): 696-698.
- [26] 张源, 朱庚富, 杨光俊. 基于能耗和排放绩效的火电厂发电调度模式研究[J]. 华东电力, 2012, 40(4): 667-670.
- Zhang Y, Zhu G F, Yang G J. Model research on thermal power generation dispatch based on the energy consumption and emissions performance [J]. East China Electric Power, 2012, 40(4): 667-670.
- [27] 金晶. 基于分类绩效的SO₂总量分配技术方法研究——以天津市为例[D]. 天津: 南开大学, 2008.
- [28] 靳玮. 大气环境治理绩效审计的评价体系——以河北省为例[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- Jin W. Evaluation system of performance audit of atmospheric environmental governance—take the Hebei as an example [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [29] 生态环境部. 重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南(2020年修订版)[EB/OL] <http://www.cciepa.org.cn/view.asp?id=3730>, 2020-06-01.
- [30] 国务院第二次全国污染源普查领导小组办公室. 第二次全国污染源普查技术规定[EB/OL] <https://max.book118.com/html/2019/0827/7135014140002051.shtml>, 2018-08-01.
- [31] 国务院第二次全国污染源普查领导小组办公室. 第二次全国污染源普查制度[EB/OL] <http://www.doc88.com/p-6708418684158.html>, 2018-08-01.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)