

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑思 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位减量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响

段文娇, 郎建垒, 程水源*, 贾佳, 王晓琦

(北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要:以京津冀地区为研究区域, 采取自下而上的方法, 建立京津冀地区钢铁行业细化至焦化、烧结和球团、炼铁、炼钢、轧钢等工序的多污染物排放清单. 清单估算结果显示, 2015年京津冀地区钢铁行业SO₂、NO_x、TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、CO、VOC的排放量分别为38.82、27.23、79.19、53.15、38.68、823.38、26.53万t, 其中烧结和球团工序是最主要的污染物排放工序(17.0%~72.0%), 其次为炼铁工序(4.6%~42.4%)和轧钢工序(3.5%~35.7%). 采用具有污染物来源示踪功能的双层嵌套气象-空气质量模型系统(WRF-CAMx)耦合模型模拟京津冀地区钢铁行业污染物排放对区域大气PM_{2.5}浓度的影响. 模拟结果显示:钢铁行业在春夏秋冬这4个季节对京津冀地区PM_{2.5}浓度贡献率分别达到14.0%、15.9%、12.3%、8.7%. 各地市中, 钢铁行业对唐山市PM_{2.5}影响最大, 年均PM_{2.5}浓度贡献率高达41.2%, 其次为秦皇岛市、石家庄市、邯郸市, 年均PM_{2.5}浓度贡献率分别达到19.3%、15.3%、15.1%.

关键词:钢铁行业; 双层嵌套气象-空气质量模型系统(WRF-CAMx); 排放清单; PM_{2.5}; 排放特征

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2018)04-1445-10 **DOI:** 10.13227/j.hjks.201709053

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM_{2.5}

DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan*, JIA Jia, WANG Xiao-qi

(Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The iron and steel industry, which discharges a large amount of pollutants including SO₂, NO_x, and PM_{2.5}, is the main source of atmospheric pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Based on the bottom-up method, a high temporal and spatial resolution emission inventory of the iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region was developed, which took into account the multiple air pollutants released during coking, sintering, pelletizing, ironmaking, steelmaking, and the steel rolling process. As the emission inventory showed, the total emissions of SO₂, NO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, and VOC from the iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2015 were 388.2, 272.3, 791.9, 531.5, 386.8, 8233.8, and 265.3 kilotons, respectively, among which, sintering and pelletizing were the two processes discharging the most pollutants (17.0%-72.0%), followed by the ironmaking process (4.6%-42.4%) and the steel rolling process (3.5%-35.7%); the iron and steel industry in Tangshan discharged the most pollutants (39.1%-63.5%) among those in all the 13 cities. The impact of the iron and steel industry on the regional PM_{2.5} concentration was simulated by a two-layer nested meteorology-air quality coupling model system (WRF-CMAx) with Particulate Source Apportionment Technology (PSAT). The simulation results showed that the iron and steel industry contributed 14.0%, 15.9%, 12.3%, and 8.7% of the PM_{2.5} concentrations of the Beijing-Tianjin-Hebei region in spring, summer, autumn, and winter, respectively, and that the iron and steel industry had the most significant impact on the PM_{2.5} concentrations in Tangshan among all the 13 cities, with a contribution rate up to 41.2%, followed by those in Qinhuangdao, Shijiazhuang, and Handan, with contributions of 19.3%, 15.3%, and 15.1%, respectively. The iron and steel industry has an important impact on the PM_{2.5} concentration of the Beijing-Tianjin-Hebei region to which the government should pay more attention, and take more effective control measures to address this problem.

Key words: iron and steel industry; WRF-CAMx; emission inventory; PM_{2.5}; emission characteristics

京津冀地区大量的污染物排放, 加上独特的地理环境条件形成的局地大气环流^[1], 使该地区环境污染日益严重, 并呈现出区域性特征. 钢铁行业是京津冀地区主要污染源之一, 其生产工序复杂, 主要包括焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、轧钢等, 较高的能耗导致硫化物、氮氧化物、烟粉尘等大量的污染物排放^[2]. 课题组已有研究表明, 钢铁行业SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOC排放量分别占到京津冀污染

物排放总量的23.7%、10.5%、15.7%、7.9%, 钢铁行业已成为京津冀大气污染问题的重要原因之一^[3].

收稿日期: 2017-09-06; **修订日期:** 2017-10-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(91544232, 51638001); 北京市科学技术委员会项目(Z161100004516013, Z171100002217002)

作者简介: 段文娇(1993~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境规划管理与污染防治, E-mail: wjduan@emails.bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chengsy@bjut.edu.cn

在钢铁行业排放清单建立及对大气环境影响评估方面,伯鑫等^[4~6]建立了基于生产工艺的全国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统,主要污染物包括 SO_2 、 NO_x 和烟粉尘,按照自下而上的方法建立了京津冀 2012 年钢铁行业高时空分辨率排放清单,主要污染物包括 SO_2 、 NO_x 和烟粉尘,清单结果表明烧结和高炉炼铁为钢铁行业污染物主要来源,唐山和邯郸钢铁行业污染物排放量占京津冀区域钢铁行业排放总量的一半以上,采用 CAMx 模拟并对比分析现状和化解产能情景下京津冀地区钢铁行业大气污染物对区域 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响,结果表明 NO_x 存在较大的减排空间,且当前化解产能力度对污染改善效果较差;赵斌等^[7]核算了天津市各行业区县分辨率的大气污染物排放清单,发现钢铁行业对 SO_2 和 CO 总排放量贡献分别高达 24% 和 30%;牟莹莹等^[8]采用自下而上的方法建立了 2014 年南京市工业源大气污染物排放清单,发现钢铁行业是 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 CO 的主要排放源;Wu 等^[9]研究估算了 2012 年至 2030 年中国钢铁行业 SO_2 、 NO_x 、PM、VOC、PCDD/Fs 的排放情况和减排潜力,发现烧结为主要排放工序, SO_2 和 TSP 控制潜力较大;吴文景等^[10]采用 WRF-CMAQ 耦合模式对京津冀地区 2012 年冬夏两季主要排放源对大气环境影响及减排效果进行了定量评估,发现工业部门内对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献最大、且减排效果最为明显的均为钢铁冶金行业,认为应优先控制工业源 $\text{PM}_{2.5}$ 排放,进一步重点控制钢铁冶金行业的 NO_x 和 SO_2 排放、水泥行业的夏季 NO_x 排放以及炼焦行业的 SO_2 和 NMVOC 排放;汪旭颖等^[11]建立了细化到排放节点的自下而上的钢铁工业颗粒物排放模型,结果表明,我国钢铁工业颗粒物控制水平不断提高,但除加严有组织源管控之外,也应加强对颗粒物无组织排放的控制;目前针对京津冀钢铁行业排放情况的研究多集中于 SO_2 、 NO_x 和烟粉尘这 3 种污染物的排放清单建立及减排效果的模拟,针对钢铁行业细化至工序的包含 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOC 多污染物的排放清单及其对区域 $\text{PM}_{2.5}$ 影响的研究较少.准确、详实的钢铁行业大气污染源排放清单可作为空气质量模型的输入数据,对空气质量影响评估十分重要^[12],是改善京津冀地区大气环境质量的基础和关键性工作,是开展大气污染防治^[13]、制定污染控制政策^[14] 和进行空气质量预测^[15] 的关键。

本研究采取自下而上的方法进行清单的建立,

获取京津冀钢铁企业基础信息,结合文献和课题组多年样品采集和分析成果,综合确定适合京津冀地区钢铁行业实际情况的排放因子,核算京津冀地区钢铁行业典型工序的 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOC 的排放清单,并深入分析污染物排放特征.基于钢铁行业典型工序 VOC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放成分谱测试结果,建立适合空气质量模型输入的物种清单,并采用双层嵌套 CAMx 耦合模型,选取 2015 年 1、4、7、10 月作为典型季节代表月,模拟京津冀钢铁行业对区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响,以期为京津冀地区大气污染控制决策提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 排放清单建立

本研究选取 2015 年作为清单基准年,针对京津冀地区钢铁行业焦化、烧结和球团、炼铁、炼钢、轧钢等典型工序排放特征开展研究,污染物包括 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOC 等.主要采用排放因子法^[16] [公式(1)] 对各污染物排放量进行估算。

$$E_{i,j,k} = A_{i,k} \times EF_{i,j} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中, $E_{i,j,k}$ 为企业 i 生产环节 k 污染物 j 的排放量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); $A_{i,k}$ 为企业 i 生产环节 k 的活动水平 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), 包括焦炭、烧结矿、球团矿、生铁、钢、钢材产量等; $EF_{i,j}$ 为企业 i 污染物 j 的排放因子 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)。

自下而上的清单建立方法能更精确地建立高分辨率污染源排放清单,此方法已在国内外清单建立中具有广泛应用^[17~19]. 本研究采用自下而上的清单建立方法,以污染源普查平台及环境统计数据为基础,获取京津冀钢铁企业的基础信息,主要包括企业具体位置、单位名称、烟囱高度、烟囱出口内径、排气温度、排气速度等,并分类收集钢铁行业烧结、球团、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等工序的生产技术信息、原辅料和燃料情况、产品产量、控制技术信息等相关活动水平数据,共获取京津冀钢铁企业有效点源 401 个,各企业分布位置如图 1 所示。

排放因子的选取,结合文献调研结果与课题组近年来对钢铁企业 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOC 样品采集测试结果综合确定. 根据课题组样品采集测试结果,参考文献^[20] 及国内外文献中关于焦化、烧结和球团、炼铁、炼钢、轧钢的排放因子^[2,9,20~24],结合京津冀地区钢铁企业各工序的产量、规模、环保措施等信息,综合确定可代表本土污染源实际排放特征的排

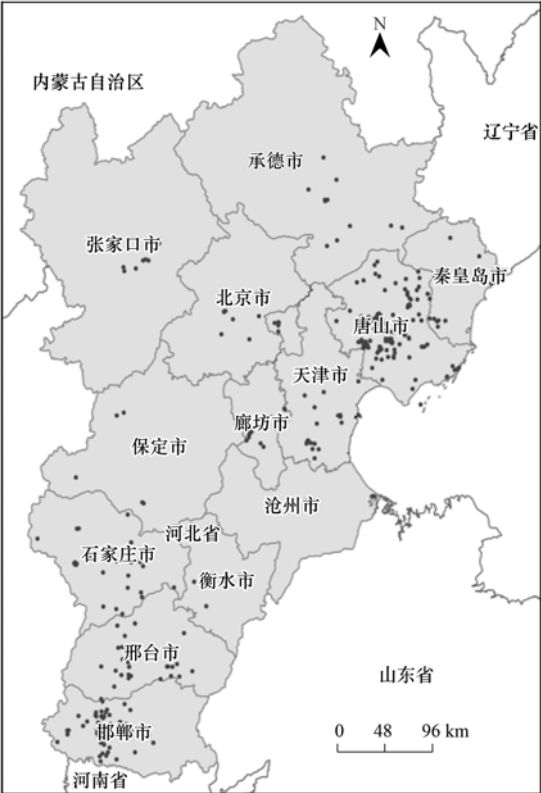


图1 京津冀钢铁企业位置分布示意
Fig. 1 Location of the iron and steel plants in the Beijing-Tianjin-Hebei region

放因子，如表 1 所示.

1.2 数值模式建立

本研究采用双层嵌套 WRF-CAMx 耦合模型对钢铁行业排放的大气 PM_{2.5} 贡献开展评估研究. CAMx 模型能在城市和区域的多种尺度上较好地模拟气态、颗粒污染物及空气毒物在大气中排放扩散、化学反应和干湿沉降等过程^[25~27]，其具有的颗粒物源识别技术(PSAT 模块)能够很好地模拟出示踪地区或示踪污染源对目标区域的污染物贡献^[28].

CAMx 模型所需的气象场由 WRF 模拟结果提供，WRF 模型所需的初始背景边界条件由美国国家环境预报中心(NCEP)的 1°×1°、6 h 分辨率的全球 FNL 数据集提供，地形资料、土地利用数据采用美国 USGS 的全球地形和土地利用数据. CAMx 模型所需的污染源排放清单，除采用本研究更新的京津冀地区钢铁清单外，京津冀其他排放源的清单数据采用课题组近十年的京津冀污染源清单研究成果^[3]，京津冀以外区域的排放清单采用清华大学建立和更新的2012年东亚地区MEIC清单^[29]，根据空气质量模型的化学机制，建立适用于空气质量模型输入的模拟区域钢铁行业及其他排放源的PM_{2.5}

表 1 钢铁行业污染物排放因子/kg·t⁻¹
Table 1 Emission factors of air pollutants from the iron and steel industry/kg·t⁻¹

工艺过程	设备规模	有组织排放							无组织排放		
		SO ₂	NO _x	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	VOC	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
焦化	<5 m	0.64 ^[9,21]	0.60 ^[9,21]	0.79 ^[21,22]	0.73 ^[21,22]	0.54 ^[21,22]	0.76 ^[23]	0.55 ^[23]	0.33 ^[20]	0.10 ^[20]	0.05 ^[20]
	≥5 m	0.58 ^[9,21]	0.44 ^[9,21]	0.65 ^[21,22]	0.59 ^[21,22]	0.41 ^[21,22]	0.62 ^[23]	0.41 ^[23]			
烧结	<100 m ²	2.52 ^[9,20,21]	2.76 ^[2,9,20,21]	1.39 ^[9,20~22]	0.81 ^[9,20~22]	0.64 ^[9,20~22]	5.71 ^[2]	0.17 ^[9]	0.56 ^[20,24]	0.19 ^[20,24]	0.14 ^[20,24]
	100~200 m ²	2.22 ^[9,20,21]	1.51 ^[2,9,20,21]	0.65 ^[9,20~22]	0.39 ^[9,20~22]	0.30 ^[9,20~22]	4.75 ^[2,24]	0.14 ^[9,24]			
	≥200 m ²	0.80 ^[9,20,21]	0.77 ^[2,9,20,21]	0.47 ^[9,20~22]	0.27 ^[9,20~22]	0.19 ^[9,20~22]	3.95 ^[2,24]	0.13 ^[9,24]			
球团		1.36 ^[9,20]	0.55 ^[9,20]	0.40 ^[9,20]	0.20 ^[9,20]	0.12 ^[9,20]	4.75 ^[2]	0.14 ^[9]	0.53 ^[20]	0.09 ^[20]	0.06 ^[20]
高炉炼铁	≥2 000 m ³	0.09 ^[9,20,21]	0.14 ^[9,20,21]	0.60 ^[22,20~23]	0.39 ^[20~23]	0.29 ^[20~23]	8.64 ^[2,23,24]	0.04 ^[9]	4.83 ^[20,24]	1.81 ^[20,24]	0.53 ^[20,24]
	<2 000 m ³	0.11 ^[9,20,21]	0.16 ^[9,20,21]	1.76 ^[20~23]	1.16 ^[20~23]	0.85 ^[20~23]	8.64 ^[2,23,24]	0.04 ^[9]			
转炉炼钢	≥150 t	0.02 ^[9,20,21]	0.05 ^[9,20,21]	0.34 ^[9,20~22]	0.30 ^[9,20~22]	0.22 ^[9,20~22]	11.67 ^[2,23,24]	0.06 ^[9,24]	0.56 ^[20,24]	0.38 ^[20,24]	0.14 ^[20,24]
	<50 t	0.03 ^[9,20,21]	0.05 ^[9,20,21]	0.56 ^[9,20~22]	0.49 ^[9,20~22]	0.36 ^[9,20~22]	11.67 ^[2,23,24]	0.06 ^[9,24]			
电炉炼钢	≥50 t	0.03 ^[9,20,21]	0.54 ^[9,20,21]	0.81 ^[9,20~22]	0.71 ^[9,20~22]	0.52 ^[9,20~22]	1.94 ^[2,23,24]	0.04 ^[9,24]	1.26 ^[20,24]	0.76 ^[20,24]	0.33 ^[20,24]
	<50 t	0.04 ^[9,20,21]	0.59 ^[9,20,21]	1.80 ^[9,20~22]	1.57 ^[9,20~22]	1.15 ^[9,20~22]	1.94 ^[2,23,24]	0.04 ^[9,24]			
轧钢		0.09 ^[9,20]	0.08 ^[9,20]	0.04 ^[9,20]	0.03 ^[9,20]	0.02 ^[9,20]	1.28 ^[23]	0.12 ^[9]	0.10 ^[20]	0.09 ^[20]	0.05 ^[20]

及 VOC 物种清单，并应用 GIS 工具进行网格污染物的空间分配.

WRF 模型设置中，长短波辐射方案分别选取 RRTM 和 Dudhia，近地层方案选取 NOAH. CAMx 模型设置中，投影方式选择 Lambert，气相化学机制、水平湍流和气相化学扩散机制分别选用 CB05、

PPM 和 EBI，采用双层嵌 套网格进行模拟，如图 2 所示，模拟区域以(39. 245°N, 117. 691°E)为中心，外层网格分辨率为 27 km，网格数 50×42，包括北京、天津、河北的全部地市，与山西、山东、内蒙、东北的部分地区；内层网格分辨率为 9 km，网格数 81×91，主要包括北京、天津、河北的全部地市.

模拟时段选用 2015 年 1、4、7、10 月作为冬季、春季、夏季、秋季这 4 个季节的典型代表月. 模拟区域分为 14 个排放源区, 京津冀内 13 个地市各为一个排放源区, 模拟区域内除京津冀之外的其他地市作为第 14 个排放源区.



图 2 双层嵌套模拟区域示意

Fig. 2 Two-level nested-grid modeling domain

2 结果与讨论

2.1 京津冀钢铁行业大气污染物排放清单

2015 年京津冀地区钢铁行业大气污染物排放结果如表 2 所示, SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOC 的总排放量分别为 38.82、27.23、79.19、53.15、38.68、823.38、26.53 万 t, 对比课题组 2014 年排放清单^[3], 2015 年钢铁行业各污染物排放量整体上略有下降, 其中 SO_2 排放量下降明显, 与脱硫设施投运率升高有关. 钢铁行业排放的污染物主要为烟粉尘和 $\text{PM}_{2.5}$ 的前体物 SO_2 、 NO_x , 这与京津冀地区钢铁行业除尘、脱硫、脱硝措施的实施情况有关. 根据环境统计数据, 京津冀地区钢铁企业烟粉尘的平均控制效率为 88.1%, 大部分企业的轧钢工序未设置除尘设施; 烧结和焦化工序设置的脱硫设施平均脱硫效率仅 51.2%, 部分企业和工序未设置脱硫措施; 脱硝措施整体上实施效果极差, 平均脱硝效率仅 3.4%.

京津冀地区钢铁行业不同生产环节污染物排放情况如图 3 所示. 整体来看, 烧结和球团工序是钢铁行业大气污染物最主要来源, 其 SO_2 和 NO_x 排放分别占到钢铁总污染物排放的 72% 和 61%, 烧结

表 2 京津冀钢铁行业污染物排放清单/万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$

Table 2 Emissions from the iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$

生产环节	SO_2	NO_x	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	CO	VOC
焦化	1.63	2.52	4.42	3.98	2.80	84.13	3.07
烧结和球团	27.96	16.65	26.73	15.03	11.01	139.95	6.10
炼铁	1.76	1.56	33.56	22.16	16.22	243.68	4.68
炼钢	0.55	0.50	11.45	10.02	7.30	254.31	3.20
轧钢	6.89	5.98	3.01	1.94	1.33	101.30	9.47
合计	38.82	27.23	79.19	53.15	38.68	823.38	26.53

和球团工序所用的含铁原料和燃料中含硫量都偏高, 较为落后的生产设备、较低的环保措施控制效率等原因也在一定程度上导致了烧结和球团工序 SO_2 和 NO_x 的大量排放. 炼铁工序是 TSP 的主要来源, 排放量占钢铁行业总排放的 42%, 除尘措施投运率及去除效率偏低, 燃料、原料、辅料等在运输、筛分、转运等过程中产生的大量无组织烟尘难以集中控制等原因, 在很大程度上导致了烟粉尘排放严重的现状. 炼铁和炼钢工序是 CO 的主要排放源, 高炉出铁时和炼钢工序中吹氧冶炼期产生大量含 CO 的废气, 较低的煤气回收率造成大量 CO 煤气的排放.

京津冀地区不同地市钢铁行业污染物排放情况如图 4 所示, 各地市污染物排放情况整体上与各地

市钢铁企业数量有较好的相关性. 唐山市集中了京津冀地区 45% 的钢铁企业, 且规模相对较大, 其各类污染物排放量远大于其它城市, SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOC 的排放量分别占整个京津冀地区钢铁行业排放总量的 47.7%、54.3%、43.3%、41.1%、39.1%、53.5%、63.5%. 邯郸市其次, 集中了 15% 的钢铁企业, 其 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOC 的排放量分别占整个京津冀地区钢铁行业排放总量的 18.1%、15.0%、21.8%、23.4%、24.4%、16.6%、13.9%.

根据本课题组采样和调研的钢铁企业各季度产品产量等基础信息, 结合课题组近年来积累的钢铁行业月不均匀系数经验和前人研究成果^[30,31], 综合确定钢铁行业污染物排放月变化规律, 并对京

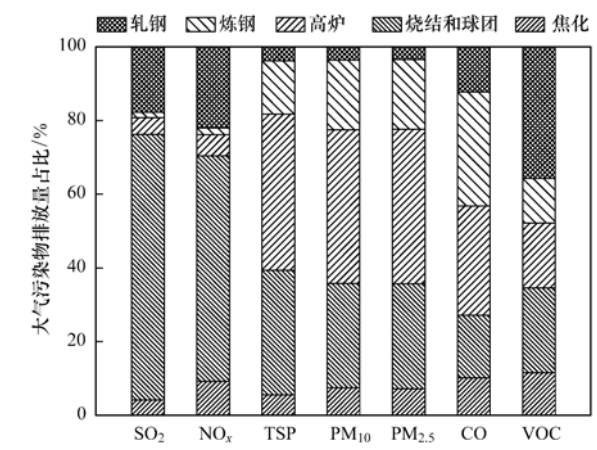


图3 京津冀地区钢铁行业不同生产环节污染物排放量占比

Fig. 3 Ratios of emissions from the production processes of the iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region

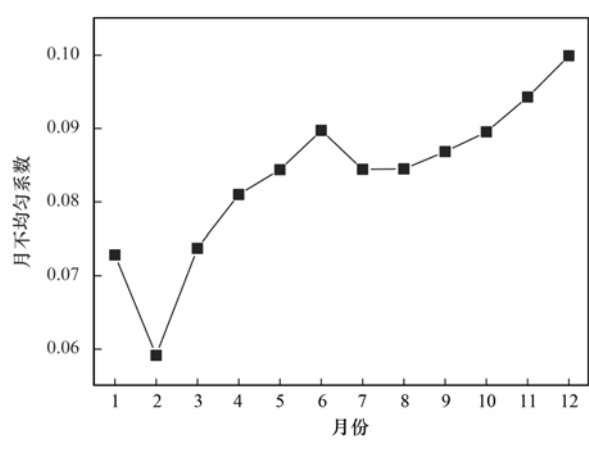


图5 钢铁行业污染物排放月变化曲线

Fig. 5 Monthly variation profiles for the iron and steel industry

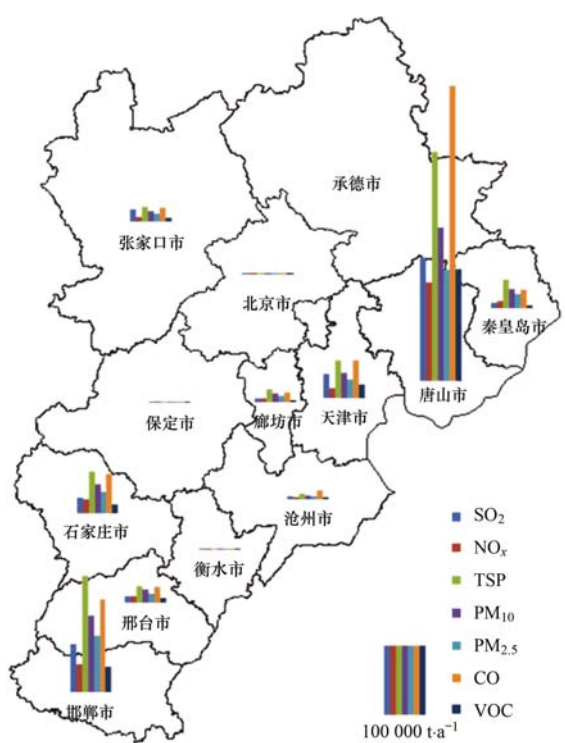


图4 京津冀地区各地市钢铁行业污染物排放量

Fig. 4 Emissions from the iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region, by cities

津冀钢铁行业污染物排放清单进行时间上的分配。月不均匀系数如图5所示，春夏秋冬这4个季节污染物排放总量分别占全年污染物排放总量的23.9%、25.9%、27.1%、23.2%，整体上季节差异较小；1、4、7、10月的排放量分别占相应4个季度排放量的31.4%、33.9%、32.6%、33.1%，认为可以较好地分别代表4个季节的平均污染物排放水平。

2.2 数值模型模拟效果验证

以模拟所选取的1、4、7、10月这4个典型季

节代表月的PM_{2.5}模拟值与PM_{2.5}监测值的相关系数(RC)、平均偏差(NMB)、标准化平均误差(NME)对模型模拟结果进行验证，以检验模拟结果的可靠性。分别选取北京市古城、天津市跃进路、石家庄市市区高新区、唐山市供销社4个监测站点的监测数据用于模拟值可靠性校验，模拟受体区域均位于市区内，对比所选取的监测站点分别靠近对应的受体点，以使验证结果能更好地代表模拟结果的可靠性。模拟验证结果如图6和表3所示。整体看来，PM_{2.5}浓度模拟值略低于监测值，主要原因可能为污染源排放清单的不确定性和空气质量模型反应机制的部分缺陷，但模拟值与监测值大部分位于Y=0.5X和Y=1.5X之间，较均匀地分布于Y=X两侧，北京、天津、石家庄、唐山模拟值与监测值的相关性系数均达到70.5%以上，平均偏差在±14.7%以内，标准化平均误差在41.1%以内，均在可接受范围内，综合考虑后认为模拟结果较好，有较高的可靠性。

表3 PM_{2.5}模拟值与监测值统计参数

Table 3 Statistical data of simulated results and monitored data				
参数	北京市	天津市	石家庄市	唐山市
模拟值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	67.6	55.9	71.1	70.2
监测值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	78.2	66.1	83.4	80.5
RC/%	78.7	77.6	73.4	70.5
NMB/%	-12.6	-14.7	-8.1	-14.3
NME/%	41.0	39.9	41.1	36.4

2.3 京津冀钢铁行业对PM_{2.5}影响

京津冀地区整体区域及各地市钢铁行业PM_{2.5}排放量贡献率与钢铁行业对区域PM_{2.5}浓度贡献率对比情况如图7所示，二者相关性较好，但仍有一定的差异，表明PM_{2.5}一次排放对PM_{2.5}浓度有直接显著的影响，SO₂、NO_x、VOCs等前体物二次反应

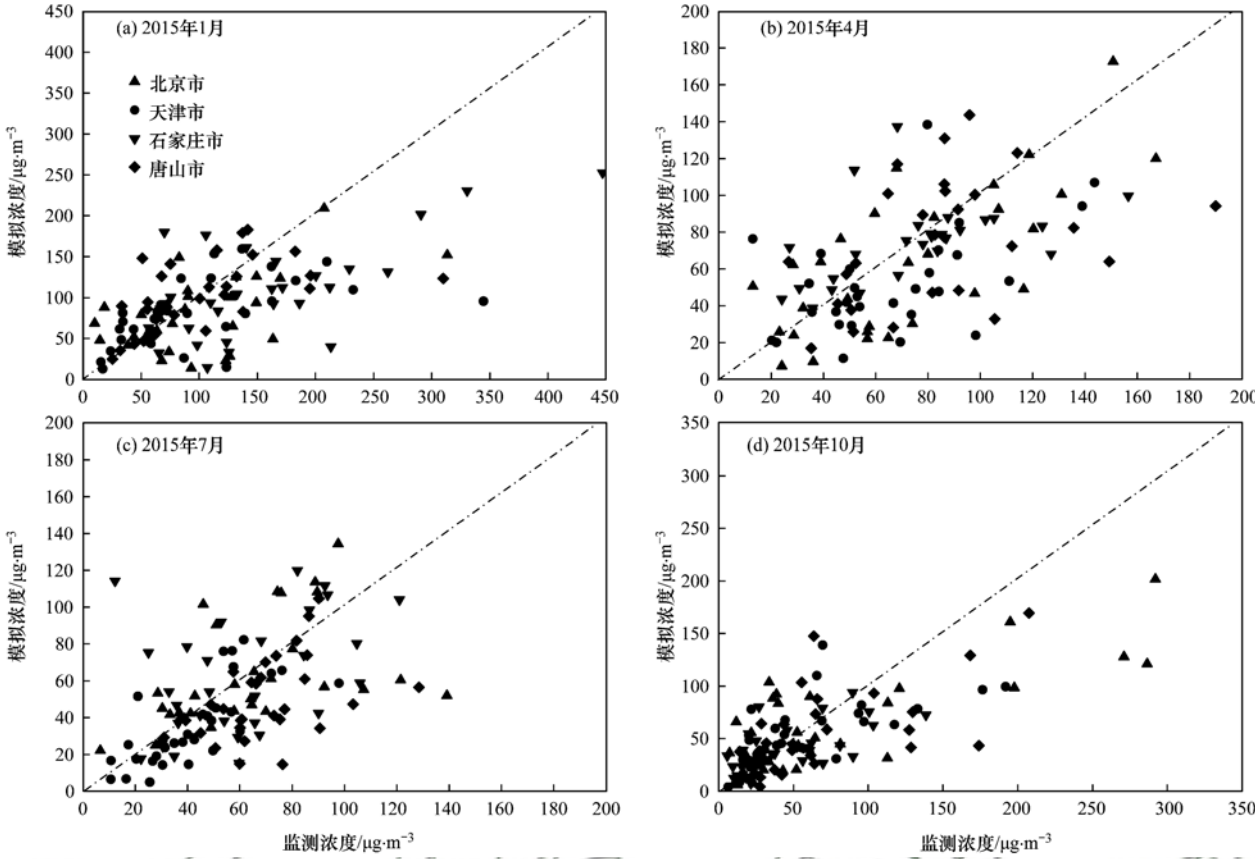


图 6 北京、天津、石家庄、唐山 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值与监测值对比

Fig. 6 Comparisons between the simulated results and monitored data of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang, and Tangshan

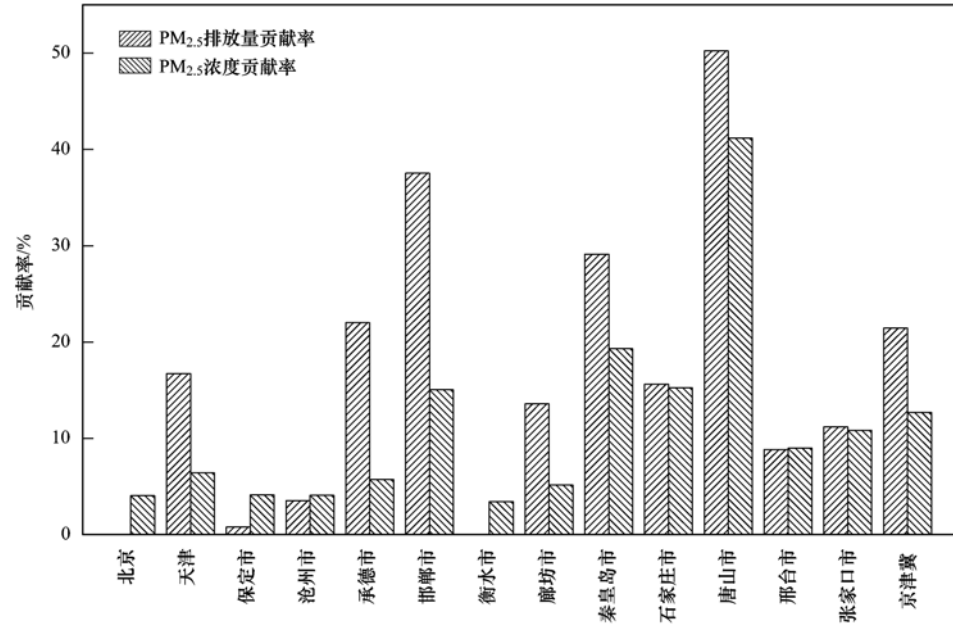


图 7 各地市钢铁行业 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量贡献率与对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献率对比

Fig. 7 Comparison between the $\text{PM}_{2.5}$ emissions and the $\text{PM}_{2.5}$ concentration contributions per city

也带来一定的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献。总体上来看，钢铁行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响较大，京津冀地区钢铁行业 $\text{PM}_{2.5}$ 一次排放量占所有源一次排放总量的 21.7%，钢铁

行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的年均贡献率为 12.7%。唐山市、秦皇岛市、石家庄市、邯郸市钢铁企业较多，钢铁行业 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量占地市内所有源 $\text{PM}_{2.5}$ 排放总量的

占比较高，钢铁行业对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率也较高，分别达到 41.2%、19.3%、15.3%、15.1%。

从空间上来看，钢铁行业对北京市、唐山市、京津冀地区整体区域 $PM_{2.5}$ 浓度贡献占比如图 8 所示。根据模拟结果，整体来看，钢铁行业对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度年均贡献率为 12.7%，春夏秋冬这 4 个季节钢铁行业对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度贡献比率分别为 14.0%、15.9%、12.3%、8.7%，其中，唐山市钢铁行业对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度的年均贡献率最高，占有各地市钢铁行业对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献总比率的 42.3%，其次为邯郸市（21.7%）和石家庄市（12.9%），各地市钢铁行业对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率整体上与各地市内钢铁行业 $PM_{2.5}$ 排放量呈较好的对应关系。京津冀地区钢铁行业对唐山市 $PM_{2.5}$ 浓度年均贡献比率为 41.2%，其中春夏秋冬 4 个季节贡献比率分别为 39.8%、54.3%、33.0%、37.7%，唐山市约拥有京津冀地区半数的钢铁企业，其钢铁行业污染物排放量巨大，京津冀地区钢铁行业对唐山市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献中，主要为唐山市本地钢铁企业的贡献。京津冀地区钢铁行业对北京市 $PM_{2.5}$ 浓度年均贡献率为 4.1%，春夏秋冬 4 个季节钢铁行业对北京市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献比率分

别为 6.1%、5.1%、3.2%、1.7%，钢铁行业对北京市 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献主要来自于唐山市（0.82%）、邯郸市（0.80%）、张家口市（0.57%）、石家庄市（0.56%）等的外来输送。

从工序上来看，钢铁行业各生产工序对 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献率如图 9 所示。从京津冀地区整体区域、北京市、及钢铁行业排放量最大的唐山市的情况来看，炼铁和烧结工序都是对 $PM_{2.5}$ 浓度影响最大的工序，二者对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率相当，主要原因可能为：① $PM_{2.5}$ 浓度对 $PM_{2.5}$ 一次源排放较为敏感，炼铁工序排放的 $PM_{2.5}$ 最多，导致其一次源排放对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率更高；② 前体物在大气中进行的复杂二次转化也对 $PM_{2.5}$ 有重要的贡献，烧结和球团工序虽然 $PM_{2.5}$ 排放量低于炼铁工序，但是 SO_2 、 NO_x 、VOC 等二次反应前体物的排放量较大，导致其二次源对 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献率更高。以上两个原因共同导致了烧结和炼铁两个工序虽然排放量呈现一定的差异，但是二者对 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献率相当的结果。

钢铁行业对 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献率整体呈现夏高冬低季节特点，可能的原因包括：① 供暖锅炉和居民散煤燃烧等排放源排放量较大且具有显著的冬

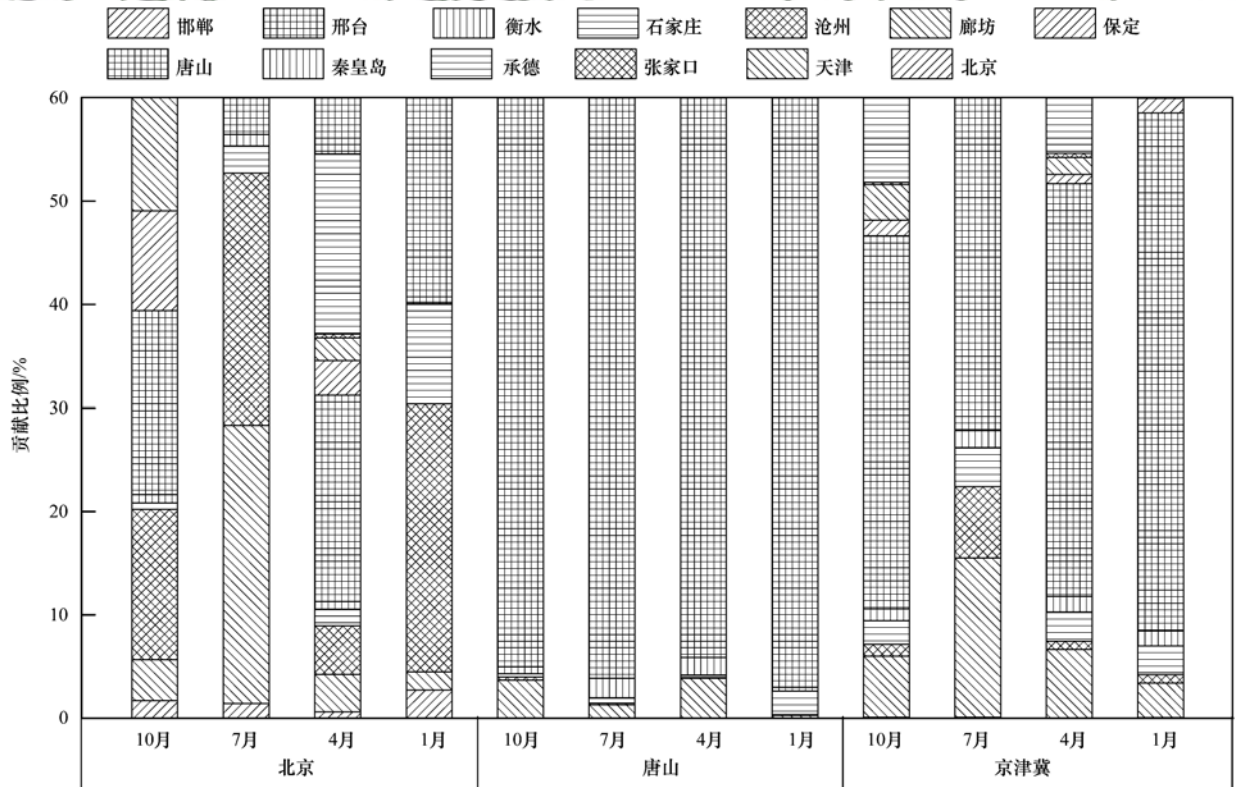


图 8 钢铁行业对北京市、唐山市、京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度贡献占比

Fig. 8 Ratios of the $PM_{2.5}$ concentration contributions from the iron and steel industry in Beijing, Tangshan, and the entire Beijing-Tianjin-Hebei region, by cities

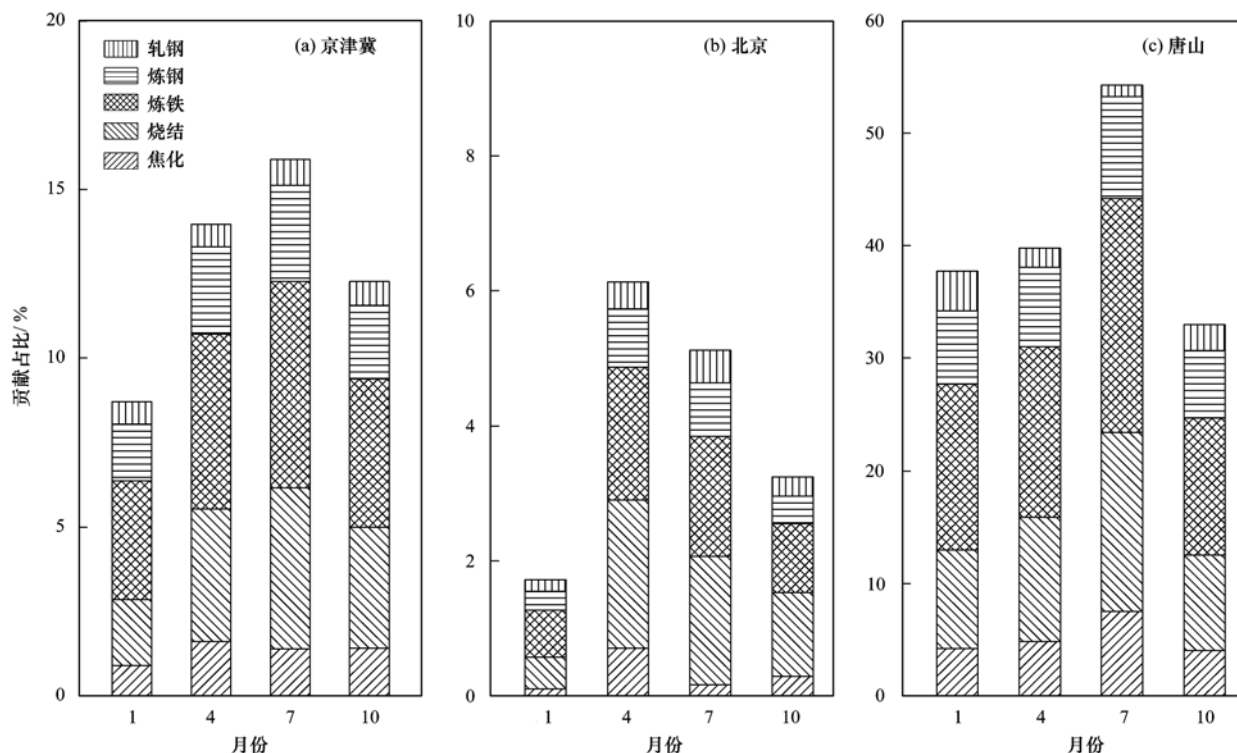


图9 钢铁行业各工序对京津冀、唐山、北京的 $PM_{2.5}$ 浓度贡献

Fig. 9 Ratios of the $PM_{2.5}$ concentration contributions from the iron and steel industry in Beijing, Tangshan, and the entire Beijing-Tianjin-Hebei region, by production processes

高夏低的季节特点,钢铁行业排放量没有显著季节特点,因此当冬季燃煤排放污染物增大,区域内污染物排放总量增大,钢铁行业排放量占比减小,很大程度上导致冬季钢铁行业对区域 $PM_{2.5}$ 影响减小;②京津冀地区钢铁行业污染物排放量较高的城市主要分布在东部和南部,京津冀地区冬季多静稳天气,春季主导西北风向,夏、秋季主导东南风和南风,污染物不同季节在大气中的输送方向的差异也在一定程度上导致了浓度贡献率的季节差异.③京津冀地区钢铁行业污染物排放中,烧结为重要的一个排放工序,烧结烟囱高度较高,夏季边界层更高,湍流混合作用使污染物在夏季扩散充分.

对比之前的研究成果^[6,32,33],本研究中京津冀地区钢铁行业对 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献率更高,可能的原因有:①除有组织排放外,本研究同时考虑了钢铁行业颗粒物的无组织排放;②焦化作为钢铁冶炼的一个前期工序,本研究也将焦化行业考虑在钢铁企业之内.由于以上两个原因,本研究核算的钢铁行业颗粒物排放量要高于前人研究成果,而 $PM_{2.5}$ 一次排放对 $PM_{2.5}$ 浓度有着较为直接显著的影响,因此本研究中钢铁行业对区域 $PM_{2.5}$ 影响较之前研究中的成果更大.

3 结论

(1) 2015 年京津冀地区钢铁行业 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、CO、VOC 排放总量分别为 38.82、27.23、79.19、53.15、38.68、823.38、26.53 万 t,整体上较 2014 年略有下降,其中 SO_2 排放量下降明显.

(2) 烧结和球团工序是京津冀钢铁行业最主要的污染物排放工序,炼铁工序排放了较多的颗粒物,行业排放的重点污染物为颗粒物、 NO_x 、 SO_2 .

(3) 京津冀地区钢铁行业排放量较大的地区主要集中在南部和东部,唐山市钢铁行业各类污染物排放量最大,其 SO_2 、 NO_x 、TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、CO、VOC 排放量占整个京津冀地区钢铁行业排放总量的 39.1%~63.5%,其次为邯郸市、秦皇岛市等.

(4) 钢铁行业对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 影响较大,年均浓度贡献率为 12.7%,并呈现夏高冬低的特点,烧结和炼铁工序是对 $PM_{2.5}$ 浓度的重要贡献工序,唐山市、邯郸市、秦皇岛市、石家庄市等钢铁企业较多的地市,钢铁行业对 $PM_{2.5}$ 浓度影响也较大.

(5) 各地市中,京津冀地区钢铁行业对唐山市

PM_{2.5} 浓度影响最大, 年均浓度贡献率高达 41.2%, 主要来自于唐山市本地钢铁行业的贡献, 其次来自于邯郸市的外来输送, 炼铁是最主要的 PM_{2.5} 浓度贡献工序; 北京市 PM_{2.5} 受钢铁行业影响较小, 钢铁行业 PM_{2.5} 浓度贡献率约 4.1%, 主要来自其他地市钢铁行业的外来输送贡献, 烧结和炼铁是主要的 PM_{2.5} 浓度贡献工序。

参考文献:

- [1] 缪育聪, 郑亦佳, 王姝, 等. 京津冀地区霾成因机制研究进展与展望[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(3): 356-368.
Miao Y C, Zheng Y J, Wang S, *et al.* Recent advances in, and future prospects of, research on haze formation over Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(3): 356-368.
- [2] Guo Y Y, Gao X, Zhu T Y, *et al.* Chemical profiles of PM emitted from the iron and steel industry in northern China[J]. Atmospheric Environment, 2017, 150: 187-197.
- [3] 李松. 区域大气污染源清单完善及现有产业结构对大气环境影响研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [4] 伯鑫, 甄瑞卿, 屈加豹, 等. 中国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 578-582.
Bo X, Zhen R Q, Qu J B, *et al.* Study on the management system of atmospheric pollutant emission inventory for steel industry of China[J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(5): 578-582.
- [5] 伯鑫, 赵春丽, 吴铁, 等. 京津冀地区钢铁行业高时空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.
- [6] 伯鑫, 徐峻, 杜晓惠, 等. 京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1684-1692.
Bo X, Xu J, Du X H, *et al.* Impacts assessment of steel plants on air quality over Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1684-1692.
- [7] 赵斌, 马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 368-375.
Zhao B, Ma J Z. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(2): 368-375.
- [8] 牟莹莹, 郑新梅, 李文青, 等. 南京市工业源大气污染物排放清单的建立[J]. 环境科学与技术, 2017(3): 204-210.
Mu Y Y, Zheng X M, Li W Q, *et al.* Development of an industrial air pollutants emission inventory of Nanjing City[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(3): 204-210.
- [9] Wu X C, Zhao L J, Zhang Y X, *et al.* Primary air pollutant emissions and future prediction of iron and steel industry in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15(4): 1422-1432.
- [10] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 867-875.
Wu W J, Chang X, Xing J, *et al.* Assessment of PM_{2.5} pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Environmental Science, 2017, 38(3): 867-875.
- [11] 汪旭颖, 燕丽, 雷宇, 等. 我国钢铁工业一次颗粒物排放量估算[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 3033-3039.
Wang X Y, Yan L, Lei Y, *et al.* Estimation of primary particulate emissions from iron and steel industry in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8): 3033-3039.
- [12] Salameh T, Sauvage S, Afif C, *et al.* Source apportionment vs. emission inventories of non-methane hydrocarbons (NMHC) in an urban area of the Middle East: local and global perspectives [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(5): 3595-3607.
- [13] Zhao H Y, Zhang Q, Davis S J, *et al.* Assessment of China's virtual air pollution transport embodied in trade by a consumption-based emission inventory [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(10): 5443-5456.
- [14] Bittman S, Jones K, Vingarzan R, *et al.* Weekly agricultural emissions and ambient concentrations of ammonia: Validation of an emission inventory [J]. Atmospheric Environment, 2015, 113: 108-117.
- [15] Djalalova I, Monache L D, Wilczak J. PM_{2.5} analog forecast and kalman filter post-processing for the community multiscale air quality (CMAQ) model[J]. Atmospheric Environment, 2015, 108: 76-87.
- [16] 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.
- [17] Townsend-small A, Marrero J E, Lyon D R, *et al.* Integrating source apportionment tracers into a bottom-up inventory of methane emissions in the Barnett Shale Hydraulic Fracturing Region [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(13): 8175-8182.
- [18] Pallavidino L, Prandi R, Bertello A, *et al.* Compilation of a road transport emission inventory for the Province of Turin: Advantages and key factors of a bottom-up approach [J]. Atmospheric Pollution Research, 2014, 5(4): 648-655.
- [19] Geng G N, Zhang Q, Martin R V, *et al.* Impact of spatial proxies on the representation of bottom-up emission inventories: A satellite-based analysis [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 17(6): 4131-4145.
- [20] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [21] 马京华. 钢铁企业典型生产工艺颗粒物排放特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [22] Sun W Q, Zhao L, Li X L, *et al.* Particulate matter emission in iron and steelmaking plants [J]. Ironmaking and Steelmaking Processes, 2016, 355-372.
- [23] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(9): 4105-4120.
- [24] 雷宇. 中国人为源颗粒物及关键化学组分的排放与控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [25] Bove M C, Brotto P, Cassola F, *et al.* An integrated PM_{2.5}

- source apportionment study: Positive Matrix Factorisation vs. the chemical transport model CAMx[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 274-286.
- [26] Nopmongkol U, Alvarez Y, Jung J, *et al.* Source contributions to United States ozone and particulate matter over five decades from 1970 to 2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **167**: 116-128.
- [27] 薛文博, 王金南, 付飞, 等. CMAQ 与 CAMx 模型对中国 PM_{2.5} 数值模拟对比分析[A]. 见: 中国环境科学学会环境规划专业委员会 2013 年学术年会论文集[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013. 194-204.
- [28] Yarwood G, Morris R E, Wilson G M. Particulate Matter Source Apportionment Technology (PSAT) in the CAMx photochemical grid model[J]. *Air Pollution Modeling and Its Application XVII*, 2007. 478-492.
- [29] 王堃, 高佳佳, 田贺忠, 等. 基于 POI 兴趣点的排放清单空间分配方法[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2377-2382.
- Wang K, Gao J J, Tian H Z, *et al.* An emission inventory spatial allocation method based on POI data[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2377-2382.
- [30] 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.
- [31] 吴晓璐. 长三角地区大气污染物排放清单研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [32] Lang J L, Cheng S Y, Wen W, *et al.* Development and application of a new PM_{2.5} source apportionment approach[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(1): 340-350.
- [33] 温维, 韩力慧, 代进, 等. 唐山夏季 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. *北京工业大学学报*, 2014, **40**(5): 751-758.
- Wen W, Han L H, Dai J, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution and source apportionment in Tangshan during summer[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, **40**(5): 751-758.



CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajiu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)