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

2019
Vol.40 No.5
第40卷 第5期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第5期
2019年5月15日

目 次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 …… 张晗宇, 程水源, 姚森, 王晓琦, 张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 …… 王红丽, 景盛翱, 乔利平(2010)
泰山顶(1 534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 …… 沈利娟, 王红磊, 银燕, 陈魁, 陈景华, 施双双(2019)
郑州-新乡冬季 $PM_{2.5}$ 中元素浓度特征及其源分析 …… 闫广轩, 张朴真, 黄海燕, 高雅, 张靖雯, 宋鑫, 张佳羽, 李怀刚, 曹治国, 姜继韶, 樊静, 王跃思, 金彩霞(2027)
我国 $PM_{2.5}$ 浓度分阶段改善目标情景分析 …… 贺晋瑜, 燕丽, 王彦超, 雷宇, 汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源 $PM_{2.5}$ 排放特征及减排潜力估算 …… 杜小申, 燕丽, 贺晋瑜, 汪旭颖, 王克, 张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 …… 赵庆炎, 韩士杰, 张轶舜, 杨留明, 张瑞芹, 燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 …… 乔月珍, 陈凤, 赵秋月, 刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放 VOCs 的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 …… 刘镇, 朱玉凡, 郭文凯, 刘晓, 陈强(2069)
12种常见落叶果树 BVOCs 排放清单和排放特征 …… 李双江, 袁相洋, 李琦, 冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 …… 黄丽, 张心昱, 袁国富, 朱治林, 唐新斋, 孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 …… 刘昔, 王智, 王学雷, 李珍, 杨超, 厉恩华, 位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 …… 范博, 王晓南, 黄云, 李霁, 高祥云, 李雯雯, 刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中 PFASs 的赋存、输入通量和季节特征 …… 陈虹, 韩建波, 张灿, 程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 …… 袁瑞丰, 李宗省, 蔡玉琴, 邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 …… 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 程瑞瑞, 李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 …… 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 …… 秦延文, 韩超南, 郑丙辉, 马迎群, 杨晨晨, 刘志超, 张雷, 赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 …… 黎睿, 潘婵娟, 汤显强, 肖尚斌, 李青云, 杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 …… 李莹杰, 王丽婧, 李虹, 欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源碳的响应及释放风险 …… 李如忠, 鲍琴, 戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 …… 徐健, 袁旭音, 叶宏萌, 张晓辉, 周慧华, 韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 …… 蒋倩文, 刘锋, 彭英湘, 王华, 姚燃, 李红芳, 罗沛, 刘新亮, 吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 …… 张杰, 郭西亚, 曾野, 邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河河口水体汞的时空变化特征 …… 马尉斌, 陈秋禹, 尹德良, 孙涛, 王永敏, 王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 …… 刘伟豪, 王永敏, 樊宇飞, 吕东威, 王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 …… 樊宇飞, 刘伟豪, 孙涛, 苑萌, 吕东威, 李先源, 王永敏, 王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 …… 黄福义, 杨凯, 张子兴, 苏建强, 朱永官, 张娴(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 …… 吴杰, 熊丽君, 吴健, 沙晨燕, 唐浩, 林匡飞, 李大雁, 沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 …… 王振方, 张玮, 杨丽, 徐玉萍, 赵风斌, 王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 …… 刘雪晴, 黄廷林, 李楠, 杨尚业, 李扬, 徐进, 王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 …… 毕业亮, 吴诗敏, 周思宁, 吴尚华, 宿辉, 白志辉, 徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 …… 伏芝萱, 郭迎庆, 楚文海(2271)
UV 降解水溶液中文拉法辛的影响因素及机制 …… 吕娟, 许志伟, 王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷镉的机制 …… 黄博, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 朱惠文, 史磊, 阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化锆的除氟效能 …… 方文侃, 李小娣, 方菁, 吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 …… 祁家欣, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低 C/N 比污水短程硝化反硝化 …… 吴春雷, 荣懿, 刘晓鹏, 史会欣, 章武首, 金鹏康, 马文伟(2310)
不同 COD 浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 …… 马艳红, 赵智超, 安芳娇, 黄利, 师晓娟, 慕浩, 陈永志(2317)
15℃ SBBR 短程硝化快速启动和稳定运行性能 …… 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对 AO-SBR 系统 *Accumulibacter* 代谢特性的影响 …… 王少坡, 李柱, 赵乐丹, 于静洁, 赵明, 郑胜达, 孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 及其对污泥表面特性的影响 …… 杨明明, 刘子涵, 周杨, 祁菁, 赵凡, 郭劲松, 方芳(2341)
HN-AD 菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 …… 刘向阳, 张千, 吴恒, 李宸, 唐健泓, 封丽, 肖芃颖, 赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 …… 黄方玉, 邓良伟, 杨红男, 杨含, 肖友乾, 王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 …… 秦文韬, 张冰, 孙晨翔, 陈湛, 文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 …… 王娜, 高婕, 魏静, 刘颖, 庄绪亮, 庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 …… 刘晋仙, 李毳, 罗正明, 王雪, 暴家兵, 柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 …… 刘杰云, 邱虎森, 王聪, 沈健林, 吴金水(2394)
地膜覆盖和施氮对菜地 CH_4 排放的影响 …… 倪雪, 江长胜, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 …… 王晓云, 蔡焕杰, 李亮, 徐家屯, 陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻水田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 …… 田伟, 伍延正, 汤水荣, 胡玉麟, 赖倩倩, 文冬妮, 孟磊, 吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 …… 曾蔓漫, 慈恩, 樊晶晶, 李江文, 翁昊璐, 李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评价 …… 宋波, 王佛鹏, 周浪, 吴勇, 庞瑞, 陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(*Ageratum conyzoides* L.)对镉污染农田的修复潜力 …… 张云霞, 宋波, 宾娟, 周子阳, 陈记玲, 陈同斌(2453)
种植油麦菜评价多环芳烃污染土壤的农用风险 …… 焦海华, 郭佳佳, 张婧旻, 张晓霞, 茹文明, 白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 …… 舒心, 李艳, 李锋, 冯靖仪, 沈嘉瑜, 史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 …… 吕占禄, 张金良, 陆少游, 邹天森, 刘凯, 张晗, 谷亚亚(2483)

《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 5 期 2019 年 5 月
Vol. 40, No. 5 May, 2019

安阳市典型工业源 $PM_{2.5}$ 排放特征及减排潜力估算

杜小申[1], 燕丽[2*], 贺晋瑜[2], 汪旭颖[2], 王克[1], 张瑞芹[1*]
(1. 郑州大学化学与分子工程学院, 郑州 450001; 2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 为探究安阳市 $PM_{2.5}$ 排放特征, 通过现场调查对安阳市工业源活动水平和控制技术信息进行收集, 采用合理的估算方法、排放因子, 建立了安阳市 2016 年工业源 $PM_{2.5}$ 排放清单, 并利用地理信息系统(GIS)技术进行空间分配. 基于典型行业超低排放改造和煤炭压减要求设置 3 种情景, 估算了 2020 年安阳市工业源 $PM_{2.5}$ 减排潜力. 结果表明, 安阳市 2016 年工业源 $PM_{2.5}$ 排放总量为81 071.13 t; 有色冶金、钢铁和建材行业是安阳市 $PM_{2.5}$ 主要贡献源, 分别占总排放量的 45.43%、25.74% 和 18.00%; 安阳市各乡镇排放差异突出, $PM_{2.5}$ 排放主要集中在市区及林州市和安阳县, 且以安阳市区排放量最为突出, 而安阳市区的 4 个辖区的排放强度差异更为巨大; 通过设定不同控制情景, 估算 2020 年安阳市 $PM_{2.5}$ 减排潜力分别为 398.72、11 623.87和14 072.27 t, 分别占 2016 年工业源排放总量的 0.49%、14.34% 和 17.22%. 可见, 安阳市 $PM_{2.5}$ 具有较大减排潜力, 超低排放改造和煤炭压减对安阳市 $PM_{2.5}$ 减排具有重要意义.

关键词: 地理信息系统(GIS); 安阳; $PM_{2.5}$; 工业源; 减排潜力
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)05-2043-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201809214

$PM_{2.5}$ Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang

DU Xiao-shen[1], YAN Li[2*], HE Jin-yu[2], WANG Xu-ying[2], WANG Ke[1], ZHANG Rui-qin[1*]
(1. School of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: To investigate the characteristics of $PM_{2.5}$ emissions in Anyang, the $PM_{2.5}$ emission inventory from industrial sources of Anyang in 2016 was established based on reasonable estimation method and emission factor. The spatial distribution analysis was carried out using Geographic Information System (GIS) technology. Based on the industry's typical ultra-low emission transformation and coal pressure reduction requirements, three scenarios were set to estimate the $PM_{2.5}$ emission reduction potential of industrial sources from Anyang in 2020. The results show that the total $PM_{2.5}$ emissions from industrial sources in Anyang was 81 071.13 t in 2016. Non-ferrous metallurgy, iron and steel, and building materials industries were the main contributing sources, accounting for 45.43%, 25.74%, and 18.00% of the total emissions, respectively. The emission differences between towns and within Anyang were outstanding. The $PM_{2.5}$ emissions were mainly concentrated in urban areas, Linzhou City, and Anyang County. The emissions in Anyang City were most prominent, while the emission intensity differences between the four jurisdictions of Anyang City were even greater. In the three different control scenarios, the potential for $PM_{2.5}$ emission reduction in Anyang in 2020 was estimated to be 398.72, 11 623.87, and 14 072.27 t, accounting for 0.49%, 14.34%, and 17.22% of the total industrial source emissions in 2016, respectively. It can be concluded that Anyang has a great potential for $PM_{2.5}$ emission reduction. In addition, ultra-low emission reform and coal pressure reduction can be of great significance for $PM_{2.5}$ emission reduction in Anyang.

Key words: geographic information system (GIS); Anyang; $PM_{2.5}$; industrial source; emission reduction potential

随着近年来我国大范围雾霾事件的频繁发生, 人们对 $PM_{2.5}$ 的认识也在逐步加深. 它既包含从污染源直接排放的一次颗粒物又包含气态污染物经光化学反应转化而生成二次颗粒物[1]. 近年来国内外大量的研究表明, 空气中 $PM_{2.5}$ 浓度的提升会提高部分疾病的发病率, 间接增加死亡人数[2~5]. 安阳市地处豫、晋、冀三省交界处, 盛行南北风, 秋冬季重污染天气频发. 尤其是在太行山脉及京广线气流通道的双重影响下, 自北向南, 沿北京、保定、石家庄、邢台、邯郸到安阳形成一个显著的高值污染带, 而安阳市处于该污染带的最南端, 在扩散条件十分不利的条件下, 二次污染特征显著. 2016 年安阳市 $PM_{2.5}$ 浓度为 86 $\mu g \cdot m^{-3}$, 为全省最高, 同时在全国 366 城市 $PM_{2.5}$ 浓度排名中也排在第 8 位[6], 扣除其中受沙尘天气影响的城市后, 安阳市将上升至第 5 位, 污染形势十分严峻.

排放清单作为摸清城市 $PM_{2.5}$ 排放的主要手段, 近年来已在全国范围内广泛开展[7~10]. 而工业源作为大部分城市 $PM_{2.5}$ 的重要贡献源, 国内学者已就工业源排放进行了较多研究; 刘松华等[11]通过发放

收稿日期: 2018-09-28; **修订日期**: 2018-11-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0207505, 2017YFC0212406)
作者简介: 杜小申(1991~), 男, 硕士研究生, 研究方向为区域大气污染物特征分析、大气污染源排放清单编制, E-mail: 291689657@qq.com
* 通信作者, E-mail: yanli@caep.org.cn; rqzhang@zzu.edu.cn

调查表、现场咨询等形式，获得苏州市 2012 年工业企业基本信息，并根据实际情况对钢铁行业进行了系数修订，得到苏州市工业源大气 $PM_{2.5}$ 排放清单；罗恢泓等[12]通过现场勘测以及走访调研的形式，获得桂林地区 2011 至 2013 年工业生产情况统计，参照国内外相关文献资料确定排放因子，并通过数据处理得到桂林地区工业排放源清单. 此外，一些城市尺度和区域尺度的多污染物排放清单中也涵盖了工业源部分[13~15]. 在获得了城市尺度排放清单后，如何量化评估不同行业部门减排对区域 $PM_{2.5}$ 污染改善幅度的相对大小又成为决策部门面临的重要问题. 现阶段对 $PM_{2.5}$ 减排量估算方法可分为两种，一种是结合技术改进及政策要求等方面设计不同情景，估算目标年减排潜力：贺晋瑜等[16]基于我国燃煤锅炉的技术特征和国内外排放清单编制技术方法，建立了燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 减排潜力计算方法，设计了 3 种控制情景，对 2020 年京津冀地区燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 减排潜力进行了预测和分析；邱凯琼[17]以我国工业源 VOCs 为研究对象，建立了 2010 年全国工业源 VOCs 排放清单，设置了基准情景和控制情景，分析评估了 VOCs 减排政策的减排潜力；孙现伟等[18]以 2012 年为基准年，设计了分阶段、分地区不断优化的控制情景(基准、适中、加严和最严情景)，以建立减排潜力模型，并对 2017、2020 和 2030 年我国燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 减排潜力及空间分布进行了预测分析. 另一种则是通过设定不同的减排比例情景，并在空气质量模型中进行模拟，研究不同情景对 $PM_{2.5}$ 的减排贡献：吴文景等[19]利用 CMAQ/2D-VBS 模型，分析了冬夏两季京津冀地区主要排放源减排 30% 对改善区域 $PM_{2.5}$ 污染的效果；孙晓伟等[20]基于自下而上建立的高分辨率排放清单，以污染最严重的典型月份 1 月为模拟时段，采用 WRF-CAMx-PSAT 模型模拟现状下电力行业对长江中游城市群的空气质量影响，并设置关停小机组和大机组替代小机组两种减排情景，对区域空气质量影响进行评估；王临清等[21]采用 MM5 + CULPUFF 耦合模型，以江苏省为例，定量模拟研究了 2012 年江苏省火电厂排放的大气污染物对各地级市 $PM_{2.5}$ 的影响；段文娇等[22]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. 虽然利用模型模拟的城市减排潜力较为准确，但对数据格式要求较高，获取难度较大，技术复杂性较高. 此外，各模型模拟结果缺乏可比性，不同研究工作，不同时空范围的研究成果很难相互印证、对照[23,24]. 虽然近年来关于减排潜力估算的研究已经较为常见，但大多集中在电厂、燃煤锅炉和钢铁行业等个别源类，而缺少对城市典型工业源整体 $PM_{2.5}$ 减排潜力估算的研究.

本研究运用 GIS 工具，通过实地调研，采用合理的排放因子建立安阳市典型工业源 $PM_{2.5}$ 排放清单，并对其分乡镇排放量及市区排放强度进行分析. 此外，结合超低排放改造及煤炭压减要求设置不同情景，估算 2020 年安阳市典型工业源 $PM_{2.5}$ 减排潜力.

1 材料与方法

1.1 研究区域与对象

本研究以 2016 年为基准年，涵盖文峰区、北关区、殷都区、龙安区、林州市、安阳县、内黄县、汤阴县共计 8 个区市县，市域面积5 599 km^2. 本研究对象为涉及 $PM_{2.5}$ 排放的火电、钢铁、有色冶金、建材和石化化工这 5 类主要工业污染源，其详细分类见表 1.

表 1 主要研究源及其详细分类

Table 1 Main research sources and their detailed classification

一级分类	二级分类
火电	煤炭
钢铁	烧结
	球团
	高炉
	转炉
有色冶金	电解铝
	电解铅
	粗铜
	氧化锌
建材	砖瓦
	水泥
	石灰
	平板玻璃
	陶瓷
石化化工	焦化
	化肥
	炭素

1.2 清单建立方法

本文采用排放因子法建立排放清单，估算方法见公式(1)：

$$E = \sum_j A_j \times EF_j \times (1 - \eta) \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中，E 为 $PM_{2.5}$ 排放总量(kg)；A_j 为 j 种排放源的活动水平数据(kg)；EF_j 为排放因子($g \cdot kg^{-1}$)；η 为控制措施去除效率(%).

本研究的活动水平数据主要来自实地调研，期间共调研企业 511 家，并参考安阳市环境统计数据和统计年鉴等宏观数据资料. 排放因子选取主要是

依据环境保护部发布的排放清单编制技术指南，综合国内外文献及国内实测数据，最终确定排放因子.

1.3　各类源排放量估算

工业源 $PM_{2.5}$ 排放总量分工艺过程排放、固定燃烧(即锅炉)排放和堆场扬尘排放三部分，计算公式为：$E = E_{工艺过程} + E_{锅炉} + E_{堆场扬尘}$，根据各行业企业活动水平和排放因子，及调研获得的企业实际采取的污染防治措施，逐一计算各排污环节污染物的排放量. 其中，火电行业排放因子主要参考文献[25]，活动水平数据主要包括经纬度信息、燃料类型与消耗量、装机容量、锅炉类型与治理措施等信息；钢铁行业排放因子主要参考文献[26]，活动水平主要包括经纬度信息、燃料类型与消耗量、工艺过程、产品产量(含中间产物)和治理措施等信息；建材行业排放因子均参考杨强等[14]和翟一然等[27]的研究，活动水平数据主要包括经纬度信息、窑炉类型、产品产量和治理措施等信息；有色冶金行业排放因子均参考文献[26]，活动水平数据主要包括产品产量、经纬度信息和治理措施等信息；石化化工行业中焦化、尿素和复合肥排放因子主要参考杨强等[14]的研究，其他化肥和炭素行业排放因子参考文献[26]，活动水平数据主要包括工艺类型、产品产量、经纬度信息及治理措施等信息；工业锅炉排放因子主要参考文献[27～30]，堆场扬尘排放因子参考文献[13]，其详细分类与第四级排放因子见表2.

表2　工业源排放因子

Table 2　Emission factors of industrial sources

一级分类	二级分类	三级分类	四级分类	$PM_{2.5}$ 排放系数/g·kg^{-1}		文献
				有组织	无组织	
火电	煤炭	煤粉炉	无控	0.400[1)]	—	[25]
			静电除尘	0.032[1)]	—	[25]
			湿式除尘	0.135[1)]	—	[25]
			布袋除尘	0.002[1)]	—	[25]
钢铁	烧结矿	烧结	—	2.520	0.100	[26]
	球团矿	球团	—	1.800	0.070	[26]
	生铁	炼铁	—	5.250	0.730	[26]
	钢	转炉	—	10.500	—	[26]
有色冶金	电解铝	一次铝	—	18.280	—	[26]
		二次铝	—	5.200	—	[26]
	氧化铝	联合法	—	42.300	—	[26]
		拜尔法	—	9.180	—	[26]
		烧结法	—	90.000	—	[26]
	粗铜	—	—	263.870	—	[26]
	粗铅	—	—	286.670	—	[26]
	电解铅	—	—	328.000	—	[26]
	粗锌	—	—	207.730	—	[26]
	电锌	—	—	287.000	—	[26]
	氧化锌	—	—	111.270	—	[26]
	蒸馏锌	—	—	264.780	—	[26]
	锌焙砂	—	—	96.510	—	[26]
建材	水泥	新型干法	—	1.130	—	[14]
	石灰窑	—	—	2.520	—	[14]
	砖瓦窑	—	—	0.180[2)]	—	[14]
	水泥粉磨	—	—	0.049	—	[14]
	石灰破碎	—	—	0.030	—	[14]
	玻璃	平板玻璃	—	7.920	—	[26]
	陶瓷	—	—	0.670	—	[26]
石化化工	炼焦	机焦	—	1.599	—	[14]
	尿素	—	—	0.811	—	[14]
	复合肥	—	—	0.198	—	[14]
	其他化肥	—	—	1.860	—	[26]
	碳素	—	—	1.440	—	[26]
工业锅炉	煤炭	煤粉炉	—	1.540	—	[27]
		层燃炉	—	0.590	—	[27]
	柴油	—	—	0.50	—	[29]
	生物质成型燃料	—	—	0.950	—	[28]
	天然气	—	—	0.170[3)]	—	[30]
	焦炭	—	—	0.144	—	[30]
	焦炉煤气	—	—	0.170	—	[30]
	煤气	—	—	0.170	—	[30]

1)平均燃煤灰分；2)单位为 g·(万块)$^{-1}$；3)单位为 g·m^{-3}

1.4 空间分配

将各企业排放量和经纬度信息导入 GIS，生成安阳市工业源 $PM_{2.5}$ 排放空间分布，并对各区县排放总量进行汇总，研究各县市排放量及排放强度差异.

2 结果与讨论

2.1 安阳市工业源分行业 $PM_{2.5}$ 排放清单

如表 3 所示，2016 年安阳市工业源 $PM_{2.5}$ 排放总量为81 071.13 t. 图 1 ~ 4 分别为安阳市工业源一级分类和二级分类排放贡献情况. 一级分类中排放量最大的是有色冶金、钢铁和建材行业，分别占工业源排放总量的 45.43%、25.74% 和 18.00%；二级分类工艺过程源排放中以电解铅贡献最为突出，占有色冶金行业工艺过程排放量的 82.74%，占工艺过程源排放总量 46.00%；在二级分类固定燃烧源排放中，以水泥和钢铁行业排放贡献最为突出，占比分别达 44.11% 和 24.65%；在二级分类堆场扬尘排放中，以钢铁行业排放量最大，为 95.13 t，占堆场扬尘排放总量的 51.40%.

表 3 2016 年安阳市工业源 $PM_{2.5}$ 排放量

Table 3 $PM_{2.5}$ emissions from industrial sources in Anyang in 2016

一级分类	二级分类	工艺过程排放量/t	固定燃烧排放量/t	堆场扬尘排放量/t	排放总量/t
火电	煤炭	—	434.85	18.12	452.97
钢铁	烧结	7 420.65	3 608.70	95.13	20 866.26
	球团	286.33			
	高炉	8 155.23			
	转炉	1 300.22			
有色冶金	电解铝	5 061.40	—	1.52	36 832.71
	电解铅	30 473.30			
	粗铜	818.00			
	氧化锌	478.49			
建材	砖瓦	—	48.47	21.91	70.38
	水泥	447.13	6 457.27	5.70	6 910.10
	石灰	1.80	2 273.75	0.38	2 275.93
	平板玻璃	3 465.66	—	0.26	3 465.92
	陶瓷	90.01	1 778.51	—	1 868.52
石化化工	焦化	7 827.78	—	41.81	7 869.59
	化肥	421.59	—	—	421.59
	炭素	—	36.93	0.23	37.16
合计		66 247.59	14 638.48	185.06	81 071.13

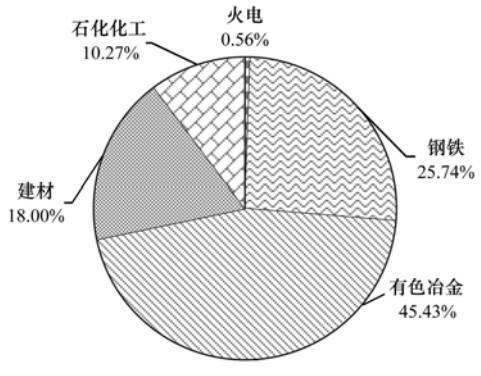

图 1 一级源分类排放贡献

Fig. 1 Primary source classification emissions contribution

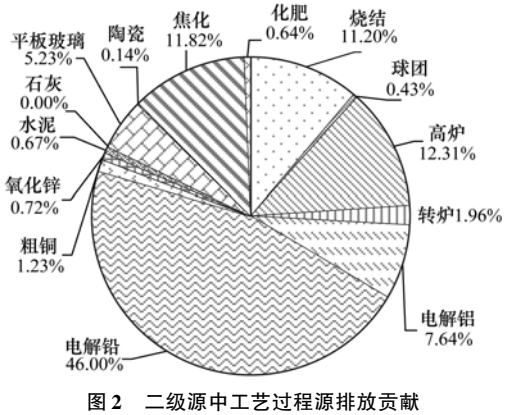

图 2 二级源中工艺过程源排放贡献

Fig. 2 Process emission contribution as secondary source

2.2 2016 年安阳市工业源分乡镇 $PM_{2.5}$ 排放清单

基于 ArcGIS 空间分析技术，采用基于地理坐标信息的空间分配方法，得到图 5 安阳市 $PM_{2.5}$ 排放总量空间分布和图 6 安阳地区 $PM_{2.5}$ 主要工业排放源分布. 通过图 5 可以看出安阳市 $PM_{2.5}$ 排放集中在安阳市区的相台街道、东风乡，汤阴县的宜沟镇，内黄县的后河镇，林州市的开元街道和河顺镇，以及安阳县的马家乡、铜冶镇、水冶镇和蒋村乡. 通过图 6 容易发现工业企业分布主要集中在安阳市市区及附近的安阳县西部、汤阴县中部和林州市中部. 对安阳市各县区排放量进行汇总(表 4)，发现安阳市区的排放量明显高于其他县市，达 40 602.84 t，占全市工业源排放总量的 50.08%. 通过对安阳市企业所属县区信息进行收集，并统计

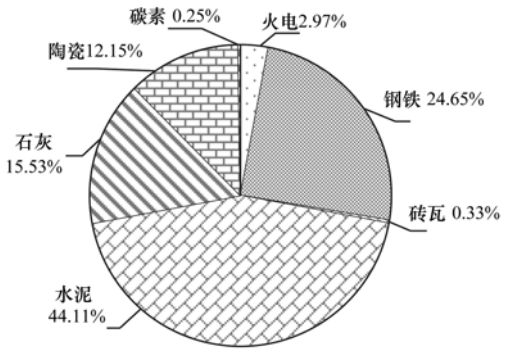

图 3　二级源中固定燃烧源贡献

Fig. 3　Contribution of fixed combustion sources as secondary sources

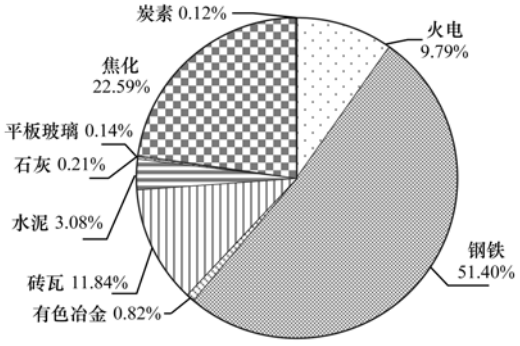

图 4　二级源中堆场扬尘源贡献

Fig. 4　Source contribution of yard dust source as secondary source

安阳市文峰区、龙安区、殷都区及北关区的 $PM_{2.5}$ 排放量及区域面积信息，安阳市各区工业源 $PM_{2.5}$ 排放量及排放强度见表 4. 通过表 4 的对比，发现安阳市各区排放量差异巨大，龙安区和殷都区排放量最大，分别为27 247. 30 t和12 447. 13 t，北关区排放量最小，仅有 14. 65 t. 其中，龙安区和殷都区排放量贡献了安阳市辖区总排放量的 97. 76%；各区排放强度差异也较大，北关区的排放强度小于 1 $t\cdot km^{-2}$，文峰区排放强度达到 4. 99 $t\cdot km^{-2}$，而龙安区排放强度达 115. 45 $t\cdot km^{-2}$，殷都区排放强度更是高达 177. 82 $t\cdot km^{-2}$，各区排放强度相差数十倍甚至数百倍.

表 4　安阳市各区工业源 $PM_{2.5}$ 排放量及排放强度对比

Table 4　Comparison of $PM_{2.5}$ emissions and emission intensity of industrial sources in various districts of Anyang

辖区	面积/km^2	$PM_{2.5}$ 排放量/t	排放强度/$t\cdot km^{-2}$
文峰区	179	893. 76	4. 99
龙安区	236	27 247. 30	115. 45
殷都区	70	12 447. 13	177. 82
北关区	59	14. 65	0. 25

2. 3　2016 年安阳市工业源分企业 $PM_{2.5}$ 排放清单

以企业为单位对各类源 $PM_{2.5}$ 排放量进行整理后发现，安阳市 $PM_{2.5}$ 排放量小于 1 t 的企业共有 370 个，排放量为 53. 35 t，占排放总量的 0. 07%；排放量在 1 ~100 t 之间的企业共有 101 个，排放量为2 002. 85 t，占排放总量的 2. 47%；而排放量大于 100 t 的企业仅有 40 个，而排放量却高达 79 014. 93 t，贡献了排放总量的 97. 46%. 而在排放量大于 100 t 的企业中，以有色冶金和钢铁行业贡献最为突出，分别占 100 t 以上企业排放总量的 44. 19% 和 32. 87%（见图 7）. 以有色冶金行业为例，安阳市某电解铝企业 $PM_{2.5}$ 排放量高达 26 668. 04 t，贡献了工业源排放总量的 32. 89%. 可见，安阳市 $PM_{2.5}$ 排放主要集中在有色冶金和钢铁行业中的部分典型企业，加强典型企业监管对于减少全市 $PM_{2.5}$ 排放具有重要意义.

2. 4　与其他研究对比

对包含城市尺度工业源 $PM_{2.5}$ 排放清单的报道

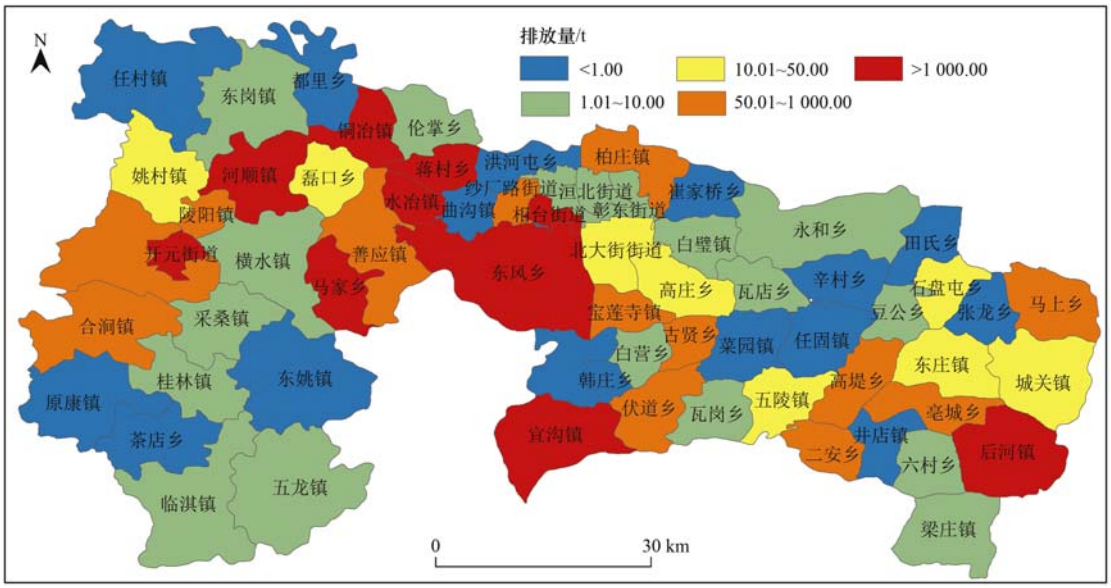

图 5　安阳市工业源 $PM_{2.5}$ 排放总量空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of total $PM_{2.5}$ emissions of industrial sources in Anyang

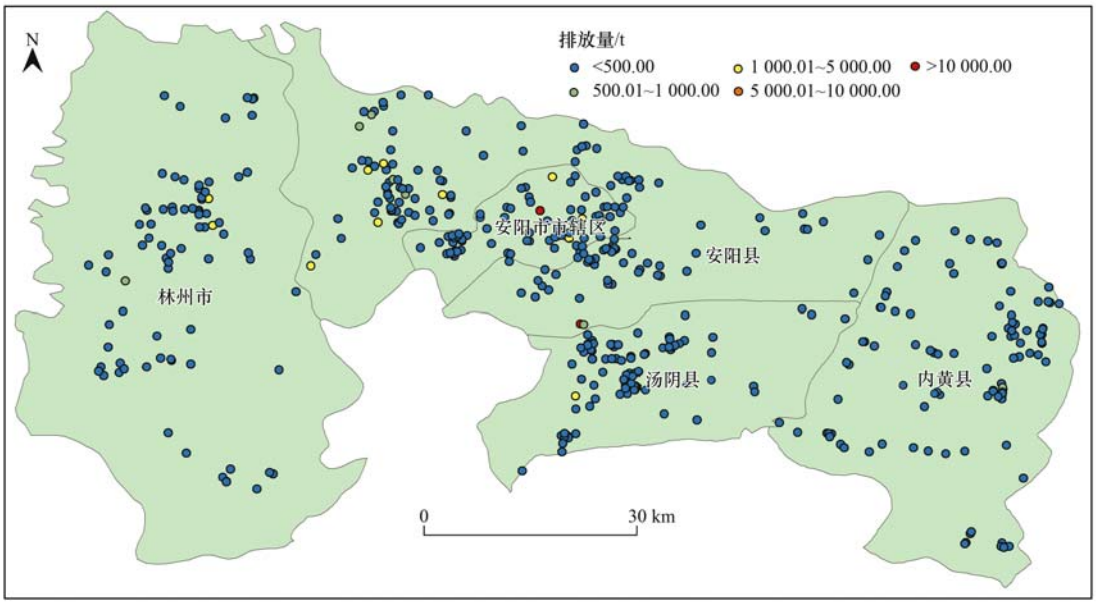

图 6 安阳地区主要工业排放源 $PM_{2.5}$ 排放分布

Fig. 6 Distribution of $PM_{2.5}$ emissions of major industrial sources in Anyang

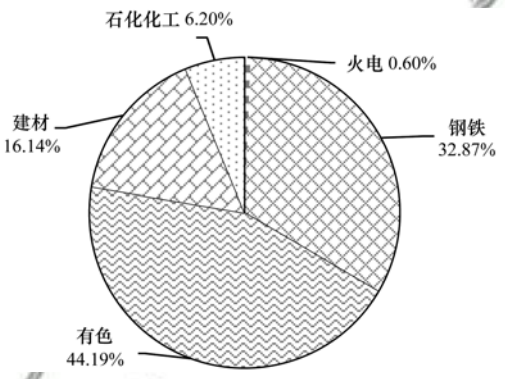

图 7 安阳市 $PM_{2.5}$ 排放量大于 100 t 企业排放总量的行业贡献

Fig. 7 Industry contribution of $PM_{2.5}$ emissions larger than 100 t enterprises in Anyang

进行收集(表 5),对比各城市工业源的排放量,发现本研究与苏州市较为接近,而高于桂林、承德、杭州和天津市排放量,这与所研究的地区及年份差异有关,还与研究中所采用的排放因子有关. 本研究中排放因子较多采用国内实测数据,活动水平数据均来自实地调研,且研究年份与当下间隔较短,数据较为准确. 此外,本研究还涵盖了工业源堆场扬尘排放. 因此,本研究结果具有一定合理性和可比性.

表 5 与其他研究对比

Table 5 Contrast with other studies

城市	研究年份	$PM_{2.5}$ 排放量/t	文献
苏州	2012	65 684.91	[11]
桂林	2013	11 674.05	[12]
承德	2013	17 705.00	[13]
杭州	2015	9 770.00	[14]
天津	2003	24 400.00	[30]
安阳	2016	8 1071.13	本研究

3 2020 年减排潜力估算

3.1 情景设定

未来的颗粒物排放既受能源消费总量和能源消费结构的影响,也与工业部门的技术进步、颗粒物减排技术的推广应用有关[31],而典型工业源 $PM_{2.5}$ 减排与工业部门减排技术推广和能源政策要求息息相关. 为考察先进技术推广和相关政策的减排作用,本研究设置基准情景、一般控制情景和加严控制情景的 3 种情景,探讨典型行业特定工艺过程超低排放改造(先进技术推广)和煤炭总量压减(相关政策要求)带来的 $PM_{2.5}$ 减排.

现阶段随着火电行业超低排放改造的逐步推进,非电行业的超低排放也已经被提上日程. 2018 年 5 月 7 日,生态环境部印发文件预示着钢铁行业超低排放即将拉开序幕[32]. 2017 年底,河南省政府下发文件要求全省钢铁、水泥、焦化、炭素、电解铝、玻璃、陶瓷这 7 大行业,在 2018 年 10 月底前完成“超低排放”改造[33],但在 2018 年 2 月 6 日发布的文件中则修改为“2018 年 10 月底前,鼓励钢铁、水泥、炭素(铝用炭素)和平板玻璃四大行业进行超低排放改造”[34]. 因此,结合地方标准[35]设置了超低排放改造层面的 3 种情景. 此外,根据文件中要求[36],“到 2020 年,北京、天津、河北、山东、河南五省(直辖市)煤炭消费总量要比 2015 年下降 10%”,以此为依据,设置了工业部门煤炭消费量下降层面的 3 种情景,其中,基准情景工业部门煤炭消费量与 2016 年保持一致,一般控制情景工业部门煤炭消费量较 2015 年减少 10%,加严控制情景工业部

门煤炭消耗量较 2015 年下降 15%. 综合超低排放层面和工业部门煤炭消费量下降层面的假设，构成本研究的情景设定，其详细情景设置见表 6. 其中，钢铁、水泥、焦化、炭素(铝用炭素)、电解铝、平板玻璃、火电和陶瓷行业超低排放仅分别考虑烧结、熟料生产焦炉烟囱废气、煅烧焙烧、电解槽、锅炉废气、喷雾干燥塔和窑炉工序，并以特定工序的减排量代表所属行业减排量.

表 6　情景设置

Table 6　Scenario settings

情景	基准情景	一般控制情景	加严控制情景
超低排放改造	仅火电行业完成	火电、钢铁、水泥、碳素、平板玻璃行业完成	火电、钢铁、水泥、碳素、平板玻璃、焦化、电解铝、陶瓷行业完成
工业部门煤炭消耗量下降(较 2015 年)	—	火电、钢铁、水泥、焦化和陶瓷产能下降 10%	火电、钢铁、水泥、焦化和陶瓷产能下降 15%

3.2　情景减排量估算

超低排放层面 $PM_{2.5}$ 减排估算：鉴于现阶段除火电行业外暂无其他行业超低排放改造后实测的 $PM_{2.5}$ 排放因子，因此，本研究做出 2 个主要假设，具体内容见表 7；煤炭消耗量下降层面颗粒物减排估算：由于各行业 $PM_{2.5}$ 排放量估算多以产品产量为统计口径，因此，更改为天然气等能源的也视为产品产量下降且暂不考虑天然气燃烧产生的排放量；电力、钢铁、水泥、焦化和陶瓷行业按煤炭消费量下降比例和是否进行超低排放改造计算减排量，其他行业产品仅考虑是否进行超低排放改造来计算减排量. 其中，火电行业超低排放改造后 $PM_{2.5}$ 排放因子和 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中占比均参考李小龙等[37]的研究. 其主要计算公式如下：

$$\frac{PM_{2.5}(FH)}{PM_{10}(FH)} = \frac{PM_{2.5}(DH)}{PM_{10}(DH)} = \alpha \tag{2}$$

$$\frac{PM_{10}(FH)}{PM_{10}(FQ)} \approx \frac{TSP(FH)}{TSP(FQ)} = \frac{C(FH) \times V(FH)}{C(FQ) \times V(FQ)} = \beta \tag{3}$$

式中，FH 代表非电行业超低排放改造后，FQ 代表非电行业超低排放改造前，DH 代表电力行业超低排放改造后，α 代表电力行业超低排放改造后 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中占比，β 代表非电行业超低排放改造后与改造前排放浓度之比.

表 7　主要假设

Table 7　Main assumptions

假设	具体内容
假设 1	超低排放改造前后废气排放流速不变，并以改造前后 PM_{10} 之比代替颗粒物排放浓度之比
假设 2	非电行业超低排放改造后 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的占比与电力行业改造后一致

3.3　情景分析结果

根据表 6 中的 3 种情景的不同假设，结合超低排放前后颗粒物排放浓度要求(超低排放改造前颗粒物排放要求参见各排放标准[38~43]，超低排放改造后排放要求参见文献[33]，详细排放环节要求对比见表 8)，并借鉴火电行业超低排放改造后排放颗粒物中 $PM_{2.5}$ 的粒径占比以及工业部门煤炭消费量下降带来的产品产量下降，估算 2020 年安阳市工业源 $PM_{2.5}$ 减排潜力. 基准情景下工业源 $PM_{2.5}$ 减排 398.72 t，且全部来自火电行业超低排放改造，占安阳市工业源排放总量的 0.49%；一般控制情景下工业源 $PM_{2.5}$ 减排11 623.87 t，占安阳市工业源排放总量的 14.34%；加严控制情景下工业源 $PM_{2.5}$ 减排 14 072.27 t，占安阳市工业源排放总量的 17.22%，不同控制情景的减排贡献见图 8. 对比 3 种情景，可见钢铁和焦化行业的超低排放改造带来的 $PM_{2.5}$ 减排在典型行业中贡献最为突出，安阳市 $PM_{2.5}$ 具有较大减排潜力，超低排放改造和煤炭压减对安阳市 $PM_{2.5}$ 减排具有重要意义.

表 8　典型行业超低排放改造前后颗粒物排放浓度对比

Table 8　Comparison of particulate matter emission concentration before and after ultra-low emission modification in typical industries

行业	工序	基准氧含量/%	改造后颗粒物浓度/mg·m^{-3}	改造前颗粒物浓度/mg·m^{-3}
钢铁	烧结	16	≤20	≤50
水泥(熟料)	水泥窑废气	10	≤10	≤30
焦化	焦炉烟囱废气	—	≤20	≤30
炭素(铝用炭素)	煅烧、焙烧	—	≤10	≤30
电解铝	电解槽	—	≤10	≤20
平板玻璃	电解槽	8	≤20	≤50
陶瓷	喷雾干燥塔和窑炉	—	≤10	≤50
火电	锅炉废气	6	≤10	≤30

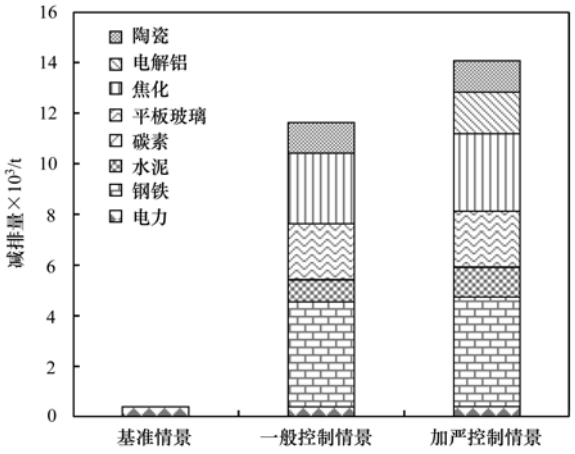

图 8 不同控制情景下工业源 $PM_{2.5}$ 减排贡献分担率

Fig. 8 Contribution rate of industrial $PM_{2.5}$ emission reduction under different control scenarios

4 结论

(1)本研究采用实地调研和排放因子法建立了2016 年安阳市工业源 $PM_{2.5}$ 排放清单，排放总量为 81 071.13 t. 有色冶金、钢铁和建材行业是安阳市 $PM_{2.5}$ 的主要贡献源，分别占工业源排放总量的 45.43%、25.74%和 18.00%.

(2)利用 GIS 技术对安阳市工业源 $PM_{2.5}$ 排放进行空间分配，发现安阳市 $PM_{2.5}$ 排放集中在安阳市区和临近安阳市区的安阳县及林州市；在排放量贡献最为突出的安阳市辖区，其下辖的各区排放强度差异巨大，且以殷都区和龙安区排放强度最高；虽然全市工业源 $PM_{2.5}$ 排放量在 100 t 以上的企业仅有 40 个，但排放量却高达79 014.93 t，贡献了排放总量的 97.46%.

(3)通过设定包含超低排放改造和煤炭消费量下降两个层面的 3 种控制情景，估算 2020 年安阳市 $PM_{2.5}$ 减排潜力分别为 398.72、11 623.87 和 14 072.27 t，分别占 2016 年工业源排放总量的 0.49%、14.34%和 17.22%. 可见，安阳市 $PM_{2.5}$ 具有极大减排潜力，超低排放改造和煤炭压减对安阳市 $PM_{2.5}$ 减排具有重要意义.

参考文献：

[1] 付高平. 成都市微细颗粒物($PM_{2.5}$)形成机理及对人类健康危险研究[D]. 成都：西南交通大学，2014.

[2] Dominici F, Peng R D, Bell M L, *et al*. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases[J]. The Journal of the American Medical Association, 2006, **295**(10): 1127-1134.

[3] Valavanidis A, Fiotakis K, Vlachogianni T. Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part C, 2008, **26**(4): 339-362.

[4] Peng R D, Bell M L, Geyh A S, *et al*. Emergency admissions for cardiovascular and respiratory diseases and the chemical composition of fine particle air pollution[J]. Environment Health Perspectives, 2009, **117**(6): 957-963.

[5] 段振华，高绪芳，杜慧兰，等. 成都市空气 $PM_{2.5}$ 浓度与呼吸系统疾病门诊人次的时间序列研究[J]. 现代预防医学，2015，**42**(2)：611-614.
Duan Z H, Gao X F, Du H L, *et al*. Analysis on the relationship between $PM_{2.5}$ concentration in ambient air and hospital outpatients with respiratory diseases in Chengdu [J]. Modern Preventive Medicine, 2015, **42**(4): 611-614.

[6] 国际环保组织绿色和平与上海闵行区青悦环保信息技术服务中心. 2016 年中国 366 个城市 $PM_{2.5}$ 浓度排名[EB/OL]. http://www.greenpeace.org.cn/270-cities-need-air-control-regulation/, 2017-01-17.

[7] Lei Y, Zhang Q, He K B, *et al*. Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990- 2005 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(3): 931954.

[8] Qiu P P, Tian H Z, Zhu C Y, *et al*. An elaborate high resolution emission inventory of primary air pollutants for the Central Plain Urban Agglomeration of China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **86**: 93-101.

[9] Zhao B, Wang P, Ma J Z, *et al*. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(1): 481-501.

[10] 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.

[11] 刘松华，周静，谭译，等. 苏州市大气细颗粒物($PM_{2.5}$)工业源排放清单[J]. 环境科学学报，2017，**37**(2)：453-459.
Liu S H, Zhou J, Tan Y, *et al*. Emission inventory of atmospheric fine particles ($PM_{2.5}$) from industrial sources in Suzhou City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(2): 453-459.

[12] 罗恢泓，廖雷，王敦球，等. 桂林地区大气细颗粒物($PM_{2.5}$)工业排放源清单[J]. 环境工程学报，2015，**9**(10)：4942-4946.
Luo H H, Liao L, Wang D Q, *et al*. Source list of atmospheric fine particulate matter from industrial emission in Guilin region [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(10): 4942-4946.

[13] 陈国磊，周颖，程水源，等. 承德市大气污染源排放清单及典型行业对 $PM_{2.5}$ 的影响[J]. 环境科学，2016，**37**(11)：4069-4079.
Chen G L, Zhou Y, Cheng S Y, *et al*. Air pollutant emission inventory and impact of typical industries on $PM_{2.5}$ in Chengdu [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4069-4079.

[14] 杨强，黄成，卢滨，等. 基于本地污染源调查的杭州市大气污染物排放清单研究[J]. 环境科学学报，2017，**37**(9)：3240-3254.
Yang Q, Huang C, Lu B, *et al*. Air pollutant emission inventory based on local emission source surveys in Hangzhou, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(9): 3240-3254.

[15] 李瑞芃，吴琳，毛洪钧，等. 廊坊市区主要大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报，2016，**36**(10)：3527-3534.
Li R P, Wu L, Mao H J, *et al*. Establishment of an air pollutant emission inventory for Langfang urban area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3527-3534.

[16] 贺晋瑜，燕丽，雷宇，等. 京津冀地区燃煤锅炉 $PM_{2.5}$ 减排潜力分析[J]. 中国环境科学，2017，**37**(4)：1247-1253.

He J Y, Yan L, Lei Y, *et al*. $PM_{2.5}$ emissions reduction potential from coal-fired boilers in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1247-1253.

[17] 邱凯琼. 工业源挥发性有机物减排潜力及其对空气质量的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[18] 孙现伟, 邓双, 朱云, 等. 我国燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 减排潜力预测与分析[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(5): 637-645.
Sun X W, Deng S, Zhu Y, *et al*. $PM_{2.5}$ emissions reduction potential from coal-fired power plants in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(5): 637-645.

[19] 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 Bejing-Tianjin-Hebei Region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 867-875.

[20] 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源. 冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3476-3484.
Sun X W, Guo X R, Cheng S Y. Impact of the electric power industry on air quality in Winter of urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3476-3484.

[21] 王临清, 朱法华, 赵秀勇. 燃煤电厂超低排放的减排潜力及其 $PM_{2.5}$ 环境效益[J]. 中国电力, 2014, **47**(11): 150-154.
Wang L Q, Zhu F H, Zhao X Y. Potential capabilities of pollutant reduction and environmental benefits from ultra-low emissions of coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2014, **47**(11): 150-154.

[22] 段文娇, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 $PM_{2.5}$ 影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1445-1454.
Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al*. Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and its impact on $PM_{2.5}$ [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1445-1454.

[23] 薛文博, 王金南, 杨金田, 等. 国内外空气质量模型研究进展[J]. 环境与可持续发展, 2013, **38**(3): 14-20.
Xue W B, Wang J N, Yang J T, *et al*. Domestic and foreign research progress of air quality model [J]. Environment and Sustainable Development, 2013, **38**(3): 14-20.

[24] 马洁云, 易红宏, 唐晓龙, 等. 空气质量模型的发展及研究进展[J]. 上海环境科学, 2014, **33**(1): 17-23.
Ma J Y, Yi H H, Tang X L, *et al*. Development and research progress of the air quality modelling[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2014, **33**(1): 17-23.

[25] 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.

[26] 中华人民共和国环境保护部. 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm, 2014-08-20.

[27] 翟一然, 王勤耕, 宋媛媛. 长江三角洲地区能源消费大气污染物排放特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(9): 1574-1582.
Zhai Y R, Wang Q G, Song Y Y. Air pollutant emissions from energy consumptions in the Yangtze River Delta region [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(9): 1574-1582.

[28] 中华人民共和国环境保护部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2014-12-31.

[29] 张强, Klimont Z, Streets D G, 等. 中国人为源颗粒物排放模型及 2001 年排放清单估算[J]. 自然科学进展, 2006, **16**(2): 223-231.

[30] 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.

[31] 张楚莹, 王书肖, 赵瑜, 等. 中国人为源颗粒物排放现状与趋势分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 1881-1887.
Zhang C Y, Wang S X, Zhao Y, *et al*. Current status and future prospects of anthropogenic particulate matter emissions in China [J]. Environmental Science, 2009, **30**(7): 1881-1887.

[32] 生态环境部办公厅. 关于征求《钢铁企业超低排放改造工作方案(征求意见稿)》意见的函[EB/OL]. https://wemedia.ifeng.com/60893650/wemedia.shtml, 2018-05-07.

[33] 河南省人民政府办公厅. 河南省 2018 年大气污染防治攻坚战工作方案(征求意见稿)[EB/OL]. http://www.0375.gov.cn/zhengcefagui/henandifangfagui/2017/1220/414.html, 2017-12-20.

[34] 河南省人民政府办公厅. 河南省人民政府办公厅关于印发河南省 2018 年大气污染防治攻坚战实施方案的通知[EB/OL]. https://www.henan.gov.cn/2018/02-23/249520.html, 2018-02-06.

[35] DB41/1424-2017, 燃煤电厂大气污染物排放标准[S].

[36] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm, 2018-06-27.

[37] 李小龙, 周道斌, 段玖祥, 等. 超低排放下燃煤电厂颗粒物排放特征分析研究[J]. 中国环境监测, 2018, **34**(3): 45-50.
Li X L, Zhou D B, Duan J X, *et al*. Characteristics of particle emission from coal-fired power plants under the ultra low emission standard[J]. Environmental Monitoring in China, 2018, **34**(3): 45-50.

[38] GB 28664-2012, 炼钢工业大气污染物排放标准[S].

[39] GB 4915-2013, 水泥工业大气污染物排放标准[S].

[40] GB 16171-2012, 炼焦化学工业污染物排放标准[S].

[41] GB 25465-2010, 铝工业污染物排放标准[S].

[42] GB 26453-2011, 平板玻璃工业大气污染物排放标准[S].

[43] GB 25464-2010, 陶瓷工业污染物排放标准[S].

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 5

May 15, 2019

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016 ····· ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, *et al.* (1999)

Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering ····· WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)

Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1 534 m) in Central East China ····· SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, *et al.* (2019)

Concentration Characteristics and Source Analysis of $PM_{2.5}$ During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang ····· YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, *et al.* (2027)

Scenario Analysis of $PM_{2.5}$ Concentration Targets and Milestones in China ····· HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, *et al.* (2036)

$PM_{2.5}$ Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang ····· DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, *et al.* (2043)

Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City ····· ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, *et al.* (2052)

Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs)in the Urban Area of Nanjing, China ····· QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, *et al.* (2062)

Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City ····· LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, *et al.* (2069)

Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees ····· LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, *et al.* (2078)

Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China ····· HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, *et al.* (2086)

Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments ····· LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, *et al.* (2094)

Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China ····· FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, *et al.* (2101)

Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China ····· CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, *et al.* (2115)

Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin ····· YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, *et al.* (2122)

Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment ····· HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, *et al.* (2132)

Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo ····· ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, *et al.* (2143)

Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir ····· QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, *et al.* (2152)

Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m ····· LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, *et al.* (2160)

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods ····· LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, *et al.* (2170)

Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin ····· LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)

Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River ····· XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, *et al.* (2186)

Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed ····· JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, *et al.* (2194)

Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin ····· ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, *et al.* (2202)

Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area ····· MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, *et al.* (2211)

Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland ····· LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, *et al.* (2219)

Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands ····· FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, *et al.* (2226)

Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments ····· HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, *et al.* (2234)

Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai ····· WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, *et al.* (2240)

Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China ····· WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, *et al.* (2249)

Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification ····· LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (2258)

Allelopathic Effects and Allelochemicals of *Myriophyllum elatinoides* on *Microcystis aeruginosa* and *Selenastrum capricornutum* ····· BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, *et al.* (2265)

Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite ····· FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)

Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV ····· LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)

Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites ····· HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, *et al.* (2287)

Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite ····· FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, *et al.* (2295)

Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems ····· QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, *et al.* (2302)

Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control ····· WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, *et al.* (2310)

Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations ····· MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, *et al.* (2317)

Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15℃ SBBR ····· SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, *et al.* (2326)

Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of *Accumulibacter* in AO-SBR System ····· WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, *et al.* (2333)

Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics ····· YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, *et al.* (2341)

Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria ····· LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, *et al.* (2349)

Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater ····· HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, *et al.* (2357)

Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants ····· QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, *et al.* (2368)

Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain ····· WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, *et al.* (2375)

Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes ····· LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, *et al.* (2382)

Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System ····· LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, *et al.* (2394)

Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH_4 Emissions from a Vegetable Field ····· NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, *et al.* (2404)

Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods ····· WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, *et al.* (2413)

Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas ····· TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, *et al.* (2426)

Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil ····· ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, *et al.* (2435)

Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi ····· SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, *et al.* (2443)

Remediation Potential of *Ageratum conyzoides* L. on Cadmium Contaminated Farmland ····· ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, *et al.* (2453)

Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting *Lactuca sativa* L. ····· JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, *et al.* (2460)

Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil ····· SHU Xin, LI Yan, LI Feng, *et al.* (2471)

Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant ····· LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, *et al.* (2483)