

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

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

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848)	《环境科学》征稿简则 (4990)
信息 (5188, 5216, 5236)	

我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征

温杰¹, 杨佳美¹, 李蒲², 郁佳², 吴建会^{1*}, 田瑛泽¹, 张进生¹, 史国良¹, 冯银厂¹

(1. 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 300071; 2. 武汉市环境监测中心, 武汉 430015)

摘要: 鉴于我国钢铁行业排放颗粒物源成分谱数量不足, 有待更新的现状, 致力于服务精细化颗粒物源解析的需求, 采用稀释通道系统对武汉市某钢铁公司的3个主要工艺环节(烧结、炼钢、炼铁)排放源进行了采样。构建了3类PM_{2.5}源成分谱及3类PM₁₀成分谱, 对源谱主要化学组分特征进行了研究, 并与国内其他区域已有的钢铁行业源谱研究进行了对比。结果表明: ①烧结工艺源成分谱中, SO₄²⁻、Al 和 NH₄⁺ 等含量高, PM_{2.5}源谱中质量分数依次为22.2%、4.5%和3.5%, PM₁₀源谱中依次为36.0%、5.2%和2.7%, 炼铁工艺Fe元素含量最高, 在PM_{2.5}源谱和PM₁₀源谱中分别达到28.3%和24.5%, 炼钢工艺源谱Ca、Fe元素等为主要组分; ②元素组分中, 烧结工艺S元素含量最高, 地壳元素在PM₁₀源谱中含量更高, 炼铁工艺Pb、Cr等重金属含量偏高, 炼钢工艺Cr富集; ③源谱之间分歧系数的计算显示, 同类工艺粗细粒径源谱相似性偏高, 烧结工艺与其他两类工艺源谱之间差异性较高, 炼钢工艺与炼铁工艺差异性较低。同国内其他区域研究源谱相比, 发现Fe、Si和Ca等为钢铁行业排放颗粒物中标识性组分, 而碳组分和SO₄²⁻等组分特征随生产方式、除污设备等不同表现出不同特征。

关键词: 钢铁行业; PM_{2.5}; PM₁₀; 源成分谱; 工艺源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4885-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804007

Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China

WEN Jie¹, YANG Jia-mei¹, LI Pu², YU Jia², WU Jian-hui^{1*}, TIAN Ying-ze¹, ZHANG Jin-sheng¹, SHI Guo-liang¹, FENG Yin-chang¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Wuhan Environmental Monitoring Center, Wuhan 430015, China)

Abstract: Considering the lack of numbers and updates of particulate matter (PM) source profiles, which show PM emitted from the Chinese iron and steel industry, a dilution tunnel system was used to sample PM discharged from the three main processes (sintering, puddling, and steelmaking) of an iron and steel company in Wuhan, China. Six source profiles for fine and coarse PM were established, and their characteristics were researched. The main conclusions were as follows: ① For the sintering source profiles, SO₄²⁻, Al, and NH₄⁺ were the dominant components, with mass fractions of 22.2%, 4.5%, and 3.5% in the PM_{2.5} profile and 36.0%, 5.2%, and 2.7% in the PM₁₀ profile, respectively. Fe was abundant in puddling source profiles, the mass fractions of which reached 28.3% and 24.5% for PM_{2.5} profile and PM₁₀ profile, respectively. As for steelmaking, the main components were Ca and Fe. ② For the element component features, S was enriched in the sintering source profiles. Metal elements, such as Pb and Cr, were more abundant in the puddling source profiles. ③ The coefficients of divergence for profiles were calculated. Profiles of different sizes for the same processes showed similarities, whereas the diversities between the sintering and the other two profiles were higher. ④ Compared with research in other regions, similarities and differences were found and analyzed.

Key words: iron and steel industry; PM_{2.5}; PM₁₀; source profile; process sources

近年来,我国区域性雾-霾天气频发,空气污染形势较为严峻^[1],已经对大气环境质量^[2]、人体健康^[3]和气候变化^[4]产生了一定影响。工业生产是导致颗粒物污染形成的一类不容忽视的污染源^[5],而钢铁行业作为我国经济发展的支柱产业,其各工艺环节也成为我国京津冀地区^[6]、华中地区^[7]等区域的重要污染源。钢铁行业生产工序复杂,主要包括

焦化、烧结、炼铁、炼钢和轧钢等,较高的能耗导致烟粉尘等大量的污染物排放^[8,9],而其颗粒物化学组成特征和粒径分布也因工艺繁杂排放特征复

收稿日期: 2018-04-02; 修订日期: 2018-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41775149); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 温杰(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染防治, E-mail: wj9312@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: envwujh@nankai.edu.cn

杂, 有较高的研究价值.

颗粒物源成分谱(源谱)作为污染源的“指纹”, 能够表征源类排放颗粒物的化学组成特征^[10]. 另外, 源成分谱还可作为 CMB 模型的输入数据, PMF 模型解析因子的依据和计算排放清单的基础^[11], 是大气颗粒物来源解析的重要基础数据. 近年来, 我国学者对于源成分谱的研究逐渐重视, 却仍然相对缺乏, 并且主要集中在扬尘源^[12]、燃煤源^[13]以及机动车排放尾气源等^[14]污染源类. 对于钢铁行业复杂工艺环节排放的颗粒物, 近年来国内外学者对该行业颗粒物源成分谱的构建与研究陆续展开, Guo 等^[15]利用自主开发的两级颗粒物撞击器对中国北方 6 家典型钢铁企业的各类工艺过程进行 PM_{2.5}、PM₁₀的采集, 并构建了多类颗粒物源成分谱; 郑玫等^[16]采用北京大学团队自主研发的等速追踪固定源稀释通道采样器, 对上海市某钢铁企业的烧结工艺所排放 PM_{2.5}进行了采集与分析, 构建烧结工艺源成分谱; 张进生等^[17]选用荷电低压撞击器 (electrical low pressure impactor, ELPI) 对包头市、常州市 2 家钢铁企业的烧结工艺与炼铁工艺所排放颗粒物进行采集, 并分析颗粒物中碳组分特征. 然而对于我

国华中地区钢铁行业排放颗粒物特征的研究比较缺乏, 涉及多工艺、多粒径段的源成分谱构建工作仍需展开.

本研究采用稀释通道系统对我国武汉市典型钢铁行业的工艺过程源进行采样, 建立了钢铁行业三大工艺——包括烧结、炼铁和炼钢工艺在内的 PM_{2.5}与 PM₁₀成分谱, 探究各工艺排放源所排放颗粒物的化学组成特征, 以期为颗粒物的来源解析提供数据参考, 并为钢铁行业后续的环境管理提供实践建议.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样厂区为武汉某钢铁厂, 共采集了 3 类工艺过程源共计 24 个样品(表 1). 采样使用的仪器设备为便携式稀释通道采样器(陕西正大环保科技有限公司, PDSI-01P 型). 采样过程中实现一组 4 张滤膜同时采集, 保持稀释倍数为 1:5, 采样流量各通道均控制在 8.3 L·min⁻¹. 所选的采样点为大型完善的锅炉, 实际采样中, 天气良好, 无雨雪天气, 运行工况稳定, 样品可以代表各工艺过程源的排放颗粒物. 图 1 为采样器示意.

表 1 钢铁厂各工艺环节采样信息

Table 1 Information of iron and steel industry processes

工艺名称	采样位置	样品数	采样平台位置	除尘设施	脱硫设施
烧结	脱硫后烟囱排放口(机尾)	8	35 m	静电除尘 + 布袋除尘	旋转喷钙法
炼铁	除尘设备后烟囱排放口	8	8 m	布袋	无
炼钢	脱硫后排放口	8	地面	布袋	炉内喷钙(石灰石)

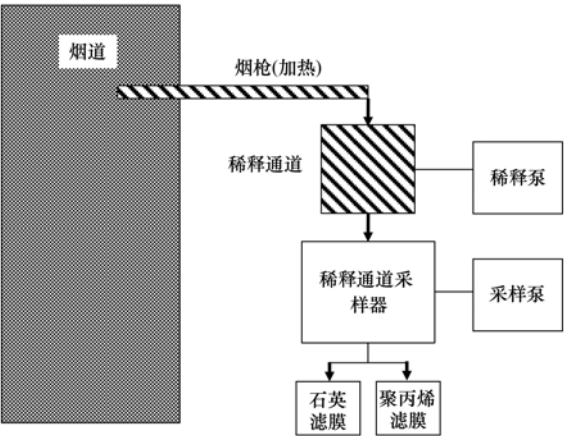


图 1 便携式稀释通道采样器 (PDSI-01P 型) 采样示意

Fig. 1 Schematic of sampling process used by the portable dilution tunnel sampler (PDSI-01P)

1.2 样品分析

采样滤膜选用 47 mm 的石英滤膜和聚丙

烯滤膜. 采样前后滤膜均在恒温恒湿的环境中平衡 48 h, 称量工具选用百万分之一天平 (MX5, Mettler Toledo), 称量循环至少两次, 保证最终称量结果差值不超过 4 μg. 石英滤膜分析碳组分 (有机碳 OC 和元素碳 EC) 和水溶性离子组分 (NH₄⁺、Cl⁻、NO₃⁻和 SO₄²⁻). 碳组分分析方法为热光发射法 (TOR), 仪器为美国沙漠研究所研发的 Model 2001A 型热/光碳分析仪, 原理、操作及质控措施见文献[17]; 离子组分采用离子色谱法, 原理及仪器见文献[18]. 聚丙烯滤膜用来分析元素组分(本研究中包括: Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As 和 Pb), 采用等离子发射光谱法/质谱法分析, 原理及仪器见文献[6].

1.3 质量控制与质量保证

采集样品阶段, 采样前检查仪器气密性, 采样过程中注意流量调节, 保证采集流量稳定; 运输与

保存环节,使用保温冰袋运输样品,全程低温避光保存,后利用实验室 4℃ 密闭的冰箱内冷藏;平衡和称重环节,温度控制为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,湿度控制 $(50 \pm 5)\%$ RH;分析环节,每批次样品分析前使用标准溶液进行仪器校正及实验室空白测量^[19]。

2 结果与讨论

2.1 源成分谱化学组分特征

本研究中共构建钢铁行业 3 种工艺排放 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 成分谱,源谱主要组分的含量如图 2 所示。源谱中所分析的主要化学组分含量范围为 40.2% (烧结, $\text{PM}_{2.5}$) ~ 80.6% (炼钢, $\text{PM}_{2.5}$),综合而言烧结工艺源谱化学组分解释量偏低,可见此排放源排放较复杂,含有未能检测到的组分。

如图 2(a)所示,烧结工艺排放颗粒物(PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$)中, SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、Al、OC、Ca 和 Fe 等组分含量较高,且在 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 中占比情况略有差异。水溶性离子方面, SO_4^{2-} 质量分数在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中均为最高,分别达到 22.1% 和 36.0%,与 Guo 等^[15] 对于我国北方钢铁行业烧结工业颗粒物排放特征的研究结果相同,此外研究表明,烧结工艺排放颗粒物中 SO_4^{2-} 的来源,部分来自燃煤产生的 SO_2 经二次反应生成,另一部分来源经脱硫工艺后,产生的含硫浆液滴吸附在颗粒物表面^[20]; NH_4^+ 的含量其次,在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中分别达到 3.5% 和 2.7%; Cl^- 作为烧结工艺原料的标识组分^[21],在本研究中

含量较低,推测由于该钢铁厂烧结工艺除污设施到位,且布袋除尘方式能够促进 Cl^- 的吸收^[22]。碳组分方面,OC 和 EC 均表现出在小粒径段中占比更高的特征。Ca 元素的含量在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中各占到 1.8% 和 1.4%,与该工艺环节所用的脱硫工艺为旋转喷钙法有关。

对于炼铁工艺,所检测组分 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 中均是元素组分占比较高,元素组分质量加和占比达到 50.7% ($\text{PM}_{2.5}$) 和 43.2% (PM_{10}),碳其次,离子组分含量相对较低。Fe 在 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 源成分谱中均为含量最高的组分, PM_{10} 源谱中含量达到 28.3%, $\text{PM}_{2.5}$ 源谱中为 24.5%;此外, Ca、Si 和 Na 等含量较高,更易在小粒径段中富集。

炼钢工艺排放颗粒物的源成分谱信息如图 2(c)所示,其组分特征和炼铁工艺相似, Ca、Si、Al 和 Fe 等元素含量较高,炼钢工艺所用原料废钢、生铁有较大关系,且在小粒径段更富集; Ca 在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 源谱中分别占到 20.3% 和 9.4%,为含量最高的组分, Fe 在 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 中含量分别为 4.3% 和 8.2%。碳组分中 OC 为主要成分,在 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 源谱中占比均在 8.5% 上下。离子组分中 SO_4^{2-} (1.4%, $\text{PM}_{2.5}$; 1.1%, PM_{10}) 含量较低,说明炼钢工艺中炉内喷钙法脱硫设施效率较高。

2.2 源成分谱元素组分特征

各工艺环节源谱中元素组分总含量较高且具有明显特征和差异,此外,钢铁行业重金属组分的排

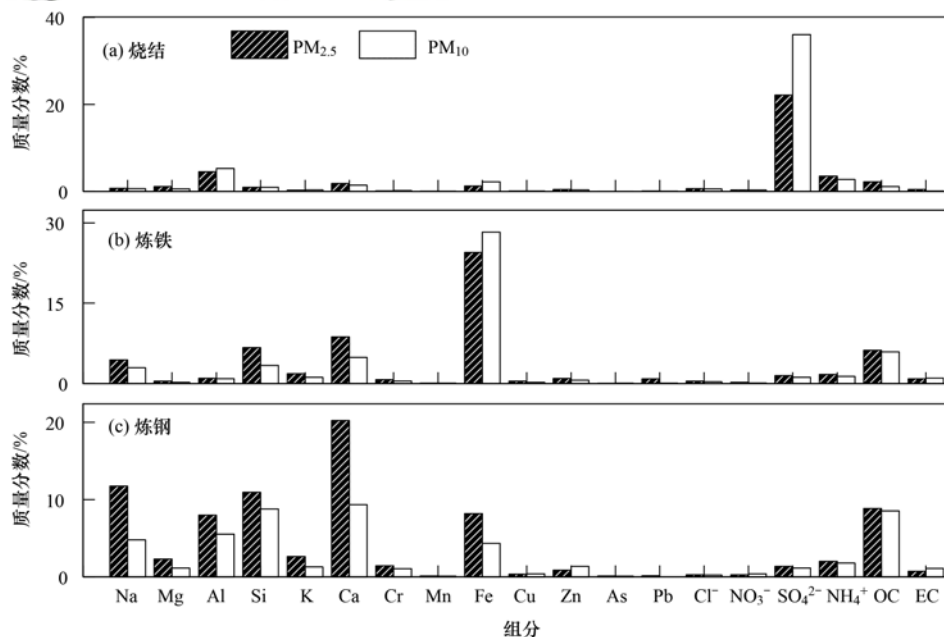


图 2 钢铁行业烧结、炼铁、炼钢工艺环节 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 源成分谱

Fig. 2 Source profiles of sintering, puddling, and steelmaking processes in the iron and steel industry

放也是研究重点. 图3为将针对工艺环节所分析元素质量浓度归一化后的结果, 并考虑S元素, 而源成分谱中选择纳入离子形式的 SO_4^{2-} , 本研究中将各元素在归一化后的质量分数表示为 $\omega(X)$ (X 为元素名称). 整体而言, 三类工艺过程排放源的排放颗粒物中的元素分布特征差异较为鲜明.

如图3(a)所示, 其中烧结工艺中 $\omega(\text{S})$ 含量最高, $\omega(\text{S}, \text{PM}_{2.5})$ 和 $\omega(\text{S}, \text{PM}_{10})$ 分别为50.3%和33.2%, PM_{10} 源成分谱中所分析元素中Si、Al、Fe等地壳元素含量相较 $\text{PM}_{2.5}$ 源谱更高, Ca在两类源谱中的含量差异不大, 除Ca外的地壳元素更易在

大粒径段颗粒物内富集, 而S元素所表征的一次排放和二次转化后的硫酸盐在小粒径段颗粒中更易富集, 也使得细颗粒物对人体健康和气候变化危害更大^[23]. 对于重金属元素, 含量在 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 源谱中分别达到3.2%和3.8%.

炼铁工艺源谱中主要元素由Fe为主的地壳元素构成, $\omega(\text{Fe}, \text{PM}_{2.5})$ 和 $\omega(\text{Fe}, \text{PM}_{10})$ 含量最高, 分别为46.2%和63.0%; $\text{PM}_{2.5}$ 源谱中, $\omega(\text{Ca})$ 、 $\omega(\text{Si})$ 和 $\omega(\text{Na})$ 分别为16.5%、12.7%和8.3%, 在 PM_{10} 源谱中, 3种元素的质量分数依次是10.8%、7.5%和6.5%, 而S元素的质量分数均在4.0%上下; 重金属

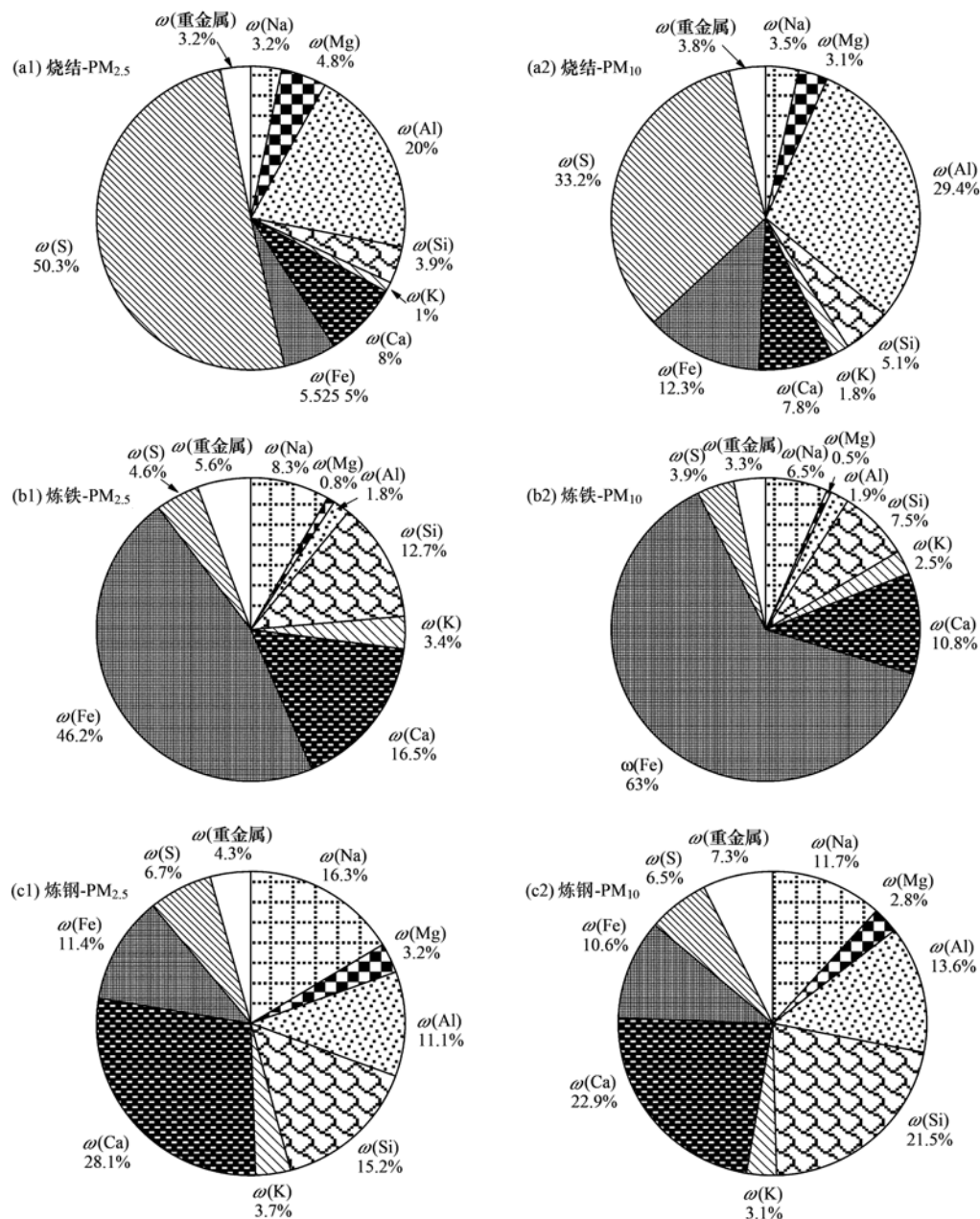


图3 各工艺环节排放颗粒物源谱中元素组分分布

Fig. 3 Chemical element distributions of source profiles

元素方面,炼铁工艺 $\text{PM}_{2.5}$ 源谱中 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 分别达到 1.6% 和 1.4%, 与其他工艺环节相比偏高, 可见该环节重金属污染相对较高。

炼钢工艺环节排放的颗粒物各元素含量分布比较均匀, 如图 3(c) 所示, $\text{PM}_{2.5}$ 源成分谱中, 含量较高的组分的质量分数 $\omega(\text{Ca})$ 、 $\omega(\text{Si})$ 、 $\omega(\text{Fe})$ 、 $\omega(\text{Na})$ 和 $\omega(\text{Al})$ 依次为 28.1%、16.3%、15.2%、11.4% 和 11.1%, 在 PM_{10} 源谱中, 以上元素的质量分数依次为, 19.5%、18.4%、9.1%、10.0% 和 11.6%, 地壳类元素含量较高。对于重金属元素, 炼钢环节颗粒物中的 Cr 在所测元素组分中含量达到 2.0% 和 1.4%, 在 3 种工艺过程排放源中水平较高。

2.3 源成分谱对比

分歧系数(CD 值)可以将不同成分谱中组分含量标准化, 从而来比较成分谱之间的相似性与差异性, CD 值的计算公式:

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{x_{ij}^2 - x_{jk}^2}{x_{ij} + x_{jk}}} \quad (1)$$

式中, CD_{jk} 为比较第 j 类源成分谱和第 k 类源成分

定义的分歧系数, x_{ij} 为第 j 类成分谱第 i 种组分的含量, p 为纳入计算组分的数量, CD 值越趋近于 0, 表明成分谱越相似。纳入计算的组分有, Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Pb、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、OC 和 EC。本研究中参考文献 [24] 中阈值的设定, 即若 $CD > 0.6$, 源成分谱之间差异性较大; 若 $0.3 < CD < 0.6$, 源成分谱之间差异性一般; 若 $CD < 0.3$, 表明成分谱之间具有一定相似性。表 3 为 6 种污染源成分谱的分歧系数, 结果显示, 同种污染源不同粒径的源成分谱具有一定相似性, 其中烧结 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 相似性最高, CD 值达到 0.22, 炼钢与炼铁工艺 PM_{10} 源谱比对后 CD 值均在 0.3 上下。不同工艺的相异性较高, 程度略有差异。其中, 烧结源成分谱同其他两类工艺的 CD 值在 0.57~0.67 范围内, 烧结 PM_{10} 与炼钢 $\text{PM}_{2.5}$ 、炼钢 PM_{10} 的 CD 值分别达到 0.66 和 0.67, 差异程度显著, 而通过计算后炼铁工艺与炼钢工艺比对的 CD 值在 0.40~0.48 范围内, 可见三类工艺排放的颗粒物中, 炼钢与炼铁工艺的颗粒物组分特征相对更为接近。

表 3 源成分谱间的分歧系数(CD 值)
Table 3 Coefficients of divergence between paired source profiles

	烧结 $\text{PM}_{2.5}$	烧结 PM_{10}	炼铁 $\text{PM}_{2.5}$	炼铁 PM_{10}	炼钢 $\text{PM}_{2.5}$	炼钢 PM_{10}
烧结 $\text{PM}_{2.5}$	0.00					
烧结 PM_{10}	0.22	0.00				
炼铁 $\text{PM}_{2.5}$	0.61	0.63	0.00			
炼铁 PM_{10}	0.57	0.59	0.31	0.00		
炼钢 $\text{PM}_{2.5}$	0.63	0.66	0.40	0.45	0.00	
炼钢 PM_{10}	0.64	0.67	0.42	0.48	0.32	0.00

比较本研究与我国其它地区钢铁行业排放颗粒物建立的源成分谱, 结果如表 4 所示, 发现各研究得到的主要化学成分有共性也有一定差异, 差异与原料种类、生产方式、除污设备及研究者所用的采样分析方法有关^[25]。对比烧结工艺源成分谱差异, 元素中的 Ca 和 Pb、离子中的 Cl^- 含量与其他地区相比较低, 而 SO_4^{2-} 相比更高, Ca 组分含量高是由于该烧结工艺旋转喷钙法脱硫的存在, SO_4^{2-} 质量分数偏高的情况说明该脱硫设施有待进一步改进。而通过对比炼铁工艺源谱可以发现, Fe 元素与其他地区源谱差异较大, Si、Ca 等地壳元素在本研究中偏高, SO_4^{2-} 偏低。炼钢工艺表现为, Fe 元素较低, Si、Ca 和 OC 等相较更高。

综合来看, 钢铁行业排放颗粒物中的主要化学组分包括 Fe、Si 和 Ca 等, 碳组分和 SO_4^{2-} 组分由工

业生产方式及除污设备的不同而略有差异。

3 结论

(1) 利用稀释通道采样法对钢铁行业主要工艺排放颗粒物进行采集, 并分析主要化学组分, 建立 6 类污染源成分谱, 通过研究发现各源类的组分特征。6 种源谱所测主要组分质量分数的解释量为 40.2%~80.6%, 烧结工艺排放的 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、Al、OC 和 Ca 等成为主要化学组分, SO_4^{2-} 在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 源谱中含量分别达到 22.1% 和 36.0%, NH_4^+ 含量其次, 占比为 3.5% ($\text{PM}_{2.5}$) 和 2.7% (PM_{10}), 而 Cl^- 质量分数较低; 炼铁工艺元素组分含量较高, 以 Fe 为代表, 占比达到 24.5% ($\text{PM}_{2.5}$) 和 28.3% (PM_{10}); 炼钢工艺源谱中主要是 Ca、Si、Al 和 Fe 等地壳元素, OC 含量较高, 在 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10}

表 4 不同地区钢铁行业源成分谱中主要组分的质量分数¹⁾/%

Table 4 Main chemical composition of source profiles for the iron and steel industry in different regions in China/%

工艺	项目	Fe	Si	Ca	Pb	OC	EC	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	文献
烧结	武汉 PM _{2.5}	1.2	0.9	1.8	0.1	2.2	0.4	3.5	22.1	0.6	本研究
	武汉 PM ₁₀	2.2	0.9	1.4	0.1	1.1	0.1	2.7	36.0	0.5	本研究
	北方某城 PM _{2.5}	2.7	0.1	16.5	3.3	6.0	0.3	8.9	13.0	23.2	[15]
	北方某城 PM ₁₀	8.3	0.2	14.0	3.0	5.0	0.2	7.6	12.4	23.2	[15]
	上海 PM _{2.5}	1.2	—	12.7	3.6	13.0	—	1.7	22.8	20.0	[16]
	贵阳 PM _{2.5}	37.2	20.3	3.5	0.5	1.9	0.0	—	0.0	0.0	[25]
炼铁	武汉 PM _{2.5}	24.5	6.7	8.7	0.8	6.2	0.8	1.7	1.5	0.4	本研究
	武汉 PM ₁₀	28.3	3.4	4.8	0.1	5.9	1.0	1.3	1.1	0.3	本研究
	北方某城 PM _{2.5}	62.9	1.0	2.5	0.3	4.0	4.2	2.3	7.1	1.6	[15]
	北方某城 PM ₁₀	64.2	1.0	2.7	0.3	4.2	3.9	1.7	6.6	1.3	[15]
	北方某城 PM _{2.5}	9.3	3.5	7.7	0.1	16.4	7.0	5.5	10.6	5.3	[10]
炼钢	武汉 PM _{2.5}	8.2	11.0	20.3	0.2	8.8	0.7	2.0	1.4	0.3	本研究
	武汉 PM ₁₀	4.3	8.8	9.3	0.0	8.6	1.1	1.8	1.1	0.2	本研究
	北方某城 PM _{2.5}	72.7	1.2	7.0	0.5	0.3	0.0	0.0	0.8	2.3	[16]
	北方某城 PM ₁₀	64.1	1.2	9.3	0.4	0.2	0.0	0.0	8.0	1.7	[16]
钢铁行业	河北石家庄	26.2	16.8	9.0	—	4.9	0.1	—	2.6	0.8	[26]
	辽宁抚顺	31.8	—	8.6	0.2	1.9	6.4	—	—	—	[27]
	浙江宁波	37.2	0.4	2.1	1.3	0.0	0.0	0.0	1.5	5.9	[28]

1) “—”表示未检出

中均占到 8.5% 上下。

(2) 对各工艺排放颗粒物中元素组分, 包括重金属元素的研究结果显示, 烧结工艺 S 元素含量最高, $\omega(\text{S}, \text{PM}_{2.5})$ 和 $\omega(\text{S}, \text{PM}_{10})$ 分别达到 50.3% 和 33.2%; 炼铁工艺排放颗粒物的元素中, Fe 较为富集, 且 Pb、Cr 等重金属相较于其它源谱含量较高; 同时炼钢工艺排放 Cr 的水平相对较高。

(3) 通过源成分谱两两之间分歧系数的计算, 发现同类工艺的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 源成分谱相似性较高, 而烧结工艺与炼铁、炼钢工艺差异性显著, 炼钢与炼铁工艺的源谱差异性不大。而国内源成分谱研究的比对结果显示, 钢铁行业排放颗粒物标识性组分包括 Fe、Si 和 Ca 等, 而碳组分、SO₄²⁻ 等组分的差异源于原料种类、生产方式以及除污设备等条件。

参考文献:

[1] 贺泓, 王新明, 王跃思, 等. 大气灰霾追因与控制[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 344-352.
He H, Wang X M, Wang Y S, et al. Formation mechanism and control strategies of haze in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(3): 344-352.

[2] Li M H, Fan L C, Mao B, et al. Short-term exposure to ambient fine particulate matter increases hospitalizations and mortality in COPD: a systematic review and meta-analysis[J]. Chest, 2016, 149(2): 447-458.

[3] Russell A G, Brunekreef B. A focus on particulate matter and health[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43

(13): 4620-4625.

[4] Wang Y, Zhang R Y, Saravanan R. Asian pollution climatically modulates mid-latitude cyclones following hierarchical modelling and observational analysis[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3098.

[5] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴 2016[J]. 北京: 中国统计出版社, 2016.

[6] Bi X H, Feng Y C, Wu J H, et al. Source apportionment of PM₁₀ in six cities of northern China[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(5): 903-912.

[7] 邱婷, 周家斌, 肖经汗, 等. 武汉市秋、冬季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(4): 17-20.
Qiu T, Zhou J B, Xiao J H, et al. Characteristics and sources apportionment of water-soluble ions in PM_{2.5} in autumn and winter of Wuhan[J]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37(4): 17-20.

[8] Watson J G, Chow J C, Lowenthal D H, et al. Simulating changes in source profiles from coal-fired power stations: use in chemical mass balance of PM_{2.5} in the Mount Zirkel wilderness[J]. Energy Fuels, 2002, 16(2): 311-324.

[9] Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, et al. Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(6): 1861-1867.

[10] 刘亚勇, 张文杰, 白志鹏, 等. 我国典型燃煤源和工业过程源排放 PM_{2.5} 成分谱特征[J]. 环境科学研究, 2017, 30(12): 1859-1868.
Liu Y Y, Zhang W J, Bai Z P, et al. Characteristics of PM_{2.5} chemical source profiles of coal combustion and industrial process in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(12): 1859-1868.

- [11] Simon H, Beck L, Bhawe P V, *et al.* The development and uses of EPA's SPECIATE database [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2010, **1**(4): 196-206.
- [12] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1799-1806.
Wu Y Y, Li R M, Peng L, *et al.* Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1799-1806.
- [13] 王亚虹, 张鹏, 宋文斌, 等. 西安市PM_{2.5}燃煤源谱特征研究[J]. *环境科学与管理*, 2017, **42**(4): 46-51.
Wang Y H, Zhang P, Song W B, *et al.* Study on PM_{2.5} characteristics of coal source profiles in Xi'an City [J]. *Environmental Science and Management*, 2017, **42**(4): 46-51.
- [14] 石爱军, 马俊文, 耿春梅, 等. 北京市机动车尾气排放PM₁₀组分特征研究[J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(4): 44-49.
Shi A J, Ma J W, Geng C M, *et al.* Characteristics of chemical composition of particulate matter (PM₁₀) from Beijing vehicle [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(4): 44-49.
- [15] 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.
- [16] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 上海PM_{2.5}工业源谱的建立[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(8): 1354-1359.
Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, *et al.* Establishing PM_{2.5} industrial source profiles in Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(8): 1354-1359.
- [17] 张进生, 吴建会, 马咸, 等. 钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3102-3109.
Zhang J S, Wu J H, Ma X, *et al.* Characteristics research on carbonaceous component of particulate matter emitted from iron and steel industry [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3102-3109.
- [18] Wu L, Feng Y C, Wu J H, *et al.* Secondary organic carbon quantification and source apportionment of PM₁₀ in Kaifeng, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(10): 1353-1362.
- [19] Liu B S, Song N, Dai Q L, *et al.* Chemical composition and source apportionment of ambient PM_{2.5} during the non-heating period in Taian, China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **170**: 23-33.
- [20] 孙英明, 吴建会, 马咸, 等. 烧结工艺颗粒物中水溶性离子排放特性分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2270-2274.
Sun Y M, Wu J H, Ma X, *et al.* Emission characteristics of water-soluble ions in the particulate matters from sintering process [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2270-2274.
- [21] Zhan G, Guo Z C. Basic properties of sintering dust from iron and steel plant and potassium recovery [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(6): 1226-1234.
- [22] de P Pablo-Romero M, Román R, Limón J M G, *et al.* Effects of fine particles on children's hospital admissions for respiratory health in Seville, Spain [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015, **65**(4): 436-444.
- [23] Li Y, Schwandner F M, Sewell H J, *et al.* Observations of ammonia, nitric acid, and fine particles in a rural gas production region[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **83**: 80-89.
- [24] Pinto J P, Lefohn A S, Shadwick D S. Spatial variability of PM_{2.5} in urban areas in the United States[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2004, **54**(4): 440-449.
- [25] 王珍, 郭军, 陈卓. 贵阳市PM_{2.5}主要污染源成分谱分析[J]. *安全与环境学报*, 2016, **16**(2): 346-351.
Wang Z, Guo J, Chen Z. Analysis of the source componential spectrum of PM_{2.5} emission in Guiyang[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16**(2): 346-351.
- [26] 齐堃, 戴春岭, 冯媛, 等. 石家庄市PM_{2.5}工业源成分谱的建立及分析[J]. *河北工业科技*, 2015, **32**(1): 78-84.
Qi K, Dai C L, Feng Y, *et al.* Establishment and analysis of PM_{2.5} industrial source profiles in Shijiazhuang City[J]. *Hebei Journal of Industrial Science & Technology*, 2015, **32**(1): 78-84.
- [27] 金永民. 抚顺市大气颗粒物主要排放源的成分谱研究[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(2): 58-61.
Jin Y M. Study on elements spectral from main source of TSP in Fushun City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, **23**(2): 58-61.
- [28] 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 宁波市环境空气中PM₁₀和PM_{2.5}来源解析[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(5): 549-555.
Xiao Z M, Bi X H, Feng Y C, *et al.* Source apportionment of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in urban area of Ningbo City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(5): 549-555.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)