

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思	(2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清	(2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹	(2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文	(2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰	(2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲	(2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾	(2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚	(2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛蒲萱, 黄韬, 高宏, 马建民	(2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹	(2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄	(2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊	(2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮	(2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水	(2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富	(2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林	(2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民	(2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹	(2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮	(2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容	(2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江	(2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯	(2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽	(2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓	(2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛	(2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜	(2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静	(2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源磷的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧	(2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡	(2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋	(2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏	(2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平	(2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷	(2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然	(2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国	(2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激	(2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun	(2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳	(2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔	(2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽	(2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚	(2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳	(2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉	(2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌	(2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕	(2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞	(2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰	(2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑	(2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳	(2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇	(2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军	(2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌	(2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩	(2948)
污泥四要素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳	(2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)	信息 (2646, 2656, 2857)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征

余卓君¹, 吴建会^{1*}, 张裕芬¹, 张进生¹, 冯银厂¹, 李蒲²

(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 300350; 2. 武汉市环境监测中心, 武汉 430015)

摘要: 本研究采用静电低压撞击器(ELPI)采集垃圾焚烧厂排放颗粒物, 分析颗粒物中元素和碳组分, 对其中 OC、EC 和重金属元素在 14 个粒径段的粒径特征进行分析, 并建立了垃圾焚烧厂源 PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的元素和碳组分成分谱, 以期对精细化来源解析提供参考. 结果表明, 垃圾焚烧厂排放颗粒物的主要组分有 Al、Si、S、Ca、Cr、Fe、OC 和 EC 等(质量分数 ≥ 1%), 其中 OC 和 Ca 的含量较高, 在 PM_{2.5} 中的质量分数分别为 10.15% 和 12.37%; 重金属含量 Cr > Pb > Zn > Mn > Cu > Cd > Ni, 其中 Cr 和 Pb 在 PM_{2.5} 中的质量分数分别为 1.83% 和 0.74%, Cr 在 PM₁ 中的质量分数达到 3.53%; OC 在 2.39 ~ 3.99 μm 和 6.68 ~ 9.91 μm 这 2 个粒径段的含量达到峰值, 分别占 OC 总含量的 15.02% 和 20.45%, 但在细颗粒物中的含量高于在粗颗粒物中的含量, EC 在细颗粒物中的含量远高于在粗颗粒物中的含量, 在 0.382 ~ 0.613 μm 粒径段占 14.8%; Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 等重金属元素主要富集于细颗粒中.

关键词: 垃圾焚烧; 颗粒物; 碳组分; 重金属; 粒径分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2533-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201810054

Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant

YU Zhuo-jun¹, WU Jian-hui^{1*}, ZHANG Yu-fen¹, ZHANG Jin-sheng¹, FENG Yin-chang¹, LI Pu²

(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 300350, China; 2. Wuhan Environmental Monitoring Center, Wuhan 430015, China)

Abstract: There are few analyses on the components of particulate matter emitted from waste incineration plants. In past studies, analyses of particle size distribution characteristics of the components were mainly targeted at particles with larger particle sizes. An electrical low pressure impactor (ELPI) was used in this study to collect the particulate matter emitted from a waste incineration plant, and the elements and carbonaceous components of these samples were analyzed. The particle size characteristics of organic carbon (OC), elemental carbon (EC), and heavy metal elements in 14 particle size segments were analyzed and composition profiles of elements and carbonaceous components of PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ from the waste incineration plant were established to provide a reference for refined source apportionment research. The results showed that the main components of the waste incineration plant included Al, Si, S, Ca, Cr, Fe, OC, EC, etc. OC and Ca were dominating components, and mass fractions of these components in the PM_{2.5} profile were 10.15% and 12.37%, respectively. The contents of heavy metals were ranked as Cr > Pb > Zn > Mn > Cu > Cd > Ni, and the mass fractions of Cr and Pb in PM_{2.5} amounted to 1.83% and 0.74%, respectively. OC in the range of 2.39-3.99 and 6.68-9.91 μm accounted for 15.02% and 20.45% of the total OC content, respectively, and the content of OC in fine particles was higher than that in coarse particles. The content of EC in fine particles was much higher than that in coarse particles, and it accounted for 14.8% in the 0.382-0.613 μm particle size. Heavy metal elements such as Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb were mainly concentrated in the fine particles.

Key words: waste incineration; particulate matter; carbonaceous components; heavy metal elements; particle size distribution

直接填埋法、堆肥法以及焚烧法是处理城市垃圾的主要方式. 由于土地资源紧张, 占地面积小而垃圾削减率高的焚烧法成为各国城市垃圾环境无害化处置的必然选择^[1,2], 发达国家城市垃圾焚烧处理率普遍在 35% ~ 40%, 一些国家甚至达到 70% 以上^[3]. 垃圾焚烧处理具有占地少、场地选择容易、处理时间短、减量化显著(减重一般达到 70%, 减容一般达到 90%)、无害化较彻底以及可回收垃圾焚烧余热等优点^[4], 但是垃圾焚烧同时会产生许多大气污染物, 主要有颗粒物(PM_{2.5}及 PM₁₀)、酸性气体(NO_x、SO₂ 和 HCl 等)、重金属及其化合物、

不完全燃烧产物(CO 等)、微量有机化合物(二噁英、呋喃等)^[5-7], 其中的重金属以及有机物中的二噁英等有较大危害. 颗粒物中的重金属不可降解, 具有毒性和生物有效性^[8,9], 高浓度重金属也会对人体产生各种急性和慢性的疾病, 如对人体的神经系统、血液组成、肺、肾、肝造成损害甚至导

收稿日期: 2018-10-11; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208501); 武汉市重大科技专项

作者简介: 余卓君(1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: 370142973@qq.com

* 通信作者, E-mail: envwujh@nankai.edu.cn

致死亡^[10]。焚烧烟气中的二噁英一旦释放至环境,将通过多介质传输路径散布于水体、大气和土壤中^[11],极易在生物体内的脂肪组织中富集^[12],对人体的许多器官和中枢、免疫和生殖系统等造成广泛的伤害。二噁英还是一种典型的内分泌干扰物,不仅对接触的人体有影响,同时还会使他们孕育的后代产生畸形。

随着我国的快速发展,城市化率不断提高,每年会产生大量的生活垃圾,当前我国城市生活垃圾的分类、回收和处理能力与水平发展还相对落后,垃圾的处理问题十分突出。在我国已有很多城市选择焚烧法处理生活垃圾,由于飞灰中可能含有重金属等有害物质,所以对于垃圾焚烧排放颗粒物及其粒径特征研究十分必要。当前对于污染源排放颗粒物中重金属及其粒径特征的研究并不多见,梁俊宁等^[13]对陕西某铅锌冶炼厂不同工艺各粒径段颗粒物中的铅元素含量及粒径分布特征进行分析;Zhang 等^[14]在湖南省株洲市对铅锌冶炼工厂排放颗粒物采样,并对其粒径分布和重金属进行分析。对于垃圾焚烧厂排放颗粒物的研究,张海龙等^[15]应用富集因子法、主成分分析法对广东某垃圾焚烧炉周边空气颗粒物中金属进行分析,发现研究区域 Fe 与 Ni、Cr、Mn、Ba 主要来自于焚烧炉释放,Zn、Cd、Pb、Bi 和 Cu 则来自于研究区域周边的交通污染源,而 Al 和 Mg 则主要来自于地壳或土壤背景值;李娜等^[16]采用筛分法研究了重庆市生活垃圾焚烧飞灰中的粒径分布,分析了各粒径颗粒中 Pb、Cd、Zn、Cu、Mn、Ni 和 Cr 等重金属的总量,结果表明,90% 以上的飞灰粒径小于 250 μm ,其中粒径为 149 ~ 250 μm 的颗粒最多,约占总量的 50%。这些研究以垃圾焚烧厂周围环境空气受体为对象,研究的颗粒物粒径较大,均在 53 μm 以上,不能详细了解垃圾焚烧实际排放颗粒物的粒径分布特征。

垃圾焚烧厂颗粒物的排放与垃圾的性质有关,还受到垃圾运动速度、空气过剩系数、烟气停留时间、炉内气体湍流度、活性炭等因素影响^[17],颗粒物中重要组分的粒径分布特征是十分重要的信息,这些因素也会对颗粒物的粒径分布造成重要影响。本研究采用静电低压撞击器(ELPI+)对垃圾焚烧厂排放颗粒物进行采集,分析颗粒物中的元素和碳组分及其在 14 个粒径段的粒径特征,并建立垃圾焚烧厂源 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的元素和碳组分成分谱,以期对颗粒物的精细化来源解析及其他相关研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取武汉市汉口某垃圾焚烧厂采集样品。该垃圾焚烧厂主要处理汉江、江岸、硚口、东西湖以及黄陂南部等江北地区的生活垃圾,日处理量 2 200 $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$,主要设备包括 4 台蒸发量为 47 $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ 的循环流化床锅炉,配套 1 台 25 MW 和 1 台 12 MW 汽轮发电机组。烟气处理采用炉外干法脱硫、SNCR 脱硝、布袋除尘和活性炭吸附技术。

采样仪器为静电低压撞击器(Dekati,芬兰),测量范围分为 14 级粒径,分别为:0.006 ~ 0.016 7、0.016 7 ~ 0.027 5、0.027 5 ~ 0.056、0.056 ~ 0.094 2、0.094 2 ~ 0.156、0.156 ~ 0.261、0.261 ~ 0.382、0.382 ~ 0.613、0.613 ~ 0.948、0.948 ~ 1.6、1.6 ~ 2.39、2.39 ~ 3.99、3.99 ~ 6.68 和 6.68 ~ 9.91 μm ,此处将 0.006 ~ 0.094 2 μm 范围之间定为 PM_{10} ,0.006 ~ 2.39 μm 范围之间定为 $\text{PM}_{2.5}$,0.006 ~ 9.91 μm 范围之间定为 PM_{10} 。在 ELPI 的收集板放置 25 mm 直径的滤膜,供后续的称重和化学分析使用。采样滤膜为特氟龙膜和石英膜(PALL,美国),分别用于颗粒物的元素、碳组分分析。

2017 年 7 月采集样品,采样点设置在排气筒检测口。采样烟气出口温度为 140℃,湿度 25% RH,烟气未经稀释直接采样,采样流量为 10 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样时长为 4 h,采样过程中全通道加热保温。

1.2 样品分析

本研究主要对垃圾焚烧源中颗粒物组分中的无机元素和碳组分进行分析。

无机元素的分析方法为电感耦合等离子体光谱法,分析仪器为 ICP-AES(ICAP7400,美国赛默飞世尔),分析的元素包括:Na、Mg、Al、Si、S、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Br、Ba、Hg 和 Pb 等。详细操作及质控参见文献[18]。

碳组分的分析方法为热光反射法(TOR),分析仪器为热/光碳分析仪(Model 2001A,美国沙漠研究所)。基本原理是在热光炉中,先通入 He 气流,在无氧的条件下程序升温,逐步加热颗粒物样品使样品中 OC 挥发,然后通入 2% O_2/He 混合气,在有氧条件下继续加热升温,使得样品中的 EC 完全氧化成 CO_2 ,然后还原成 CH_4 ,由火焰离子化检测器(FID)定量检测,进而计算 OC 和 EC 的含量^[19~23]。详细操作及质控参见文献[24]。

1.3 质量控制与质量保证

采样环节为防止高温烟气冷凝,烟枪、预切割器、收集盘以及每个管路均有加热套件或保温装置;

运输和保存环节，使用保温冰袋运输样品，在实验室4℃密闭的冰箱内冷藏；平衡和称重环节，温度控制为(20±1)℃，湿度控制为(50±5)% RH。

2 结果与讨论

本研究中构建了垃圾焚烧厂源PM₁、PM_{2.5}和PM₁₀的元素和碳组分成分谱，对颗粒物组分特征进行分析总结，并对其中OC、EC和重金属元素在14个粒径段的粒径特征进行分析，在建立成分谱的基础上进一步了解颗粒物组分的粒径分布特征，为精细化来源解析提供颗粒物粒径信息参考。

2.1 元素、碳组分成分谱特征

垃圾焚烧厂的主要组分有Al、Si、S、Ca、Cr、Fe、OC和EC等(质量分数≥1%)，如图1所示，其中OC的质量分数最高，PM₁₀中OC的质量分数达到近13.74%，PM_{2.5}中达到10.15%，PM₁中OC

的质量分数超过16.32%，可见OC在细颗粒物中的含量更高，这与Yang等^[25]的研究结果相近，与王艳等^[26]对于城市生活垃圾露天燃烧PM_{2.5}中碳组分的研究有一定差距，这主要与焚烧的燃烧方式有关，本研究中流化床焚烧炉的燃烧效率高于王艳等的研究中桶内燃烧和自然堆积燃烧的燃烧效率。Ca在PM₁₀、PM_{2.5}和PM₁中的质量分数达到12%左右，仅次于OC的含量。垃圾焚烧飞灰中Ca含量较高与垃圾中掺杂的玻璃和陶瓷等材料有关，同时与脱硫剂的添加有很大关系。其次，Si、Fe和Al等含量均在1%以上，Si和Fe在PM₁中的质量分数达到6%左右，与Yang等^[25]研究结果相近，这与垃圾中的土壤、玻璃、陶瓷和废弃铁制品等都有关系。重金属元素Cr、Zn、Pb和Mn的质量分数也相对较高，Cr在PM₁中的质量分数近4%，Pb和Zn在1%左右。

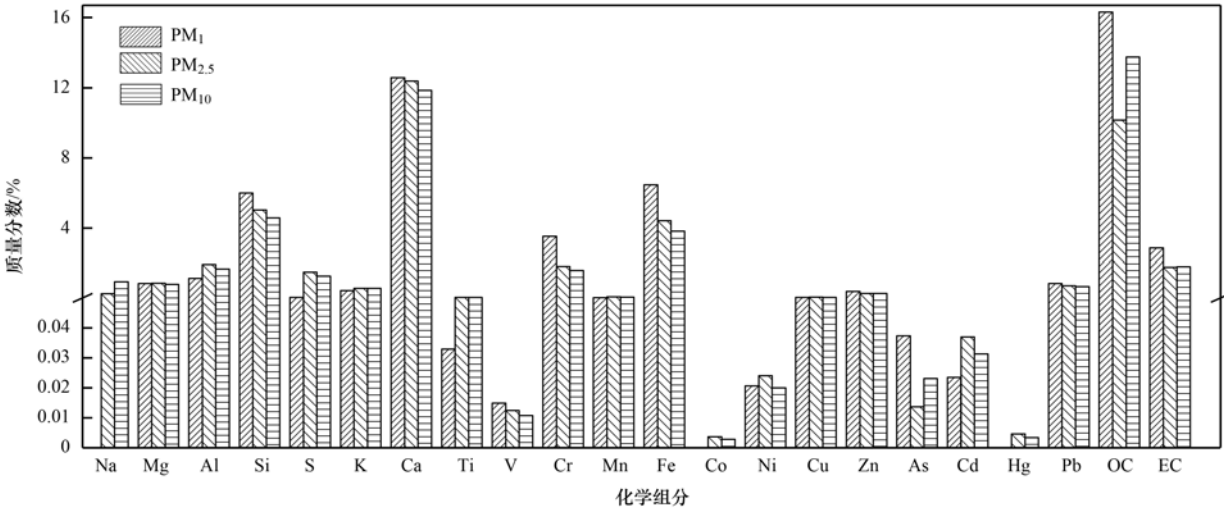


图1 垃圾焚烧厂颗粒物元素、碳组分成分谱

Fig. 1 Composition profile of elements and carbonaceous components of particulate matter from the waste incineration plant

Si、Ca、Cr、Fe、Zn、Pb、OC和EC在PM₁中的质量分数都高于在PM_{2.5}和PM₁₀中的质量分数，Si、Ca、Cr、Fe和Pb等元素在PM₁、PM_{2.5}和PM₁₀中的含量明显呈依次下降趋势。本研究中重金属含量Cr>Pb>Zn>Mn>Cu>Cd>Ni，这与李娜等^[16]、胡艳军等^[27]和朱伟等^[28]的研究结果不同，Cr在本研究中含明显高于Pb、Zn和Mn等，细颗粒物中Cr的含量高于其他重金属。王文霞等^[29]的研究表明，这是由于Ca的存在会促进Cr(VI)的生成，在Si和Al存在的情况下，CaO会与Si和Al发生反应，生成硅铝酸盐，且CaO易与氧化铬反应生成铬酸钙。

在14级粒径段中，Fe、Al、S和EC在细粒径段的含量出现峰值，Fe在0.0167~0.0275 μm和0.613~0.948 μm粒径段分别占14.14%和11.86%(表1)，Al在0.156~0.261 μm之间可达

9.51%，S在0.613~0.948 μm之间的质量分数达到5.81%；Na的含量呈现单峰分布，在6.68~9.91 μm粗粒径段达到13.81%；OC、Ca、Si、Mg、Cr和Pb在粗细粒径段都出现峰值，Ca在0.613~0.948 μm和6.68~9.91 μm粒径段分别占39.09%和44.08%，Si在1~8级中的百分比均接近5%，在0.613~0.948 μm和6.68~9.91 μm粒径段分别占12.8%和9.46%，Cr的含量在亚微米粒径段相对较高，在0.006~0.0167 μm粒径段占5.46%，其他亚微米粒径段也均超过2%，在6.68~9.91 μm粒径段达到2.25%。

2.2 颗粒物中OC、EC的粒径分布特征

垃圾焚烧厂排放颗粒物各粒径段中OC、EC占OC、EC总含量的百分比(质量分数)如图2所示。

OC在0.006~0.0167 μm粒径段的含量占

表 1 不同粒径段各化学组分所占质量分数/%

粒径/ μm	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	OC	EC
0.006~0.016 7	0.00	0.85	1.42	5.90	0.00	0.47	9.57	0.08	5.46	0.03	4.02	0.00	0.26	0.96	19.74	3.36
0.016 7~0.027 5	0.00	0.59	0.95	6.04	0.03	0.42	11.38	0.03	2.03	0.08	14.14	0.07	0.49	0.69	9.07	2.22
0.027 5~0.056	0.00	0.35	0.33	6.04	0.00	0.32	4.40	0.00	3.02	0.06	2.00	0.24	0.18	0.63	19.86	4.77
0.056~0.094 2	0.00	1.80	2.07	6.00	0.28	0.69	25.01	0.03	4.37	0.11	2.65	0.00	0.70	1.26	19.45	1.63
0.094 2~0.156	0.00	0.41	1.32	3.67	0.00	0.39	2.99	0.00	2.75	0.02	1.98	0.00	0.14	0.35	14.99	2.42
0.156~0.261	0.18	0.59	9.51	3.48	0.50	0.74	15.04	0.03	2.68	0.04	3.04	0.00	0.66	0.92	21.40	1.73
0.261~0.382	0.00	0.69	1.34	2.64	0.54	0.69	10.42	0.05	2.23	0.03	1.36	0.00	0.58	0.94	8.85	0.54
0.382~0.613	0.00	0.22	0.65	5.05	0.14	0.31	0.00	0.00	3.89	0.11	1.95	0.00	0.00	0.64	5.83	1.96
0.613~0.948	0.52	2.34	2.31	12.80	5.81	0.94	39.09	0.15	1.09	0.20	11.86	0.34	0.46	0.81	3.45	0.64
0.948~1.6	0.60	0.84	2.07	3.16	1.39	0.63	9.39	0.18	0.95	0.18	3.69	0.08	0.23	1.54	12.45	2.34
1.6~2.39	0.44	0.65	0.99	3.18	1.74	0.56	6.30	0.10	0.53	0.11	2.18	0.09	0.12	0.16	11.33	2.03
2.39~3.99	0.03	1.37	1.58	3.50	2.31	1.21	15.00	0.21	1.71	0.24	3.97	0.29	0.42	0.39	29.09	2.94
3.99~6.68	1.48	0.12	0.18	1.68	0.00	0.19	1.12	0.00	0.44	0.02	0.91	0.00	0.05	0.10	13.13	0.88
6.68~9.91	13.81	1.76	3.21	9.46	0.98	1.51	44.08	0.07	2.25	0.12	4.50	0.00	1.46	2.80	42.00	1.40
PM ₁	0.00	0.87	1.17	6.00	0.07	0.47	12.57	0.03	3.53	0.07	6.46	0.08	0.42	0.87	16.32	2.86
PM _{2.5}	0.29	0.89	1.95	5.03	1.51	0.60	12.37	0.09	1.83	0.11	4.41	0.09	0.30	0.74	10.15	1.80
PM ₁₀	0.97	0.82	1.69	4.57	1.28	0.60	11.85	0.08	1.62	0.10	3.82	0.09	0.31	0.70	13.75	1.81

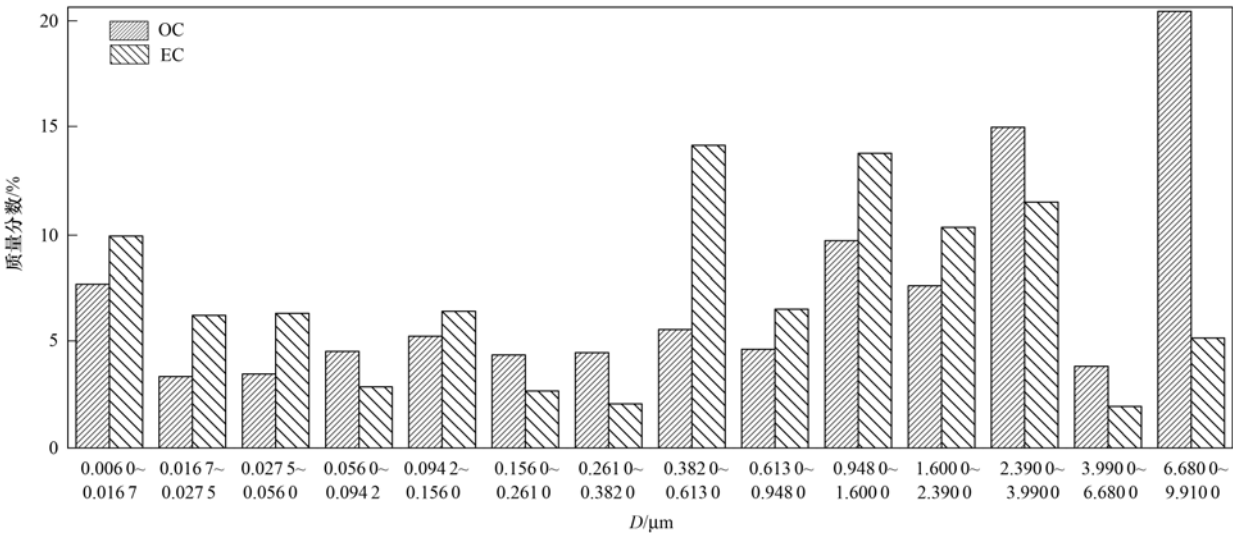


图 2 OC 和 EC 含量的粒径分布

Fig. 2 Particle size distributions of OC and EC

PM₁₀ 中 OC 总量的 7.69%，在 0.016 7~0.027 5、0.027 5~0.056、0.056~0.094 2、0.094 2~0.156、0.156~0.261、0.261~0.382、0.382~0.613 和 0.613~0.948 μm 粒径段之间，质量分数均在 4% 左右，在 0.948~1.6、2.39~3.99 和 6.68~9.91 μm 这 3 个粒径段也出现峰值，占 OC 总量的比例分别为 9.70%、15.02% 和 20.45%。PM₁ 和 PM_{2.5} 中 OC 含量占 PM₁₀ 中 OC 总量的 19.07% 和 60.70%，可见垃圾焚烧排放的颗粒物中 OC 在细颗粒物中的含量高于在粗颗粒物中的含量，但在粗颗粒物中的含量也近 40%，同样不可忽视。

EC 在细颗粒物中的含量远高于在粗颗粒物中的含量。PM₁ 和 PM_{2.5} 中 EC 含量占 PM₁₀ 中 EC 总量的 25.35% 和 81.37%，可见垃圾焚烧排放颗粒物

中 EC 主要富集于细颗粒物中。在 0.006~0.016 7、0.382~0.613 和 0.948~1.6 μm 粒径段出现峰值，分别占 EC 总量的 9.91%、14.18% 和 13.80%。

2.3 颗粒物中重金属的粒径分布特征

在 Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 等元素中，Cr、Zn 和 Pb 等重金属元素在颗粒物中的质量分数相对较高。其中 Cr 在 PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的质量分数分别为 3.53%、1.83% 和 1.62%，在 PM₁ 中的质量分数高于在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的质量分数；Zn 在 PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的质量分数分别为 0.42%、0.30% 和 0.31%；Pb 在 PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的质量分数分别为 0.87%、0.74% 和 0.70%。Mn 和 Cu 在 PM₁、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的质量分数都在 0.1% 左右。

Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 等重金属元素主要富集于细颗粒中，如表 2 所示，PM₁₀中的 Ni 和 Cd 有近 90% 存在于 PM_{2.5}中，Cr、Mn 和 Cu 也超过 80%。这是由于细颗粒物中富集了更高浓度的未燃尽碳，而碳对重金属有一定的吸附效果，根据蒸发-冷凝机制，挥发的重金属在离开焚烧区域后将经历冷凝过程，当温度低于金属及其化合

物的冷凝露点时，发生金属及其化合物的同类核化和异相吸附，由于微小尺寸颗粒比表面积较大更易富集高浓度的重金属^[30]。Cd、Zn、Pb 和 Cu 富集于细颗粒物，与邝薇等^[31]、王春峰^[32]和金晶等^[33]的研究结果一致，可能是因为酸溶态 Cd、Zn、Pb、Cu 和有机结合态 Pb 以及晶型氧化态 Pb 和 Zn 含量的增加^[34]。

表 2 PM₁、PM_{2.5}中各重金属元素占 PM₁₀中总含量的比例/%

Table 2 Proportion of each heavy metal element in PM ₁ and PM _{2.5} in relation to the total content of PM ₁₀ /%								
项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
PM ₁	31.12	9.94	14.68	13.27	19.36	22.99	10.71	17.73
PM _{2.5}	85.06	80.91	89.96	82.64	72.72	44.37	88.69	79.88

由图 3 所示，Mn 在 0.056 ~ 0.092 4 μm 粒径段存在一个峰值，该粒径段 Mn 的含量占颗粒物中 Mn 总含量的 22.73%；Ni、Cd 和 Pb 在 0.948 ~ 1.6 μm 粒径段都出现明显峰值，其中 Ni 还在 0.056 ~ 0.092 4 μm 出现峰值，Cd 和 Pb 呈现明显的单峰分布；Cu 在 0.613 ~ 0.948 μm 之间出现一个高峰，近 40% 的 Cu 富集于此粒径段；Zn 在各粒径段的含量变化较大，在 0.156 ~ 0.261、0.261 ~ 0.382 和 0.613 ~

0.948 μm 这 3 个细粒径段较高，分别可达 10.83%、10.34% 和 13.79%，在 6.68 ~ 9.91 μm 粗粒径段可达 17.66%；Cr 在 14 个粒径段上含量较为平均，均在 5% ~ 10% 之间，与金晶等^[33]、冯军会等^[34]和叶秀雅^[35]的研究结果一致。Mn、Ni、Cu 和 Cd 主要富集于 0.613 ~ 0.948、0.948 ~ 1.6 和 1.6 ~ 2.39 μm 这 3 个粒径段，在 0.613 ~ 2.39 μm 之间的含量分别可达 61.40%、50.74%、69.37% 和 51.79%。

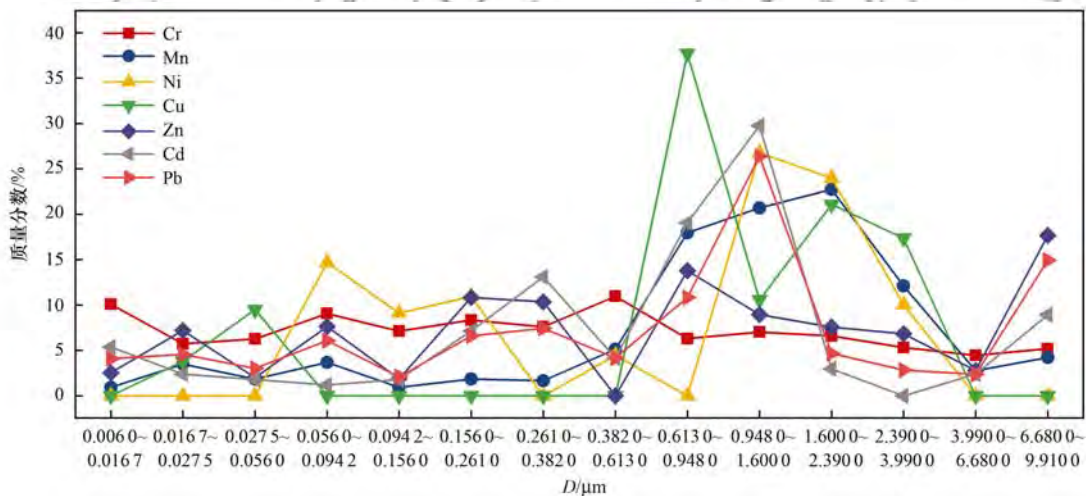


图 3 重金属元素含量的粒径分布

Fig. 3 Particle size distributions of heavy metal elements

3 结论

(1)垃圾焚烧厂排放颗粒物中 Al、Si、S、Ca、Cr、Fe、OC 和 EC 等含量较高。OC 和 Ca 的质量分数相对较高，在 PM_{2.5} 中的质量分数分别可达 10.15% 和 12.37%，OC 在细颗粒物中含量更高。重金属元素 Cr、Zn、Pb 和 Mn 的质量分数也相对较高。重金属含量 Cr > Pb > Zn > Mn > Cu > Cd > Ni，Cr 的含量在本研究中明显高于 Pb、Zn 和 Mn 等。

(2)OC 在 2.39 ~ 3.99 μm 和 6.68 ~ 9.91 μm 两个粒径段的含量占 OC 总含量的比例较高，在细

颗粒物中的含量高于在粗颗粒物中的含量，但在粗颗粒中的含量也近 40%，同样不可忽视。EC 在细颗粒物中的含量远高于在粗颗粒物中的含量。

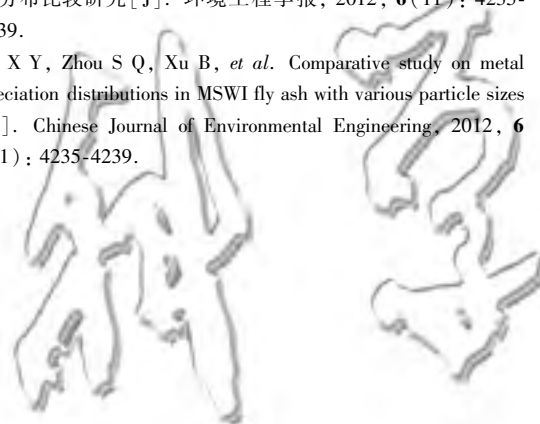
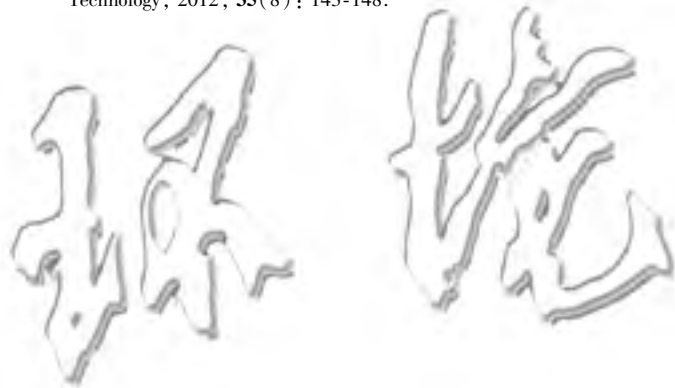
(3)由于微小尺寸颗粒比表面积较大更易富集高浓度的重金属，所以 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 等重金属元素主要富集于细颗粒中。PM₁₀中的 Ni 和 Cd 有近 90% 存在于 PM_{2.5}中，Cr、Mn 和 Cu 也超过 80%。

参考文献：

[1] 郭卫广, 刘建国, 张来, 等. 中国城市垃圾典型可行焚烧技术的综合评价[J]. 环境科学研究, 2012, 25(8): 941-946.
Guo W G, Liu J G, Zhang L, et al. A comprehensive assessment

- of typical municipal solid waste incineration technologies in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(8): 941-946.
- [2] Hu C W, Chao M R, Wu K Y, *et al.* Characterization of multiple airborne particulate metals in the surroundings of a municipal waste incinerator in Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(20): 2845-2852.
- [3] Sakai S I, Yoshida H, Hirai Y, *et al.* International comparative study of 3R and waste management policy developments [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2011, **13**(2): 86-102.
- [4] 张倩, 徐海云. 生活垃圾焚烧处理技术现状及发展建议[J]. *环境工程*, 2012, **30**(2): 79-81, 89.
- Zhang Q, Xu H Y. Status and development suggestion of incineration technology of domestic garbages[J]. *Environmental Engineering*, 2012, **30**(2): 79-81, 89.
- [5] 武桐, 曹阳, 许崇涛, 等. 垃圾焚烧大气污染物排放控制综述[J]. *工业锅炉*, 2014, (5): 28-32.
- Wu T, Cao Y, Xu C T, *et al.* Review of air pollutants control in waste incineration[J]. *Industrial Boiler*, 2014, (5): 28-32.
- [6] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [7] 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.
- [8] Limbeck A, Wagner C, Lendl B, *et al.* Determination of water soluble trace metals in airborne particulate matter using a dynamic extraction procedure with on-line inductively coupled plasma optical emission spectrometric detection [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, **750**: 111-119.
- [9] Sato K, Tamura T, Furuta N. Partitioning between soluble and insoluble fractions of major and trace elements in size-classified airborne particulate matter collected in Tokyo [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2008, **10**(2): 211-218.
- [10] Leung A O W, Duzgoren-Aydin N S, Cheung K C, *et al.* Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in southeast China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(7): 2674-2680.
- [11] U. S. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-98/137, Methodology for assessing health risks associated with multiple pathways of exposure to combustor emissions[S].
- [12] 施敏芳, 邵开忠. 垃圾焚烧烟气净化和二噁英污染物的控制技术[J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(9): 78-79.
- Shi M F, Shao K Z. Dioxins pollution control for municipal refuse incinerators [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **29**(9): 78-79.
- [13] 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 等. 铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2883-2889.
- Liang J N, Li W H, Ge Y, *et al.* Characterization of lead size distributions with different process in lead-zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2883-2889.
- [14] Zhang K, Chai F H, Zheng Z L, *et al.* Size distribution and source of heavy metals in particulate matter on the lead and zinc smelting affected area [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **71**: 188-196.
- [15] 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 等. 广东某垃圾焚烧炉周边空气颗粒物中金属浓度特征及源解析研究[J]. *环境化学*, 2015, **34**(6): 1109-1115.
- Zhang H L, Li X P, Qi J Y, *et al.* Characterization of airborne particulate metals in the surroundings of a municipal solid waste incinerator (MSWI) in Guangdong [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(6): 1109-1115.
- [16] 李娜, 郝庆菊, 江长胜, 等. 重庆市垃圾焚烧飞灰粒径分布及重金属形态分析[J]. *环境化学*, 2010, **29**(4): 659-664.
- Li N, Hao Q J, Jiang C S, *et al.* Particle size distribution and speciation analysis of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash in Chongqing, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2010, **29**(4): 659-664.
- [17] 唐影. 垃圾焚烧发电过程污染物排放控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015. 11-14.
- Tang Y. Study on the control of pollutants emissions of waste incineration power generation process[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. 11-14.
- [18] 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.
- [19] 吴琳, 冯银厂, 叶文媛, 等. 大气颗粒物中碳组分测定结果比较: 元素分析和热光反射方法[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(12): 1481-1487.
- Wu L, Feng Y C, Ye W Y, *et al.* Comparison of carbon species measurement results in atmospheric particulate matter: elemental analysis and TOR methods [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(12): 1481-1487.
- [20] Chow J C, Watson J G, Crow D, *et al.* Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **34**(1): 23-34.
- [21] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U. S. air quality studies [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, **27**(8): 1185-1201.
- [22] Currie L A, Benner B A Jr, Kessler J D, *et al.* A critical evaluation of interlaboratory data on total, elemental, and isotopic carbon in the carbonaceous particle reference material, NIST SRM 1649a [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2002, **107**(3): 279-298.
- [23] Chow J C, Watson J G, Chen L W A, *et al.* Equivalence of elemental carbon by thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(16): 4414-4422.
- [24] 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.
- [25] Yang H H, Luo S W, Lee K T, *et al.* Fine particulate speciation profile and emission factor of municipal solid waste incinerator established by dilution sampling method [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, **66**(8): 807-814.
- [26] 王艳, 郝伟伟, 程轲, 等. 城市生活垃圾露天焚烧PM_{2.5}及其组分排放特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3518-3523.
- Wang Y, Hao W W, Cheng K, *et al.* Emission characteristics and chemical components of PM_{2.5} from open burning of municipal solid waste [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3518-3523.
- [27] 胡艳军, 孙铁. 不同粒径垃圾焚烧飞灰中重金属富集特性表征[J]. *环境化学*, 2012, **31**(11): 1717-1723.

- Hu Y J, Sun T. Heavy metal enrichment in municipal solid waste incineration fly ash with various size ranges[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(11): 1717-1723.
- [28] 朱伟, 郝庆菊, 江长胜, 等. 重庆市垃圾焚烧飞灰特性及重金属浸出行为的研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(6): 1391-1396.
- Zhu W, Hao Q J, Jiang C S, *et al.* Study on characteristics and leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration fly ash in Chongqing [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(6): 1391-1396.
- [29] 王文霞, 胡红云, 朱娟娟, 等. 垃圾焚烧底灰中铬的分布及浸出特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2014, **35**(1): 196-199.
- Wang W X, Hu H Y, Zhu J J, *et al.* Chromium distribution and leaching behavior in municipal solid waste incineration bottom ash [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, **35**(1): 196-199.
- [30] Chang M B, Tseng F Y, Ku S R. Effects of ash physical properties on leaching behavior of heavy metals from MSW incineration [J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 1997, **60**(1-4): 13-25.
- [31] 邝薇, 钟山, 陈孟林, 等. 垃圾焚烧飞灰中重金属的污染特性[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(8): 143-148.
- Kuang W, Zhong S, Chen M L, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in MSWI fly ash [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(8): 143-148.
- [32] 王春峰, 陈冠飞, 朱艳臣, 等. 不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4891-4898.
- Wang C F, Chen G F, Zhu Y C, *et al.* Leaching toxicity and bioaccessibility of heavy metals in MSWI fly ash with various particle sizes [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4891-4898.
- [33] 金晶, 王琪, 李航, 等. 垃圾焚烧飞灰中重金属的分布规律及浸出特性[J]. *环境科学与技术*, 2007, **30**(4): 1-3.
- Jin J, Wang Q, Li H, *et al.* Distribution and leaching characteristics of heavy metals in MSWI fly ash [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **30**(4): 1-3.
- [34] 冯军会, 何品晶, 曹群科, 等. 不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属分布和浸出性质[J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(4): 63-66, 70.
- Feng J H, He P J, Cao Q K, *et al.* Heavy metals distribution and leaching characteristics in MSWI APC residues with various particle sizes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(4): 63-66, 70.
- [35] 叶秀雅, 周少奇, 徐斌, 等. 不同粒径垃圾焚烧飞灰金属形态分布比较研究[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(11): 4235-4239.
- Ye X Y, Zhou S Q, Xu B, *et al.* Comparative study on metal speciation distributions in MSWI fly ash with various particle sizes [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(11): 4235-4239.



CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)