

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放测量

蒋靖坤^{1,2}, 邓建国¹, 李振¹, 马子轸¹, 周伟¹, 张强¹, 段雷^{1,2}, 郝吉明^{1,2}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为贯彻落实《大气污染防治行动计划》, 环境保护部指导各地开展大气污染源排放清单编制工作, 其中包括固定源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放清单。但目前国内尚无固定源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 标准采样方法。本研究提出了适合我国固定源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 测量的双级虚拟撞击采样方法, 开发了相应的分级采样系统, 并用该方法对各类固定源进行了现场测试。测试结果表明, 所测试的煤粉炉电厂的烟囱入口 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 $(0.93 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10} 质量浓度为 $(1.13 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。所测试的垃圾焚烧电厂的烟囱排放口 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 $(3.3 \pm 0.65) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10} 质量浓度为 $(6.9 \pm 0.86) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。所测试的大型循环流化床发电厂的烟囱排放口 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 $(0.59 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10} 质量浓度为 $(1.12 \pm 0.16) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。所测试的钢铁转炉的烟囱排放口 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 $(0.15 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10} 质量浓度为 $(0.43 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

关键词: 固定源; 细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$); 标准方法; 虚拟撞击采样器; 排放测试

中图分类号: X830.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2003-05 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.06.001

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ Emissions from Stationary Sources

JIANG Jing-kun^{1,2}, DENG Jian-guo¹, LI Zhen¹, MA Zi-zhen¹, ZHOU Wei¹, ZHANG Qiang¹, DUAN Lei^{1,2}, HAO Ji-ming^{1,2}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

Abstract: Recently, the Ministry of Environmental Protection of China started the development of emission inventories in fifteen Chinese cities. It includes the emission of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ from stationary sources. However, there is no national standard method in China for stationary source PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ sampling. In this study, a two-stage virtual impactor was developed for sampling PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ from stationary sources. Its performance was evaluated for four types of stationary sources, i. e., coal-fired power plant, waste incineration, circulating fluid bed, and converter steelmaking. These four tested emission sources were equipped with high efficiency PM control devices. $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations measured in the chimneys of these emission sources were (0.93 ± 0.03) , (3.3 ± 0.65) , (0.59 ± 0.04) , and $(0.15 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, while the PM_{10} mass concentrations were (1.13 ± 0.11) , (6.9 ± 0.86) , (1.12 ± 0.16) , and $(0.43 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively.

Key words: stationary source; $\text{PM}_{2.5}$; standard method; virtual impactor; emission test

目前我国多地频繁出现的霾污染,已经严重影响到了人们日常生活。环保部颁布了新的环境空气质量标准^[1],明确规定霾污染首要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均限值和年均限值。目前已开展环境大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度测量的 74 个城市中绝大多数城市不能达标^[2]。研究表明我国固定污染源是大气一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要来源之一^[3~5]。环境保护部为贯彻落实国务院《大气污染防治行动计划》,加强科技支撑大气污染防治工作,指导各地开展大气污染源排放清单编制工作,目前发布了《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》^[6],旨在为各地编制大气可吸入颗粒物 (PM_{10}) 和细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 源排放清单提供统一方法。但目前国内尚

无固定源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放标准测定方法。指南暂时根据 $\text{PM}_{2.5}$ 占总烟尘比例估算 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放。因此为了测定固定源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放,编制准确的源清单,需要建立适合我国固定污染源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放测量的标准方法。

前期工作已调研了国内外各种固定源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 采样方法^[7~10]。低压荷电撞击器 (ELPI) 及其简化版本 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 三级撞击器 (DPI) 常被国内研究人员用来测定固定源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排

收稿日期: 2015-12-26; 修订日期: 2016-01-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2013CB228505)

作者简介: 蒋靖坤 (1980 ~), 男, 副教授, 主要研究方向为大气颗粒物测量, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

放^[11~15]. 但该方法用于测定我国固定源 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放存在一定问题: 首先, ELPI 和 DPI 都属于传统撞击采样器, 存在烟尘反弹和再悬浮而进入下一级, 导致 $PM_{2.5}$ 测量结果偏高; 其次, ELPI 和 DPI 由于尺寸比较大, 无法直接置于烟道内进行采样, 通常需要通过管路将烟气引出后采样, 在引出过程中不可避免地导致烟尘损失. 也有学者建议使用美国的采样方法 201A 加双级旋风采样器来测定 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放^[16~20], 但由于我国固定源采样口尺寸与美国相比有较大差异, 因此该方法在实际使用中面临很大限制, 为了克服上述问题本研究前期工作已研制了适合我国固定源分级采样的 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器^[21].

基于前期工作, 本研究进一步开发了与虚拟撞击采样器相配套的采样控制系统, 形成了相应的采样方法, 并用该方法对四类典型固定源进行了现场测试.

1 测试方法与操作过程

测试使用开发的 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器 (图 1), 具体测量原理见文献[7, 21]. 该采样器根据烟尘惯性将其分为 $> 10 \mu m$ 、 $2.5 \sim 10 \mu m$ 和 $< 2.5 \mu m$ 三级, 有效地克服了 ELPI 和 DPI 的烟尘反弹和再悬浮问题, 适用各类浓度的烟尘采样 ($< 200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). 采样器直径为 74 mm, 满足国内一些固定源 80 mm 采样口尺寸^[22], 采样时直接将采样器置于烟道内进行采样. 采样器为恒流采样, 室温下流量为 $25 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. 采样的流量、温度、湿度、动静压由如图 1 所示的控制箱直接测量或控制.

$PM_{10}/PM_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器为恒流采样器, 选择相对稳定的工况进行采样. 采样过程与根据 GB 16147-1996 中总烟尘测量过程基本一致, 首先用皮托管和热电偶测量采样点处的平均烟气流速、静压以及烟温, 用烟气传感器测定烟气中 O_2 、 CO_2 含量, 用湿度计测量烟气水含量, 然后将这些参数输入控制箱中计算采样流量, 并选取合适的等速采样嘴. 然后将已称重的 37 mm 石英滤膜或 Teflon 滤膜装入采样器; 最后将采样器伸入烟道内, 采样嘴正对烟气流向, 启动采样泵开始采样, 采样结束后缓慢将采样器从烟道中取出.

本研究用开发的采样系统对四类典型固定源 (包括燃煤电厂、垃圾焚烧厂、循环流化床以及钢铁厂) 进行了现场测试, 所测试固定源的具体信息如表 1 所示, 其中采样时间是以保证滤膜上采集一

定重量的烟尘为依据, 一般实验室天平精度为 0.1 mg, 因此至少采集 0.3 mg 的烟尘.

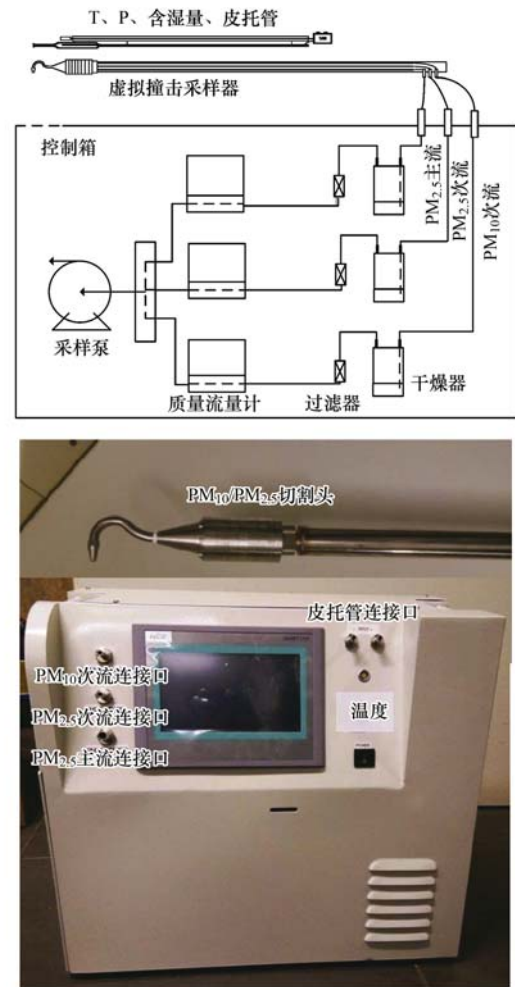


图 1 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样系统

Fig. 1 $PM_{10}/PM_{2.5}$ two-stage virtual impactor

2 测量结果

2.1 煤粉炉发电厂脱硫后烟尘分级浓度测量结果

选取山西某典型煤粉炉电厂进行测试, 该电厂装机容量为 300 MW, 烟尘控制措施有五电厂静电除尘器, 石灰石石膏法脱硫塔, 以及烟道除雾器. 测试期间为 100% 负荷, 排烟温度为 78°C . 测试点位于烟囱入口. 烟尘测试结果如图 2 所示, 其中 I、II 和 III 分别对应 3 次测试结果. $PM_{2.5}$ 平均质量浓度为 $0.93 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 标准偏差为 0.03. PM_{10} 平均质量浓度为 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 标准偏差为 0.11. $PM_{2.5}$ 质量浓度约占 PM_{10} 的 82%. 该电厂实施了超净排放技术^[23], 静电除尘器采用高效电源以及低温省煤器技术, 控制总烟尘浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以内, 因此测得 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度也较低.

表 1 所测固定源的基本情况¹⁾
Table 1 Tested stationary sources

项目	机组容量	测试点位	烟温 /℃	污控措施	采样时间 /min	滤膜净质量 /mg
燃煤电厂	300 MW	烟囱入口	78	SCR + ESP + WFGD	120	1.5
垃圾焚烧厂	15 MW	烟囱入口	120	ESP + BF	90	1.7
循环流化床	600 MW	烟囱入口	135	ESP + BF	120	1.1
钢铁厂	180 t	烟筒采样口	45	BF	120	0.45

1) SCR 为选择性催化还原,ESP 为电除尘器,BF 为布袋除尘器,WFGD 为石灰石湿法脱硫

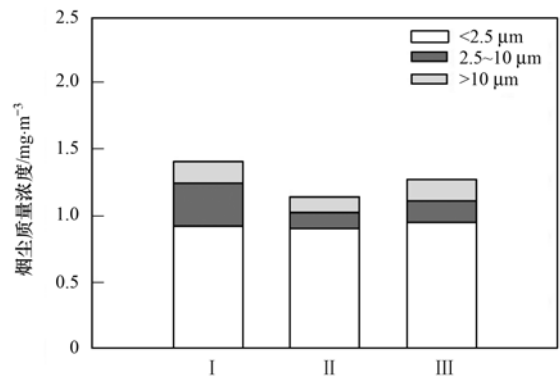


图 2 煤粉炉烟尘分级质量浓度
Fig. 2 Mass concentration of size-resolved PM from coal-fire power plant

2.2 循环流化床发电厂烟尘分级浓度测量结果

选取四川某典型燃煤循环流化床发电厂进行测试,发电容量 600 MW,烟尘控制措施为静电除尘加布袋除尘,测试点位于烟囱入口,布袋除尘器之后,排烟温度 135℃. 测试结果如图 3 所示,其中 I、II 和 III 分别对应 3 次测试结果. PM_{2.5} 平均质量浓度为 0.59 mg·m⁻³,标准偏差为 0.04. PM₁₀ 平均质量浓度为 1.12 mg·m⁻³,标准偏差为 0.16. PM_{2.5} 质量浓度约占 PM₁₀ 质量浓度的 52.7%. 结果表明该电厂除尘效率很高,排放的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度也较低.

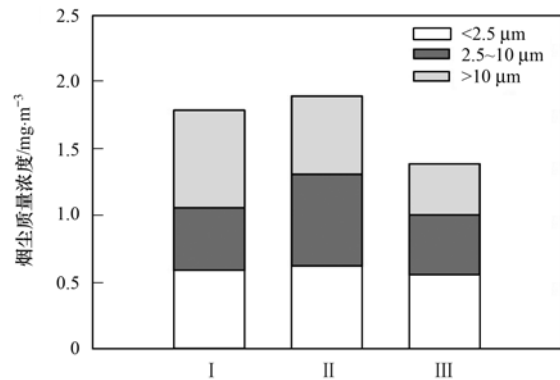


图 3 循环流化床电厂烟尘分级质量浓度
Fig. 3 Mass concentration of size-resolved PM from circulating fluid bed power plant

2.3 垃圾焚烧发电厂烟尘分级浓度测量结果

选取浙江省某典型垃圾焚烧发电厂进行测试,该电厂采用流化床燃烧炉,装机容量为 15 MW,污染控制措施为静电除尘加布袋除尘,测试点位于烟囱入口,在布袋除尘器之后,排烟温度为 120℃. 测试结果如图 4 所示,其中 I、II 和 III 分别对应 3 次测试结果. PM_{2.5} 平均质量浓度为 3.3 mg·m⁻³,标准偏差为 0.65. PM₁₀ 平均质量浓度为 6.9 mg·m⁻³,标准偏差为 0.86. PM_{2.5} 质量浓度约占 PM₁₀ 质量浓度的 48%. 该垃圾焚烧电厂采用除尘效率相对较高的布袋除尘器,故排放烟气中 PM_{2.5} 浓度较低.

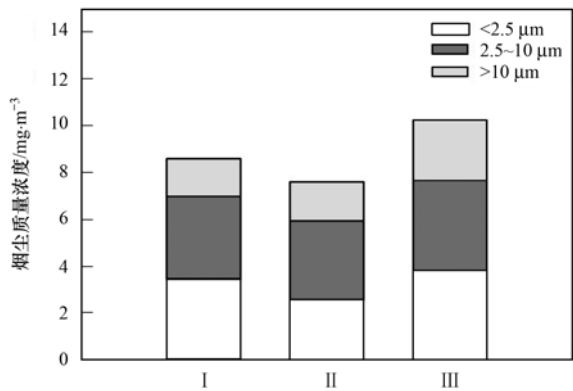


图 4 垃圾焚烧电厂烟尘分级质量浓度
Fig. 4 Mass concentration of size-resolved PM from waste incineration power plant

2.4 钢铁厂烟尘分级浓度测量结果

选取辽宁某钢厂进行测试,测试点位于转炉的烟筒排放口,转炉容量 180 t,除尘措施为布袋除尘器,最终排烟温度为 45℃. 测试结果如图 5 所示,其中 I、II 和 III 分别对应 3 次测试结果. PM_{2.5} 平均质量浓度为 0.15 mg·m⁻³,标准偏差为 0.04. PM₁₀ 平均质量浓度为 0.43 mg·m⁻³,标准偏差为 0.15. PM_{2.5} 质量浓度约占 PM₁₀ 质量浓度的 35%. 相比于测试的其他几个固定源,钢厂转炉后最终排放口 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度较低.

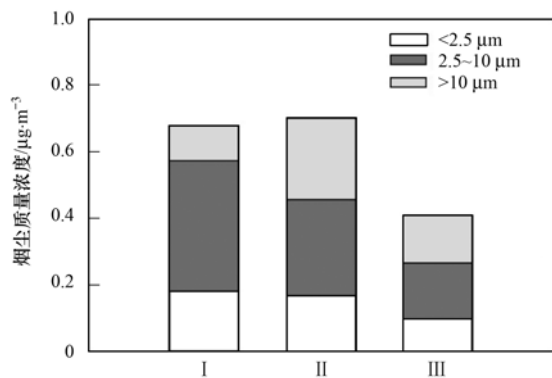


图5 钢厂转炉烟尘分级质量浓度

Fig. 5 Mass concentration of size-resolved PM from converter steelmaking

3 结果与分析

研发的 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器切割效率曲线优于国际标准 ISO 7708:1995 对采样器的规定^[24], 采样器横截面直径为 74 mm, 满足我国固定源采样口尺寸要求, 与之配套的控制系統简单轻便, 整个采样系统易于操作, 适用于我国固定源现场采样. 现场测试结果表明除垃圾焚烧发电厂外, 所测试的其他几个固定源最终排放口的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度都非常低, 这些都得益于静电除尘以及布袋除尘等高效烟尘控制措施. 其中燃煤电厂测得的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 $1.13 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.93 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 与刘含笑等^[8]测得扬州第二发电厂的结果接近, 其用 DPI 测得 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 $1.13 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.71 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (600 MW 机组) 以及 $1.29 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.89 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (500 MW 机组).

测得的 4 个固定源结果表明 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的比例在 50% 左右, 其中煤粉炉经过脱硫塔后 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 比例升高为 80% 以上. 这与王珩等^[25]用 Andersen 8 级撞击器直接伸入烟道内测得的趋势相似, 其测定一台 300 MW 电除尘器出口 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 为 43.4%, 经过湿法脱硫塔后升高为 74.5%.

随着环保标准加严, 污染控制措施效率增强, 固定源最终排放口总烟尘浓度在 $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下, 此时传统滤筒采样法自身会带来很大误差, 因为空白滤筒平均误差约为 $1 \sim 2 \text{ mg}$, 假设正常采样流量为 $25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 收集 30 min, 则浓度误差为 $1.3 \sim 2.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 而 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 分级采样器相比总烟尘采样器内部结构复杂, 会导致粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 烟尘损失, 因此无法利用分级采样器准确地确定总烟尘的含量, 但从双级虚拟撞击采样器的测量结果可估计

$PM_{2.5}$ 占总烟尘的大致比例. 对于煤粉炉电厂, 最终排放口 $PM_{2.5}$ 约占总烟尘 73%, 即大部分烟尘为 $PM_{2.5}$. 对于垃圾焚烧电厂 $PM_{2.5}$ 占总烟尘的比例约为 37%. 对于大型循环流化床 $PM_{2.5}$ 约占总烟尘的比例为 35%. 对于钢厂转炉最终排放口 $PM_{2.5}$ 所占比例约为 25%. 目前试行的源清单指南中给出了大型燃煤设备产生总烟尘中 $PM_{2.5}$ 占比为 6%. 如经过烟尘控制措施后, 这一比例将发生非常大的变化.

本研究所测的 $PM_{2.5}$ 为可过滤烟尘, 已有的研究表明实际排放的 $PM_{2.5}$ 中还需包含可凝结烟尘^[7,18]. 因此还需尽快建立固定源 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 分级采样标准方法, 积累更多固定源 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放数据, 确定其所占比例, 才能编制较为准确的污染源颗粒物排放清单.

4 结论

(1) 本研究建立了一套 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样方法, 并用该方法对各类固定源进行了现场测试, 初步获得了煤粉炉、垃圾焚烧炉、循环流化床以及钢铁转炉最终排放口的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度, 该方法适合我国固定源.

(2) 煤粉炉电厂烟囱入口 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $(0.93 \pm 0.03) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 质量浓度为 $(1.13 \pm 0.11) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 垃圾焚烧电厂烟囱入口 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $(3.3 \pm 0.65) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 质量浓度为 $(6.9 \pm 0.86) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 大型循环流化床发电厂烟囱入口 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $(0.59 \pm 0.04) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 质量浓度为 $(1.12 \pm 0.16) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 钢铁转炉烟囱排放口 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $(0.15 \pm 0.04) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 质量浓度为 $(0.43 \pm 0.15) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

参考文献:

- [1] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [2] Jiang J K, Zhou W, Cheng Z, *et al.* Particulate matter distributions in China during a winter period with frequent pollution episodes (January 2013)[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(2): 494-503.
- [3] 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): 931-954.
- [4] 史妍婷, 杜谦, 高建民, 等. 燃煤电厂锅炉 $PM_{2.5}$ 排放危害度评价模型建立及案例分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 470-474.
- [5] 王毓秀, 彭林, 王燕, 等. 电厂燃煤烟尘 $PM_{2.5}$ 中化学组分特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 60-65.
- [6] 中国环境保护部. 大气细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 源排放清单编制技术指南 (试行) [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/>

- hbb/bgth/201401/t20140124_266910.htm, 2014-01-24.
- [7] 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 等. 固定污染源排气中 $\text{PM}_{2.5}$ 采样方法综述[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 2018-2024.
- [8] 刘含笑, 朱少平, 姚宇平, 等. $\text{PM}_{2.5}$ 重量法现场测量技术研究[J]. 电力与能源, 2014, **33**(5): 572-575.
- [9] 刘含笑, 朱少平, 姚宇平, 等. 电荷法测试 WESP 进出口烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的试验研究[J]. 中国电力, 2014, **47**(12): 37-41.
- [10] 刘智. 火电厂烟气中 $\text{PM}_{2.5}$ 测试方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. 14-34.
- [11] 朱少平, 刘含笑, 郦建国, 等. 电子低压冲击器不同稀释比对 $\text{PM}_{2.5}$ 排放测试的影响[J]. 电力与能源, 2014, **35**(2): 141-143.
- [12] 刘光铨, 王炎生, 陈明兰, 等. WY-1 型烟道用冲击式尘粒分级仪的研制[J]. 环境工程, 1985, **5**(1): 17-24.
- [13] 原永涛, 魏玉珍, 张滨渭, 等. 多级冲击采样器用于发电厂烟道飞灰采样的探讨[J]. 热力发电, 2010, **39**(5): 77-81.
- [14] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 66-76.
- [15] 王铮, 薛建明, 许月阳, 等. 燃煤电厂超细颗粒物排放测试方法研究[J]. 环境工程技术学报, 2013, **3**(2): 133-137.
- [16] 胡远志, 侯帮磊, 马波, 等. 固定源排放 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 采样测试方法研究与应用[A]. 见: 2014 中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 成都: 中国环境科学学会, 2014. 4753-4757.
- [17] 李兴华, 曹阳, 蒋靖坤, 等. 固定源 $\text{PM}_{2.5}$ 稀释采样器的研制[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(10): 3309-3315.
- [18] 裴冰. 燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1544-1549.
- [19] Yang H H, Lee K T, Hsieh Y S, *et al.* Filterable and condensable fine particulate emissions from stationary sources[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2014, **14**(7): 2010-2016.
- [20] USEPA Methods 201a and 202, Methods for measurement of filterable PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ and measurement of condensable particulate matter emissions from stationary sources[S].
- [21] 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 等. 基于虚拟撞击原理的固定源 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 采样器的研制[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3639-3643.
- [22] GB/T 16157-1996, 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法[S].
- [23] 王树民, 宋畅, 陈寅彪, 等. 燃煤电厂大气污染物“近零排放”技术研究及工程应用[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(4): 487-494.
- [24] ISO 7708: 1995, Air quality-Particle size fraction definitions for health-related sampling[S].
- [25] 王珩, 宋蔷, 姚强, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, **28**(5): 1-7.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行