

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽胞杆菌及其芽胞对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放

裴冰^{1,2,3}

(1. 上海市环境监测中心, 上海 200235; 2. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200030; 3. 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: 建立了固定源可凝结颗粒物 (condensable particulate matter, CPM) 采样-分析方法, 开发了 CPM 采样配件, 与 EPA Method 202 方法进行比对后应用于燃煤电厂. 结果表明燃煤电厂 CPM 排放均值为 $(21.2 \pm 3.5) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 同步使用国标方法测得的 FPM 为 $(20.6 \pm 10.0) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 高效除尘器可有效降低 FPM 的排放水平, 但对 CPM 无太大影响. 高效除尘改造后 CPM 对 TPM 的贡献将有所提高, 应引起足够的重视. CPM 中冷凝液贡献了 68%, 滤膜为 32%, 有机组分较少, 为 1%.

关键词: 燃煤电厂; 固定源; 可凝结颗粒物; 排放; 测试

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1544-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.005

Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants

PEI Bing^{1,2,3}

(1. Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

Abstract: The sampling-analysis method for CPM of stationary source was established and the sampling device was developed. The determination method was compared with EPA method 202 and applied in real-world test in coal-fired power plants. The result showed the average CPM emission concentration in the coal-fired power plant was $(21.2 \pm 3.5) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ while the FPM was $(20.6 \pm 10.0) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ during the same sampling period according to the method in the national standard. The high-efficiency dust removal device could efficiently reduce FPM emission but showed insignificant effect on CPM. The mass contribution of CPM to TPM would rise after high-efficiency dust removal rebuilding project, to which more attention should be paid. The condensate contributed 68% to CPM mass while the filter contributed 32%, and the organic component contributed little to CPM, accounting for only 1%.

Key words: coal-fired power plants; stationary source; condensable particulate matter; emission; test

固定源排放的一次颗粒态污染物是环境空气颗粒物的重要贡献之一, 我国对其排放水平的测定及排放总量的测算均源自使用国家标准方法 (固定污染源排气中颗粒物的测定与气态污染物采样方法 GB 16157)^[1] 的现场测试. 然而, 从固定源排放一次颗粒物的组成^[2] 及我国与 EPA 固定源颗粒物测试方法的比较^[3] 可知, 固定源排放的一次颗粒物实质上包括可过滤颗粒物 (filterable particulate matter, FPM) 与可凝结颗粒物 (condensable particulate matter, CPM), 其粒径及组成示意图 1^[2].

目前, 我国对固定源颗粒物的研究多集中于细颗粒物采样方法、质量浓度^[4-8] 及其中碳组分, PAH, 重金属等有毒有害成分^[9-16] 的测定上, 然而上述方法的测试对象均为 FPM, 对 CPM 的研究未见报道. Corio 等^[17] 使用 Method 202^[18] 及 Method 201A^[19] 对燃煤锅炉排气进行测试, 结果表明 CPM 平均占总 PM_{10} 排放的 76%, 同时其还对美国国内使

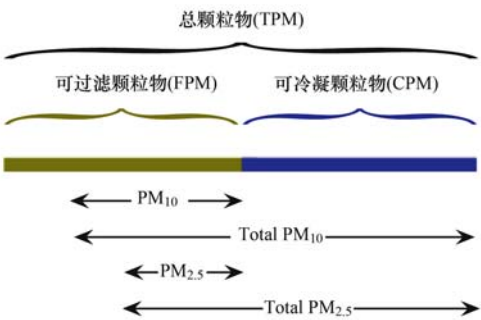
用 Method 202 及 Method 5^[20] 测试的 18 家燃煤源结果进行了归纳, 其中 CPM 占总颗粒物量平均值为 49% (范围 12% ~ 92%), FPM 占总颗粒物量平均值为 51% (范围 8% ~ 88%). 这意味着燃煤源 CPM 排放量基本与 FPM 处于相同水平, 不容忽视. 此外由于其生成机制的原因, CPM 属于细颗粒物, 在 PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$ 中占据的份额更大. 因此测定 CPM 排放量对完整测算燃煤源向环境的一次颗粒物, 尤其是一次细颗粒物排放意义重大.

由于我国固定源测试方法的欠缺及研究手段的匮乏, 适合我国国情的采样设备也不成熟, 国内无论是管理还是科研部门对 CPM 的测试尚未有效开展. 根据 Corio 等^[17] 的测试结果, 对 CPM 的忽视可能会

收稿日期: 2014-11-01; 修订日期: 2014-11-29

基金项目: 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室开放基金项目 (SCAPC201303)

作者简介: 裴冰 (1982 ~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为固定污染源监测管理、大气颗粒物来源解析及环境突发事件应急监测, E-mail: peibing@semc.gov.cn



图中各成分比例仅为示意,不代表实际情况(实际比例与燃料种类、燃烧方式及除尘设施等因素有关);总颗粒物(total particulate matter, TPM),可凝结颗粒物与可过滤颗粒物之和;FPM为烟道内过滤法(Method 17或GB 16157)或烟道外过滤法(Method 5)的滤筒或滤膜在烟道内状况下(Method 17或GB 16157)或烟道外加热状况下(Method5)捕集的颗粒物;CPM指烟道内温度状况下在采样位置处为气态,离开烟道后在环境状况下降温数秒内凝结为液态或固态的颗粒物

图1 总颗粒物构成示意^[2]
Fig. 1 Composition of Total Particulate Matter

对固定源一次颗粒物排放量产生较大程度的低估。本研究使用自主研发的可凝结颗粒物采样配件^[21],建立了可凝结颗粒物的测试方法并现场应用,得到燃煤电厂可凝结颗粒物排放状况,以期为全面评估燃煤电厂一次颗粒物排放水平及细颗粒物排放清单提供数据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 EPA与中国固定源颗粒物测试方法体系比较

EPA(environment protection agency, USA)对于FPM与CPM均规定了相应的测定方法:Method 5

及Method 17^[22]测定FPM;Method 202测定CPM,Method 201与Method 201A使用直接采样方法测定PM₁₀与PM_{2.5};CTM 039使用稀释采样方法测定PM₁₀与PM_{2.5}。与此相比,我国的颗粒物测试国家标准方法(GB 16157)与Method 17类似,实质上只可实现对FPM的测定。对EPA和我国固定源颗粒物测定方法进行了归纳,见表1。与EPA相比,我国固定源颗粒物测定方法较为单一,主要表现在:①我国固定源颗粒物无法实现固定源PM₁₀及PM_{2.5}的测定;②我国固定源测定方法仅关注烟道内状况下颗粒物,无法实现固定源CPM的测定;③我国固定源颗粒物测定方法为直接采样法,对稀释采样方法并未进行规定。

1.2 CPM测试方法的建立

1.2.1 EPA CPM测试方法

EPA CPM的测试方法(Method 202)于1991年11月首次颁布,而后在2010年11月进行了修订。主要改动为将湿式冲击瓶法变为干式冲击瓶法,目的为减少测试过程中可能产生的正偏差。修订后的Method 202设备示意图见图2。

Method202规定的CPM测试方法简述为:Method5/Method17/Method201A方法中烟道内采样组件后的烟气经冷凝器进入干式冲击瓶,降温后由CPM滤膜再进行捕集,CPM滤膜处气流温度不应超过30℃。冲击瓶及滤膜捕集部分之和为CPM。现场采样完成后,冲击瓶内组分立即充入N₂进行吹脱以去除其中溶解的SO₂气体。CPM滤膜分别使用水及正己烷萃取,冲击瓶内液体使用正己烷萃取,正己烷

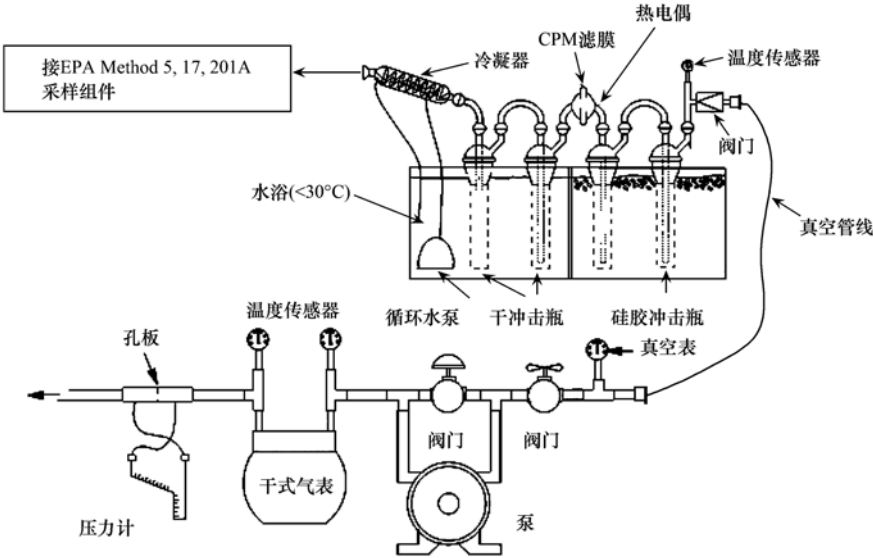


图2 干式冲击瓶法测定CPM^[18]
Fig. 2 Determination of CPM using the dry impinger method

萃取液经干燥后残余物至恒重后即为 CPM 有机组分;水溶液经烘干至液体少于 10 mL 后置于室温下干燥至恒重即为无机组分量,有机组分与无机组分之和为 CPM.

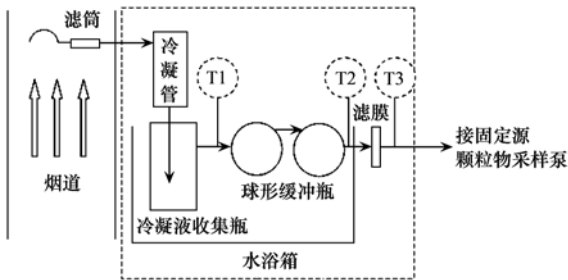
表 1 美国与中国固定源颗粒物测定方法体系^[23,24]

Table 1 Determination methods system of stationary source particulate matter in U. S. A and China		
国家	编号	方法名称
美国	Method 5	Determination Of Particulate Matter Emissions From Stationary Sources
	Method 5A	Determination Of Particulate Matter Emissions From The Asphalt Processing And Asphalt Roofing Industry
	Method 5B	Determination Of Nonsulfuric Acid Particulate Matter Emissions From Stationary Sources
	Method 5D	Determination Of Particulate Matter Emissions From Positive Pressure Fabric Filters
	Method 5E	Determination Of Particulate Matter Emissions From The Wool Fiberglass Insulation Manufacturing Industry
	Method 5F	Determination Of Nonsulfate Particulate Matter Emissions From Stationary Sources
	Method 5G	Determination Of Particulate Matter Emissions From Wood Heaters (Dilution Tunnel Sampling Location)
	Method 5H	Determination Of Particulate Matter Emissions From Wood Heaters From A Stack Location
	Method 5I	Determination Of Low Level Particulate Matter Emissions From Stationary Sources
	Method 17	Determination Of Particulate Matter Emissions From Stationary Sources
	Method 201	Determination Of PM ₁₀ Emissions (Exhaust Gas Recycle Procedure)
	Method 201A	Determination Of PM ₁₀ And PM _{2.5} Emissions From Stationary Sources (Constant Sampling Rate Procedure)
	Method 202	Dry Impinger Method For Determining Condensable Particulate Emissions From Stationary Sources
	CTM 039	Measurement of PM _{2.5} and PM ₁₀ Emission by Dilution Sampling (Constant Sampling Rate Procedures)
中国	GB 5468-91	锅炉烟尘测试方法
	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

1.2.2 本研究建立的 CPM 测试方法

(1) CPM 采样设备概述

由于我国固定源颗粒物测试体系与 EPA 不同,现场采样设备也有一定的差异.本研究在我国通用固定源颗粒物采样设备的基础上开发了可凝结颗粒物测试配件^[20],可与我国市面上常见的固定源颗粒物采样设备联用,便于在使用国标方法采集 FPM 的同时完成 CPM 的采样,此外,与商用 CPM 采样器 (Apex) 相比,该配件在搬运及使用上也更为便利.采样设备示意图 3. 其中虚线部分即为可凝结颗粒物采样配件.



T1、T2、T3 为温度监控单元

图 3 可凝结颗粒物采样配件示意

Fig. 3 Sampling device for CPM

烟道内含尘烟气经等速采样由滤筒捕集 FPM 后进入冷凝管,冷凝管使用水浴箱内液体进行水冷,冷凝液由收集瓶收集,除湿后的烟气进入球形缓冲瓶,采用球形缓冲瓶相对冲击瓶可增大换热面积,同时为新颗粒的生成提供停留时间,减少冲击瓶带来

的颗粒物沿程损失.降温后新生成的颗粒经滤膜捕集后连接固定源颗粒物采样泵.采样过程中,冷凝液收集瓶及球形缓冲瓶均处于水浴箱液面以下,同时该系统在冷凝液收集瓶出口,缓冲瓶出口及滤膜后端监控气体温度.

(2) 系统停留时间的确定

该系统需设置一定的停留时间以确保新颗粒物有足够的时间生成,气、液、固三相在降温后重新达到平衡.以采样流量 20 L·min⁻¹ 计,冷凝液收集瓶及 1 个球形缓冲瓶分别可提供约 0.5 s 及 1 s 的停留时间,采用现场试验方式确定所需的停留时间:选取某燃煤电厂锅炉 (装机容量 300 MW, 负荷 100%, 使用布袋除尘器及石灰石-石膏湿法脱硫,脱硫后端安装 GGH, 排气温度 75℃) 测试平台使用该套系统进行采样,采样过程中要求电厂负荷保持稳定,燃用同批次煤种,污染物处理设施运营正常.采样停留时间分别为 0.5、1.5、2.5 及 3.5 s,测试不同停留时间下的 CPM 质量浓度,每次停留时间 CPM 质量浓度为 3 次测试平均值,结果见图 4. 从中可知,确定系统停留时间为 2.5 s.

(3) 样品采样及分析方法

采样前,使用去离子水清洗整套部件,而后将冷凝管,冷凝液收集瓶及缓冲瓶等玻璃件置于烘箱中于 150℃ 烘烤 6 h,滤膜 (本研究使用特氟龙滤膜确定质量浓度) 使用微量天平 (Mettler XP6) 称量,称量前滤膜需在恒温 (20℃ ± 1℃) 恒湿 (50% ± 5%

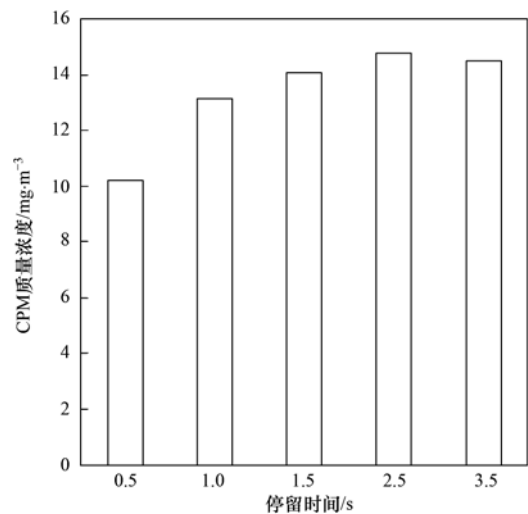


图4 停留时间对 CPM 质量浓度的影响
Fig. 4 Effect of residence time on the CPM mass concentration

RH)实验室中放置 24 h. 其余设备按照 GB 16157 要求进行准备.

赴现场采样平台后,将 CPM 配件安装在采样管及采样泵之间,采样管中放置滤筒,CPM 配件缓冲瓶后放置滤膜,连接完毕后进行气密性检查.气密性检查通过后按照 GB 16517 采样点位、频次及体积要求等进行采样,采样过程中 CPM 配件中水浴箱采样完毕后取出滤筒及滤膜保存.将冷凝液收集瓶中液体转移至样品瓶 1 中,使用去离子水及正己烷冲洗冷凝管、冷凝液收集瓶及缓冲瓶,冲洗液分别倒入样品瓶 1(去离子水冲洗液)及样品瓶 2(正己烷冲洗液)中.

将滤膜及样品瓶带至实验室,滤膜增重为 CPM_{滤膜},样品瓶 1 中液体使用正己烷萃取,正己烷萃取液倒入样品瓶 2,样品瓶 2 中液体在室温下通风橱内干燥残余物至恒重为 CPM_{有机},萃取余液经烘干至液体少于 10 mL 后置于室温下干燥至恒重为 CPM_{无机},CPM_{有机}及 CPM_{无机}扣除空白后与 CPM_{滤膜}之和为 CPM 质量,除以采样标态体积得到 CPM 质量浓度.

(4)方法精密度及检出限

基于 HJ 168-2010(环境监测 分析方法标准制修订技术导则)^[25],计算本方法的特性指标,实验室内相对标准偏差为 12.7%,方法检出限(MDL)为 0.28 mg·m⁻³.

(5)该方法与 EPA202 方法的比对

使用上文描述的设备与采样-分析方法,在某燃煤电厂锅炉使用可凝结颗粒物采样器(APEX)及 EPA Method 202 方法进行同步测试,结果如表 2 所

表 2 本研究使用方法与 Method 202 比对/mg·m ⁻³		
Table 2 Comparison of this study with Method 202/mg·m ⁻³		
编号	本研究设备 + 方法	APEX + EPA M202
1	18.2	16.3
2	15.5	14.6
3	17.4	15.8
4	18.4	19.4
5	14.7	14.3
6	18.9	17.3
平均	17.2	16.3
相对标准偏差/%	10	12

示,两方法测试对比结果较为接近.

1.3 测试计划及质控措施

选择 3 台典型燃煤电厂锅炉进行现场测试,测试对象信息见表 3.3 台锅炉均使用石灰石-石膏湿法工艺进行脱硫,锅炉 A 完成了高效除尘改造,使用布袋除尘器,而锅炉 B、C 则为电除尘器,其中锅炉 B 为三电场,锅炉 C 为四电场.此外,锅炉 C 还安装了 SCR 进行烟气脱硝.

测试期间锅炉燃用同批次煤种,负荷保持稳定,污染物控制设施正常运行.采样点位、采样流量、时间、累积采气体积等遵循 GB 16157 相关要求.每台锅炉各采集 6 组样品,每组采样结束后得到滤筒,冷凝液及滤膜.样品带回实验室后滤筒按照 GB 16157 要求烘干后称量增重除以采气量标态体积得到 FPM 质量浓度,冷凝液及滤膜按照上文描述方法得到 CPM 质量浓度.

表 3 测试对象情况 ¹⁾			
Table 3 Information of coal-fired boilers			
测试对象	机组容量/MW	污染物控制设施	负荷/%
锅炉 A	300	FF + WFGD	100
锅炉 B	325	ESP + WFGD	95.5
锅炉 C	1 000	SCR + ESP + WFGD	96.3

1) FF (Fiber Filter), 布袋除尘器; WFGD (wet flue gas desulphurization), 湿法烟气脱硫; ESP (electrostatic precipitator), 电除尘器; SCR (selective catalytic reduction), 选择性催化还原

采样前、后均进行系统检漏,保证气密性,如若不达标本次测试作废.采样过程中监控系统负压以防止可能产生的泄漏或阻塞.每组采样-分析过程均进行空白测试,结果扣除空白值.

2 结果与讨论

2.1 燃煤电厂颗粒物排放状况

对测试结果进行统计,颗粒物排放质量浓度见表 4,CPM 及 FPM 在 TPM 中的分担率见表 5.从可知,燃煤电厂 CPM 排放质量浓度均值为(21.2 ±

3.5) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 同期基于国家标准方法测得的 FPM 为 $(20.6 \pm 10.0) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 在总颗粒物 TPM 中, CPM 为 50.7%, FPM 为 49.3%, 该结果与文献[17]中报道相近. 这意味着对于我国燃煤电厂, CPM 排放不容忽视, 与 FPM 排放质量浓度处于同一水平, 基于国家标准方法 GB 16157 测得的 FPM 并不能真实表征燃煤电厂对环境颗粒物的真实贡献.

表 4 燃煤电厂颗粒物排放质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 4 Particulate matter emission concentration of coal-fired power plants/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

锅炉	CPM	FPM	TPM
A	17.2 ± 1.7	12.1 ± 3.6	29.3 ± 4.3
B	23.6 ± 2.0	33.4 ± 3.7	57.9 ± 4.0
C	22.8 ± 2.3	16.2 ± 2.6	39.0 ± 1.7
平均值	21.2 ± 3.5	20.6 ± 10.0	41.8 ± 12.3

表 5 燃煤电厂 CPM、FPM 在 TPM 中分担率/%

Table 5 Contribution of CPM and FPM to TPM in coal-fired power plants/%

锅炉	CPM	FPM	TPM
A	58.7	41.3	100
B	41.4	58.6	100
C	58.5	41.5	100
平均值	50.7	49.3	100

2.2 污染物控制设施对 CPM、FPM 排放的影响

燃煤电厂颗粒物排放水平与燃料灰分、锅炉类型、工况负荷及污染物控制设施类型等多种因素有关, 本研究所测对象均为煤粉发电锅炉, 燃料灰分相近, 测试期间工况均接近满负荷, 污染物控制设施中均采用湿法脱硫工艺, 但在除尘设施类型上有所不同, 图 5 展示了所测对象在不同颗粒物去除设施情况下 CPM、FPM 的排放状况.

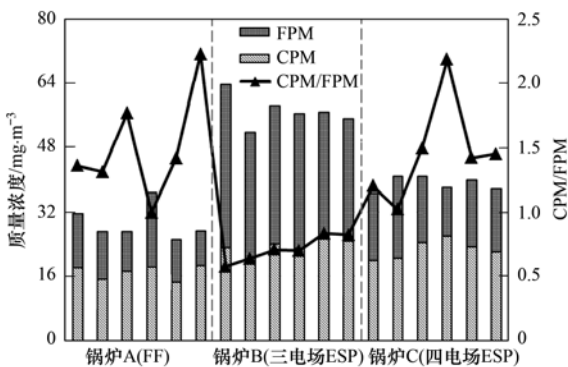


图 5 不同锅炉 TPM 排放状况

Fig. 5 TPM emission status from different boilers

由图 5 可知, 使用了 FF 的锅炉 A, TPM 排放浓度 $[(29.3 \pm 4.3) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ 最低, 其次为使用四电场

ESP 的锅炉 C $[(39.0 \pm 1.7) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$, 最高的为使用三电场 ESP 的锅炉 B $[(57.9 \pm 4.0) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$, 其排序与除尘器的除尘效率相符. 然而, 对 TPM 的去除主要体现在 FPM 上, 锅炉 B 的 FPM 浓度 $[(33.4 \pm 3.7) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ 高于锅炉 A $[(12.1 \pm 3.6) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ 与 C $[(16.2 \pm 2.6) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$, 而相比而言三台锅炉的 CPM 排放浓度则较为接近, 分别为 (17.2 ± 1.7) 、 (23.6 ± 2.0) 及 $(22.8 \pm 2.3) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 三台锅炉的 CPM/FPM 比值亦印证了这一点, 锅炉 B 小于 1.0, 而锅炉 A 及 C 则大于 1.0, 这说明较为高效的除尘器可有效降低 FPM 的排放, 但相比而言对 CPM 的影响有限, 这主要是因为 CPM 在烟道温度状况下以气态形式存在, 除尘设施对其无能为力. 但使用了 FF 的锅炉 A 其 CPM 排放浓度略低于锅炉 B 及 C, 这可能是因为 FF 对于小颗粒物的去除效果优于 ESP, 锅炉 A 烟气中凝结核少于锅炉 B 及 C, 从而阻碍了 CPM 的形成.

此外, 由于燃煤电厂颗粒物排放标准的趋严^[26], 我国多数电厂将会进行高效除尘改造. 高效除尘固然会有效降低 FPM 的排放, 但对 CPM 排放无太大影响. 高效除尘改造后 CPM 在 TPM 中的份额将会大幅提高, 鉴于 CPM 为一次排放的 $\text{PM}_{2.5}$, 其对环境颗粒物, 尤其是细颗粒物的贡献应引起重视.

2.3 CPM 质量浓度的组成

依据 1.2.2 节中分析方法所述, CPM 为 $\text{CPM}_{\text{滤膜}}$, $\text{CPM}_{\text{有机}}$ 及 $\text{CPM}_{\text{无机}}$ 之和, 三者对 CPM 的贡献见图 6. 由于 $\text{CPM}_{\text{无机}}$ 及 $\text{CPM}_{\text{有机}}$ 均由冷凝液分析而来, 故冷凝液贡献了 CPM 质量的 68%, 滤膜贡献了 CPM 的 32%. 这说明 CPM 在液相中分布较多, 湿式电除尘等新型除尘技术可能会对其有一定的控制作用. 此外, 燃煤电厂 CPM 中有机组分含量较少, 仅为 1%.

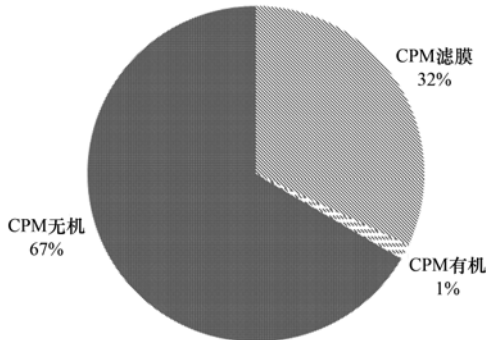


图 6 CPM 质量浓度组成

Fig. 6 Constitution of CPM mass concentration

3 结论

(1)本研究建立了 CPM 的采样分析方法并与 EPA Method202 方法进行了比对,利用自行研发的较为便利的 CPM 采样配件进行了现场应用,初步得到燃煤电厂 CPM 的排放状况。

(2)燃煤电厂 CPM 排放均值为 $(21.2 \pm 3.5) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,同步使用国标方法测得的 FPM 为 $(20.6 \pm 10.0) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,CPM 与 FPM 排放质量浓度处于相近水平,不容忽视,可基于本研究结果对我国燃煤电厂一次颗粒物排放状况及对环境真实贡献进行全面评估。

(3)高效除尘器可有效降低 FPM 的排放水平,但对 CPM 无太大影响. 高效除尘改造后 CPM 对 TPM 的贡献将大幅度提高,应引起足够的重视。

(4)冷凝液贡献了 CPM 质量的 68%,滤膜为 32%,燃煤电厂 CPM 中有机组分较少,为 1%。

参考文献:

- [1] 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].
- [2] 裴冰. 固定源排气中可凝结颗粒物排放与测试探讨[J]. 中国环境监测, 2010, 26(6): 9-12.
- [3] 裴冰. 固定源测试体系的中美比较与借鉴[J]. 环境监控与预警, 2014, 6(1): 18-23, 43.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 孔少飞, 白志鹏, 陆炳, 等. 固定源排放颗粒物采样方法的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12): 88-94.
- [7] 史妍婷, 杜谦, 高建民, 等. 燃煤电厂锅炉 $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [8] 王铮, 薛建明, 许月阳, 等. 燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [9] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3263-3270.
- [10] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 基于重庆本地碳成分谱的 $\text{PM}_{2.5}$ 碳组分来源分析[J]. 环境科学, 2014, 34(3): 810-819.
- [11] 陈颖军, 蔡伟伟, 黄国培, 等. 典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 673-678.
- [12] 海婷婷, 陈颖军, 王艳, 等. 民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2533-2538.
- [13] 窦晗, 常彪, 魏志成, 等. 国内民用燃煤烟气中多环芳烃排放因子研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1783-1788.
- [14] 裴冰. 燃煤电厂烟尘铅排放状况外场实测研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(6): 1697-1702.
- [15] 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. 58-60, 94-98.
- [16] 裴冰. 上海市燃煤电厂重金属排放状况研究[A]. 见: 中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 2013. 5236-5241.
- [17] Corio L A, Sherwell J. In-Stack condensible particulate matter measurements and issues [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, 50(2): 207-218.
- [18] USEPA. Method 202-Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources [S].
- [19] USEPA. Method 201A-Determination of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ emissions from stationary sources (constant sampling rate procedure) [S].
- [20] USEPA. Method 5-Determination of particulate matter emissions from stationary sources [S].
- [21] 裴冰. 颗粒物采样装置及利用该装置进行颗粒物检测的方法[P]. 中国专利: CN 102967491 A, 2013-03-13.
- [22] USEPA. Method 17- Determination of particulate matter emissions from stationary sources [S].
- [23] USEPA. Summary Pages for Test Methods and Performance Specifications. [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/emc/>, 2014-04-12.
- [24] 环境保护部. 大气监测规范、方法标准[EB/OL]. <http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/dqjhjbh/jcgfffbz/>, 2014-10-19.
- [25] HJ 168-2010 环境监测 分析方法标准制修订技术导则[S].
- [26] GB 13223-2011 火电厂大气污染物排放标准[S].

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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