

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中砷形态变化及油菜砷吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

高炉炼铁工艺细颗粒物 PM_{2.5} 排放特性分析

范真真¹, 赵亚丽¹, 赵浩宁^{1,2}, 梁兴印^{1*}, 孙静雯¹, 王保贵¹, 王亚军¹

(1. 北京盛邦天业科技有限公司, 北京 100012; 2. 天津市联合环保工程设计有限公司, 天津 300191)

摘要: 采用静电低压撞击器 (electrical low pressure impactor, ELPI) 对高炉出铁场、矿槽除尘后细颗粒物 (PM_{2.5}) 的粒径及质量浓度分布进行在线分析. 结果表明, 出铁场除尘后 PM_{2.5} 粒数浓度在 $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 数量级范围内, 主要为粒径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 而矿槽除尘后 PM_{2.5} 粒数浓度在 $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 数量级范围内, 主要为粒径 $1.0 \mu\text{m}$ 以下的颗粒物, 质量浓度呈单峰分布; PM_{2.5} 化学组成分析表明水溶性离子 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 含量较高, 分别为 10.32%~28.55%、10.36%~12.15%、3.97%~15.4%; 主量元素主要为 Fe、Si、Al, 含量分别为 16.8%~31.62%、2.24%~8.76%、1.24%~5.89%; 含碳组分 OC 和 EC 在 PM_{2.5} 中的含量也较为丰富, 分别为 2.7%~4.6% 和 0.8%~1.3%. PM_{2.5} 单体颗粒形态主要为球状颗粒和不规则颗粒. 高炉出铁场、矿槽除尘后 PM_{2.5} 的排放因子分别为 $0.045 \sim 0.085 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $0.042 \sim 0.071 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$.

关键词: 高炉炼铁; 细颗粒物 (PM_{2.5}); 粒径分布; 化学组分; 颗粒形貌

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3287-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.09.007

Emission Characteristics of PM_{2.5} from Blast Furnace Iron Making

FAN Zhen-zhen¹, ZHAO Ya-li¹, ZHAO Hao-ning^{1,2}, LIANG Xing-yin¹, SUN Jing-wen¹, WANG Bao-gui¹, WANG Ya-jun¹

(1. Beijing Shengbang Tianye Technology Limited Company, Beijing 100012, China; 2. Tianjin United Environmental Engineering Desing Co., Ltd., Tianjin 300191, China)

Abstract: Electrical low pressure impactor (ELPI) was used to online analyze the PM_{2.5} particle size and mass concentration distribution in the trapping field and ore tank of blast furnace iron-making plant. Results showed that the grain number concentration of PM_{2.5} in trapping field after dust removal was in the range of $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$, and the particle size was mainly below $0.1 \mu\text{m}$. While the grain number concentration of the PM_{2.5} in ore tank after dust removal was in the range of $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$, the particle size was mainly below $1.0 \mu\text{m}$, and the mass concentration distribution showed a single peak. The micro-morphology of PM_{2.5} monomer was mainly divided into two categories, spherical particles and irregular aggregates. Chemical composition analysis indicated that the concentrations of water soluble SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} were higher than other ions in PM_{2.5}, with the percentage of 10.32%-28.55%, 10.36%-12.15%, 3.97%-15.4%, respectively. The major elements was Fe, Si, Al, with 16.8%-31.62%, 2.24%-8.76%, 1.24%-5.89% of total mass, respectively; organic carbon and elementary carbon were 2.7%-4.6% and 0.8%-1.3%, respectively. The emission factors of PM_{2.5} in trapping field and in ore tank after dust removal were ranged from 0.045 to 0.085 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ and 0.042 to 0.071 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$, respectively.

Key words: blast furnace iron making; PM_{2.5}; particle-size distribution; chemical composition; particle morphology

细颗粒物 PM_{2.5} 也称可入肺颗粒物, 是指空气动力学等效直径等于和小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物. 大量研究表明 PM_{2.5} 化学成分复杂, 不仅能降低大气能见度, 且会对人体健康产生较大危害^[1~5]. 近年来, 细颗粒物污染形势严峻, 已引起国内外的广泛重视. 目前, 美国、欧盟、英国和中国等已在大气环境质量标准中均对 PM_{2.5} 进行了明确的要求.

钢铁冶炼行业作为我国大气污染的大户之一, 一个年产 100 万 t 钢的企业, 仅在炼钢、炼铁、烧结这 3 个工艺过程中, 每年产生约 10 万 t 粉尘^[6]. 颗粒物是钢铁企业废气排放中的重要污染物. 这些颗粒物粒径较小且组成成分较复杂. 目前, 国内针对大气环境、燃煤电厂或燃煤锅炉可吸入颗粒 PM₁₀ 和

细颗粒物 PM_{2.5} 特性研究较多^[7~11], 而对钢铁冶炼行业 PM_{2.5} 排放特征的研究工作很少. 高炉炼铁工艺作为钢铁行业关键工艺, 其 PM_{2.5} 贡献率很大, 因此本研究通过对高炉炼铁出铁场与矿槽除尘后细颗粒物 PM_{2.5} 进行现场测试, 深入探究其粒径与浓度分布、化学组成、颗粒形貌、排放因子等排放特性, 以期为我国钢铁冶炼行业 PM_{2.5} 的排放控制决策和控制技术的开发提供基础信息.

收稿日期: 2014-02-12; 修订日期: 2014-03-26

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201009006)

作者简介: 范真真 (1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水和大气污染控制技术, E-mail: fanzz0924@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xingyinliang@126.com

1 材料与方法

1.1 采样点的选择

本研究分别对山东某钢铁公司 2 条 1 880 m³ 高炉生产线,唐山 A 钢铁公司 2 650 m³ 高炉生产线,唐山 B 钢铁公司 550 m³ 高炉生产线进行样品采集和现场测试. 采样位置主要是高炉出铁场除尘后、矿槽除尘后,测试设备基本情况见表 1.

1.2 分析内容与仪器

本研究分析内容及分析仪器见表 2.

表 1 测试设备基本情况

Table 1 Basic information of test equipment			
编号	规模/m ³	测试工段	废气治理技术
1	1 880	出铁场	布袋除尘
2	1 880	出铁场	布袋除尘
		矿槽	布袋除尘
3	2 650	出铁场	布袋除尘
		矿槽	布袋除尘
4	550	出铁场	布袋除尘

表 2 分析内容与分析仪器

Table 2 Analysis items and analytical instruments		
分析内容	分析仪器	仪器制造商
PM _{2.5} 的粒径分布	荷电低压颗粒物撞击器 (ELPI)	芬兰 Dekati 公司
水溶性离子	Dionex-600 型离子色谱仪	美国 Dionex 公司
痕量元素、主量元素	IRIS Intrepid II XSP 型电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 和 iCAP Qc 型 ICP-MS 2202E 型双道氢化物发生电子荧光光度计 (AFS)	Thermo 公司
OC、EC	Model 2001 型热光碳分析仪	沙漠研究所 (Desert Research Institute, DRI)
形貌	EVO18 型 SEM	德国 Zeiss

1.3 分析方法

在现场采样过程中,选用石英膜、Tefon 膜、聚碳酸酯滤膜,分别进行等速采样. 用 ELPI 对各污染点源细颗粒物 PM_{2.5} 的粒径和浓度分布进行在线监测.

石英膜样品:用于 OC、EC 分析. 将采集的石英滤膜剪成条状碎片,置于 10 mL 干净的试管中;加 5 mL 高纯去离子水使之完全淹没滤膜,超声提取 30 min,提取液用微孔滤膜过滤. 重复上述步骤一次,将两次收集的滤液合并后进行 OC、EC 分析.

Tefon 膜样品:用于痕量元素与主量元素的分析. 将采样滤膜剪碎后放入消解罐中,在消解罐中加入 6 mL 硝酸、3 mL 盐酸 (1:1) 和 0.5 mL 氢氟酸,摇匀,封闭消解罐;将消解罐放入微波加速反应系统中,连接温控和压控传感器,设置微波消解程序、试验以温控为主,压控为辅. 消化完毕后待罐中温度降至室温,取出消解罐,将溶液倒入 Teflon 烧杯,在电热板上低温赶酸,然后转移至 10 mL 容量瓶内,用蒸馏水冲洗器皿,稀释至刻度,摇匀后进行痕量元素与主量元素分析.

聚碳酸酯滤膜样品:用于颗粒的形貌及水溶性离子组分分析. 采用扫描电镜进行颗粒物形貌分析,工作距离采用 6.5 mm 左右,工作电压 15 kV;将采集滤膜剪成条状碎片,置于 10 mL 干净的试管中,加 5 mL 高纯去离子水使之完全淹没滤膜,超声

提取 30 min,提取液用 0.25 μm 微孔滤膜过滤. 重复上次步骤一次,将两次收集的滤液合并后进行水溶性离子组合分析. 其中分析阳离子所用的分析柱为 CS17,抑制器为 CSRS;分析阴离子所用的分析柱为 AS11-HC,抑制器为 ASRS.

2 分析与讨论

2.1 PM_{2.5} 的粒径与浓度分布

由 ELPI 测得的高炉出铁场及矿槽排放的 PM_{2.5} 粒数浓度如图 1 所示. 由图 1(a)可知,高炉出铁场除尘后 PM_{2.5} 粒数浓度随粒径增加呈单调递减分布,对于不同规模的高炉炼铁工艺出铁场除尘后产生的 PM_{2.5} 粒数浓度在 10⁵ ~ 10⁶ cm⁻³ 数量级范围内,颗粒物随颗粒增大其粒数浓度不断减小,所排放的 PM_{2.5} 粒数浓度主要取决于粒径小于 0.1 μm 的颗粒. 由此可见,出铁场外排的 PM_{2.5} 大多为粒径 0.1 μm 以下的细颗粒物.

由图 1(b) 可以看出,高炉矿槽除尘后产生的 PM_{2.5} 粒数浓度在 10⁴ ~ 10⁵ cm⁻³ 数量级范围内,相比于出铁场除尘后 PM_{2.5} 的粒数浓度取决于粒径小于 0.1 μm 的颗粒外,粒径为 0.1 ~ 1.0 μm 的细颗粒物颗粒浓度也较大,即高炉矿槽除尘后的 PM_{2.5} 粒数浓度的大小取决于粒径在 1.0 μm 以下的细颗粒物的颗粒浓度. 高炉矿槽粉尘主要来自高炉原料转运加料和渣沟等环节,包括原始原料和熟矿原料转运和

投料过程中产生的扬尘. 其中熟料原料中含有大量高温加热后产生的细灰分颗粒. 在原料转运和投料过程中这部分颗粒由于密度低粒径小极易产生扬尘

现象, 并被集尘罩的负压气流吸走, 从而导致高炉矿槽部分细颗粒比普通的物理性原料转运过程产生的细颗粒比例增大.

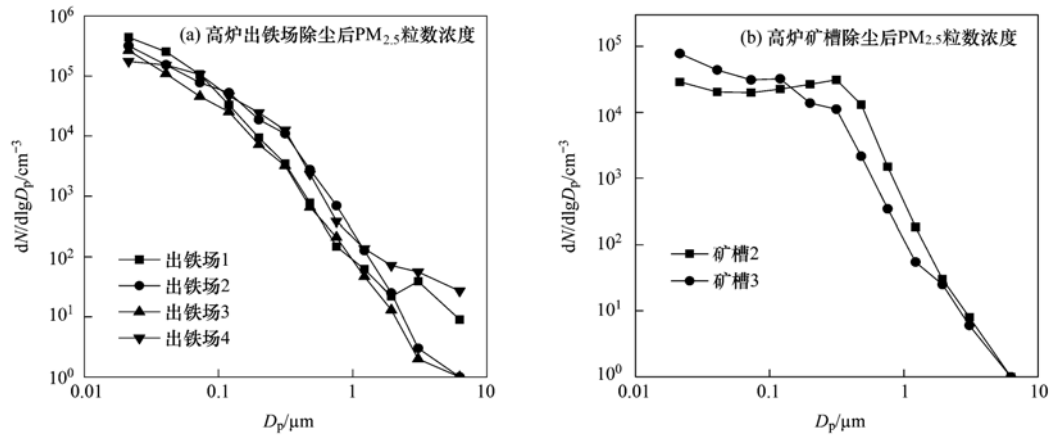


图1 高炉出铁场及矿槽 $PM_{2.5}$ 粒径浓度分布

Fig. 1 Particle size distribution of $PM_{2.5}$ from trapping field and ore tank of blast furnace iron-making plant after dust removal

高炉出铁场及矿槽除尘后排放的 $PM_{2.5}$ 质量浓度如图 2 所示. 高炉出铁场和矿槽除尘后 $PM_{2.5}$ 质量浓度均呈单峰分布.

由图 2(a) 可看出出铁场 1、出铁场 4 除尘后 $PM_{2.5}$ 质量浓度均在粒径为 0.31 μm 处出现峰值, 但粒径 $\geq 0.76 \mu m$, $PM_{2.5}$ 质量浓度则又呈现明显上升趋势. 而出铁场 2、出铁场 3 粒径浓度均在 0.76 μm 处出现峰值. 但在粒径 $\geq 3.1 \mu m$ 时, $PM_{2.5}$ 质量浓度又呈现明显上升趋势. 由图 2(b) 可看出矿槽 2 和矿槽 3 除尘后 $PM_{2.5}$ 质量浓度分别在粒径为 0.48 μm 和 0.31 μm 处出现峰值. 这种分布形态与许多燃煤电厂产生颗粒物的质量浓度分布一致^[14~16]. 这可能是因为燃烧过程产生的粗颗粒物由各种碎裂过程直接产生, 而细颗粒物主要是通过汽化-凝结机

制形成^[17].

2.2 $PM_{2.5}$ 的化学组成

对高炉出铁场和矿槽除尘后 $PM_{2.5}$ 化学组成水溶性离子(阳离子 NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和阴离子 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Br^-)、主量元素(Fe、Al、Si、Ca、Na、K 和 Mg)、微量元素(As、Hg、Se、Pb、Cd、Cr、Cu、Al、V、Zn、Mn、Fe)分别进行分析, 其元素组分分布情况如图 3. 从中可以看出, 出铁场与矿槽产生的 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子浓度高低顺序基本一致 $SO_4^{2-} > K^+ > Ca^{2+} > Cl^- > F^- > Na^+ > Mg^{2+} > NO_3^- > NH_4^+$. 对于高炉炼铁工艺排放 $PM_{2.5}$ 中 9 种水溶性离子含量最高的为 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} , 分别为 10.32% ~ 28.55%、10.36% ~ 12.15%、3.97% ~ 15.4%. 这可能与高

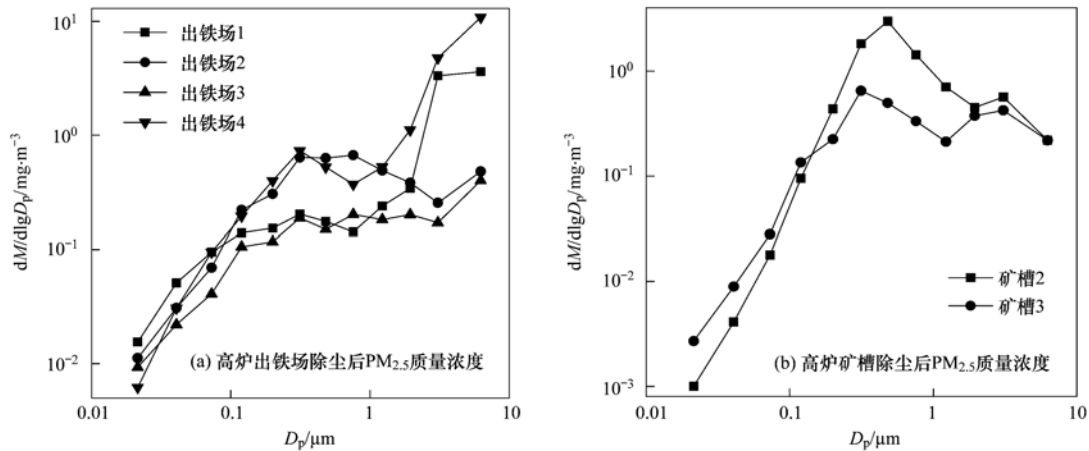


图2 高炉出铁场与矿槽 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布

Fig. 2 Mass concentration of $PM_{2.5}$ from trapping field and ore tank of blast furnace iron-making plant after dust removal

炉炼铁所用燃料煤种的含硫量较高所致. $\text{PM}_{2.5}$ 中大多数的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 是通过 SO_2 、 NO_x 气体氧化而形成的, SO_4^{2-} 通常以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4HSO_4 和 H_2SO_4 的形式存在, 且这些硫酸盐均是水溶性的^[18,19].

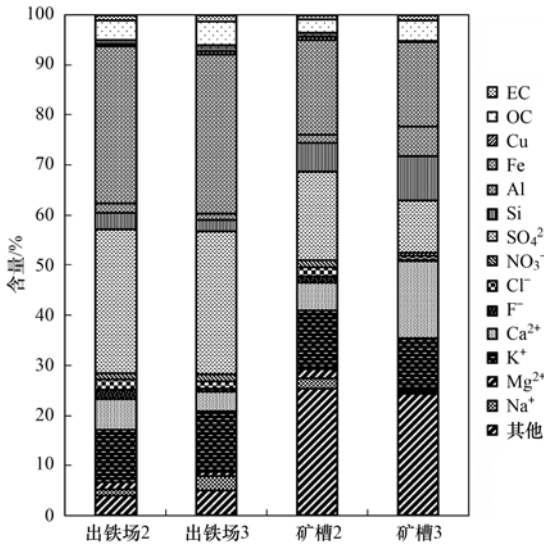


图3 高炉炼铁工艺各测试点 $\text{PM}_{2.5}$ 元素分布
Fig. 3 Element distribution of $\text{PM}_{2.5}$ from the test point of blast furnace iron-making

主量元素主要为 Fe、Si、Al, 含量分别为 16.8% ~ 31.62%、2.24% ~ 8.76%、1.24% ~ 5.89%, 其他元素含量均在 1% 以下, 6 种常见重金属元素中只有微量 Cr、As、Pb 被检出. 研究表明^[13] 细颗粒形成过程受多种生成因素影响, 其中气化-凝结机制对 $\text{PM}_{0.38}$ 形成起决定作用, 而工况温度和元素气化温度是细颗粒物气化-凝结的关键. 高炉炼铁过程中炉温可以达到 1 200 ~ 1 400℃, 主要成灰元素的物理性质如表 3 所示. 从中可知主要成灰元素 Si、Al、Fe、Ca 的熔点均在 900℃ 以上, 沸点均在 1 700℃ 以上, 在高炉炼铁过程中均不能达到其气化温度. 由高炉出铁场和高炉矿槽 $\text{PM}_{2.5}$ 元素组分分布情况可知高炉出铁场 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Na、K、Mg 等元素均发生了富集现象, 含量明显高于矿槽 $\text{PM}_{2.5}$ 各元素含量. 而由于这部分元素的气化凝结富集导致 Si、Al、Ca 等元素组分所占比例明显下降, 其中只有 Fe 元素出现了异常现象, 这是因为高炉冶炼过程 Fe 元素高浓度富集于铁水中, 而高炉渣主要成分为 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 , 3 种物质占高炉渣成分的 90% 左右, 即气化-凝结机制的影响不足以抵消 Fe 的富集效率. 因此综合以上分析认为工况温度和主量元素熔沸点是影响高炉出铁场细颗粒生成的主导因素.

表3 主要成灰元素的物理性质

Table 3 Physical properties of ash-forming elements

元素	Na	K	Si	Al	Ca	Mg	Fe
熔点/K	371	336.35	1 685	933.25	1 112	922	1 809
沸点/K	1 156	1 032	3 540	2 740	1 757	1 363	3 135

含碳组分 OC 和 EC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的含量也较为丰富, 本研究中测得 OC、EC 含量分别为 2.7% ~ 4.6% 和 0.8% ~ 1.3%, OC、EC 的比值在 2.1 ~ 5.8 之间. 这与原煤燃烧排放 $\text{PM}_{2.5}$ 的 OC、EC 比值一致^[20,21]. Chow 等^[22] 认为当 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 的比值超过 2 的时候, 显示存在二次反应生成的有机碳.

总体上, $\text{PM}_{2.5}$ 主要元素成分按含量大小分布较为相似: $\text{Fe} > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Si} > \text{OC} > \text{Al} > \text{EC}$.

2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 单体颗粒形貌分析

出铁场、矿槽各废气排放点 $\text{PM}_{2.5}$ 单体颗粒呈现的颗粒形貌如图 4 所示. 从高炉各点位排放颗粒物微观形态分析, 主要包含球状颗粒、凝聚态颗粒

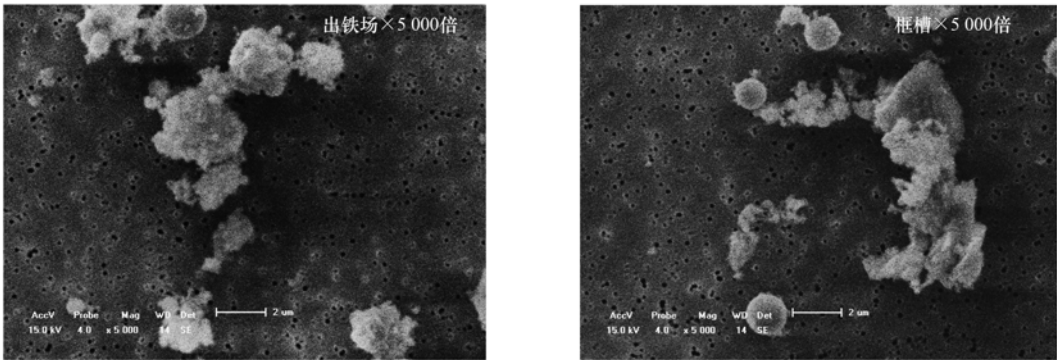


图4 各排放口 $\text{PM}_{2.5}$ 单体颗粒微观形态
Fig. 4 Micro-morphology of $\text{PM}_{2.5}$ monomer from discharge outlets of trapping field and ore tank

状和不规则块状或粉末状等几种颗粒构型。出铁场 PM_{2.5} 颗粒形态主要为球形颗粒和不规则颗粒两种, 其中球形颗粒表面较粗糙, 由表面吸附超细颗粒聚合形成, 不规则颗粒呈絮状。矿槽 PM_{2.5} 颗粒形态分为球形颗粒和非球形的不规则颗粒, 不规则块状或粉末状颗粒主要为原料破碎和其他机械过程产生。这与燃油和燃煤电厂排放可吸入颗粒物的物理化学特性相似^[23]。

2.4 PM_{2.5}的排放因子

根据实测数据核算 PM_{2.5} 的排放因子, 首先调查企业一段时间 T 内产品产量 P , 该时间段内某生产

工艺各废气排放点的 PM_{2.5} 排放因子按照公式 $EF_{PM_i} = (Q_{Ni} \cdot c_{PM_i} \cdot T) / P$ 进行计算。式中, EF_{PM_i} 为某生产线第 i 个废气排放点 PM_{2.5} 排放因子, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; Q_{Ni} 为某生产线第 i 个废气排放点标态干烟气量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; c_{PM_i} 为某生产线第 i 个排放点烟气中 PM_{2.5} 的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。基于现场实测数据, 计算出各测试点 PM_{2.5} 的排放因子, 结果列于表 4。高炉出铁场 PM_{2.5} 排放因子为 $0.045 \sim 0.085 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 高炉矿槽 PM_{2.5} 排放因子为 $0.042 \sim 0.071 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。本研究所得结果与相关报道中所涉及的燃煤电厂或锅炉除尘后细颗粒物 PM_{2.5} 的排放因子均具有很好的可比性^[24,25]。

表 4 炼铁高炉 PM_{2.5} 排放因子

Table 4 Emission factor of PM _{2.5} from BF iron making			
编号	测试位置	PM _{2.5} 质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	PM _{2.5} 排放因子/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
高炉 1	出铁场	1.555 6	0.063
	出铁场	3.444 6	0.054
高炉 2	矿槽	7.460 3	0.071
	出铁场	1.217 4	0.045
高炉 3	矿槽	2.455 3	0.042
	出铁场	3.995 0	0.085

3 结论

(1) 高炉出铁场除尘后产生的 PM_{2.5} 粒数浓度在 $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 数量级范围内, 其中主要为 $0.1 \mu\text{m}$ 以下细颗粒物。高炉矿槽除尘后 PM_{2.5} 粒数浓度在 $10^4 \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 数量级范围内, 主要为小于 $1.0 \mu\text{m}$ 的细颗粒物。高炉出铁场、矿槽除尘后的 PM_{2.5} 质量浓度呈单峰分布, 出铁场峰值出现粒径为 $0.31 \mu\text{m}$ 或 $0.76 \mu\text{m}$ 处, 矿槽除尘后峰值出现在粒径为 $0.48 \mu\text{m}$ 和 $0.31 \mu\text{m}$ 处。

(2) 高炉出铁场生成细颗粒物的主导因素是工况温度和主量元素熔沸点。

(3) 高炉炼铁过程 PM_{2.5} 单体颗粒形态主要为球形颗粒和不规则颗粒。

(4) 根据实测数据核算出高炉出铁场、矿槽除尘后 PM_{2.5} 排放因子分别分布于 $0.045 \sim 0.085 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, $0.042 \sim 0.071 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 范围内, 可为建立我国的产排污系数体系, 编制排放清单提供参考。

参考文献:

[1] 朱李华, 陶俊, 陈忠明, 等. 2010 年 1 月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 13-19.

[2] Kam W, Delfino R J, Schauer J J, et al. A comparative assessment of PM_{2.5} exposures in light-rail, subway, freeway, and surface street environments in Los Angeles and estimated lung

cancer risk[J]. Environmental Science: Processes and Impacts, 2013, **15**(1): 234-243.

[3] Brook R D, Rajagopalan S, Pope C A, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association[J]. Circulation, 2010, **121**(21): 2331-2378.

[4] Gu Z P, Feng J L, Han W L, et al. Diurnal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons associated with PM_{2.5} in Shanghai, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(3): 389-396.

[5] Oh S M, Kim H R, Park Y J, et al. Organic extracts of urban air pollution particulate matter (PM_{2.5})-induced genotoxicity and oxidative stress in human lung bronchial epithelial cells (BEAS-2B cells)[J]. Mutation Research, 2011, **723**(2): 142-151.

[6] 韩剑宏. 钢铁工业环保技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[7] Yu Y, Schleicher N, Norra S, et al. Dynamics and origin of PM_{2.5} during a three-year sampling period in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2011, **13**(2): 334-346.

[8] Shen G F, Yuan S Y, Xie Y N, et al. Ambient levels and temporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ at a residential site in the mega-city, Nanjing, in the western Yangtze River Delta, China[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2014, **49**(2): 171-178.

[9] Zhang Y S, Wang C Y, Wang L, et al. Control Technology of PM_{2.5} in Coal-Fired Power Plant and Experiment on Dedusting Performance of Typical Filters to PM_{2.5}[J]. Advanced Materials Research, 2013, **726**: 2135-2139.

[10] 王铮, 薛建明, 许月阳, 等. 燃煤电厂 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.
- [11] 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.
- [12] 程永高, 侯素霞, 谷群广, 等. 钢铁企业排放的 $PM_{2.5}$ 等颗粒物中重金属元素分布的实验研究[J]. 材料与冶金学报, 2014, **13**(1): 71-73, 78.
- [13] 马京华. 钢铁企业典型生产工艺颗粒物排放特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [14] 梁兴印, 张玉凤, 赵大琛, 等. 黑色金属冶炼行业 $PM_{2.5}$ 排放特性研究[J]. 实验技术与管理, 2013, **30**(9): 43-46.
- [15] 易红宏, 郝吉明, 段雷, 等. 电厂除尘设施对 PM_{10} 排放特征影响研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1921-1927.
- [16] 隋建才, 徐明厚, 丘纪华, 等. 燃煤锅炉 PM_{10} 形成与排放特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, **27**(2): 335-338.
- [17] 商昱薇. 层燃工业锅炉细颗粒物 $PM_{2.5}$ 排放特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [18] 李彩霞, 李彩亭, 曾光明, 等. 长沙市夏季 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的污染特征[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 599-603.
- [19] 王明星. 大气化学[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 160-177.
- [20] 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 and Technology, 2005, **39**(6): 1861-1867.
- [21] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China[J]. Geophysical Research Letters, 2006, **33**(20), doi: 10.1029/2006GL026966.
- [22] Chow J C, Waston J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. Atmosphere Environment, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [23] 赵承美, 李清飞, 孙俊民, 等. 燃油和燃煤电厂排放可吸入颗粒物的物理化学特性[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(6): 55-58.
- [24] 王圣, 朱法华, 王慧敏, 等. 基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 630-635.
- [25] 李超, 李兴华, 段雷, 等. 燃煤工业锅炉可吸入颗粒物的排放特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 650-655.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue, <i>et al.</i>	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing, <i>et al.</i>	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang, <i>et al.</i>	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang, <i>et al.</i>	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人