

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因素分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

炼焦工序颗粒物排放特征

王彦辉^{1,2}, 赵亮^{1,2}, 孙文强^{1,2*}, 叶竹³, 蔡九菊²

(1. 东北大学热能工程系, 沈阳 110819; 2. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110819; 3. 东北大学冶金学院实验中心, 沈阳 110819)

摘要: 为探究钢铁企业炼焦工序各排放源颗粒物的排放特征, 根据固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法, 使用崂应 3012H 自动烟尘(气)测试仪和安德森分级采样器对某钢铁企业炼焦工序的装煤/推焦、干熄焦排气、筛焦转运等环节的颗粒物排放源进行现场采样. 将不同排放源的颗粒物分别进行了微观形貌、粒径分布和化学成分分析. 结果表明, 各排放源单颗粒分为富铁、富硅、富钙、炭质和烟气聚合物这 5 种类型, 外观上主要呈多角块状、不规则层片、团状和絮状 4 种形态; 装煤/推焦排放颗粒物的粒径集中在 3.3~4.7 μm , 干熄焦排气为 3.3~4.7 μm 和 5.8~9.0 μm , 筛焦转运为 4.7~5.8 μm ; 炼焦工序各排放源颗粒物的主要化学成分为 C、 SiO_2 、 Al_2O_3 、S、CaO、TFe, 质量分数分别为 76.30%~81.30%、5.36%~5.91%、3.96%~4.26%、1.15%~1.34%、0.52%~1.59%、0.81%~1.34%.

关键词: 炼焦工序; 颗粒物; 形貌; 粒径分布; 化学成分

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5359-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803181

Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process

WANG Yan-hui^{1,2}, ZHAO Liang^{1,2}, SUN Wen-qiang^{1,2*}, YE Zhu³, CAI Jiu-ju²

(1. Department of Thermal Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Experimental Center of School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To investigate the particulate matter emission characteristics of various emitting sources of the coking process of iron and steel plants, an automatic dust (smoke) tester and an eight-staged Anderson sampler were employed to conduct onsite sampling of particulate matter emissions from the coking process, including coal loading and coke pushing, coke dry quenching exhaust and coke screening and transferring in a steel plant, based on the measurement of particulate matter in the exhaust of fixed sources and sampling of gaseous pollutants. The morphology, particle size distribution, and chemical composition of the particulate matter from different sources were investigated. The results show that the single particles can be divided into five categories: iron-rich, silicon-rich, calcium-rich, carbon, and smoke polymer. They mainly appear in four forms: polygon block, irregular lamellae, lumps, and floc. The particle size of the coal loading and coke pushing unit mainly is 3.3-4.7 μm , while it is 3.3-4.7 μm and 5.8-9.0 μm for the dry quenching exhaust and 4.7-5.8 μm for the coke screening and transferring unit. The main chemical components of particulate matter in the coking process are C, SiO_2 , Al_2O_3 , S, CaO, and TFe, with contents of 76.30%-81.30%, 5.36%-5.91%, 3.96%-4.26%, 1.15%-1.34%, 0.52%-1.59%, and 0.81%-1.34%, respectively.

Key words: coking process; particulate matter; morphology; particle size distribution; chemical composition

大气污染对人体健康危害和环境能见度的影响引起了研究人员的广泛关注^[1~5]. 有研究表明, 工业排放颗粒物是城市大气污染的主要来源之一^[6~11]. 其中, 钢铁工业生产规模庞大, 颗粒物排放源数量众多, 排放量达到了 357.2 万 t, 在工业颗粒物总排放量中占 28.9%^[12]. Zhao 等^[13] 和 Li 等^[14] 研究了烧结、炼铁和炼钢工序颗粒物的排放特征. 炼焦工序颗粒物排放量占钢铁企业总排放量的 10% 左右, 但关于炼焦颗粒物方面的研究却鲜见报道. 在排放特征分析方面, 方宏达等^[15] 采用 BRC 连续提取法并结合电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试了 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中不同金属成分的质量分数; 秦鑫等^[16] 利用在线气溶胶质谱仪并结合自适

应共振理论神经网络算法, 对颗粒物中含有的重金属成分进行了化学分析; 冯茜丹等^[17] 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的 3 种典型微观形貌和粒度分布等特征进行分析; Saarnio 等^[18] 对芬兰赫尔辛基电厂所产生颗粒物的粒径分布和来源进行了分析. 目前, 对于城市和燃煤工业排放颗粒物特征的研究较多, 但对于钢铁企业尤其是炼焦工序颗粒物特征的研究较少. 所以, 本研究主要对炼焦工序排放颗粒物的粒径分布、形

收稿日期: 2018-03-27; 修订日期: 2018-05-30

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409023); 中央高校基本科研业务费项目(N162504011)

作者简介: 王彦辉(1992~), 男, 硕士, 主要研究方向为钢铁行业烟尘排放特性与控制, E-mail: 784614788@qq.com

* 通信作者, E-mail: sunwq@mail.neu.edu.cn

貌和化学成分等特征进行检测分析, 以期为钢铁企业污染物排放清单的完善提供数据补充和参考。

1 材料与方法

1.1 采样点和采样频次

本研究选取国内某年产1 000万 t 的大型联合钢铁企业进行测试. 该企业炼焦工序共有2座65孔顶装焦炉, 年产能175万 t, 采用干法熄焦工艺, 各排放源均配有布袋除尘器, 并设有装煤和出焦的除尘地面站. 炼焦工序使用煤种为气煤、1/3焦煤、肥煤、焦煤、瘦煤. 根据《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157-1996) 中的相关规定, 并结合现场实际情况对其炼焦工序的装煤/推焦、干熄焦排气、筛焦转运等过程有组织排放源采样, 各采样点距地面高度25 m, 其分布如图1所示, 每个采样点分别对TSP和PM₁₀进行6组采样.

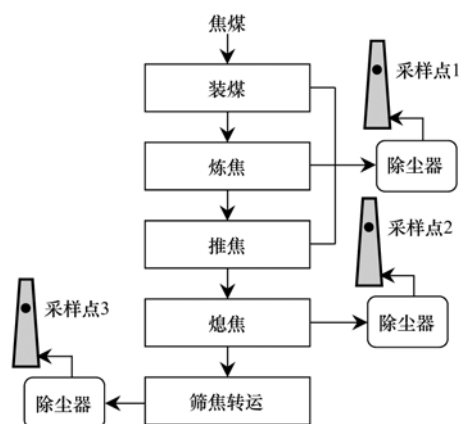


图1 炼焦工序工艺流程及采样点示意

Fig. 1 Sketch of the coking process and sampling points

1.2 采样设备及材料

本研究分别利用崂应3012H自动烟尘(气)测试仪、美国Thermo-Andersen公司生产的TE-20-800安德森分级采样器对TSP和PM₁₀进行采集. 出于对采样环境和样品分析目的的综合考虑, 选取具有高捕集效率(对0.3 μm的粒子捕集效率约99%)、耐高温(250℃)、不吸收气体、重金属空白值低等特点的Teflon膜作为安德森分级采样器的滤膜; 采用具有高捕集效率(对0.5 μm的粒子捕集效率约99%)、耐高温(500℃)、耐酸、耐腐蚀的玻璃纤维滤筒供崂应3012H自动烟尘(气)测试仪使用. 此外, 为了减小采样误差, 采样前对滤膜、滤筒和采样设备进行预处理: ① 为了降低水分对称重的影响, 将Teflon膜和玻璃纤维滤筒置于105℃的高温加热箱中烘烤1 h, 然后放入干燥器中冷却至室温, 最

后用岛津AUW220D分析天平(量程为82 g, 精度为0.01 mg)称量至恒重; ② 用去离子水对安德森分级采样器的每级碰撞板和预分离器进行清洗, 然后烘干; 用清洁的空气对3012H自动烟尘(气)测试仪的测试管路进行清洗并检查干燥剂是否有效.

1.3 分析方法

1.3.1 形貌分析

用德国ZEISS生产的Ultra Plus场发射扫描电镜(15 kV和1 kV工作电压下分辨率分别达到0.8 nm和1.2 nm; 放大倍数12~1 000 000倍; 电压调整范围0.02~30 kV)和X射线能谱仪对装煤/推焦、干熄焦、筛焦转运颗粒物进行形貌观察和面扫描元素分析. 扫描前将样品用炭质双面胶粘在4 cm²大小的铁片状样品桩上, 为了提升样品的导电性, 达到较好的成像效果, 对样品进行喷涂Au镀膜处理, 而后调整到合适的工作电压和距离下对颗粒物进行成像观察.

1.3.2 颗粒物的粒径分布

本研究采用安德森分级采样器获取各排放源PM₁₀的粒径分布. 采样器由8个不锈钢采集盘、真空泵以及管路组成. 其0~7级采集盘允许通过的粒径区间分别为: 9.0~10.0、5.8~9.0、4.7~5.8、3.3~4.7、2.1~3.3、1.1~2.1、0.6~1.1和0.4~0.6 μm. 对不同排放源颗粒物在每采集盘滤膜上的收集量进行称重, 再根据式(1)分别求出各排放源PM₁₀不同粒径区间内的颗粒物质量浓度.

$$c_i = (m_{2i} - m_{1i}) / V \quad (1)$$

式中, c_i 为第*i*级颗粒物质量浓度(mg·m⁻³), m_{1i} 为第*i*级采集盘上空白滤膜的质量(mg), m_{2i} 为第*i*级采集盘上采样后滤膜的质量(mg), V 为采样流量的体积(m³).

1.3.3 化学成分分析

采用日本理学公司制造的ZSX Primus II型X射线荧光光谱仪对Na、MgO、Al₂O₃、K、CaO、TiO₂、Cr₂O₃、Mn、TFe、SiO₂、P、Cl等化学成分进行检测; 使用美国LECO公司制造的CS230红外碳硫分析仪对C和S进行检测; 采用美国PE公司制造的Optima 8300DV型电感耦合等离子体发射光谱仪对Mo、Sr、Se、As、Zn、Cu、Ni、Co、Cd、Pb等痕量元素进行检测.

2 结果与讨论

2.1 颗粒物的形貌

图2是装煤/推焦过程排放颗粒物的形貌. 颗

颗粒物整体状态呈大小不一相间分布, 主要原因是装煤/推焦过程既有煤粉和焦炭之间机械碰撞、黏附团聚产生的粗大颗粒, 又有高温(1 000℃左右)红焦在大气中发生剧烈氧化燃烧反应致使焦炭颗粒表面爆裂以及无机矿物蒸发成核凝结所产生的细小烟尘颗粒物^[19]. 对图 2 中的矩形区域进行面扫描, 其能谱图如图 3 所示. 可见, 装煤/推焦颗粒物按成分的谱峰可分为富铁、富硅、富钙和炭质 4 种类型. 其中不规则层片颗粒可能是因燃烧破裂的煤焦碎片, 多角块状颗粒可能是因为熔点较高而保留原始多角外形的铁、硅、钙矿物颗粒^[20~22]. 此外, 附着于层片状颗粒表面或团聚在一起的絮状颗粒, 可能是超细颗粒发生凝并生成的烟气聚合体^[23].

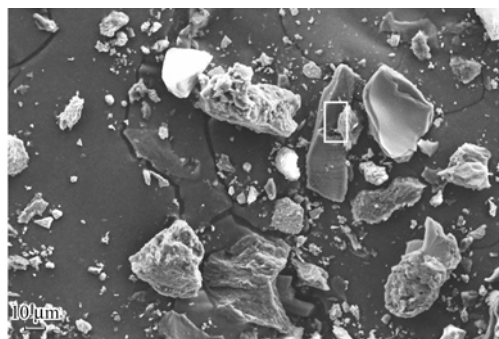


图 2 装煤/推焦过程排放颗粒物电镜成像

Fig. 2 SEM image of the coal loading and coke pushing unit

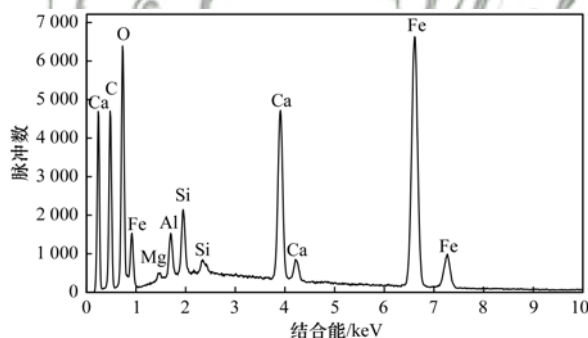


图 3 装煤/推焦过程排放颗粒物能谱图

Fig. 3 EDS spectrum of the coal loading and coke pushing unit

图 4 是干熄焦排气所含颗粒物的形貌. 颗粒物整体状态呈片状堆叠, 细小碎粒零星分布. 这主要是因为干熄焦排气中, 由排焦箱下落的焦炭经摩擦、碰撞形成的低温(约 160℃)粉尘, 颗粒物较为粗大. 细小碎粒颗粒物主要是熄焦时吸收红焦显热所产生的烟气体冷凝后形成. 对图 4 中的矩形区域进行面扫描, 其能谱图如图 5 所示. 可见, 干熄焦排气颗粒物中, C 和 Ca 的谱峰较高, 可分为炭质和富钙两种类型. 其中较大的多角不规则片状颗粒可能是物理破碎的焦炭, 较小的多角碎粒可能是富

钙的矿物颗粒. 白色团状颗粒主要是在干熄焦过程中吸收红焦显热的高温混合烟气冷凝后形成亚微米级($< 1.0 \mu\text{m}$)的颗粒物发生团聚的烟气聚合体^[23].

图 6 是筛焦转运过程排放颗粒物的形貌. 多角块状、条状大颗粒物几乎布满整个空间, 少量的碎屑状小颗粒散落在大颗粒物之间. 对图 6 中的矩形区域进行面扫描, 其能谱图如图 7 所示. 结合图 5 和图 7 可以发现, 筛焦转运过程和干熄焦排气颗粒物的能谱分布较为相似, C 和 Ca 的谱峰较为突出, 同样可分为炭质和富钙两种类型. 其中条状颗粒主要是熄焦后的焦炭在筛焦楼破碎筛分以及运输过程中因机械破碎形成, 较为粗大.

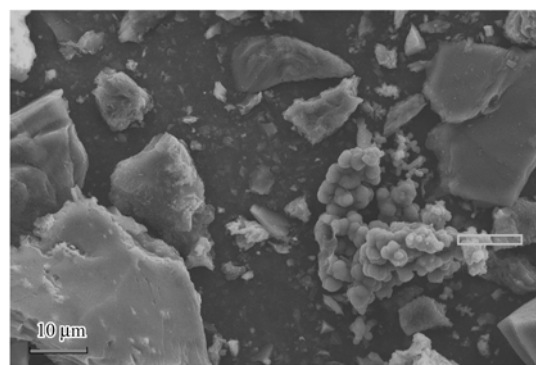


图 4 干熄焦排气颗粒物电镜成像

Fig. 4 SEM image of the coke dry quenching exhaust

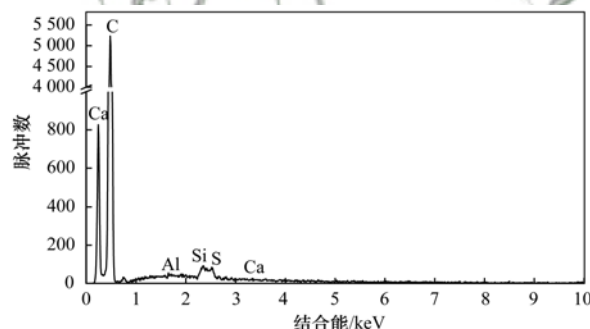


图 5 干熄焦排气颗粒物能谱图

Fig. 5 EDS spectrum of the coke dry quenching exhaust

2.2 颗粒物的粒径分布

根据图 8 所示, 装煤/推焦过程所产生的颗粒物中 PM_{10} 总体上近似单峰分布, 在 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 粒径范围内出现峰值, 质量浓度为 $2.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 较纯煤粉燃烧排放的颗粒物(峰值分别位于 $0.005 \sim 0.015 \mu\text{m}$ 和 $0.030 \sim 0.050 \mu\text{m}$ 粒径范围之内)^[24]向较大的粒径范围偏移. PM_{10} 中粗粒子模态($> 2.0 \mu\text{m}$)颗粒所占质量分数约 60% 的比重, 主要原因是装煤/推焦过程中, 来自装煤孔排出的烟尘和推焦时焦炭在空气中燃烧产生的烟尘具有较高的黏附

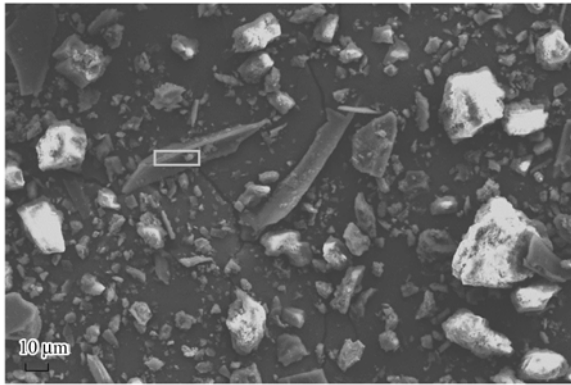


图6 筛焦转运过程排放颗粒物电镜成像

Fig. 6 SEM image of the coke screening and transferring unit

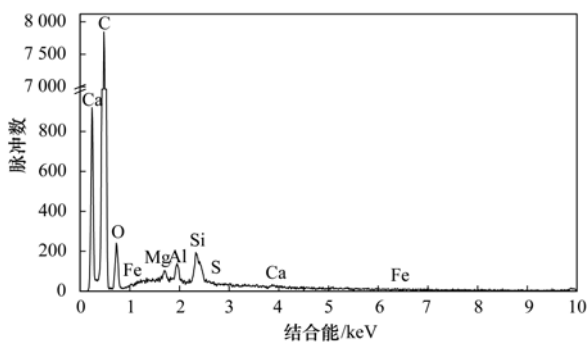
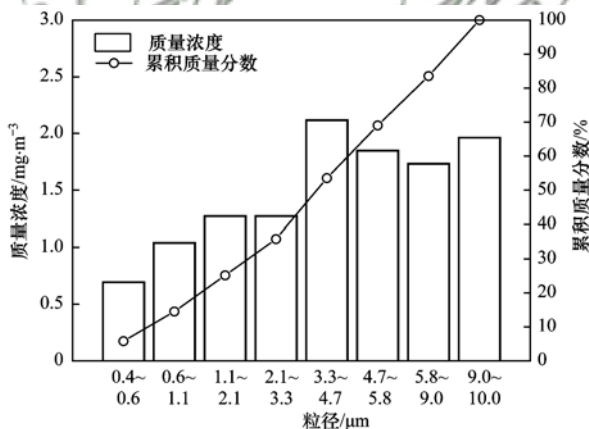


图7 筛焦转运过程排放颗粒物能谱图

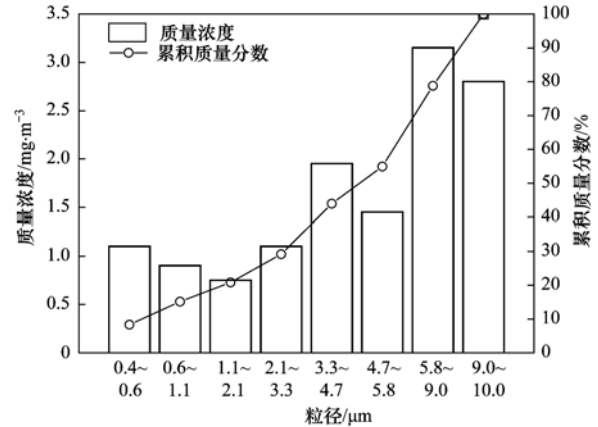
Fig. 7 EDS spectrum of the coke screening and transferring unit

图8 装煤/推焦过程 PM_{10} 的粒径分布Fig. 8 PM_{10} of the coal loading and coke pushing unit

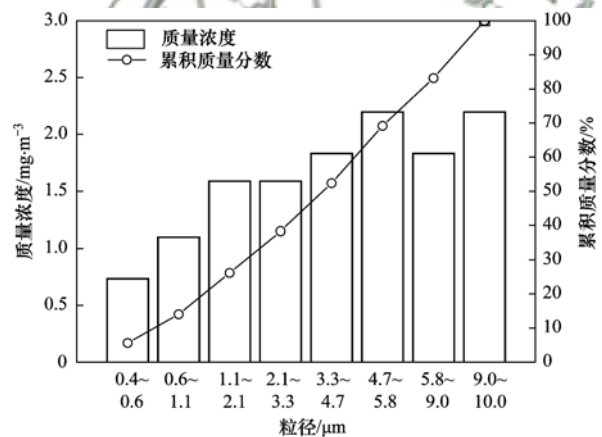
性, 相互碰撞时容易团聚成较大颗粒。

根据图9所示, 干熄焦排气中 PM_{10} 分别在粒径区间 $3.3 \sim 4.7 \mu m$ 和 $5.8 \sim 9.0 \mu m$ 范围内出现 $1.95 mg \cdot m^{-3}$ 和 $3.15 mg \cdot m^{-3}$ 这2个质量浓度峰值。 PM_{10} 中粗粒子模态颗粒所占质量分数约70%, 形成这样的规律可能是因为在熄焦炉顶进行装焦作业时, 焦块在高温环境 ($500 \sim 600^\circ C$) 下燃烧, 致使其中无机物发生气化现象后经均相成核和异相冷凝形成积聚模态 ($0.1 \sim 2.0 \mu m$) 颗粒物, 并且熄焦炉下

部排焦时会产生经机械破碎而形成的粗粒子模态颗粒物, 两者共同作用, 使得相较于纯煤粉燃烧过程, 干熄焦排气的粒径分布频度的峰值朝着大粒径方向偏移。

图9 干熄焦排气 PM_{10} 的粒径分布Fig. 9 PM_{10} of the dry coke quenching exhaust

根据图10所示, 筛焦转运过程中 PM_{10} 在 $4.7 \sim 5.8 \mu m$ 的粒径范围内出现峰值, 质量浓度为 $2.20 mg \cdot m^{-3}$ 。 PM_{10} 中粗粒子模态颗粒所占质量分数为67%, 主要原因是此过程中, 通过机械振动破碎、皮带输送跌落等物理条件产生的粉尘多为粗粒子模态颗粒物。

图10 筛焦转运过程 PM_{10} 的粒径分布Fig. 10 PM_{10} of the coke screening and transferring unit

2.3 颗粒物的化学成分

炼焦工序排放颗粒物的化学成分在一定程度上受其所用煤种及煤质的影响, 但炼焦工序在焦煤配比环节会根据实际情况产生变化, 情况较为复杂。因此, 本研究只分析排放颗粒物中的化学成分, 未探讨煤种及煤质对排放颗粒物化学成分的影响。

炼焦工序各排放源颗粒物的化学成分检测结果如表1所示。对于炼焦工序的不同排放源, 大部分

无机化合物(SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO)、金属元素(Fe 、 K 、 Na 、 Co 、 Ni 、 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Cd 、 Rb)和非金属元素(C 、 S 、 As 、 Se)的成分变化较小,仅有无机化合物 CaO (0.52% ~ 1.59%)和非金属元素 Cl (< 0.01% ~ 0.16%)的质量分数分别发生了约 3 倍和 10 倍的变化. 主要原因可能是炙热的红焦在运送到熄焦炉之前,与空气中的氧有着更长久的接触,所以干熄焦中的 CaO 大幅增加;而 Cl 的析出随温度的上升而增加^[25],所以随着装煤/推焦、干熄焦排气、筛焦转运过程温度的逐步降低, Cl 的析出量快速下降.

此外,炼焦工序各排放源颗粒物的主要成分如图 11 所示,其中 C 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 S 、 CaO 、 TFe (其它元素质量分数均小于 1.00%)质量分数分别为 76.30% ~ 81.30%、5.36% ~ 5.91%、3.96% ~ 4.26%、1.15 ~ 1.34%、0.52% ~ 1.59%、0.81% ~ 1.34%. 分析可知,炼焦工序以煤为原料,所以其排放的颗粒物中, C 的质量分数很高. Al 、 Si 、 Fe 、 Ca 、 S 是煤的主要矿物成分,而 SiO_2 、 Al_2O_3 、 S 、 TFe 、 CaO 是煤在成焦过程中,煤中的矿物质经燃烧反应所产生灰分的主要成分,所以有较高的质量分数. 这一结果与文献[26]所得到的结果相近.

表 1 颗粒物的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of the particulate matters/%				
成分类别	成分名称	装煤/推焦	干熄焦排气	筛焦转运
无机化合物	SiO_2	5.91	5.58	5.36
	Al_2O_3	4.26	4.11	3.96
	CaO	0.52	1.59	1.18
	TiO_2	0.24	0.21	0.19
	MgO	0.10	0.22	0.18
	TFe	0.93	1.34	0.81
	K	0.09	0.07	0.06
	Na	0.03	0.01	0.01
	Co	<0.01	<0.01	<0.01
	Ni	<0.01	<0.01	<0.01
金属元素	Cu	<0.01	<0.01	<0.01
	Zn	<0.01	<0.01	<0.01
	Pb	<0.01	<0.01	<0.01
	Cd	<0.01	<0.01	<0.01
	Rb	<0.01	<0.01	<0.01
	C	76.60	76.30	81.30
	S	1.18	1.34	1.15
	Cl	0.16	0.02	<0.01
非金属元素	As	<0.01	<0.01	<0.01
	Se	<0.01	<0.01	<0.01

3 结论

(1)炼焦工序各排放源颗粒物分为炭质、富铁、

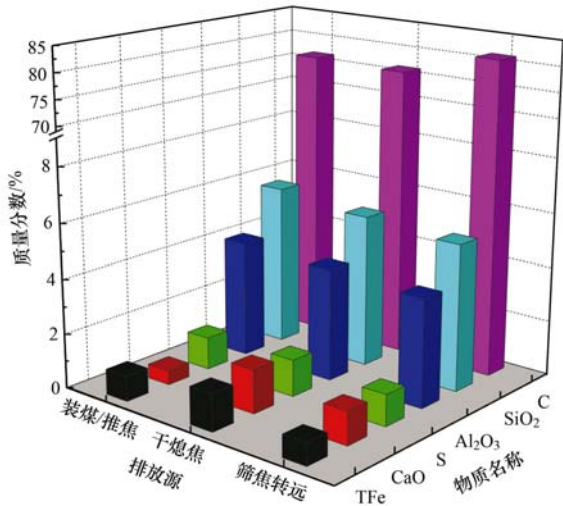


图 11 颗粒物主要化学成分分布

Fig. 11 Main chemical composition of the particulate matters

富硅、富钙和烟气聚合体 5 种类型,外观上呈不规则层片、多角块状、团状、絮状 4 种形态;其中装煤/推焦过程产生不规则层片的炭质、多角块状的富铁、富硅、富钙和絮状的烟气聚合体颗粒物,干熄焦排气、筛焦转运过程产生不规则层片的炭质、多角块状的富钙和团状的烟气聚合体颗粒物.

(2)装煤/推焦、筛焦转运颗粒物的 PM_{10} 总体上都呈单峰形态,分别在 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 以及 $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 粒径范围内达到 $2.12 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的质量浓度峰值;干熄焦排气则是分别在 $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 和 $5.8 \sim 9.0 \mu\text{m}$ 范围内出现 $1.95 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 这 2 个峰值.

(3)炼焦工序各排放源颗粒物主要化学成分按从高到低的顺序有 C 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 S 、 CaO 、 TFe ,质量分数分别为 76.30% ~ 81.30%、5.36% ~ 5.91%、3.96% ~ 4.26%、1.15% ~ 1.34%、0.52% ~ 1.59%、0.81% ~ 1.34%.

参考文献:

[1] Park D, Barabad M L, Lee G, *et al.* Emission characteristics of particulate matter and volatile organic compounds in cow dung combustion[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47** (22): 12952-12957.

[2] Kittner N, Fadadu R P, Buckley H L, *et al.* Trace metal content of coal exacerbates air-pollution-related health risks; the case of lignite coal in Kosovo[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(4): 2359-2367.

[3] Li X Z, Yang Y, Xu X, *et al.* Air pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons generated by human activities and their health effects in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **112**: 1360-1367.

[4] 柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 等. 青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 15-21.

Ke X S, Sheng L F, Kong J, *et al.* Variation of atmospheric

- particle number concentrations in Qingdao and its impact on visibility[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 15-21.
- [5] 浦静姣, 徐宏辉, 马千里. 长江三角洲背景地区大气污染对能见度的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(12): 4435-4441.
- Pu J J, Xu H H, Ma Q L. Impacts of atmospheric pollution on visibility in the background area of Yangtze River Delta, China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4435-4441.
- [6] 段文娇, 郎建奎, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM_{2.5} 影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1445-1454.
- Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on PM_{2.5} [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1445-1453.
- [7] 王慧丽, 雷宇, 陈潇君, 等. 京津冀燃煤工业和生活锅炉的技术分布与大气污染物排放特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(10): 1510-1517.
- Wang H L, Lei Y, Chen X J, *et al.* Technology distribution and air pollutant emissions from coal-fired boilers for industrial and residential use in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(10): 1510-1517.
- [8] 王堃, 滑申冰, 田贺忠, 等. 2011 年中国钢铁行业典型有害重金属大气排放清单[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 2934-2938.
- Wang K, Hua S B, Tian H Z, *et al.* Atmospheric emission inventory of typical heavy metals from iron and steel industry in China, 2011 [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 2934-2938.
- [9] 伯鑫, 徐峻, 杜晓惠, 等. 京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(5): 1684-1692.
- Bo X, Xu J, Du X H, *et al.* Impacts assessment of steel plants on air quality over Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(5): 1684-1692.
- [10] 牟莹莹, 郑新梅, 李文青, 等. 南京市工业源大气污染物排放清单的建立[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(3): 204-210.
- Mu Y Y, Zheng X M, Li W Q, *et al.* Development of an industrial air pollutants emission inventory of Nanjing city [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(3): 204-210.
- [11] 陈璐, 周阳, 姚立英, 等. 天津市各区县 PM_{2.5} 污染工业行业贡献构成分析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 33-39.
- Chen L, Zhou Y, Yao L Y, *et al.* Modeling studies of industrial sector contributions to PM_{2.5} pollution in different districts of Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 33-39.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境统计年报? 2015 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [13] Zhao L, Sun W Q, Li X L, *et al.* Assessment of particulate emissions from a sinter plant in steelmaking works in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, **189**(8): 368.
- [14] Li X L, Sun W Q, Zhao L, *et al.* Emission characterization of particulate matter in the ironmaking process [J]. *Environmental Technology*, 2017, **13**: 1-11.
- [15] 方宏达, 陈锦芳, 段金明, 等. 厦门市郊区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中重金属的形态特征及生物可利用性研究[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(11): 1872-1877.
- Fang H D, Chen J F, Duan J M, *et al.* Speciation characteristics and bioavailability of heavy metal elements in PM_{2.5} and PM₁₀ in the suburbs of Xiamen [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(11): 1872-1877.
- [16] 秦鑫, 张泽锋, 李艳伟, 等. 南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4467-4474.
- Qin X, Zhang Z F, Li Y W, *et al.* Sources analysis of heavy metal aerosol particles in north suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4467-4474.
- [17] 冯茜丹, 明彩兵, 刘晖, 等. 2011 年秋季广州城区大气 PM_{2.5} 微观形貌和粒度分布[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 1013-1018.
- Feng X D, Ming C B, Liu H, *et al.* Microscopic morphology and size distribution of PM_{2.5} in Guangzhou urban area in fall 2011 [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1013-1018.
- [18] Saarnio K, Frey A, Niemi J V, *et al.* Chemical composition and size of particles in emissions of a coal-fired power plant with flue gas desulfurization [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2014, **73**: 14-26.
- [19] 刘洪鹏, 郭超, 巩时尚, 等. 龙口油页岩半焦燃烧破碎特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, **17**(7): 168-172.
- Liu H P, Guo C, Gong S S, *et al.* Longkou oil shale semi-coke combustion characteristics of particle crushing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, **17**(7): 168-172.
- [20] 罗雷, 郭扬扬, 郑扬, 等. 典型钢铁源颗粒物形貌及元素的特征分析[J]. *过程工程学报*, 2017, **17**(3): 647-654.
- Luo L, Guo Y Y, Zheng Y, *et al.* Morphology and elemental feature analysis of particles in typical steel source [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2017, **17**(3): 647-654.
- [21] 赵亚丽, 赵浩宁, 范真真, 等. 烧结机细颗粒物 PM_{2.5} 排放特性[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(3): 1369-1375.
- Zhao Y L, Zhao H N, Fan Z Z, *et al.* Emission characteristics of PM_{2.5} from sintering machine [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(3): 1369-1375.
- [22] 范真真, 赵亚丽, 赵浩宁, 等. 高炉炼铁工艺细颗粒物 PM_{2.5} 排放特性分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3287-3292.
- Fan Z Z, Zhao Y L, Zhao H N, *et al.* Emission characteristics of PM_{2.5} from blast furnace iron making [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3287-3292.
- [23] 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.
- [24] 孙在, 谢小芳, 杨文俊, 等. 煤燃烧超细颗粒物的粒径分布及数浓度排放特征试验[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3126-3132.
- Sun Z, Xie X F, Yang W J, *et al.* Size distribution and number emission characteristics of ultrafine particles from coal combustion [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3126-3132.
- [25] 郭华楼, 胡宾生, 贵永亮, 等. 煤粉中的氯在高炉冶炼过程中的行为[J]. *中国冶金*, 2010, **20**(11): 12-15.
- Guo H L, Hu B S, Gui Y L, *et al.* Behavior on blast furnace smelting process of chlorine in coal [J]. *China Metallurgy*, 2010, **20**(11): 12-15.
- [26] Rivera N, Kaur N, Hesterberg D, *et al.* Chemical composition, speciation, and elemental associations in coal fly ash samples related to the Kingston ash spill [J]. *Energy & Fuels*, 2015, **29**(2): 954-967.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)