

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的影响

邓建国¹, 马子轸¹, 李振¹, 段雷^{1,2}, 蒋靖坤^{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: 湿法脱硫系统被广泛应用于火电厂脱除烟气中的 SO_2 , 一方面对烟气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 有一定的去除作用, 但同时也会产生新的颗粒物, 其净效应近年来受到广泛关注. 选择3台装有不同湿法脱硫工艺的燃煤机组(石灰石-石膏单塔脱硫、石灰石-石膏双塔串联脱硫以及海水脱硫), 采集了脱硫系统入口和出口的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 分析了 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度和元素组成. 根据 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分物质守恒建议了一种估算脱硫塔对 $\text{PM}_{2.5}$ 去除率和增加率的方法, 可选择 Ti、Pb、Cr 和 V 等元素作为参照. 结果表明, 所测试的3种湿法脱硫系统对 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除率较为一致(67.5%~84.4%), 平均为 77.1%, 但增加率差别较大. 其中, 石灰石-石膏双塔串联系统的 $\text{PM}_{2.5}$ 增加率较低, 仅为 8.6%, 主要是由于二级吸收塔入口烟气温度降低, 脱硫浆液液滴蒸发减弱导致携带减少; 海水脱硫系统 $\text{PM}_{2.5}$ 增加率为 23.9%, 这可能与脱硫海水不循环从而所含固体浓度较低有关; 而石灰石-石膏单塔脱硫系统可能由于除雾器运行效率较差导致 $\text{PM}_{2.5}$ 增加率高达 162.3%.

关键词: 固定源; 脱硫塔(FGD); 脱硫浆液携带; 可过滤 $\text{PM}_{2.5}$; 元素; 烟尘

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3457-06 DOI: 10.13227/j.hjx.201901020

Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of $\text{PM}_{2.5}$ from Coal-Fired Power Plants

DENG Jian-guo¹, MA Zi-zhen¹, LI Zhen¹, DUAN Lei^{1,2}, JIANG Jing-kun^{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: Wet flue gas desulphurization (WFGD) is widely used to control SO_2 emission from coal-fired power plants. The influence of WFGD on particulate matter (PM) emission has recently drawn significant public attentions in China. In this study, $\text{PM}_{2.5}$ was collected at both the inlet and outlet from three WFGD units, including a single scrubber lime-stone-gypsum FGD unit, a cascade scrubber lime-stone-gypsum FGD unit, and a seawater FGD unit. $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations and their chemical compositions were analyzed. A method to calculate the addition and removal ratios is proposed according to the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ components, such as Ti, Pb, Cr, and V. The results indicate that the removal ratio was similar between the three WFGD units (77.1% on average). However, the addition ratio varied significantly. The performance of the cascade scrubber lime-stone-gypsum FGD unit was best, with a lower addition ratio of 8.6%, which is attributed to the weaker evaporation of desulphurization slurry droplets in their second tower under the low temperature of the flue gas. The addition ratio of the seawater FGD unit was also low (23.9%) because of its low concentration of solids in the seawater. The addition ratio of the single scrubber lime-stone-gypsum FGD system was highest, with a value of 162.3%, which was probably due to the low efficiency of the de-mister.

Key words: stationary source; flue gas desulphurization (FGD); entrainment of desulphurization slurry; filterable $\text{PM}_{2.5}$; element; dust

在我国能源消费结构中, 煤所占的比例超过60%, 其中约53%的煤用于发电^[1, 2]. 燃煤发电过程中会产生 NO_x 、 SO_2 和烟尘等污染物. 目前我国霾污染严重^[3, 4], 为了改善环境空气质量, 燃煤电厂实施严格的排放标准^[5], 现在已几乎全部安装了烟气脱硝(主要是选择性催化还原, SCR)、除尘(主要是电除尘器, ESP)以及脱硫(FGD)设施, 而且约80%完成了超低排放改造, 排放的污染物浓度显著降低^[6~8]. 湿法脱硫(WFGD)由于其运行稳定、经济和高效等优点, 在燃煤电厂以及其他行业被广泛使用^[9, 10]. 目前燃煤电厂脱硫系统约90%采用以石灰石作为脱硫剂的石灰石-石膏湿法脱硫工艺, 而在我国沿海一带很多电厂使用以海水作为脱硫剂的湿法脱硫工艺. 石灰石-石膏脱硫工艺主

要为单塔脱硫; 而对于烟气 SO_2 浓度较高的电厂, 双脱硫塔串联脱硫工艺应用更多.

已有研究表明, WFGD 可以去除部分烟尘^[11~15], 但同时由于脱硫浆液携带导致增加新的烟尘^[16, 17], 进而影响最终从排放口排放进入大气中的烟尘的理化性质. Meij 等^[18, 19]测定了新西兰火电厂排口烟尘元素组成, 发现其中约50%来自石灰石-石膏脱硫浆液. Nielsen 等^[20]研究了丹麦火电厂烟尘排放特征, 发现含有很高的 Ca 和 Na 元素, 而这些元素主要来自于湿法脱硫系统, 表明有脱硫

收稿日期: 2019-01-03; 修订日期: 2019-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213202)

作者简介: 邓建国(1985~), 男, 硕士, 主要研究方向为污染源颗粒物排放, E-mail: fengxing_luotuo@163.com

* 通信作者, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

浆液被携带进入烟气中. Córdoba 等^[21, 22]系统地测定了燃煤电厂灰渣、石灰石浆液和石膏中无机元素的含量以及烟气中烟尘及气态无机元素的含量,并分析了这些元素在各个源汇之间的分布规律,发现石灰石-石膏湿法脱硫系统的浆液循环使无机元素在脱硫浆液中积累,进而导致这些无机元素排放增加. 阮仁晖等^[23]测试了超低排放电厂脱除特性,表明 WFGD 后超细颗粒物增加明显.

目前的研究没有定量地确定 WFGD 对 $PM_{2.5}$ 的去除率和增加率,特别是对于实施了超低排放改造的燃煤电厂, $PM_{2.5}$ 浓度在除尘后已经相对较低,脱硫所增加的 $PM_{2.5}$ 有可能被突显出来. 尽管最终排放的总烟尘和 $PM_{2.5}$ 质量浓度仍然很低,但还是容易引起一些误解,认为脱硫塔会显著增加烟气 $PM_{2.5}$ 排放. 因此,为了更深入了解 WFGD 对 $PM_{2.5}$ 排放的影响,本研究测试并分析了石灰石-石膏单塔、石灰石-石膏双塔以及海水脱硫等 3 种典型湿法脱硫工艺进出口 $PM_{2.5}$ 的质量浓度和化学组成,并根据 $PM_{2.5}$ 化学组分物质守恒估算了 WFGD 对 $PM_{2.5}$ 的去除率和增加率,并分析了可能的原因,这对于当前我国燃煤电厂超低排放改造具有一定的指导意义.

1 材料与方法

1.1 样品收集与分析

根据国际标准 ISO 13271:2012^[24],采用基于虚

拟撞击原理的 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器(图 1)收集 $PM_{2.5}$ 样品^[25~27],该采样器避免了传统撞击器(例如 ELPI)由于颗粒物反弹和再悬浮导致浓度偏高的问题. 采样器截面直径为 74 mm,可直接伸入烟道内进行采样,避免了烟道外采样时烟尘在管路中的沉积损失. 采样器设计流量为 $30\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样时用烟气分析仪测定烟气中 O_2 、 CO_2 、 H_2O 含量以及温度等参数,然后根据这些参数计算实际采样流量,然后用皮托管测定采样点处的烟气流速,最后根据采样流量以及烟气流速选取等速采样嘴进行采样. 在同一烟道截面不同采样点按等速采样取 3 个平行样,每次采样时间约为 1 h. 采样时用石英滤膜(Quartz filter, PALL 公司,美国)和特氟龙滤膜(Teflon filter, PALL 公司,美国)收集烟尘样品. 由于高温(一般使用温度 $<42^\circ\text{C}$)容易失重,特氟龙滤膜仅用于元素分析. 而石英滤膜由于背景杂质元素的影响仅用于重量分析,采样之前将石英膜置于马弗炉 400°C 烘烤 2 h,去除挥发性杂质,然后放入恒温恒湿天平室经 24 h 平衡调质处理以及去除静电后,再用 0.01 mg 精度天平称重;采样之后,将石英滤膜样品再放入恒温恒湿天平室经 24 h 平衡调质处理以及去除静电后称重. 将收集样品的特氟龙滤膜用 X 射线荧光(XRF NAS100)测定元素含量. 同时,采集电厂脱硫系统的脱硫浆液,风干后用 ICP-MS 分析了元素含量. 本研究所测试的 3 个装备不同湿法脱硫系统的电厂的基本信息如表 1 所示.

表 1 所测试的 3 个装备了不同湿法脱硫系统的电厂的基本信息

Table 1 Basic information for three power plants equipped with different FGD systems

电厂	装机容量 /MW	污控措施 ¹⁾	煤种	运行负荷 /%	湿法脱硫工艺	脱硫效率 /%	脱硫入口总烟尘 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	脱硫出口总烟尘 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
A(山西)	250	SCR + LLTESP + WFGD	山西次烟煤	90	石灰石石膏(单塔单循环)	97	1.3	2.1
B(河北)	600	SCR + ESP + WFGD	内蒙烟煤	90	石灰石石膏(双塔双循环)	98	30.4	7.2
C(广东)	1000	SCR + ESP + WFGD	澳大利亚与 印尼混煤	90	海水脱硫	95	16.2	6.7

1) SCR 为选择性催化还原脱硝, ESP 为静电除尘器, LLTESP 为低低温静电除尘器, WFGD 为湿法脱硫系统



图 1 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 双级虚拟撞击采样器

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

本研究所用 $PM_{2.5}$ 采样方法为直接法,收集的 $PM_{2.5}$ 样品为可过滤颗粒物,即在烟气温度下可用

滤膜或滤筒收集到的空气动力学直径(D_a)小于等于 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的烟尘颗粒物. 下文计算与讨论只针对

可过滤 PM_{2.5}, 不涉及可凝结颗粒物, 即在烟气温度下气态物质, 降温后形成的颗粒物^[27].

1.2 PM_{2.5}去除率和增加率估算方法

湿法脱硫系统对 PM_{2.5} 的去除率和增加率分别定义为:

$$\alpha = \frac{c_2}{c_1} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{c_3}{c_1} \quad (2)$$

式中, α 和 β 分别为 PM_{2.5} 去除率和增加率; c_1 为标况下 WFGD 入口 PM_{2.5} 浓度, c_2 为标况下被 WFGD 去除的 PM_{2.5} 浓度, c_3 为标况下经过 WFGD 后增加的 PM_{2.5} 浓度.

脱硫塔对 PM_{2.5} 既去除又增加, 如果能分别计算出去除率和增加率, 那么可以更加合理地优化脱硫运行, 减少脱硫浆液携带. 脱硫塔去除的和脱硫浆液携带增加的 PM_{2.5} 无法直接测量, 因此不能直接得到去除率和增加率. 但根据 PM_{2.5} 及其中典型元素 (Hg 和 As 等挥发/半挥发性元素除外) 的质量守恒, 可间接估算去除率和增加率. 质量守恒如式 (3) (假设去除 PM_{2.5} 的化学组成与入口 PM_{2.5} 的一致) 和式 (4) 所示:

$$c_1(1 - \alpha) + c_3 = c_4 \quad (3)$$

$$c_1 x_i (1 - \alpha) + c_3 y_i = c_4 z_i \quad (4)$$

式中, c_4 为标况下 WFGD 出口的 PM_{2.5} 浓度; x_i 为 PM_{2.5} 中某元素 i 在 WFGD 入口 PM_{2.5} 中所占质量分数, y_i 为元素 i 在经过 WFGD 后增加的 PM_{2.5} 中的质量分数, z_i 为元素 i 在 WFGD 出口 PM_{2.5} 中的质量分数. 如果 y_i 非常小可被忽略 (即该元素在脱硫液中的浓度很低), 则公式 (4) 可被简化为式 (5):

$$\alpha = 1 - \frac{c_4 z_i}{c_1 x_i} \quad (5)$$

因此, 如果某些元素的携带非常小, 可以忽略不计 (y_i 可被忽略), 那么它们在脱硫前后的浓度变化则可被用来按 (5) 计算 PM_{2.5} 去除率 α , 进而再先后按公式 (3) 计算增加的 PM_{2.5} 浓度 c_3 、按公式 (2) 计算 PM_{2.5} 增加率 β .

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 质量浓度在脱硫塔前后变化

3 个电厂脱硫塔前后 PM_{2.5} 质量浓度如图 2 所示, 电厂 A 的 PM_{2.5} 质量浓度经过脱硫塔后增加, 从 0.77 mg·m⁻³ 增加到 1.5 mg·m⁻³, 增加了 91%. 电厂 B 的 PM_{2.5} 质量浓度经过脱硫塔后降低, 从 9.5 mg·m⁻³ 下降到 2.3 mg·m⁻³, 降低了 75%. 电厂 C 的 PM_{2.5} 质量浓度经过脱硫塔后也降低了, 从 3.8

mg·m⁻³ 下降到 1.7 mg·m⁻³, 降低了 55%. 电厂 A 经过超低排放改造, 电除尘器改为了低低温电除尘器, 并增加了高效电源进一步提高除尘效率, 因此脱硫塔入口 PM_{2.5} 质量浓度较低. 电厂 A 的脱硫塔为单塔单循环石灰石-石膏脱硫, 并增设托盘提高脱硫效率, 测试期间脱硫效率在 95% 以上. 但是经过脱硫塔后 PM_{2.5} 质量浓度增加, 可能为硫塔后除雾器运行效率相对较低, 导致脱硫浆液携带相对较多. 电厂 B 使用传统的电除尘器, 电除尘器出口 PM_{2.5} 质量浓度也较高. 为了使 SO₂ 排放达标, 电厂 B 使用双塔串联双循环石灰石-石膏脱硫塔, 测试期间脱硫效率在 95% 以上. 经过脱硫塔后 PM_{2.5} 浓度降低, 表明脱硫塔对烟尘主要以去除为主, 脱硫浆液携带相对较少. 电厂 C 使用传统的电除尘器除尘, 脱硫塔入口 PM_{2.5} 质量浓度也高于电厂 A, 并使用海水脱硫, 新鲜海水脱硫后不循环, 经过曝气等处理后直接排放, 测试期间脱硫效率在 95% 以上. 经过脱硫塔后 PM_{2.5} 浓度降低, 表明脱硫塔对烟尘也主要以去除为主, 脱硫浆液携带相对较少. 尽管电厂 A 因为高效除尘使得其脱硫系统对烟尘的增加效果相对显著, 其脱硫后 PM_{2.5} 质量浓度仍因为采用了高效除尘而显著低于电厂 B 和 C.

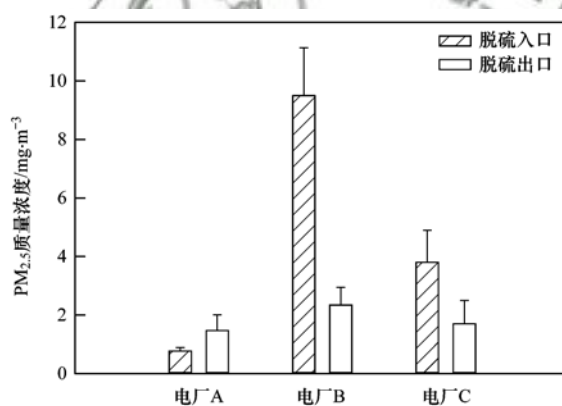


图 2 3 个电厂脱硫前后 PM_{2.5} 质量浓度

Fig. 2 Concentrations of PM_{2.5} at the FGD inlet and the FGD outlet of the three plants

2.2 PM_{2.5} 元素组成在脱硫前后变化

3 个电厂脱硫前后 PM_{2.5} 中元素浓度变化如图 3 所示. WFGD 入口 PM_{2.5} 的元素组成主要为 Al、Si、Fe、Ca、Ti 和 K 等飞灰常量元素 (通常浓度在 mg·m⁻³ 范围内), 以及 Cr、Ba、Sr 和 Mn 等微量元素 (通常浓度在 μg·m⁻³ 范围内), 与文献 [19, 20] 报道的结果一致. 电厂 A 的元素浓度同电厂 B 和 C 有所差别, 主要表现在 S, 主要是低低温电除尘器的影响. 低低温电除尘入口烟气温度约 90℃, 低于 SO₃ 酸露点. 于是, 烟气中 SO₃ 冷凝在烟尘表面, 导致电除尘出口烟尘中 S 含量较高. SO₄²⁻ 浓度的

增加降低了颗粒物的比电阻,从而提高了电除尘器的脱除效率,这也是低低温电除尘器的原理。

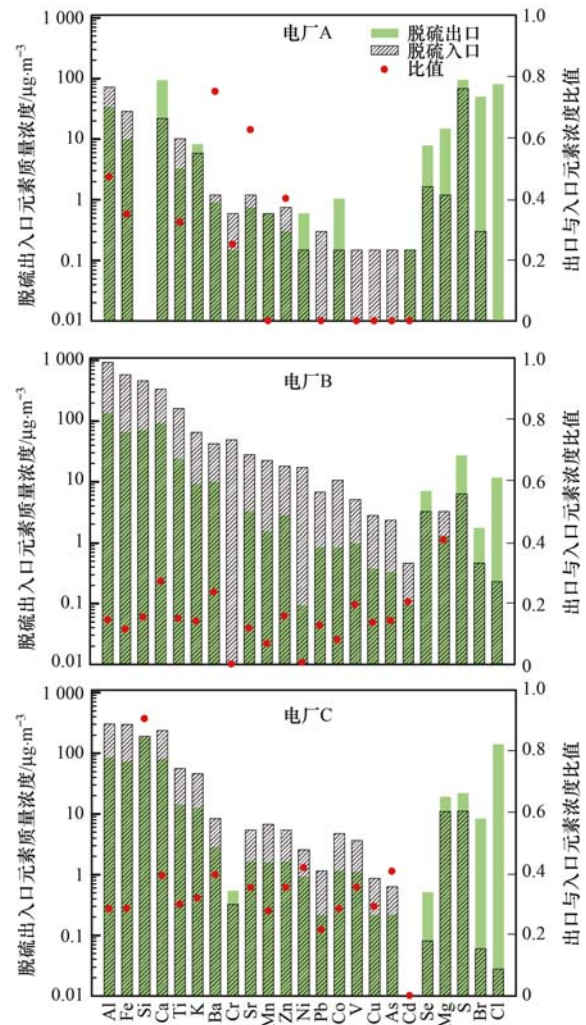
经过脱硫后主要的灰分元素浓度显著下降,而 Mg、S、Cl、Se 和 Br 等元素浓度增加。图 3 中比值相对较小的元素表明其被脱硫塔去除效果较明显,而比值较大,甚至接近或大于 1 的则可能为脱硫后增加的元素。如图 3 所示,脱硫塔后灰分元素 Al、Fe、Ti、Ba、Sr、Zn、Pb 和 V 等浓度降低,表明 WFGD 去除了烟气中部分烟尘;而 S、Ca、Mg、Br 和 Cl 等元素浓度增加,表明 WFGD 增加了新的烟尘,因为 S 和 Ca 是脱硫石膏的主要元素,而 Cl 和 Br 元素与煤中卤素在燃烧过程中产生 HCl 和 HBr 有关,这些气体被脱硫浆液吸收,脱硫浆液不断循环导致 Cl 等卤素在脱硫浆液中累积。当有脱硫浆液携带时,导致烟尘中这些卤素元素增加。电厂 C 为海水脱硫,海水不循环,脱硫塔后 Cl 元素的增加主要来自于海水本身含有 Cl。总之,脱硫塔对 $PM_{2.5}$ 排放影响为既去除又脱硫浆液携带而增加。此外 Se 元素经过 WFGD 后浓度增加,与之前的研究报道的结果一致^[15, 18],这是由于 Se 元素的挥发性较高, WFGD 入口烟气温度高, Se 元素主要以气态的形成存在。随着 WFGD 出口烟气温度的降低, Se 冷凝进入烟尘中^[22]。

2.3 $PM_{2.5}$ 增加率和去除率计算

图 3 中 3 个电厂脱硫塔前后 $PM_{2.5}$ 元素组成可以看出,出入口元素浓度比值较低的元素理论上为携带可以忽略的元素,可作为示踪组分计算去除率和增加率。但是这些元素在脱硫前后含量不能太低,太低容易由于检测准确性而影响计算准确性。对于电厂 A, Ti 和 Cr 元素比值较低;对于电厂 B, Sr、Mn、Pb、Co 和 V 元素比值较低;对于电厂 C, Mn、Pb 和 Co 等元素比值较低。此外通过直接测定脱硫浆液元素组成,含量很低的元素才可作为示踪元素,本研究测定两个石灰石-石膏浆液的元素组成,其中 V、Cr、Pb、Zn 和 Ti 等元素含量很低(如图 4)。同样,海水中这些元素的含量也很低^[28]。

综合考虑比值、元素检出限以及脱硫浆液中含量这 3 个因素,决定通过 Ti、Pb、Cr 和 V 这 4 种元素计算 3 个电厂脱硫系统的 $PM_{2.5}$ 去除率,进而计算 $PM_{2.5}$ 增加率。根据各元素去除率取平均,得到如下结果:电厂 A 中 $PM_{2.5}$ 去除率为 67.5%,相应的 $PM_{2.5}$ 增加率为 162%;电厂 B 中 $PM_{2.5}$ 去除率为 84.4%,增加率为 8.6%;电厂 C 中 $PM_{2.5}$ 烟尘去除率为 79.3%,增加率为 23.9%。

电厂 A 脱硫的 $PM_{2.5}$ 增加率大于去除率,可能是因为除雾器运行效率不高,最终导致脱硫塔后



图中比值大于 1 的未显示

图 3 湿法脱硫系统前后 $PM_{2.5}$ 中元素浓度及变化

Fig. 3 Concentrations of elements in $PM_{2.5}$ at the FGD inlets and outlets

$PM_{2.5}$ 烟尘浓度有所增加(但其脱硫出口 $PM_{2.5}$ 浓度仍是 3 个电厂中最低的)。电厂 B 去除率大于增加率,最终导致脱硫塔后 $PM_{2.5}$ 烟尘浓度降低。较低的增加率表明在双塔串联脱硫系统中脱硫浆液的携带较弱。这除了除雾器运行较正常之外,还因为该脱硫塔入口的高温烟气(118℃)在一级塔中冷却降温至 48℃,经过二级塔后烟气温度进一步下降为 46℃。烟气温度很低使得二级塔中脱硫浆液液滴蒸发很弱,同时液滴粒径较大,容易被后端除雾器去除,因此二级脱硫塔对 $PM_{2.5}$ 的去除作用占主导,脱硫浆液携带则不明显。从双塔串联脱硫系统中 $PM_{2.5}$ 的低增加率可知,如果适当降低 WFGD 入口烟气温度,可有效减少脱硫系统所携带浆液液滴的逃逸。同样地,电厂 C 的去除率大于增加率,最终导致脱硫塔后 $PM_{2.5}$ 烟尘浓度降低。脱硫塔对 $PM_{2.5}$ 烟尘增加率除了与入口烟气流速、烟气温度以及除雾器运行效率等有关外,还与脱硫浆液固体含量有

关。当脱硫浆液固体含量高时, 由于携带导致的增加率也高。海水湿法脱硫的特点是新鲜的海水经过脱硫后直接排放, 没有再次循环, 脱硫过程不存在飞灰和气态污染物在脱硫液中积累, 因此相比于石灰石-石膏脱硫塔, 海水脱硫浆液固体含量较低, 最终增加率也较低。

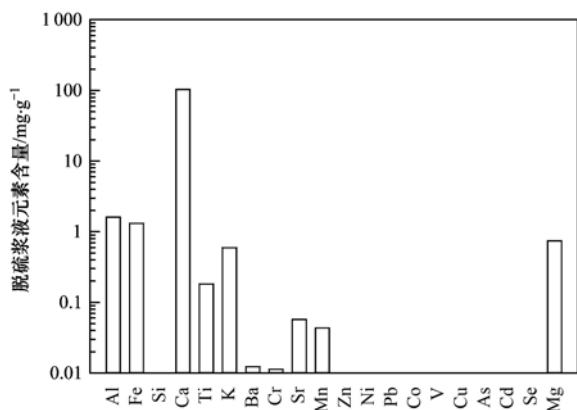


图4 脱硫浆液中元素含量

Fig. 4 Concentrations of elements in the desulfurization slurry

3 结论

(1) 本文提出了一种基于 PM_{2.5} 中典型元素质量平衡的脱硫塔对 PM_{2.5} 去除率和增加率的估算方法。基于所测试的 3 台燃煤电厂, 考虑脱硫塔前后元素比值、元素测量下限、以及脱硫浆液中元素含量等因素, 建议采用 Ti、Pb、Cr 和 V 等元素。

(2) 采集并分析了 3 台不同湿法脱硫工艺系统 (包括石灰石-石膏单塔、石灰石-石膏双塔和海水脱硫) 入口和出口烟气中的 PM_{2.5} 样品, 发现湿法脱硫系统在去除 PM_{2.5} 烟尘的同时又会由于浆液夹带增加一部分烟尘, 3 台脱硫系统 PM_{2.5} 烟尘去除率分别为 67.5%、84.4% 和 79.3%, 平均约为 77.1%; 增加率分别为 162.3%、23.9% 和 8.6%。

(3) 除了提高除雾器运行效率之外, 降低入口烟气温度和降低脱硫浆液固体含量均可减少脱硫浆液携带。脱硫对 PM_{2.5} 排放的综合效应还受入口烟尘浓度影响, 如脱硫入口烟尘浓度较高, 则脱硫系统对烟尘的去除效果更明显; 如使用了高效除尘装置使得脱硫入口烟尘浓度较低, 则脱硫系统液滴携带所带来的增加效果更明显, 但脱硫出口烟尘浓度仍相对较低。

参考文献:

[1] Song Y C, Yang L, Zhao J F, *et al.* The status of natural gas hydrate research in China: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **31**: 778-791.
[2] Wu X C, Zhao H F, Zhang Y X, *et al.* Measurement of slurry droplets in coal-fired flue gas after WFGD [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2015, **37**(5): 915-929.

[3] Wang S X, Zhao B, Cai S Y, *et al.* Emission trends and mitigation options for air pollutants in east Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(13): 6571-6603.
[4] Li Q, Li X H, Jiang J K, *et al.* Semi-coke briquettes: towards reducing emissions of primary PM_{2.5}, particulate carbon, and carbon monoxide from household coal combustion in China [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 19306.
[5] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S]. 2011.
[6] Wang X S, Hao J M. Air quality management in China: issues, challenges, and options [J]. *Journal of Environmental Science*, 2012, **24**(1): 2-13.
[7] Liu F, Zhang Q, Tong D, *et al.* High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13299-133317.
[8] Li J W, Qi Z F, Li M, *et al.* Physical and chemical characteristics of condensable particulate matter from an ultralow-emission coal-fired power plant [J]. *Energy & Fuel*, 2017, **31**(1): 1778-1785.
[9] Gao X, Ding H L, Wu Z L, *et al.* Analysis on leaching characteristics of iron in coal fly ash under ammonia-based Wet Flue Gas Desulfurization (WFGD) conditions [J]. *Energy & Fuels*, 2009, **23**(12): 5916-5919.
[10] Zhao Y, Wang S X, Nielsen C P, *et al.* Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(12): 1515-1523.
[11] Tian H Z, Lu L, Hao J M, *et al.* A review of key hazardous trace elements in Chinese coals: abundance, occurrence, behavior during coal combustion and their environmental impacts [J]. *Energy & Fuels*, 2013, **27**(2): 601-614.
[12] Thorneloe S A, Kosson D S, Sanchez F, *et al.* Evaluating the fate of metals in air pollution control residues from coal-fired power plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(19): 7351-7356.
[13] Senior C L, Tyree C A, Meeks N D, *et al.* Selenium partitioning and removal across a wet FGD scrubber at a coal-fired power plant [J]. *Environmental Sciences & Technology*, 2015, **49**(24): 14376-14382.
[14] Jano-Ito M A, Reed G P, Millan M. Comparison of thermodynamic equilibrium predictions on trace element speciation in oxy-fuel and conventional coal combustion power plants [J]. *Energy & Fuel*, 2014, **28**(7): 4666-4683.
[15] Ohki A, Yamada K, Furuzono T, *et al.* Analysis of trace elements in flue gas desulfurization water in the coal combustion system and the removal of boron and mercury from the water [J]. *Energy & Fuel*, 2011, **25**(8): 3568-3573.
[16] 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 等. 燃煤电厂产生和排放的 PM_{2.5} 中水溶性离子特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2361-2366.
Ma Z Z, Li Z, Jiang J K, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} emitted from coal-fired power plants [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2361-2366.
[17] Li Z, Jiang J K, Ma Z Z, *et al.* Influence of flue gas desulfurization (FGD) installations on emission characteristics of PM_{2.5} from coal-fired power plants equipped with selective catalytic reduction (SCR) [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 655-662.
[18] Meij R. Trace element behavior in coal-fired power plants [J]. *Fuel Processing Technology*, 1994, **39**(1-3): 199-217.
[19] Meij R, te Winkel H. The emissions of heavy metals and persistent organic pollutants from modern coal-fired power stations

- [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(40): 9262-9272.
- [20] Nielsen M T, Livbjerg H, Fogh C L, *et al.* Formation and emission of fine particles from two coal-fired power plants[J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, **174**(2): 79-113.
- [21] Córdoba P, Font O, Izquierdo M, *et al.* The retention capacity for trace elements by the flue gas desulphurisation system under operational conditions of a co-combustion power plant[J]. *Fuel*, 2012, **102**: 773-788.
- [22] Córdoba P, Font O, Izquierdo M, *et al.* Enrichment of inorganic trace pollutants in re-circulated water streams from a wet limestone flue gas desulphurisation system in two coal power plants[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, **92**(9): 1764-1775.
- [23] 阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 等. 超低排放燃煤电厂颗粒物脱离特性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 126-134.
- Ruan R H, Tan H Z, Duan Y F, *et al.* Particle removal characteristics of an ultra-low emission coal-fired power plant[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 126-134.
- [24] ISO 13271: 2012, Stationary source emissions -- determination of PM₁₀/PM_{2.5} mass concentration in flue gas-measurement at higher concentrations by use of virtual impactors[S].
- [25] 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 等. 基于虚拟撞击原理的固定源 PM₁₀/PM_{2.5} 采样器的研制[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3639-3643.
- Jiang J K, Deng J G, Duan L, *et al.* Development of a two stage virtual impactor for stationary source PM₁₀ and PM_{2.5} Sampling[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3639-3643.
- [26] 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 等. 双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2003-2007.
- Jiang J K, Deng J G, Li Z, *et al.* Application of a two-stage virtual Impactor in measuring of PM₁₀ and PM_{2.5} emissions from stationary sources[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2003-2007.
- [27] 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 等. 固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 2018-2024.
- Jiang J K, Deng J G, Li Z, *et al.* Sampling methods for PM_{2.5} from stationary sources: a review[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 2018-2024.
- [28] 刘莹, 翟世奎, 张爱滨, 等. ICP-MS 测定海水中溶解态痕量重金属——直接稀释法[J]. *海洋学报*, 2008, **30**(5): 151-158.
- Liu Y, Zhai S K, Zhang A B, *et al.* Determination of dissolved heavy trace metals in seawater on ICP-MS direct dilution method[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, **30**(5): 151-158.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenhe River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)