

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012 ~ 2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述

段雷¹, 马子轶², 李振¹, 蒋靖坤¹, 叶芝祥²

(1. 清华大学环境学院, 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; 2. 成都信息工程学院资源环境学院, 大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室, 成都 610225)

摘要: 当前我国面临严重的大气细颗粒物(PM_{2.5})污染, 燃煤电厂是大气中PM_{2.5}的重要来源之一. 为了实现国家“十一五”和“十二五”规划对二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)的总量减排目标, 燃煤电厂大规模安装烟气脱硫和脱硝设施, 这虽然减少了气态污染物转化生成的二次PM_{2.5}, 但另一方面也会对烟气中PM_{2.5}的物理化学特征产生影响, 有可能增加一次PM_{2.5}的排放. 本文综述了燃煤电厂排放PM_{2.5}及其水溶性离子的粒径分布特征, 重点介绍了脱硫和脱硝这两种烟气处理设施对燃煤电厂排放PM_{2.5}的影响原理及相关研究结果, 特别是对细颗粒物中水溶性离子(如SO₄²⁻、Ca²⁺和NH₄⁺)的影响. 在我国PM_{2.5}污染十分严重和燃煤电厂大量安装脱硫和脱硝装置的背景下, 定量研究脱硫和脱硝对PM_{2.5}排放特征的影响具有十分重要的意义.

关键词: 燃煤电厂; 细颗粒物; PM_{2.5}; 水溶性无机离子; 烟气脱硫; 烟气脱硝

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1117-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.03.047

Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants

DUAN Lei¹, MA Zi-zhen², LI Zhen¹, JIANG Jing-kun¹, YE Zhi-xiang²

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Air Environmental Modeling and Pollution Controlling Key Laboratory of Sichuan Education Institutes, College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Currently, China suffers from serious pollution of fine particulate matter (PM_{2.5}). Coal-fired power plant is one of the most important sources of PM_{2.5} in the atmosphere. To achieve the national goals of total emission reductions of sulfur dioxide (SO₂) and nitrogen oxides (NO_x) during the 11th and 12th Five-Year Plan, most of coal-fired power plants in China have installed or will install flue gas desulfurization (FGD) and flue gas denitrification (DNO_x) systems. As a result, the secondary PM_{2.5}, generated from gaseous pollutants in the atmosphere, would be decreased. However, the physical and chemical characteristics of PM_{2.5} in flue gas would be affected, and the emission of primary PM_{2.5} might be increased. This paper summarized the size distributions of PM_{2.5} and its water soluble ions emitted from coal-fired power plants, and highlighted the effects of FGD and DNO_x on PM_{2.5} emission, especially on water soluble ions (such as SO₄²⁻, Ca²⁺ and NH₄⁺) in PM_{2.5}. Under the current condition of serious PM_{2.5} pollution and wide application of FGD and DNO_x, quantitative study on the effects of FGD and DNO_x installation on emission characteristics of PM_{2.5} from coal-fired power plants is of great necessity.

Key words: coal-fired power plant; fine particles; PM_{2.5}; water soluble inorganic ions; flue gas desulfurization; flue gas denitrification

当前我国面临极其严重的大气细颗粒物(PM_{2.5})污染. 随着我国经济社会的持续快速发展, 特别是能源消耗的增加, 大气环境中的PM_{2.5}浓度不断增加. PM_{2.5}及其中的毒害物质如重金属和PAHs等^[1,2]可通过呼吸道到达人的肺部, 对呼吸系统、心血管系统、免疫系统、血液循环系统和生殖系统等产生损伤作用, 已被列为致癌物质^[3~5]. PM_{2.5}不仅危害人体健康, 还会吸收和散射可见光, 造成大气能见度降低, 形成灰霾. 目前, 京津冀、长三角、珠三角和成渝地区以及全国范围内的其他城市频繁暴发严重灰霾污染, 这与大气中高浓度的PM_{2.5}密不可分^[6~10]. PM_{2.5}对大气能见度的影响与其化学成分

有关, 其中水溶性无机离子具有很强的消光作用, 特别是硫酸盐、硝酸盐和铵盐, 是引起能见度下降的主要因素^[11~15]. 大气PM_{2.5}具有很强的吸湿性, 当空气湿度增大时, 硫酸盐、硝酸盐和铵盐的消光能力急剧增长^[16].

燃煤电厂是我国大气PM_{2.5}的重要排放源^[17]. 虽然除尘设施对PM_{2.5}的去除效率低于对总颗粒物的去除效率^[18,19], 但由于已经采取了较为严格的颗粒物排放控制措施, 燃煤电厂排放一次PM_{2.5}占全国总

收稿日期: 2014-07-24; 修订日期: 2014-09-16

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

作者简介: 段雷(1972~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: lduan@tsinghua.edu.cn

排放的贡献并不高:1990~2005年间,电力部门燃煤排放对全国一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量的贡献率稳定在10%左右^[20].但是,相对于其他排放源,燃煤电厂进一步削减 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的潜力已经很小,而随着对燃煤锅炉、水泥行业和生物质燃烧等颗粒物排放控制的加严,未来燃煤电厂一次排放的贡献比例将更大.而且,燃煤电厂排放的大量二氧化硫(SO_2)和氮氧化物(NO_x)还通过大气化学反应生成硫酸盐和硝酸盐,从而对二次 $\text{PM}_{2.5}$ 产生贡献^[21].

近年来,燃煤电厂采取了严格的大气污染控制措施,这可能对 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特征产生重要影响.我国在“十一五”期间实施了 SO_2 排放总量控制,到2010年我国的 SO_2 排放总量比2005年下降14.29%,超额完成控制目标^[22];《国家环境保护“十二五规划”》要求我国在“十二五”期间继续控制 SO_2 排放,使其排放量下降8%,同时,该规划增加了“十二五”期间对氮氧化物的控制目标,要求氮氧化物排放量下降10%.为了完成上述总量减排目标,燃煤电厂已经或者即将安装烟气脱硫和脱硝设施.对于烟气脱硫,燃煤电厂一般采取湿式烟气脱硫技术(WFGD),其中以石灰石/石灰法湿式烟气脱硫技术为主,在该方法中,石灰石(CaCO_3)或生石灰(CaO)的加入以及脱硫浆液(含石膏)的夹带会增加烟气中含 CaCO_3 和 CaSO_4 的 $\text{PM}_{2.5}$ ^[23,24].对于烟气脱硝,目前主流技术是选择性催化还原(SCR),作为还原剂 NH_3 的加入会增加烟气中含 NH_4^+ 的 $\text{PM}_{2.5}$,而且催化剂的存在有利于 SO_2 氧化为 SO_3 ,增加烟气中含 SO_4^{2-} 的 $\text{PM}_{2.5}$ ^[25].总之,燃煤电厂烟气脱硫和脱硝均有可能增加水溶性 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放,相关定量结果值得关注.

1 燃煤电厂排放细颗粒物的粒径分布与水溶性离子特征

燃煤电厂(通常采用煤粉炉)排放的颗粒物的粒径分布与颗粒物的形成机制密切相关.煤粉燃烧形成颗粒物的机制主要有两个:一是破碎-聚结机制,即在煤粉燃烧过程中,煤中的不挥发矿质组分在高温的煤粉表面熔融和聚结,形成粒径大于 $1\mu\text{m}$ 的超微米颗粒;另一个是气化-凝结机制,即挥发性元素在烟气温度降低的过程通过均相成核或者在已有粒子上异相凝结形成亚微米颗粒物($<1\mu\text{m}$)^[26,27].因此,燃煤电厂形成的颗粒物的粒数浓度和质量浓度均呈双峰分布:粒数浓度分布模态的峰值分别出现在 $0.1\mu\text{m}$ 左右和 $1\mu\text{m}$ 左右,峰值对

应的粒径均在 $2.5\mu\text{m}$ 以内;质量浓度分布模态的峰值则分别出现在 $0.1\sim0.2\mu\text{m}$ 和 $10\sim20\mu\text{m}$ 的粒径区间内^[19,28~30].燃煤电厂的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子通常表示为消耗单位质量燃料或消耗单位热量排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量,我国燃煤电厂(煤粉炉)在未控制状态下的排放因子为 $(6.8\pm4.47)\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ^[28].

燃煤电厂排放的颗粒物所含水溶性无机离子包括 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 NH_4^+ 等阳离子,以及 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 F^- 等阴离子.在燃煤电厂除尘前的 $\text{PM}_{2.5}$ 中,水溶性离子的总质量约占 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量的6%以上,而且烟气中颗粒物所含的水溶性离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主,由于这些离子(及相关元素)的挥发性较高,它们在亚微米颗粒中含量较高^[31,32],与上述颗粒物形成机制相一致.刘晓宇^[33]的研究结果表明除尘后 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的含量分别可达76.5、34.5、58.3和79.4 $\mu\text{mol}_e\cdot\text{m}^{-3}$ (其中 mol_e 为电荷摩尔数), Cl^- 和 Ca^{2+} 分别占阴离子总量和阳离子总量的40%~50%和50%.

在这些水溶性离子的粒径分布上,郭兴明等^[32]发现燃煤锅炉出口处的 PM_{10} 中的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 呈双模态或三模态分布,峰值分别位于 0.1 、 0.7 和 $2.0\mu\text{m}$ 左右.Wang等^[34]研究了除尘后纳米级($0.03\sim0.06\mu\text{m}$)、超细级($0.06\sim0.1\mu\text{m}$)、亚微米级($0.7\sim1.1\mu\text{m}$)和超微米级($1.8\sim2.7\mu\text{m}$)4个粒径段的颗粒物的离子组成,发现超微米级颗粒物的水溶性离子浓度最高;在超微米级和超细级,颗粒物上含量最丰富的水溶性离子均为 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 NO_3^- ;在亚微米级,以 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主;而在纳米级,以 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 为主,其次是 NO_3^- 和 Cl^- ;在这4个粒径段范围内的 K^+ 和 Na^+ 的相对含量都很低.图1是根据以上研究结果得到的燃煤电厂排放的颗粒物中主要水溶性无机离子的粒径分布示意.

2 烟气脱硝和脱硫对燃煤电厂排放细颗粒物的影响

脱硫和脱硝设施的安装可能引起燃煤电厂排放颗粒物中水溶性离子组成的变化,其可能影响机制如图2所示.燃煤烟气中的颗粒物所含的水溶性离子不仅来源于煤中灰分,也来源于在烟气净化过程(如脱硫和脱硝)中加入或反应生成.

2.1 烟气脱硝对燃煤电厂排放细颗粒物的影响

控制 NO_x 排放的技术可以分为低 NO_x 燃烧和

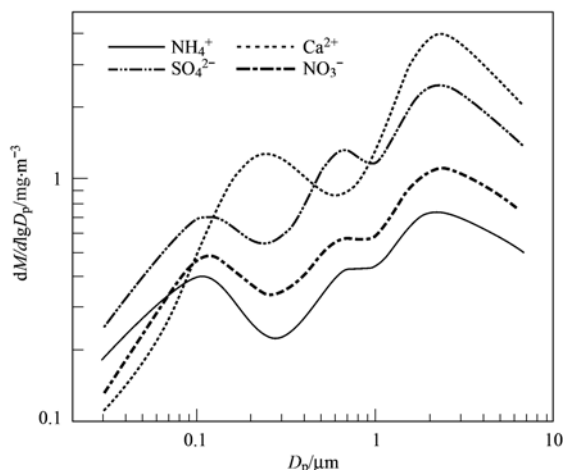


图1 燃煤电厂排放的颗粒物中水溶性无机离子粒径分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of size distribution of water-soluble organic ions in particulate matter emitted from coal-fired power plant

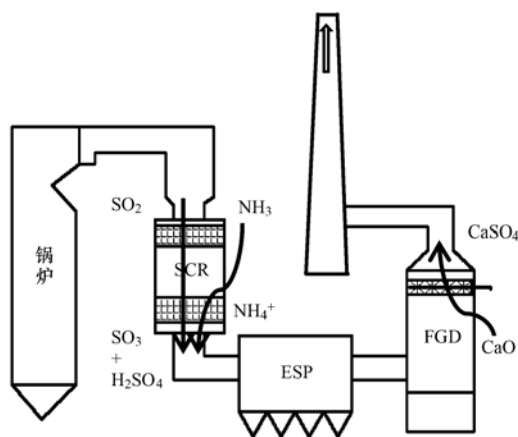
烟气脱硝两类。目前主要的低氮燃烧技术是分级燃烧,利用富燃或降低火焰温度或者两者组合的燃烧条件控制 NO_x 的生成。理论上,在富燃料状态下会形成较强的还原性气氛,有利于挥发分的挥发形成更多颗粒物,但另一方面,在火焰温度比较低的时候,挥发形成的颗粒物会减少^[35]。实际上,有研究表明低氮燃烧技术对排放颗粒物的质量浓度可能有影响^[36],结果的确存在争议:有些研究认为分级燃烧会抑制亚微米颗粒的形成^[37,38];但另有研究认为,分级燃烧会使煤燃烧时排放的亚微米颗粒物增加^[39]。低氮燃烧技术对不同粒径的颗粒物的影响可能不同。Liu等^[40]对比了低 NO_x 燃烧器和普通燃烧器的燃煤电厂排放颗粒物的粒数浓度分布,发现低 NO_x 燃烧器有利于粒径小于60 nm的超细颗

粒的形成。Linak等^[41]针对褐煤的实验研究表明分级燃烧器会使亚微米颗粒物的体积浓度增加40%~59%,与上述结果一致;但对烟煤,分级燃烧对亚微米颗粒的体积浓度的影响很小(亚微米颗粒物体积浓度增加量不足6%)。在水溶性离子组成方面,LNB可能降低燃煤电厂排放 $\text{PM}_{2.5}$ 中的离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+})含量^[34]。

目前,广泛应用于燃煤电厂的烟气脱硝技术是选择性催化还原(SCR),大多数安装在除尘器之前。SCR的原理是加入还原剂(一般是 NH_3)在催化剂的作用下与 NO_x 发生氧化还原反应生成 N_2 ^[42~44]。虽然有研究认为SCR对颗粒物排放没有影响^[24],但从原理上讲,在SCR中,催化剂会促进 SO_2 被 O_2 氧化生成 SO_3 ,特别是目前大规模商用的钒钨钛催化剂^[45,46]。SCR系统的反应温度越高,催化剂的负载量越大, SO_3 的转化率就越高^[47]。 SO_3 易与水蒸气反应形成硫酸蒸气,当温度低于120℃时,形成的 SO_3 几乎全部形成硫酸蒸气^[48]。在烟气经过湿法脱硫时,由于停留时间短,温度下降快(低于酸露点),硫酸蒸气会很快冷凝形成亚微米级小液滴,这些小液滴可以穿透除雾器进入烟囱而被排入大气^[49]。当烟气中的硫酸浓度为 $6.55 \times 10^7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,形成的液滴中 H_2SO_4 的含量可以高达81%^[50]。Berger等^[51]采集的烟气冷凝液的pH在2.0左右,离子组成以 SO_4^{2-} 为主, Cl^- 、 NO_3^- 和 F^- 的含量相对很少。同时,在SCR系统中加入的 NH_3 易与硫酸气溶胶反应生成 $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$ 或 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ^[52]。除尘后纳米级的颗粒物中的 NH_4^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 有富集的现象,表明这些纳米级颗粒物可能是通过成核作用新形成的^[34]。 H_2SO_4 、 $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 可通过冷凝和成核作用形成超细颗粒物($<0.2 \mu\text{m}$),它们在烟气中的停留时间长,甚至可以穿透WFGD系统,排放进入大气环境,增加排放的细颗粒物浓度^[26]。目前关于SCR对排放的细颗粒物的数浓度、质量浓度和离子组成的影响的研究较少。最新的研究表明,SCR会增加细颗粒物的数量浓度和质量浓度,同时增加颗粒物中水溶性的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的排放(未发表数据)。汇总有关研究中SCR对 $\text{PM}_{2.5}$ (主要是 PM_1)排放影响的定量结果,如表1所示,对某些燃煤电厂,烟气脱硝导致的 PM_1 排放可增加1倍,其中 NH_4^+ 的排放可增加近5倍, SO_4^{2-} 增加2倍以上。

2.2 烟气脱硫对燃煤电厂排放细颗粒物的影响

燃煤电厂普遍采用石灰石/石灰湿法烟气脱硫



SCR: 选择性催化还原; ESP: 电除尘; FGD: 烟气脱硫

图2 脱硫和脱硝对燃煤电厂排放 $\text{PM}_{2.5}$ 影响的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of effects of WFGD and SCR on $\text{PM}_{2.5}$ emitted from coal-fired power plant

表 1 SCR 对燃煤电厂 PM₁ 排放的影响/mg·m⁻³

Table 1 Effects of SCR on PM₁ emitted from coal-fired power plants/mg·m⁻³

电厂	PM ₁			PM ₁ 中 SO ₄ ²⁻			PM ₁ 中 NO ₃ ⁻			PM ₁ 中 NH ₄ ⁺			文献
	M ₁	M ₂	ΔM	M ₁	M ₂	ΔM	M ₁	M ₂	ΔM	M ₁	M ₂	ΔM	
1(低硫煤)				8	16	8							[25]
1(中硫煤)				15	31	16							[25]
1(高硫煤)				31	61	30							[25]
2	88.4	107	18.4	3.73	8.87	5.14	0.71	0.79	0.08	0.97	4.80	3.83	本研究
3	99.4	180	80.4	1.82	6.27	4.45	0.27	0.32	0.05	0.70	4.32	3.62	本研究

1) M₁ 为 SCR 前或无 SCR 浓度; M₂ 为 SCR 后或有 SCR 浓度; ΔM = M₂ - M₁

技术控制 SO₂ 的排放,该方法的原理是用石灰石或者石灰浆液与烟气中的 SO₂ 反应生成 CaSO₃, CaSO₃ 进而氧化生成 CaSO₄^[41]. 脱硫系统对烟气中细颗粒物的影响可能存在两个相反的过程:一方面,在脱硫过程中,部分颗粒物会被淋洗下来,不过 WFGD 对细模态的颗粒物去除效率很低,因此粗模态颗粒物的浓度会有明显下降^[24,53];另一方面,在脱硫过程中可能伴随脱硫液的夹带^[54,55],一些小液滴穿过除雾器后干化形成固体颗粒物,粒径一般在 1 μm 以内. 因此,经过脱硫设施后总烟尘的质量浓度可能有所下降(50% ~ 80%),但是 PM₁ 的含量有明显增加(20% ~ 100%)^[25].

脱硫过程不仅影响颗粒物的粒数浓度和质量浓度,而且会引起细颗粒物中的水溶性离子组成的变化. 经过脱硫处理, CaCO₃ 和 CaSO₄ 等脱硫浆液的成分会进入烟气中的细颗粒物. Meij^[56] 分析了经过 WFGD 后颗粒物的组成,颗粒物含 40% 的飞灰、10% 的石膏和 50% 的水. Saarnio 等^[57] 研究了在 WFGD 前后颗粒物组成的变化,结果表明,在 WFGD 后,颗粒物组成上增加了脱硫剂的成分[Ca(OH)₂ 和 NaCl] 和气体转化

形成的组分(SO₄²⁻);虽然在脱硫之后颗粒物的水溶性组分(除 NO₃⁻ 外)的质量浓度有所下降,但是, Ca²⁺、K⁺ 和 Na⁺ 与各自对应的金属元素的质量之比会增加(这表明尽管 FGD 能去除一部分颗粒物,但同时也会增加水溶性离子排放),而且 SO₄²⁻/PM₁ 和 Ca²⁺/PM₁ 的值上升更明显(表明主要增加较细的颗粒物). 在 WFGD 后颗粒物中阳离子相对丰富,因此颗粒物的碱度较高,有利于吸收气相中的酸性气体 SO₂ 和 NO_x 进入颗粒物中形成 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻^[58],而起这种作用的物质来源于脱硫剂. 国内的一些学者也观察到了类似的结果. 有研究^[20,59] 对比了 WFGD 前后颗粒物中元素组成的变化,结果表明,经 WFGD 后细颗粒物中 S 和 Ca 元素的含量明显增加,其中 S 元素的增加除来自脱硫剂和 CaSO₄ 外,还可能来自 SO₂ 的转化,出口烟气新增的石灰石与石膏颗粒分别占颗粒物质量的 45.7% 和 7.9%. 总结相关定量结果,如表 2 所示, WFGD 可能增加细颗粒物的排放,例如某些燃煤电厂的 PM₁ 排放可增加 1 倍;部分研究结果显示 PM₁ 中 SO₄²⁻ 和 Ca²⁺ 含量增加,但另一些研究结果显示不增加.

表 2 WFGD 对燃煤电厂 PM₁ 的影响/mg·m⁻³

Table 2 Effects of WFGD on PM₁ from coal-fired power plants/mg·m⁻³

电厂	PM ₁			PM ₁ 中 Ca ²⁺			PM ₁ 中 SO ₄ ²⁻			文献
	M ₁	M ₂	ΔM	M ₁	M ₂	ΔM	M ₁	M ₂	ΔM	
1*	1.8 ~ 2.8	2.4 ~ 3.1	0.3 ~ 1.3	0.8	0.7	-0.1	0.88	0.4	-0.48	[24]
2*	1.4	2.7 ~ 2.8	1.3 ~ 1.4				0.4	0.3	-0.1	[24]
3	4.68% ^a	13.25% ^a								[28]
4	2.26% ^a	12.64% ^a								[28]
5				6.7% ^b	20.8% ^b		10.2% ^b	21.5% ^b		[57]
6	20.8	29.0	8.2 ^c			1.1 ^c			6.0 ^c	[59]
7*							51.9% ^d	50.6% ^d		[60]
8							29.6% ^d	52.3% ^d		[60]
9*							1.37% ^d	0.79% ^d		[60]
10							2.42% ^d	52.8% ^d		[60]
11*							8.95% ^d	3.32% ^d		[60]

1) M₁ 为 WFGD 进口浓度; M₂ 为 WFGD 出口浓度; ΔM = M₂ - M₁; * 表示该电厂脱硫前后 SO₄²⁻ 的 ΔM 为负值; a 表示 PM₁ 占总烟尘的比例; b 表示 Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 占被分析组分(SO₄²⁻、F⁻、Cl⁻、Cu、Fe、Zn、Na、K、Mg 和 Ca 等)的比例; c 表示 PM_{0.4} 中 Ca²⁺ 或 SO₄²⁻ 在脱硫前后的浓度差; d 表示 SO₄²⁻ 占 PM_{2.5} 的比例

3 展望

除了除尘之外,燃煤电厂的烟气处理还包括脱硝和脱硫. 这些过程对于颗粒物,特别是细颗粒物的生成和去除以及化学组成都可能产生影响. 迄今为止,相关的定量研究还十分缺乏,不仅是国内,国际上的研究也很少. 在目前我国燃煤电厂大规模安装脱硫和脱硝装置背景下,定量研究脱硫和脱硝对排放 $\text{PM}_{2.5}$ 的物理化学特征的影响具有格外重要的意义. 一般来讲,脱硫和脱硝均会增加燃煤电厂的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放,这可能引起燃煤电厂排放特征的明显转变,从而在一定程度上抵消由于 SO_2 和 NO_x 减排带来的二次 $\text{PM}_{2.5}$ 削减的效果. 这个效应特别是在燃煤电厂周边表现更为明显(因为二次转化需要一定的时间). 研究脱硝和脱硫对细颗粒物的影响,有助于重新认识燃煤发电排放对大气颗粒物的贡献,有助于科学采取各种污染物的综合控制对策,以改善我国的大气环境质量.

参考文献:

- [1] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and arsenic in China: situation, sources and control policies[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**(1): 93-101.
- [2] Duan J C, Bi X H, Tan J H, *et al.* Seasonal variation on size distribution and concentration of PAHs in Guangzhou city, China [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(3): 614-622.
- [3] Loomis D, Grosse Y, Lauby-Secretan B, *et al.* The carcinogenicity of outdoor air pollution [J]. *The Lancet Oncology*, 2013, **14**(13): 1262-1263.
- [4] Yang G H, Wang Y, Zeng Y X, *et al.* Rapid health transition in China, 1990-2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010[J]. *The Lancet*, 2013, **381**(9882): 1987-2015.
- [5] Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J, *et al.* Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2005, **113**(7): 823-839.
- [6] Cheng Z, Wang S X, Jiang J K, *et al.* Long-term trend of haze pollution and impact of particulate matter in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **182**: 101-110.
- [7] 赵晴. 典型地区无机细粒子污染特征及成因研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [8] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Concentration and chemical characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing, China: 2001-2002 [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 264-275.
- [9] 刘宁, 王雪松, 胡泳涛, 等. 珠江三角洲秋季 PM_{10} 污染模拟与形成过程分析[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(9): 1537-1545.
- [10] 李莉, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区大气 O_3 和 PM_{10} 的区域污染特征模拟[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 238-247.
- [11] Sisler J F, Malm W C. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(5): 851-862.
- [12] Tsai Y I, Cheng M T. Visibility and aerosol chemical compositions near the coastal area in Central Taiwan [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **231**(1): 37-51.
- [13] Cheng M T, Tsai Y I. Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **263**(1-3): 101-114.
- [14] Yang L X, Wang D C, Cheng S H, *et al.* Influence of meteorological conditions and particulate matter on visual range impairment in Jinan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **383**(1-3): 164-173.
- [15] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 238-245.
- [16] Malm W C, Day D E. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(16): 2845-2860.
- [17] Zhang Q, He K B, Huo H. Policy: Cleaning China's air [J]. *Nature*, 2012, **484**(7393): 161-162.
- [18] Zhang C F, Yao Q, Sun J M. Characteristics of particulate matter from emissions of four typical coal-fired power plants in China [J]. *Fuel Processing Technology*, 2005, **86**(7): 757-768.
- [19] Yi H H, Guo X M, Hao J M, *et al.* Characteristics of inhalable particulate matter concentration and size distribution from power plants in China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56**(9): 1243-1251.
- [20] 雷宇. 中国人为源颗粒物及关键化学组分的排放与控制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [21] 贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 大气颗粒物与区域复合污染 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 45-51.
- [22] 中国网. 2010 年我国二氧化硫排放总量比 2005 年下降 14.29% [EB/OL]. http://www.china.com.cn/policy/txt/2012-03/02/content_24784587.htm.
- [23] 王琰, 宋蕾, 姚强, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, **28**(5): 1-7.
- [24] 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.
- [25] Farthing W E, Walsh P M, Gooch J P, *et al.* Identification of (and Responses to) potential effects of SCR and wet scrubbers on submicron particulate emissions and plume characteristics [R]. EPA-600/R-04/107, US: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Air Pollution Prevention and Control Division, 2004.
- [26] Sarofim A F, Padia A S, Howard J B. The physical transformation of the mineral matter in pulverized coal under

- simulated combustion conditions [J]. *Combustion Science and Technology*, 1977, **16**(3-6): 187-204.
- [27] 贺克斌. 燃煤飞灰电除尘特性的模拟与分析[D]. 北京: 清华大学, 1990.
- [28] 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. 94-128.
- [29] Ylätaalo S I, Hautanen J. Electrostatic precipitator penetration function for pulverized coal combustion[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1998, **29**(1): 17-30.
- [30] Liu X W, Xu M H, Yao H, *et al.* Characteristics and composition of particulate matter from coal-fired power plants [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **52**(6): 1521-1526.
- [31] Bhanarkar A D, Gavane A G, Tajne D S, *et al.* Composition and size distribution of particulates emissions from a coal-fired power plant in India[J]. *Fuel*, 2008, **87**(10-11): 2095-2101.
- [32] 郭兴明, 郝吉明, 段雷, 等. 大容量燃煤电站锅炉水溶性离子排放特征[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, **46**(12): 1991-1994.
- [33] 刘晓宇. 典型固定燃烧源颗粒物排放特征研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2007.
- [34] Wang H L, Hao Z P, Zhuang Y H, *et al.* Characterization of inorganic components of size-segregated particles in the flue gas of a coal-fired power plant [J]. *Energy & Fuels*, 2008, **22**(3): 1636-1640.
- [35] Flagan R C, Seinfeld J H, Engineering. *Fundamentals of air pollution engineering*[M]. New York: Dover Publications Inc., 2012. 358-388.
- [36] Schmidt E W, Gieseke J A, Allen J M. Size distribution of fine particulate emissions from a coal-fired power plant [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1976, **10**(12): 1065-1069.
- [37] McElroy M W, Carr R C, Ensor D S, *et al.* Size distribution of fine particles from coal combustion [J]. *Science*, 1982, **215**(4528): 13-19.
- [38] Taylor D D, Flagan R C. The influence of combustor operation on fine particles from coal combustion [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1981, **1**(1): 103-117.
- [39] Nettleton M A. Particulate formation in power station boiler furnaces [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1979, **5**(3): 223-243.
- [40] Liu X Y, Wang W, Liu H J, *et al.* Number size distribution of particles emitted from two kinds of typical boilers in a coal-fired power plant in China[J]. *Energy & Fuels*, 2010, **24**(3): 1677-1681.
- [41] Linak W P, Peterson T W. Effect of coal type and residence time on the submicron aerosol distribution from pulverized coal combustion[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1984, **3**(1): 77-96.
- [42] Bosch H, Janssen F. Catalytic reduction of nitrogen oxides: a review on the fundamentals and technology [M]. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- [43] Bosch H, Bongers A, Enoch G, *et al.* Lithium-Vanadium bronzes as model catalysts for the selective reduction of nitric oxide[J]. *Catalysis Today*, 1989, **4**(2): 139-154.
- [44] 郝吉明, 马广大, 王书肖, 等. 大气污染控制工程[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2010. 378-411.
- [45] Kamata H, Ohara H, Takahashi K, *et al.* SO₂ oxidation over the V₂O₅/TiO₂ SCR catalyst[J]. *Catalysis Letters*, 2001, **73**(1): 79-83.
- [46] Tronconi E, Cavanna A, Orsenigo C, *et al.* Transient kinetics of SO₂ oxidation over SCR-DeNO_x monolith catalysts[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1999, **38**(7): 2593-2598.
- [47] 魏宏鸽, 程雪山, 马彦斌, 等. 燃煤烟气中 SO₃ 的产生与转化及其抑制对策探讨[J]. *发电与空调*, 2012, **33**(2): 1-4.
- [48] 赵立章. 燃煤锅炉低温受热面发生酸性腐蚀的原因分析[J]. *工业锅炉*, 2001, **70**(6): 45-48.
- [49] Gutberlet H, Hartenstein H, Licata A. SO₂ conversion rate of deNO_x catalysts- effects on downstream plant components and remedial measures [A]. In: *The Power Gen 1999* [C]. New Orleans, 1999.
- [50] 唐志永. 湿法脱硫后燃煤电站尾部装置腐蚀研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [51] Berger D M, Kieffer J K, Mathay W J, *et al.* Determining corrosivity of flue gas condensate[J]. *Power Engineering*, 1984, **88**(10): 56-58.
- [52] Corio L A, Sherwell J. In-stack condensable particulate matter measurements and issues [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(2): 207-218.
- [53] 颜金培, 杨林军, 鲍静静. 湿法脱硫烟气中细颗粒物的变化特性[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2011, **41**(2): 387-392.
- [54] 程永新, 曹佩. 湿法烟气脱硫系统中“石膏雨”问题的分析及对策[J]. *电力建设*, 2011, **31**(11): 94-97.
- [55] 陈牧. 湿法脱硫后烟卤出口烟气液滴夹带问题分析及解决[J]. *电力建设*, 2010, **31**(10): 80-83.
- [56] Meij R. Trace element behavior in coal-fired power plants[J]. *Fuel Processing Technology*, 1994, **39**(1-3): 199-217.
- [57] 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.
- [58] Sakai M, Su C L, Sasaoka E. Simultaneous removal of SO_x and NO_x using slaked lime at low temperature [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, **41**(20): 5029-5033.
- [59] 周科, 聂剑平, 张广才, 等. 湿法烟气脱硫燃煤锅炉烟气颗粒物的排放特性研究[J]. *热力发电*, 2013, **42**(8): 81-89.
- [60] 李壮. 火电厂煤粉炉 PM_{2.5} 产排特性的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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