

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究 窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明 (1)
厦门城区大气颗粒物 PM₁₀ 中有机酸源谱特征分析 杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水正 (8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析 李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思 (15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO₂ 和 NO_x 的影响 王鸿,朱天乐,王美艳 (21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较 汪军,王德建,张刚,王远 (27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物 陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋 (34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究 张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨 (39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布 王敏,张洪海,杨桂朋 (45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析 闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇 (51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测 李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙 (61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究 郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁 (69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究 徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍 (77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型 陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军 (84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征 李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元 (91)
湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用 蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山 (98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价 张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男 (108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布 李晋昌,张红,石伟 (116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估 张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强 (121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征 刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军 (129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选 卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新 (137)
海洋细菌 *Marinobacter adhaerens* HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用 王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦 (145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响 苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民 (150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响 高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳 (156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析 王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐 (163)
天然有机物的相对分子量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响 胡孟柳,林洁,许光红,董秉直 (169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响 徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺 (177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究 曾宪委,刘建国,聂小琴 (182)
负载型 TiO₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究 张小娜,周少奇,周晓 (188)
污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析 吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇 (194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响 刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根 (198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N₂O 产生量的影响 韩雪,高大文 (204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢 (209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换 白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立栲,何宝燕,李跃鹏 (217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究 夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳 (226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究 孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南 (231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析 杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛 (237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究 齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福 (244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估 千志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏 (251)
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用 霍向晨,刘树深,张晶,张瑾 (257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌 吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远 (263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响 孟瑶,梁红,高大文 (271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响 张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林 (277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响 霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国 (283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征 董洪芳,于君宝,管博 (288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究 方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇 (293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究 陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,黄玉娟 (302)
无定形 Fe(OH)₃ 和 Fe₃O₄ 共沉淀态 As 的化学提取 陈义萍,王少锋,贾永锋 (308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响 李华,黄建国,袁玲 (315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究 段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎 (321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能 李坤权,李焯,郑正,桑大志 (328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究 田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易 (336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展 侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强 (347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征 何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛 (357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征 唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正 (364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析 任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强 (373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析 虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维 (379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析 施晓清,李笑诺,杨建新 (385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究 邓俊,徐琬莹,周传斌 (395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施 黄锦楼,陈琴,许连煌 (401)
《环境科学》征订启事(26) 《环境科学》征稿简则(68) 信息(76,144,301,400) 专辑征稿通知(394)

气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO_2 和 NO_x 的影响

王鸿, 朱天乐*, 王美艳

(北京航空航天大学化学与环境学院, 北京 100091)

摘要: 在 pH 值 5.9~6.1, 吸收液浓度 $\geq 1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 分析了模拟烟气的 NO_x 氧化度、 O_2 和 SO_2 浓度, 以及添加液相 S(IV) 氧化抑制剂 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 对 SO_2 、 NO_x 吸收脱除效率的影响. 结果表明, 氨可高效吸收脱除 SO_2 和 NO_2 , 但对 NO 的吸收脱除效率几乎为 0, 因此, NO 氧化是其吸收脱除 NO_x 的前提. 吸收液 S(IV) 浓度是影响 NO_2 脱除效率的关键因素, 气相 O_2 浓度越高或 SO_2 浓度越低, 吸收液 S(IV) 浓度降低越快, 继而使 NO_2 吸收脱除效率降低越快. 通过添加 S(IV) 氧化抑制剂 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 到吸收液, 可在一定程度上抑制其氧化, 从而延缓 NO_2 吸收脱除效率的降低.

关键词: 气相组成; 亚硫酸铵; 吸收; 烟气; SO_2 ; NO_x ; 氧化抑制剂

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0021-06

Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO_x and SO_2 from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption

WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan

(School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The effects of NO_x oxidation ratio, O_2 and SO_2 concentrations in simulated flue gas as well as addition of S(IV) oxidation inhibitor $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ on the simultaneous removal of SO_2 and NO_x by ammonia absorption were investigated under the conditions of pH 5.9-6.1 and aqueous S(IV) concentration $\geq 1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. The research results showed that NO_2 could be effectively absorbed by ammonium sulfite, but the NO absorption was negligible. Therefore, NO oxidation is the premise of NO_x removal. Aqueous S(IV) concentration is a key factor affecting NO_2 absorption removal, the higher the O_2 concentration or the lower the SO_2 concentration, the faster the aqueous S(IV) concentration decreased, which resulted in a faster decrease of NO_2 removal efficiency. S(IV) oxidation was inhibited to some extent by the addition of oxidation inhibitor $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ into the absorption solution. As a result, the decrease of NO_2 removal efficiency became slower.

Key words: gaseous composition; ammonium sulfite; absorption; flue gas; SO_2 ; NO_x ; oxidation inhibitor

燃料燃烧和垃圾焚烧均会产生既含 SO_2 又含 NO_x 的烟气, 严重危害人体健康和生态系统. 传统烟气处理工艺是在两个不同的处理单元分别实现 SO_2 和 NO_x 的脱除, 最常用的处理技术是湿式烟气脱硫和选择性催化还原脱硝^[1,2]. 这种处理工艺设置方式存在占地面积大, 建设和运营成本高不足. 于是, 在同一个处理装置内, 实现 SO_2 和 NO_x 的同步脱除成为研究方向. 基于酸碱中和与氧化还原的液相吸收具有运行稳定、效率高等优点, 是最具应用潜力的同步脱硫脱硝方法^[3,4]. 液相吸收能够高效脱除 SO_2 早已被实践证明, 属于成熟技术^[4,5]. 因此, 为了实现同步脱硫脱硝, 研究主要关注液相吸收脱除 NO_x . 此外, 考虑到碱液吸收能高效脱除 NO_2 , 对 NO 的脱除效率较低, 而烟气中的 NO_x 以 NO 为主. 因此, NO 的预氧化也是研究重点之一.

针对碱液吸收脱除 NO_x , Gao 等^[6,7] 在不含 O_2 和 SO_2 的气氛条件下, 研究了亚硫酸铵吸收 NO 和 NO_2 的动力学行为, 表明增大吸收液 S(IV) 浓度, 即

SO_3^{2-} 与 HSO_3^- 总浓度, 可提高脱硝反应速率. Kameoka 等^[8] 则在不含 O_2 和 SO_2 的气氛条件下, 比较了水和 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚硫酸钠水溶液吸收脱除 NO_2 的效果, 表明亚硫酸钠水溶液对 NO_2 的吸收速率是水的 2.5 倍. Takeuchi 等^[9] 分别在空气气氛和 N_2 气氛条件下, 研究了亚硫酸钠单纯吸收 NO_2 的过程, 推得 NO_2 与 SO_3^{2-} 的反应是链反应. Littlejohn 等^[10] 利用酸、碱性亚硫酸钠溶液在 O_2 浓度为 0 和 5%, 无 SO_2 的气氛条件下吸收 NO_2 , 并利用拉曼光谱法检测反应产物及浓度, 总结得出了 NO_2 与 SO_3^{2-} 的链反应过程, 并计算得到链反应中各反应的速率常数. Shen 等^[11] 在无氧和氧气浓度为 15% 且无 SO_2 的气氛条件下, 测定了 NO_2 与 SO_3^{2-} 、 HSO_3^- 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的反应速率常数, 指出 NO_2 与 SO_3^{2-} 、 HSO_3^- 、

收稿日期: 2012-04-05; 修订日期: 2012-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(20977003)

作者简介: 王鸿(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: 415521015@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: zhutl@buaa.edu.cn

$S_2O_3^{2-}$ 的反应对 NO_2 浓度是一级反应,而 NO_2 水解反应对 NO_2 浓度是二级反应,同时指出 $S_2O_3^{2-}$ 在反应中起到自由基捕获的作用,能够抑制因 O_2 、 NO_2 引发的液相中 SO_3^{2-} 离子的氧化. 有关 NO 预氧化研究表明, O_3 注入^[12,13]、低温等离子体^[14~16]、光催化氧化^[17]以及 UV/H_2O_2 ^[18] 等方法均可有效氧化烟气中的 NO . 在吸收液中添加 $KMnO_4$ ^[3]、氯酸类氧化剂^[19~21]也可以促进 NO 的吸收脱除.

本研究在氨吸收法适宜的 pH 值和溶液 $S(IV)$ 浓度条件下,采用鼓泡吸收法,分析了模拟烟气的 NO_x 氧化度、 O_2 和 SO_2 浓度,以及液相 $S(IV)$ 添加氧化抑制剂 $Na_2S_2O_3$ 对 SO_2 、 NO_x 吸收脱除效率的影响,并探讨了各因素的影响机制.

1 材料与方 法

实验装置由模拟烟气、吸收和气体采样分析 3 部分构成,如图 1 所示. 模拟烟气由 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O 、 SO_2 、 NO_2 或者 $NO + NO_2$ 构成. O_2 含量通过空气和 N_2 的配比来调节. H_2O 通过控温鼓泡塔,借助空气将其引入主气流之中. 空气由空压机提供,其他气体皆由气瓶气提供,利用质量流量控制器调控各路气体的流量,总处理气量为 $6 L \cdot min^{-1}$. 各路气体进入吸收塔之前,先在混合罐中混合均匀. 实验在常温常压下进行. 模拟烟气的组成为 $6\% O_2 + 12\% CO_2 + 3\% H_2O + 1500 mg \cdot m^{-3} SO_2 + 310 mg \cdot m^{-3} NO_2 + N_2$,在研究 NO_x 氧化度影响时, NO_x 浓度由 NO 和 NO_2 按标准气配置,折算成 NO_2 的总浓度为 $310 mg \cdot m^{-3}$.

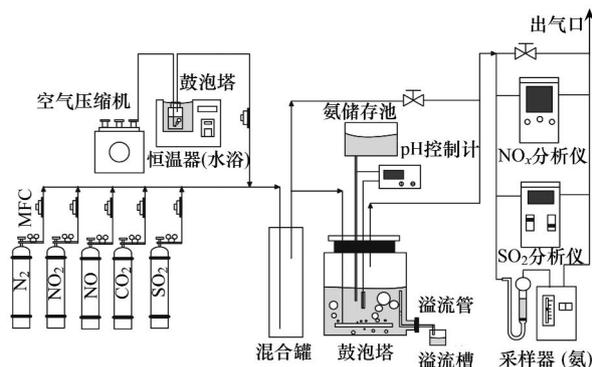


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

实验所用吸收塔是容积为 5 L 的广口玻璃瓶,采用鼓泡吸收方式,模拟烟气通过浸没于吸收塔底的曝气头形成小气泡,实现与吸收液的接触吸收. 初始亚硫酸铵吸收液由纯氨水(分析纯)与亚硫酸

(分析纯)按一定比例混合而成, $S(IV)$ 浓度皆为 $1.0 mol \cdot L^{-1}$. 实验过程中,通过溢流管放出多余的吸收液,维持吸收塔内吸收液体积为 2.5 L. 吸收液 $S(IV)$ 浓度采用碘滴定法分析测定, HSO_3^- 浓度采用氢氧化钠滴定法分析测定, $S_2O_3^{2-}$ 浓度测量先用甲醛固定 $S(IV)$,然后通过碘滴定法测定, NO_2^- 和 NO_3^- 离子采用离子色谱仪(Methrohm 792 Basic, 瑞士)测定.

气相 NO_x 和 SO_2 浓度分别采用烟气分析仪(Testo335, 德国)和 SO_2 分析仪(Kane SGA94, 英国)检测. 氨气浓度采用次氯酸钠-水杨酸分光光度法检测. 定义 η 为 NO_x 或 SO_2 的吸收脱除效率,如式(1)所示,其中 c_{in} 和 c_{out} 分别为吸收塔的入口和出口的 NO_x 或 SO_2 浓度.

$$\eta = \frac{c_{in} - c_{out}}{c_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 吸收液 pH 值的确定

pH 值既影响脱硫脱硝效率,也与氨逃逸量直接相关. 为此,在初始亚硫酸铵吸收液 $S(IV)$ 浓度为 $1 mol \cdot L^{-1}$ 前提下,利用 $1.0 mol \cdot L^{-1}$ 的氨水或 $1.0 mol \cdot L^{-1}$ 硫酸溶液调控吸收液 pH 值,测定对应不同 pH 值吸收反应 1h 的平均脱硫脱硝效率和吸收塔出口 NH_3 浓度,结果如图 2 所示.

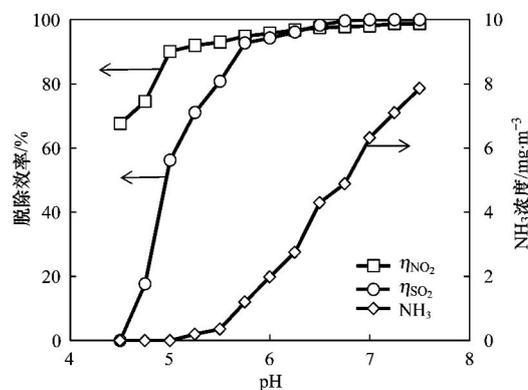


图 2 pH 值对 SO_2 和 NO_2 脱除的影响

Fig. 2 Effects of pH on SO_2 and NO_2 removal

可以看出,当 $pH < 6$ 时, SO_2 脱除效率随 pH 增高迅速增大,当 $pH > 6$ 时,继续增大 pH 值,脱除效率继续提高,但幅度很小. 而 NO_2 脱除效率在 $pH < 5$ 时即显著升高,随后,效率提高幅度很小. 从图 2 还可看出,pH 从 4.5 升至 7.5 时,吸收塔出口气体的氨浓度由 0 增大到 $7.8 mg \cdot m^{-3}$,对应 $pH = 6$ 的氨浓度为 $2.0 mg \cdot m^{-3}$. 综合考虑脱硝效率和氨逃逸

情况,后续研究控制吸收液 pH 值为 5.9~6.1,利用从高位储液槽滴加 1.0 mol·L⁻¹ 氨水实现。

2.2 气相 NO_x 氧化度的影响

气相 NO_x 氧化度是指反应气中 NO₂ 与 NO_x 的体积百分比。有关 NO_x 氧化度对碱液吸收脱硝效率的影响,传统观点认为氧化度为 50%~60% 时 NO_x 吸收速率最大,吸收效率最高^[22]。然而,由于烟气中 NO_x 浓度较低,并不适用此结论。本研究测定了对应不同 NO_x 氧化度吸收反应 1 h 的平均脱硫脱硝效率,结果表明,不同 NO_x 氧化度下的 SO₂ 脱除效率皆在 93% 以上,NO、NO₂ 和 NO_x 脱除效率如图 3 所示。

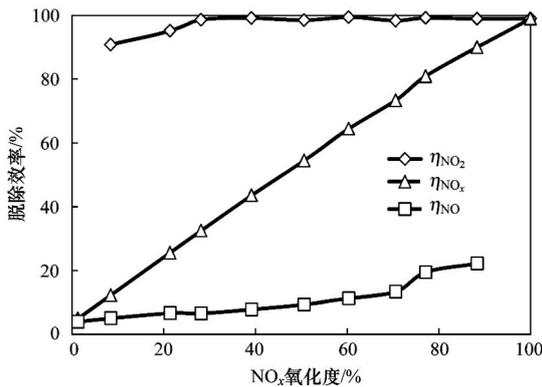


图 3 氧化度与 NO_x 脱除的关系

Fig. 3 Effect of oxidation ratio on NO_x removal

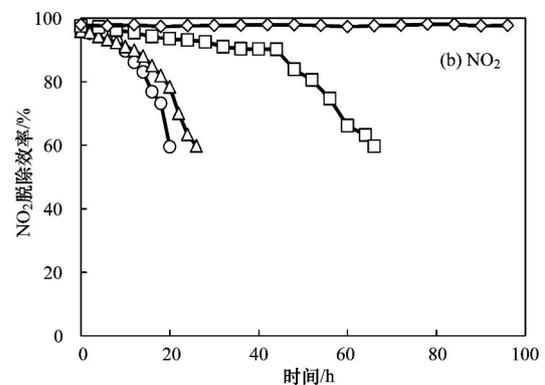
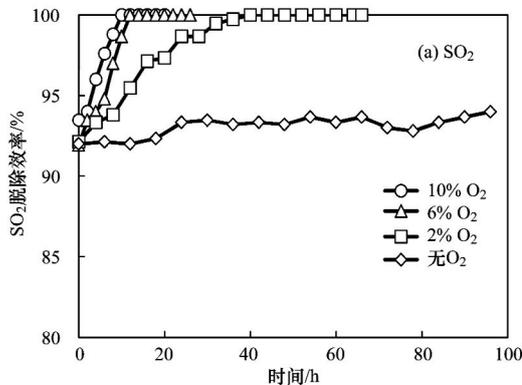
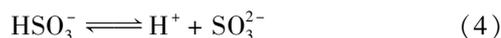


图 4 气相 O₂ 浓度对 SO₂ 和 NO₂ 脱除的影响

Fig. 4 Effects of O₂ content on SO₂ and NO₂ removal



O₂ 的存在会促进 S(IV) 转化为 SO₄²⁻, 如反应 (5) 和 (6) 所示,降低液相 SO₃²⁻ 和 HSO₃⁻ 的浓度,继而提高 SO₂ 从气相传递至液相的速率。

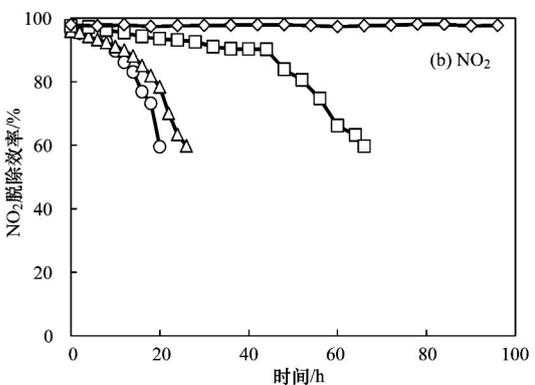
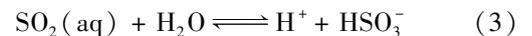
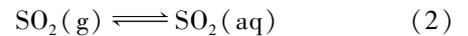
图 4(b) 表明, O₂ 浓度对 NO₂ 吸收脱除效率的

从图 3 可以看出,亚硫酸铵吸收液能高效吸收脱除气相 NO₂,但对 NO 的吸收脱除效率很低,NO_x 脱除效率与 NO_x 氧化度近似呈斜率为 1 的线性关系,表明当 NO_x 氧化度在 50% 左右时的吸收速率并不是最大,与传统观点相悖。出现这种现象的原因是本研究中模拟烟气中 NO_x 浓度较低且吸收液为弱酸性或中性环境,此时 NO 并不能被吸收液吸收,但 NO₂ 仍可维持高吸收率。考虑到氨逃逸因素,氨吸收不允许在高 pH 条件下进行。可见,NO 氧化为 NO₂ 是其高效脱除的前提条件。文献 [17, 23] 的实验结果与本结果相类似,仅因 NO₂ 的吸收脱除效率在各自体系不一而导致直线斜率有所差异。

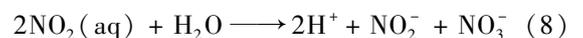
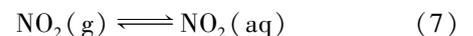
2.3 气相 O₂ 浓度的影响

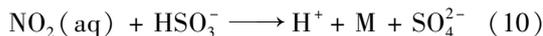
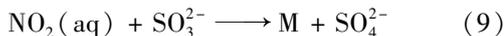
为了全面考察 O₂ 浓度对 SO₂ 和 NO₂ 脱除效率的影响,选取 4 个代表性 O₂ 比例 (0、2%、6%、10%) 进行研究,获得脱除效率与吸收反应时间的关系如图 4 所示。

从图 4(a) 可以看出,反应气不含 O₂ 情况下,SO₂ 脱除效率在反应时间内维持在 93% 左右;有 O₂ 情况下,SO₂ 脱除效率会从 93% 增大到接近 100%,而且 O₂ 浓度越高,增至 100% 所需时间越短。这是因为 SO₂ 吸收主要涉及如下反应过程:



影响规律与 SO₂ 正好相反。反应气不含 O₂ 时,NO₂ 脱除效率维持在 98% 左右。有 O₂ 情况下,随着反应进行,NO₂ 脱除效率逐步降低而且 O₂ 浓度越高,降低越快。这是因为 NO₂ 吸收主要经历如下反应过程:





反应(9)和(10)的M表示 N_2 、 N_2O 、 NO 和 NO_2^- 等可能反应产物。Littlejohn等^[10]指出,在有 O_2 情况下,反应(9)和(10)是以自由基链反应的形式进行,使得1 mol的 NO_2 吸收可以氧化1 mol以上的S(IV),而且 O_2 浓度越高,S(IV)氧化速率越大。实际上,本研究也对吸收液S(IV)浓度随时间变化情况进行了检测。结果表明, O_2 浓度越高,S(IV)下降越快,如图5所示。另外,对吸收液 NO_2^- 和 NO_3^- 检测表明,其总N浓度之和远低于实际从气相进入液相的 NO_2 换算的N量,这表明大部分被吸收的 NO_2 转化为 N_2O 或 N_2 之类非水溶性含N化合物。

2.4 气相 SO_2 浓度的影响

本研究中,分别在0、500、1500和2500

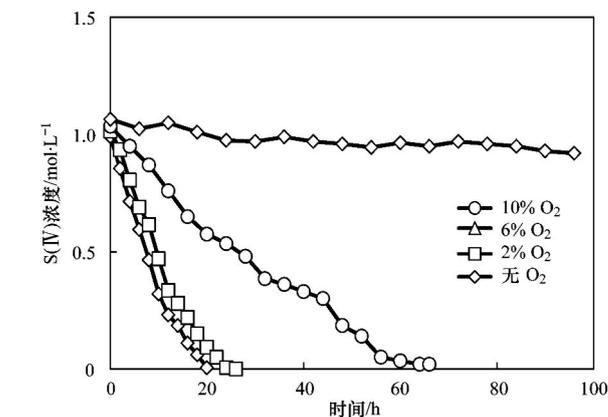
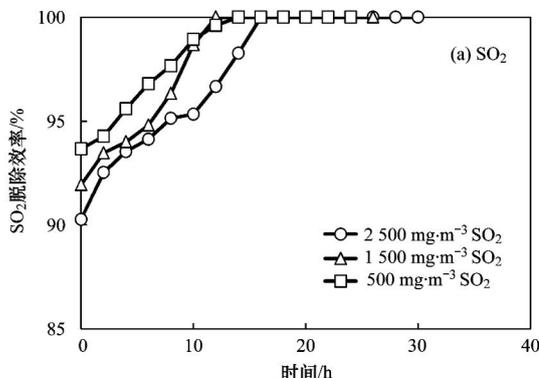


图5 O_2 浓度对S(IV)浓度的影响

Fig. 5 Effect of O_2 content on S(IV) concentration

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的气相 SO_2 浓度条件下,研究 SO_2 和 NO_2 脱除效率与反应时间的关系,结果如图6所示。

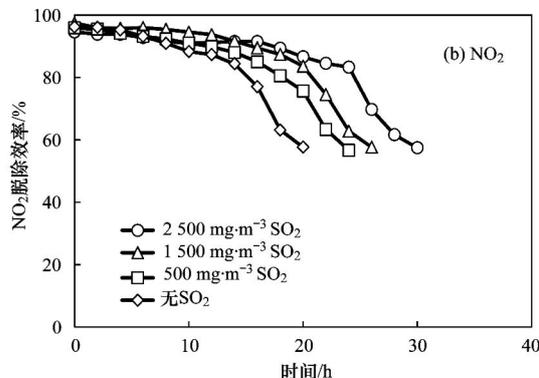


图6 SO_2 浓度对 SO_2 和 NO_2 脱除的影响

Fig. 6 Effects of SO_2 concentration on SO_2 and NO_2 removal

图6(a)表明, SO_2 浓度越高,起始脱除效率越低,且脱除效率达到接近100%所需时间越长。相反,由图6(b)可以看出, SO_2 浓度越高, NO_2 吸收脱除效率随时间下降越慢,高 NO_2 脱除效率维持时间越长。显然,这是由于气相 SO_2 浓度越高,越有助于反应(1)进行,使 $\text{SO}_2(\text{aq})$ 浓度升高,进而促进 SO_2 离子化反应(4)和(5),提高液相 SO_3^{2-} 和 HSO_3^- 所致。因此,气相 SO_2 浓度也是影响 SO_2 和 NO_2 脱除效率的重要因素。

2.5 液相添加S(IV)氧化抑制剂的影响

上述研究表明,维持高的S(IV)浓度是确保高 NO_2 脱除效率的前提。在非模拟烟气条件下的研究表明, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 在吸收液中能起到捕获自由基的作用,因此可有效抑制因 O_2 存在而引发的S(IV)氧化自由基链反应的发生,降低在含氧气氛时吸收液中S(IV)的氧化速率、稳定吸收液S(IV)浓度,延缓

NO_2 吸收脱除效率下降^[11, 17, 24, 25]。本研究在模拟烟气条件下,研究吸收液初始 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度为 $0.33 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_2 、 NO_2 吸收脱除效率和液相S(IV)浓度随反应时间的变化,结果如图7所示。

从图7(a)可以看出,添加 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 SO_2 脱除效率几乎没有影响,但可显著延缓 NO_2 脱除效率的降低。图7(b)则表明 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度会随着反应的进行而降低, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的添加,显著降低了S(IV)的氧化速率。

3 结论

(1)氨吸收可有效脱除 NO_2 ,但对 NO 的吸收脱除作用非常微弱。随着 NO_x 氧化度提高, NO_x 脱除效率近似以斜率为1的线性关系增大。

(2)吸收液S(IV)浓度是影响 NO_2 脱除效率的关键因素,气相 O_2 浓度增大或 SO_2 浓度降低,皆会

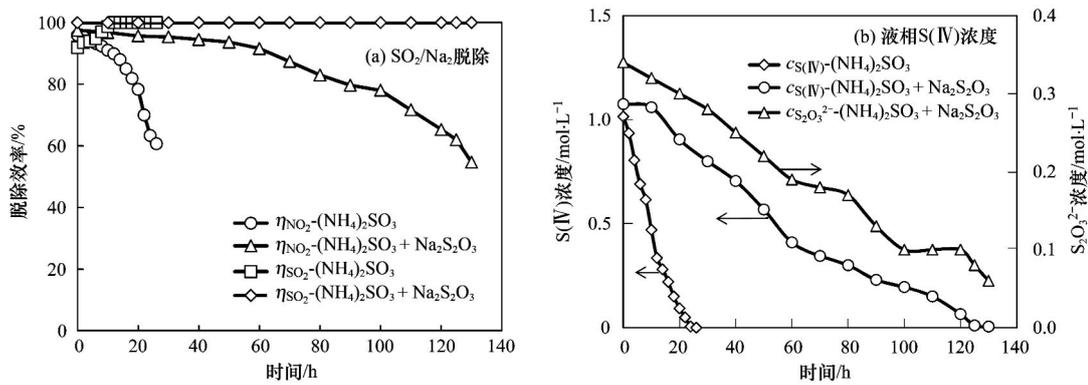


图7 液相添加氧化抑制剂对 SO₂/NO₂ 脱除和液相 S(IV) 浓度的影响

Fig. 7 Effects of oxidation inhibitor on SO₂/NO₂ removal and S(IV) concentration

加快液相 S(IV) 消耗, 使 NO₂ 吸收脱除效率降低。

(3) 吸收液中 S(IV) 添加氧化抑制剂 S₂O₃²⁻, 可防止 S(IV) 浓度快速下降, 继而延缓 NO₂ 吸收脱除效率的降低。

参考文献:

- [1] Srivastava R K, Jozewicz W, Singer C. SO₂ scrubbing technologies: a review [J]. Environmental Progress, 2001, **20** (4): 219-228.
- [2] Radojevic M. Reduction of nitrogen oxides in flue gases [J]. Environmental Pollution, 1998, **102**(1): 685-689.
- [3] Chu H, Chien T W, Li S Y. Simultaneous absorption of SO₂ and NO from flue gas with KMnO₄/NaOH solutions [J]. The Science of the Total Environment, 2001, **275**(1-3): 127-135.
- [4] Xu Y. China's functioning market for sulfur dioxide scrubbing technologies [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(21): 9161-9167.
- [5] Jia Y, Zhong Q, Fan X Y, et al. Kinetics of oxidation of total sulfite in the ammonia-based wet flue gas desulfurization process [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, **164**(1): 132-138.
- [6] Gao X, Du Z, Ding H F, et al. Kinetics of NO_x absorption into (NH₄)₂SO₃ solution in an ammonia-based wet flue gas desulfurization process [J]. Energy & Fuels, 2010, **24**(11): 5876-5882.
- [7] Gao X, Du Z, Ding H L, et al. Effect of gas-liquid phase compositions on NO₂ and NO absorption into ammonium-sulfite and bisulfite solutions [J]. Fuel Processing Technology, 2011, **92**(8): 1506-1512.
- [8] Kameoka Y, Pigford R L. Absorption of nitrogen dioxide into water, sulfuric acid, sodium hydroxide, and alkaline sodium sulfite aqueous solutions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1977, **16**(1): 163-169.
- [9] Takeuchi H, Takahashi K, Kizawa N. Absorption of nitrogen dioxide in sodium sulfite solution from air as a diluent [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1977, **16**(4): 486-490.
- [10] Littlejohn D, Wang Y Z, Chang S G. Oxidation of aqueous sulfite ion by nitrogen dioxide [J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(10): 2162-2167.
- [11] Shen C H, Rochelle G T. Nitrogen dioxide absorption and sulfite oxidation in aqueous sulfite [J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32**(13): 1994-2003.
- [12] Wang Z H, Li B, Ehn A, et al. Investigation of flue-gas treatment with O₃ injection using NO and NO₂ planar laser-induced fluorescence [J]. Fuel, 2010, **89**(9): 2346-2352.
- [13] Mok Y S, Lee H J. Removal of sulfur dioxide and nitrogen oxides by using ozone injection and absorption-reduction technique [J]. Fuel Processing Technology, 2006, **87**(7): 591-597.
- [14] Chang J S. Physics and chemistry of plasma pollution control technology [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2008, **17**(4): 045004, doi: 10.1088/0963-0252/17/4/045004.
- [15] 罗宏晶, 朱天乐, 王美艳. 非热等离子体强化碱液吸收脱除烟气中 NO 和 Hg⁰ 的研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1682-1687.
- [16] Wang M Y, Zhu T L, Wang H. Oxidation and removal of NO from flue gas by DC corona discharge combined with alkaline absorption [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, **39**(2): 704-710.
- [17] Wu Z B, Wang H Q, Liu Y, et al. Study of a photocatalytic oxidation and wet absorption combined process for removal of nitrogen oxides [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, **144**(2): 221-226.
- [18] Liu Y X, Zhang J, Sheng C D, et al. Simultaneous removal of NO and SO₂ from coal-fired flue gas by UV/H₂O₂ advanced oxidation process [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, **162**(3): 1006-1011.
- [19] Chu H, Chien T W, Twu B W. The absorption kinetics of NO in NaClO₂/NaOH solutions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, **84**(2-3): 241-252.
- [20] Zhao Y, Guo T X, Chen Z Y. Experimental study on simultaneous desulfurization and denitrification from flue gas with composite absorbent [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2011, **30**(2): 216-220.
- [21] Jin D S, Deswal B R, Park Y S, et al. Simultaneous removal of SO₂ and NO by wet scrubbing using aqueous chlorine dioxide

- solution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **135**(1-3): 412-417.
- [22] 童志权. 大气污染控制工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 312-314.
- [23] Tang N, Liu Y, Wang H Q, *et al.* Enhanced absorption process of NO₂ in CaSO₃ slurry by the addition of MgSO₄[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **160**(1): 145-149.
- [24] Rosenberg H S, Grotta H M. NO_x influence on sulfite oxidation and scaling in lime limestone flue gas desulfurization (FGD) systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 1980, **14**(4): 470-472.
- [25] Mo J S, Wu Z B, Cheng C J, *et al.* Oxidation inhibition of sulfite in dual alkali flue gas desulfurization system[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(2): 226-231.

欢迎订阅 2013 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产 and 生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2013 年为大 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolofop- <i>p</i> -ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人