

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)

基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)

湿地水环境健康评价方法及案例分析 李玉凤, 刘红玉, 郝敬锋, 郑因, 曹晓 (346)

北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)

漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)

黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)

沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)

长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)

洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 张文斌, 余辉 (399)

降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)

浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)

基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)

基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)

Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)

羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)

天然菱铁矿改性及强化除砷研究 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)

零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 廖娣劫, 杨琦, 李俊琦 (469)

水体中氧氟沙星的光化学降解研究 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)

阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)

吡啶在紫外光辐射下的生物降解 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)

蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)

ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 曹玉娟, 张扬, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)

丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)

亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄毓, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)

我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 李东玲, 吴焯, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)

北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)

道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)

Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)

UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)

干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)

九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)

秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)

我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)

典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)

电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)

北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)

上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)

海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)

三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)

大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)

应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)

软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)

固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)

五氟酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)

建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)

《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)

Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析

陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032)

摘要: 为进一步提高一氧化氮(NO)的去除效率,在新型生物转鼓反应器(rotating drum biofilter, RDB)中,以 Fe^{II}(EDTA)络合协同 RDB 生物转鼓的耦合技术强化难水溶性 NO 的气液传质速率,提高生物还原效能为目标进行了研究. 结果表明,适量 Fe^{II}(EDTA)被添加到 RDB 底部营养液后,能迅速吸收气相中的 NO 并生成 Fe^{II}(EDTA)-NO 络合物,进而可通过反硝化实现同步脱氮和络合剂再生. 在转速 0.5 r·min⁻¹、空床停留时间(EBRT)57.7 s、温度 30℃、pH 7~8 的实验条件下,RDB 的净化效能随络合剂的投加而显著改善; Fe^{II}(EDTA)质量浓度从 0 增至 500 mg·L⁻¹后,NO 去除率从 61.1% 提高到 97.6%,去除负荷从 16.2 g·(m³·h)⁻¹ 上升到 26.7 g·(m³·h)⁻¹. 分析了 Fe^{II}(EDTA)络合协同净化 NO 的反应过程,建立了 NO 净化效率与 Fe^{II}(EDTA)添加浓度的关联方程,可较好地拟合实验数据.

关键词: 生物转鼓过滤器(RDB); Fe^{II}(EDTA); 一氧化氮(NO); 络合协同; 过程分析

中图分类号: X701.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)02-0539-06

Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe^{II} (EDTA)

CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, JIANG Yi-feng, CHEN Jian-meng

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: In order to accelerate the NO removal efficiency, a novel and effective system was developed for the complete treatment of NO from flue gases. The system features NO absorption by Fe^{II}(EDTA) and biological denitrification in a rotating drum biofilter (RDB) so as to promote biological reduction. The experimental results show that a moderate amount of Fe^{II}(EDTA) was added to the nutrient solution to improve the mass transfer efficiency of NO from gas to liquid, with the concomitant formation of nitrosyl complex Fe^{II}(EDTA)-NO. Under the experimental conditions of rotational speed was at 0.5 r·min⁻¹, EBRT of 57.7 s, temperature was at 30℃, pH was 7-8, with the increasing concentration of Fe^{II}(EDTA) was from 0 mg·L⁻¹ to 500 mg·L⁻¹, the NO removal efficiency was improved from 61.1% to 97.6%, and the elimination capacity was from 16.2 g·(m³·h)⁻¹ to 26.7 g·(m³·h)⁻¹. In order to simulate the denitrifying process of waste gas containing NO by using RDB coupled with Fe^{II}(EDTA) absorption, a tie-in equation of NO removal and the Fe^{II}(EDTA) concentration added in RDB was established. The experimental NO removal efficiency change tendency agrees fairly with that predicted by the proposed equation.

Key words: rotating drum biofilter (RDB); Fe^{II}(EDTA); nitric oxide (NO); couple; process analysis

化石燃料燃烧等排放的大量氮氧化物(NO_x)是导致酸雨、光化学烟雾等一系列严重大气污染的主要污染物之一^[1]. 2005年,文献[2]公布的卫星遥感数据显示我国沿海发达地区大气污染中NO浓度从1996~2002年增加了42%. 文献[3]显示我国NO_x污染程度已相当严重,其排放总量已达到1 797.7万t. 随着NO_x污染问题的日趋严重和人们对环境质量要求的不断提高,有关废气脱硝技术的研究已迫在眉睫^[2, 4, 5].

由于NO_x主要成分NO(占95%^[6])在水中的溶解度很低(常温常压下亨利系数为5 222 Pa·m³·mol⁻¹),因此处理难度较大. 现有的选择性催化还原、选择性非催化还原、变压吸附吸收等传统

处理方法,具有处理费用高、存在二次污染物等缺点^[7],使得这些技术的实际应用受到限制. 生物法是近年来新兴的绿色处理技术,其可以通过生物氧化和还原(即硝化、反硝化)降解NO. 相比较化能自养型的硝化菌而言,异养型的反硝化菌具有较高的生长速率和比底物利用速率. Barnes等^[8]研究表明,在NO进口浓度670 mg·L⁻¹、EBRT 60 s条件下,NO的反硝化净化效率可达90%. 文献[9~11]也针对不同NO废气开展了反硝化净化研究,一致肯定了

收稿日期: 2011-04-02; 修订日期: 2011-06-21

基金项目: 浙江省工业锅炉炉窑烟气污染控制工程技术中心研究中心开放基金项目(2011B01); 国家自然科学基金项目(51008280); 浙江省环保科研计划项目(2010A10)

作者简介: 陈浚(1975~),男,博士,副教授,主要研究方向为大气污染控制及环境生物技术, E-mail: bec@zjut.edu.cn

该方法在 NO 生物净化上的应用前景. 在生物净化过程中, NO 首先从气相转移到液相或生物膜固相表面的液膜中, 然后在微生物代谢作用下被转化为无害的物质^[9, 10]. 但由于 NO 难溶于水, 因此气液传质成为降解过程中的限制步骤, 现有的工艺很难取得理想的降解效果. 为克服 NO 的气液传质受限, 文献^[11~14]采用 Fe^{II}(EDTA) 等络合剂来吸收 NO, 它能与 NO 快速形成液相络合物 Fe^{II}(EDTA)-NO, 从而使 NO 能快速从气相转入液相, 减小 NO 传质过程中的液膜阻力, 加快气液传质速率, 研究表明络合吸收剂对 NO 具有较好的吸收选择性, 并具有吸收容量大、吸收速率快等特点. 在反应器选择上, 污染负荷、养分和生物量等分布不均问题一直困扰着生物过滤、生物滴滤等传统生物处理系统的稳定运行^[15]. 为此, Kim 等^[16]首次提出了“气相生物转鼓过滤器”(rotating drum biofilter, RDB) 的概念, 滤料转动引发的间歇性气液接触可增强气态污染物的气液传质速率, 从而使 RDB 更适宜处理 NO 等水溶性较差的废气.

课题组前期已经从设备强化传质的角度考察了 RDB 降解 NO 的过程, 结果表明该工艺运行稳定且净化效果良好, 在进气浓度 $584 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, EBRT 86.4 s 时, NO 的去除效率最高可达到 85.2%^[17, 18]. 为进一步提高 RDB 降解 NO 的效率, 本研究开展了 RDB 络合协同 Fe^{II}(EDTA) 处理 NO 的研究, 并分析 NO 去除过程中的传质-反应的关联方程, 以期为该工艺的工程应用奠定基础.

1 材料与方法

1.1 试剂和仪器

EDTA(乙二胺四乙酸, 质量分数为 98.5%, 天津化学试剂研究所), FeSO₄·7H₂O(质量分数为 99.5%, 上海国药集团化学试剂有限公司), NO(质量分数为 99.9%, 杭州今工特种气体有限公司), 其他试剂均为分析纯.

气相中 NO 进出口浓度分别采用美国 Thermo 公司 42CHL 型 NO/NO₂ 分析仪(范围为 0~2 000 × 10⁻⁶)和 42C 型 NO/NO₂ 分析仪(范围为 0~100 × 10⁻⁶)在线测定. pH 采用 WTW Multi3301 多功能测定仪测定, 实验温度条件采用水浴温控自动控制.

1.2 实验装置

实验装置主体材料采用不锈钢, 全密封设计, 装置内径 300 mm、宽 240 mm、总容积 15 L. 填料采用多孔聚氨酯, 填料区外径 200 mm、内径 100 mm、厚

100 mm, 填料体积 2.4 L, 实验装置包括配气、气体成分分析、温控、RDB 等 4 个主要部分^[18]. 模拟废气由 NO 和 N₂ 混合而成, 在气体混合罐中充分混合后从 RDB 顶部进入外壳和转鼓之间的空腔中, 由转鼓上生物膜净化后, 从转鼓中间的空心轴排出, 随着鼓的转动, 转鼓上生物膜可以间歇地与营养液接触, 摄取营养组分和排出代谢产物, 另外, 通过计量泵添加微生物所需营养液并排放代谢产物, 营养液更换率 $0.2 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$.

1.3 实验方法

以 NO 模拟废气(NO 进气浓度保持在 $370 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右)和葡萄糖(C₆H₁₂O₆) 分别作为微生物生长所需的氮源和碳源. 实验过程中营养液添加量及温度、pH 等工艺参数的改变对系统会造成一定的冲击, 但经过 4~5 d 基本都能恢复. 本研究所用数据均为系统恢复稳定后实验所得. NO 进出气浓度取值为稳定后 3 min 内的平均值.

2 结果与讨论

2.1 络合吸收协同 RDB 还原 NO 对比实验

络合吸收协同生物法综合了络合吸收法和生物法的优势, 为证明该法的优势, 在相同的实验条件下, 对比了络合吸收法、直接生物法和络合吸收协同 RDB 去除 NO 的效率. 络合吸收法脱除 NO 实验在 RDB 内填料挂膜前进行, 在营养液中添加 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 Fe^{II}(EDTA) 作为吸收液, 络合协同生物法和直接生物法脱除 NO 实验均在 RDB 启动后稳态运行的条件下进行, 其中络合协同生物法考察时在营养液中加入 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 Fe^{II}(EDTA) 吸收液, 后者则不添加 Fe^{II}(EDTA) 溶液. 实验条件为温度 30℃、pH 6.5~7.5、转鼓转速 $0.5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、EBRT 57.7 s、进气 NO 浓度 $370 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 结果见图 1.

从图 1 中可以明显看出, 没有生物还原作用时, 单独的络合吸收由于 Fe^{II}(EDTA) 不断消耗, NO 去除效率一直下降, 经过 12 h 实验, 对 NO 的去除率从最初的 100% 下降到 25%, 在反应一段时间后, 络合液对 NO 吸收将趋于饱和, 所以反映出来的 NO 去除率快速下降. 当生物法直接去除 NO 时, 在稳态条件下 RDB 对 NO 的去除效率基本保持在 60%~75% 之间, 由于 NO 在水中的溶解度很低, 微生物对 NO 的吸附能力又很弱, 尽管微生物有比较强的还原能力, 但受到 NO 从气相向液相传质过程的限制, NO 的去除效率较低. 当络合吸收协同 RDB 处理 NO

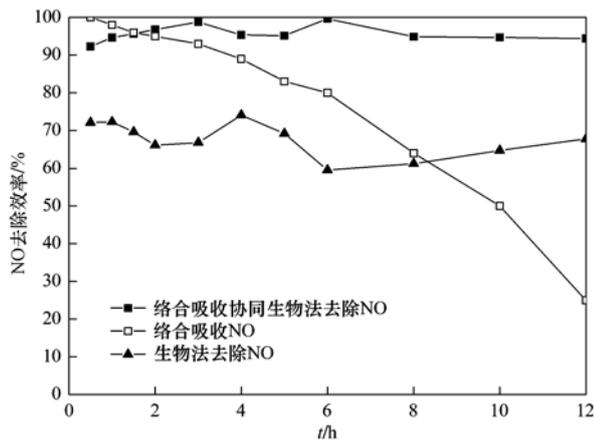


图1 3种NO去除工艺的对比实验

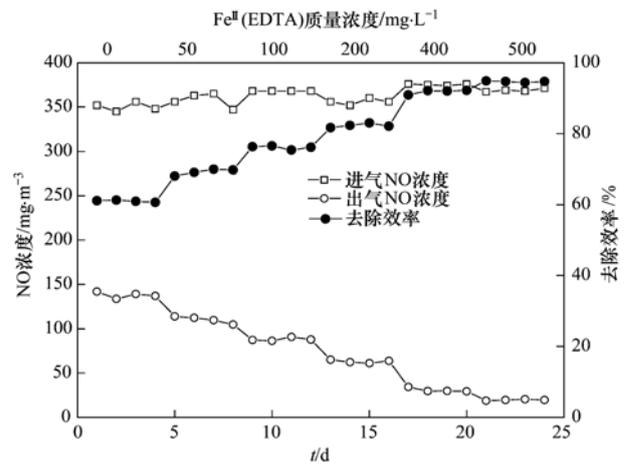
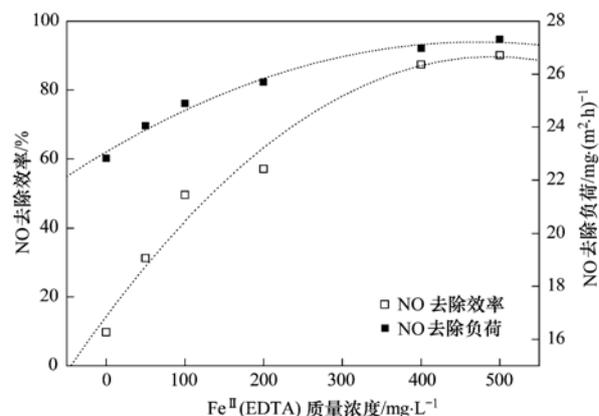
Fig. 1 Comparison of three different NO removal techniques

时, Fe^{II}(EDTA) 可以使 NO 快速从气相转入液相从而被微生物转化, 从 NO 的去除效率可以最高达到 95% 以上, 可以实现系统高效率下的连续运行。

2.2 Fe^{II}(EDTA) 质量浓度对 NO 去除效率的影响

在营养液量 2.0 L、转速 0.5 r·min⁻¹、进气流量 0.15 m³·h⁻¹、EBRT 57.7 s、温度 30℃、pH 值 7.0 ~ 8.0、葡萄糖为碳源的实验条件下, 考察了不同质量浓度 Fe^{II}(EDTA) 添加至营养液对 RDB 净化 NO 的去除效率和去除负荷的影响。从图 2 和图 3 中可以看出, 随着浓度的上升, NO 去除率和去除负荷不断上升。在最初的 1~4 d 里, 实验未添加任何络合剂, 生物转鼓对 NO 的平均去除效率为 60.1%。此后每隔 4 d 增加转鼓营养液中 Fe^{II}(EDTA) 的浓度。实验分别考察了 50、100、200、400、500 mg·L⁻¹ 这 5 种不同 Fe^{II}(EDTA) 质量浓度下 RDB 的 NO 去除效果。从图 2 可以看出, 每增加一次 Fe^{II}(EDTA) 质量浓度, NO 去除效率都会有一次跃升, 之后就趋于稳定。Fe^{II}(EDTA) 质量浓度从 0 mg·L⁻¹ 增加到 500 mg·L⁻¹, 去除率从 61.1% 上升到 97.6%, 极大地提高了去除效率。

但是, 单纯的去除率并不能说明 RDB 反硝化去除 NO 是否高效, 因此选择去除负荷这一参数来评价反应器的去除效能。由图 3 可知, NO 去除率和去除负荷随着 Fe^{II}(EDTA) 的添加浓度增加而上升, Fe^{II}(EDTA) 质量浓度从 0 增加到 500 mg·L⁻¹, 去除负荷从 16.2 g·(m³·h)⁻¹ 上升到 26.7 g·(m³·h)⁻¹, 超过了在稳定运行阶段时的最大值。根据文献 [13], 络合协同体系中微生物对 NO 的还原速率与 Fe^{II}(EDTA) 质量浓度成正比, 即在一定的实验条件下, 增加 Fe^{II}(EDTA) 质量浓度, 一方面可以增加

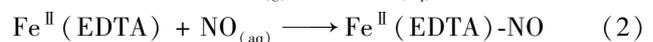
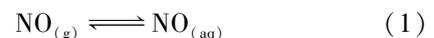
图2 Fe^{II}(EDTA) 添加浓度对 NO 去除率的影响Fig. 2 Effects of Fe^{II}(EDTA) concentration on NO removal efficiency图3 Fe^{II}(EDTA) 添加浓度对 NO 去除负荷的影响Fig. 3 Effects of Fe^{II}(EDTA) concentration on NO elimination capacity

NO 从气相向液相的传质过程, 从而使微生物可降解的 NO 量增大, 从而使 NO 的去除效率也相应增大; 另一方面 Fe^{II}(EDTA) 也可以作为电子供体参与 NO 的还原, 加快 NO 的去除速率^[19]。

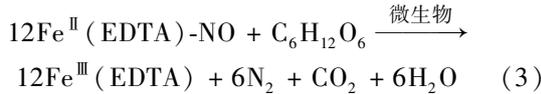
2.3 Fe^{II}(EDTA) 络合协同 RDB 增强对 NO 去除的动力学模型建立与验证

从上面的分析可知, 络合剂加入到 RDB 后可以加速 NO 从气相进入液相的过程。NO 主要通过与络合剂发生反应形成络合物 Fe^{II}(EDTA)-NO, 随后被微生物还原得以脱除。因此, 对络合吸收在去除 NO 的过程进行分析。

气相中 NO 通过溶解进入液相, 与 Fe^{II}(EDTA) 发生络合反应, 过程可用下列反应式来表示:



由于微生物的还原作用,络合吸收的 NO 转化为 N_2 :



在气液两相传质中,液相传质系数的表达式为:

$$\frac{1}{K_L} = \frac{H}{k_G} + \frac{1}{k_L} \quad (4)$$

式中, K_L 为气相总摩尔分率差为推动力的总传质系数, $\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; k_G 为气膜传质系数, $\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; k_L 为液膜传质系数, $\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; H 为 NO 在水中的亨利系数, Pa.

式(4)转化后为:

$$K_L = \frac{k_L}{1 + (Hk_L/k_G)} \quad (5)$$

文献[20, 21]研究发现,反应式(2)为双分子二级可逆反应,对 NO 和 $Fe^{II}(\text{EDTA})$ 均为一级, $Fe^{II}(\text{EDTA})\text{-NO}$ 的分解为一级反应.

反应式(2)的平衡常数可以表示为:

$$K_e = \frac{[Fe^{II}(\text{EDTA})\text{-NO}]_e}{[Fe^{II}(\text{EDTA})]_e \cdot c_L} \quad (6)$$

式中, K_e 为反应平衡常数; $[Fe^{II}(\text{EDTA})\text{-NO}]_e$ 、 $[Fe^{II}(\text{EDTA})]_e$ 为溶液中的 $Fe^{II}(\text{EDTA})\text{-NO}$ 和 $Fe^{II}(\text{EDTA})$ 的浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; c_L 为溶液中 NO 的浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

反应式(2)的平衡常数 K_e 为 $10^7 \text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$ 数量级^[22], K_e 值很大,且通过反应(3)的还原作用可以加速反应(2)向右进行,可以认为平衡时液相 NO 浓度为 0,则与之平衡的气相中 NO 组成也相应可取为 0.

在 RDB 中,NO 在 $Fe^{II}(\text{EDTA})$ 溶液中的吸收速率可以表示为:

$$N_{NO} = K_L a S (\Delta c)_{lm} \quad (7)$$

式中, N_{NO} 为 NO 吸收速率, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$; a 为填料比表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$; S 为填料横截面积, m^2 ; $(\Delta c)_{lm}$ 为 NO 在 RDB 进出口气相总摩尔分率差的对数平均值,即:

$$\begin{aligned} \Delta c_{lm} &= \frac{(\Delta c_0 - \Delta c_{out})}{\ln(\Delta c_0 / \Delta c_{out})} \\ &= \frac{(c_0 - c_0^*) - (c_{out} - c_{out}^*)}{\ln[(c_0 - c_0^*) / (c_{out} - c_{out}^*)]} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, c_0 、 c_{out} 为 NO 在 RDB 进出口气相中的摩尔分率; c_0^* 、 c_{out}^* 为与 NO 在进出口液相呈平衡的摩尔分率; (Δc_0) 、 (Δc_{out}) 为 NO 在 RDB 进出口气相中的总摩尔分率差, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

从以上分析得知,平衡常数 K 值很大,式(6)中 NO 在 RDB 进出口的液相呈平衡时的气相 c_0^* 和 c_{out}^* 为 0,因此,式(8)可以写成:

$$\Delta c_{lm} = \frac{(\Delta c_{in} - \Delta c_{out})}{\ln(\Delta c_{in} / \Delta c_{out})} = \frac{(c_{in} - c_{out})}{\ln[c_{in} / c_{out}]} \quad (9)$$

根据上面的分析,由于 NO 在水中的溶解度很小,使得液相传质阻力远大于气相传质阻力,且总传质系数小.因此,NO 的吸收为“液膜控制”的传质过程.文献[23]在喷雾塔中用 $Fe^{II}(\text{EDTA})$ 吸收 NO 的实验得出液膜传质阻力占了整个传质阻力的 99%,气膜传质阻力可以忽略.

气膜传质系数主要受气速、液速、温度等影响,而液膜传质系数在络合溶液中会受到 $Fe^{II}(\text{EDTA})$ 溶液的吸收可使液相的传质系数增大,这种影响可用增强因子 F 来表示,即^[24]:

$$K_L = F K_L \quad (10)$$

根据前面分析, $Fe^{II}(\text{EDTA})$ 络合吸收 NO 为拟一级反应.由于反应很快, pH 为 7 左右,温度在 25 ~ 80°C 之间,二级反应速率常数的数量级均为 $10^5 \text{m}^3 \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ ^[25],增强因子可以表示为:

$$F = [k_2 [Fe^{II}(\text{EDTA})] D_L]^{1/2} / k_L \quad (11)$$

式中, k_2 为溶解的 NO 与 $Fe^{II}(\text{EDTA})$ 的二级反应速率常数, $\text{m}^3 \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$; D_L 为 NO 在液相中的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

将式(10)、(11)代入式(5),得到总传质系数:

$$K_L = (k_2 [Fe^{II}(\text{EDTA})] D_L)^{1/2} / k_L H \quad (12)$$

NO 从气相到液相的减少速率可以表示为:

$$N_{NO} = K_L a S (\Delta c)_{lm} = \rho_M S V_G (c_0 - c_{out}) \quad (13)$$

式中, ρ_M 为模拟气体的摩尔浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为空床气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

将式(9)代入式(13),得到:

$$\ln(c_0 / c_{out}) = K_L \frac{a}{\rho_M V_G} \quad (14)$$

将式(12)、(13)和(14)联合,得到:

$$\begin{aligned} \ln(c_0 / c_{out}) &= -\ln(1 - \eta / 100) = \\ &= \frac{[k_2 [Fe^{II}(\text{EDTA})] D_L]^{1/2}}{k_L H} \cdot \frac{a}{\rho_M V_G} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, η 为 NO 的去除率.

在生物过滤器中, a 主要取决于填料的材质、类型和几何尺寸、营养液量、气速等.修正的有效传质面积的计算中,将液体湿润的填料表面作为有效传质面积,并提出如式(16)^[26]:

$$\frac{a}{a_1} = 1 - \exp\left[-1.45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma}\right)^{0.75} \left(\frac{L}{a_1 \mu_L}\right)^{0.1}\right]$$

$$\left[\left(\frac{L^2 a_1}{\rho_L^2 g} \right)^{-0.05} \left(\frac{L^2}{\rho_L \sigma a_1} \right)^{0.2} \right] \quad (16)$$

式中, a_1 为单位填料的总表面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$; σ 、 σ_c 为液体表面张力及填料材质的临界表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; L 为液体的空床质量流速, $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; ρ_L 为液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; μ_L 为液体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从式(15)可以分析出各种工艺参数对最终 NO 吸收率的影响。在本实验中, NO 去除率随着 Fe^{II} (EDTA) 质量浓度的 1/2 次方的增加而增加, 但直接随着有效传质面积或气流速率的减少而增加。

实验中填料外径为 200 mm, 因此, a 是以半径为 10 cm 的横截面积。转鼓体积为 15 L, t 为停留时间。

假设系数 K' , 使得:

$$\begin{aligned} N_{\text{GL}} &= \delta \cdot R = \delta \cdot k_1 \cdot c_B = K_L (c_G^* - c_L) \\ &= K' (c_L - c_B) \end{aligned}$$

式中, N_{GL} 为气相到液相的传质通量, $\text{mol} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; δ 为填料表层的微生物膜厚度, cm; R 为微生物利用速率, $\text{mol} \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{s})^{-1}$; c_B 为微生物相 NO 的浓度, $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$; c_G^* 为气液交界面 NO 的浓度, $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

可得到:

$$\ln \frac{c_G}{c_0} \times \frac{\varepsilon V}{a \delta (r - R_0)} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{\delta}{K_L} + \frac{\delta}{K'}} \quad (17)$$

式中, ε 为填料的孔隙率, %; V 为填料体积, cm^3 ; r 为径向半径, cm; R_0 为径向外径, cm。

$$\text{令: } y = \ln \frac{c_G}{c_0} \times \frac{\varepsilon_1 V_G}{a \delta (r - R_0)} \quad (18)$$

在本实验中, $\varepsilon = 93.9\%$, $a = 6 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$, $\delta = 0.01 \text{ cm}$, $R_0 = 10 \text{ cm}$, $r = 5 \text{ cm}$, $\mu_L = 5.49 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ [27], Fe^{II} (EDTA) 与 NO 的二级反应速率常数 $k_2 = 1.35 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$, 而 NO 在水中的溶解系数 $H = 1.91 \times 10^{-5} \text{ kmol} \cdot (\text{kPa} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ 。

实验控制在转速 $0.5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进气流量 $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、EBRT 57.7s、温度 30°C 、pH 7~8 条件下, Fe^{II} (EDTA) 质量浓度分别为 0、50、100、200、400、500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下的进气浓度 c_0 、出气浓度 c_G 和实际的去除效率 η , 共记录 180 组数据。

随机抽取每种 Fe^{II} (EDTA) 质量浓度下的数据 10 组, 在所取的进出气浓度下, 根据式(18)分别得到对应的 y 值, 再由式(12)得到相应的 $1/K$ 值, 取

同一 EDTA 浓度下的平均值记做 $(1/K)_{\text{平均}}$ 。拟合 $(1/K)_{\text{平均}}$ 与 EDTA 浓度 x 之间的关系, 如图 4。

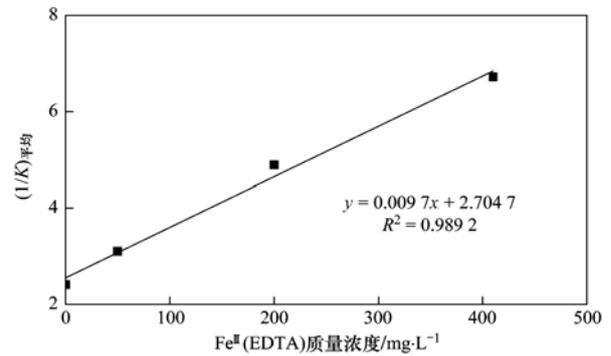


图 4 $(1/K)_{\text{平均}}$ 与 Fe^{II} (EDTA) 质量浓度之间的关系

Fig. 4 Relationship between $(1/K)_{\text{average}}$ and Fe^{II} EDTA concentration

拟合 $(1/K)_{\text{平均}}$ 与 EDTA 浓度 x 之间的关系, 得到:

$$(1/K)_{\text{平均}} = 0.0097x + 2.7047 \quad (19)$$

联立式(12)~(15), 得到去除效率 η 与 EDTA 浓度 x 之间关系:

$$\eta = 1 - \exp(-0.0037428x - 1.0436) \quad (20)$$

理论推导得到的去除效率 η 与实验测得的实际去除效率比较如图 5。

从图 5 可以看出, 各个散点很好地在曲线上波动, 而在同一 EDTA 浓度下, 曲线相对靠近散点密度较大的方向。这说明, 模型推导结果与实验数据很好地吻合。

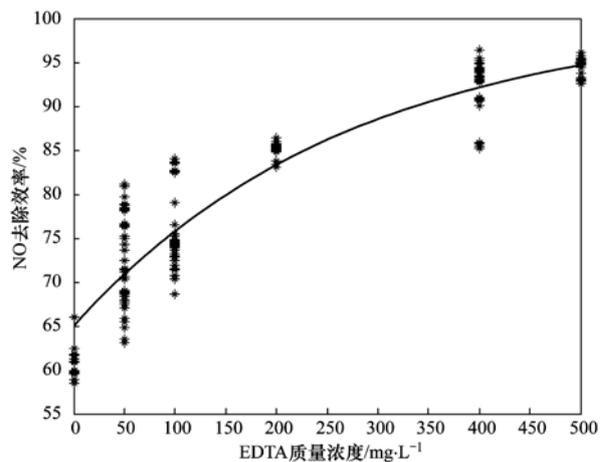


图 5 NO 去除效率与 EDTA 浓度关系图

Fig. 5 Relationship between EDTA concentration and NO removal efficiency

3 结论

(1) 实验表明 Fe^{II} (EDTA) 络合吸收剂不仅能加快 NO 的气液传质速率, 同时还能对 NO 的生物

反硝化提供电子供体,从而提高 NO 的去除效率.

(2) 在转速 $0.5 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、EBRT 57.7 s 、温度 30°C 、pH $7.0 \sim 8.0$ 的实验条件下, Fe^{II} (EDTA) 质量浓度从 0 增至 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, RDB 对 NO 的去除率可从 61.1% 上升到 97.6% .

(3) 拟合得到 NO 净化效率 η 与 Fe^{II} (EDTA) 质量浓度 x 关系方程, 该方程能较好地拟合实验结果.

参考文献:

- [1] Han K M, Song C H, Ahn H J, *et al.* Investigation of NO_x emissions and NO_x -related chemistry in East Asia using CMAQ-predicted and GOME-derived NO_2 columns [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(3): 1017-1036.
- [2] Richter A, Burrows J P, Nüß H, *et al.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. *Nature*, 2005, **437**(7055): 129-132.
- [3] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报 [R]. 北京, 2010.
- [4] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [5] Kennes C, Rene E R, Veiga M C. Bioprocesses for air pollution control [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2009, **84**(10): 1419-1436.
- [6] Fritz A, Pitchon V. The current state of research on automotive lean NO_x catalysis [J]. *Applied Catalysis B-Environmental*, 1997, **13**(1): 1-25.
- [7] Van der Maas P, Van den Bosch P, Klapwijk, B *et al.* NO_x removal from flue gas by an integrated physicochemical absorption and biological denitrification process [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **90**(4): 433-441.
- [8] Barnes J M, Apel W A, Barrett K B. Removal of nitrogen oxides from gas streams using biofiltration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1995, **41**(2-3): 315-326.
- [9] Bradford M, Grover R, Paul P. Environmental protection-controlling NO_x emissions Part 2 [J]. *Chemical Engineering Progress*, 2002, **98**(4): 38-42.
- [10] Bradford M, Grover R, Paul P. Environmental protection-controlling NO_x emissions part 1 [J]. *Chemical Engineering Progress*, 2002, **98**(3): 42-46.
- [11] Van der Maas P, Van den Brink P, Utomo S, *et al.* NO removal in continuous BioDe NO_x reactors: $\text{Fe}(\text{II})\text{EDTA}^{2-}$ regeneration, biomass growth, and EDTA degradation [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **94**(3): 575-584.
- [12] Van der Maas P, Loes H, Sander W, *et al.* Denitrification in aqueous FeEDTA solutions [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2004, **79**(8): 835-841.
- [13] Li W, Wu C Z, Shi Y. Metal chelate absorption coupled with microbial reduction for the removal of NO_x from flue gas [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2006, **81**(3): 306-311.
- [14] Li W, Wu C Z, Zhang S H, *et al.* Evaluation of microbial reduction of $\text{Fe}(\text{III})\text{EDTA}$ in a chemical absorption-biological reduction integrated NO_x removal system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(2): 639-644.
- [15] 陈建孟, 王家德, 庄利, 等. 生物滴滤池净化二氯甲烷废气的实验研究 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(4): 9-13.
- [16] Kim B, Zhu X, Suidan M. An innovative biofilter for treating VOCs in air emissions [A]. In: *Proceedings of the Air and Waste Management Association's 95th annual conference* [C]. Baltimore, USA. 2002.
- [17] Chen J, Jiang Y F, Chen J M, *et al.* Dynamic model for nitric oxide removal by a rotating drum biofilter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168**(2-3): 1047-1052.
- [18] Chen J, Jiang Y F, Sha H L, *et al.* Effect of key parameters on nitric oxide removal by an anaerobic rotating drum biofilter [J]. *Environmental Technology*, 2008, **29**(11): 1241-1247.
- [19] Van der Maas P, Peng S, Klapwijk B, *et al.* Enzymatic versus nonenzymatic conversions during the reduction of EDTA-chelated $\text{Fe}(\text{III})$ in BioDe NO_x reactors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(8): 2616-2623.
- [20] Shi Y, Littlejohn D, Kettler P B, *et al.* Removal of nitric oxide from flue gas with iron thiochelatase aqueous solution in a turbulent contact absorber [J]. *Environmental Progress*, 1996, **15**(3): 153-158.
- [21] Shi Y, Littlejohn D, Chang S G. Integrated tests for removal of nitric oxide with iron thiochelatase in wet flue gas desulfurization systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(11): 3371-3376.
- [22] Chang S C, Littlejohn D, Lynn S. Effects of metal chelates on wet flue gas scrubbing chemistry [J]. *Environmental Science & Technology*, 1983, **17**(11): 649-653.
- [23] Harriott P, Smith K, Benson L B. Simultaneous removal of NO and SO_2 in packed scrubbers or spray towers [J]. *Environmental Progress*, 1993, **12**(2): 110-113.
- [24] 谭天恩, 金一中, 骆有寿. 传质-反应过程 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [25] 化学工程手册编委会. 化学工程手册——气体吸收 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.
- [26] Yih S M, Lii C W. Absorption of NO and SO_2 in $\text{Fe}(\text{II})\text{-EDTA}$ solutions I. Absorption in a double stirred vessel [J]. *Chemical Engineering and Communication*, 1988, **73**(1): 43-53.
- [27] 荆国华. $\text{Fe}(\text{II})\text{EDTA}$ 络合吸收结合生物转化脱除 NO 研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i>	(337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i>	(342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i>	(346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i>	(352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i>	(359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i>	(370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i>	(379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i>	(385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i>	(393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui	(399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i>	(407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i>	(412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i>	(421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo	(448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i>	(454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i>	(459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi	(469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai	(476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i>	(481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming	(488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i>	(495)
Biosorption of Chromium (VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i>	(499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i>	(505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i>	(511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i>	(518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong	(525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi	(532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i>	(539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i>	(545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i>	(551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i>	(565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i>	(574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i>	(580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i>	(587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i>	(592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i>	(599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i>	(606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i>	(612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i>	(618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i>	(625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i>	(633)
Detection of <i>Proocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i>	(640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i>	(647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG YA-lei, <i>et al.</i>	(652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i>	(658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i>	(665)

《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)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

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@reces. 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@reces. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行