

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

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

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

光助芬顿反应催化降解气体中甲苯

郑思灿, 陈天虎*, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 以甲苯作为挥发性有机污染物(VOCs)的代表, 利用连续进气动态实验装置, 研究光助芬顿反应降解气体中甲苯的作用。考察了芬顿试剂溶液初始 pH、 H_2O_2 浓度、 Fe^{2+} 浓度以及甲苯初始浓度对降解甲苯的影响, 并利用在线质谱和色谱对产物进行了定性、定量分析。结果表明, 紫外光照加快了羟基自由基的生成, 显著提高了气体中甲苯的去除率; pH = 3.0、 H_2O_2 浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 Fe^{2+} 浓度为 $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 甲苯去除率最高; 当甲苯初始浓度为 $260 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 去除率能够达到 98%; 光助芬顿反应催化降解气体中甲苯实验未检测到 CO_2 之外的中间产物, CO_2 产率分析表明去除的甲苯全部转化为 CO_2 。

关键词: 光助芬顿反应; 甲苯; 羟基自由基; 挥发性有机污染物; 催化

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3590-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.006

Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction

ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu*, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, ZHU Cheng-zhu, CHEN Dong

(School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In this study, the performance of photo-Fenton reaction on decomposition of toluene was investigated by a flowing column using toluene as a representative of volatile organic pollutants (VOCs). The effects of initial pH, H_2O_2 concentration, Fe^{2+} concentration, initial concentration of toluene on degradation of toluene by photo-Fenton reaction were evaluated. Mass spectrometry and gas chromatograph were utilized to detect the products. The results showed that the introduction of UV greatly enhanced the Fenton reaction by improving the generation of hydroxyl radicals. When the initial concentration of toluene was $260 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, the toluene removal can achieve 98% under the following experimental conditions: initial pH = 3.0, H_2O_2 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, Fe^{2+} $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. Furthermore, no other intermediate except CO_2 was detected in the reaction that photocatalytic degradation of toluene in waste gas by the photo-Fenton, which indicates all the degraded toluene was mineralized into CO_2 .

Key words: photo-Fenton reaction; toluene; hydroxyl radicals; volatile organic pollutants; catalysis

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是一类化合物的统称,主要包括烷烃、烯烃和芳香烃以及各种含氧烃、卤代烃、氮烃、硫烃、低沸点多环芳烃等,是空气中普遍存在且组成复杂的一类有机污染物。VOCs的工业来源主要来自石油化工、制药生产、涂料生产、包装印刷、汽车喷漆等行业^[1~3]。由于VOCs种类较多,其物化性质表现出多样性,具有一定的潜在危害。一些活性强的VOCs可以在一定条件下与氮氧化物发生光化学反应,引起地表臭氧浓度的增加,形成光化学烟雾污染^[4],也可以与大气中的一些自由基反应,形成二次有机气溶胶。部分VOCs如氯代烃类则消耗平流层的臭氧,形成臭氧空洞。此外,最近的研究表明VOCs是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物之一,可对人体健康造成一定的危害^[5~8]。目前VOCs的控制技术主要为燃烧法、吸附法、吸收法、冷凝法、生物膜法、电晕法等^[9~11],但这些技术工艺复杂、成本较高,难以工程推广应用。

甲苯属于VOCs中典型的污染物之一,具有高

毒性、致癌性和环境持续性等特点,其催化降解已成为国内外研究的热点^[12~14]。紫外光/芬顿(UV/Fenton)技术是近年来在环保领域发展起来的一项高级氧化工艺,该技术通过产生强氧化性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)氧化降解污染物。其中亚铁离子作为催化剂,使 H_2O_2 分解的活化能大大降低,紫外光(UV)的引入,大大提高芬顿试剂的氧化效果。UV/Fenton技术在水处理领域的研究与应用已非常成熟^[15~17],但有关利用UV/Fenton技术处理VOCs的研究较少。Feitz等^[18]利用UV/Fenton技术降解二氯甲烷气体,发现紫外光的引入能够加强二氯甲烷的降解。Tokumura等^[19]利用352 nm紫外灯辅助芬顿反应催化降解甲苯,给出了反应动力学模型,分析了气、液相中甲苯和二氧化碳的动态变化。本实验

收稿日期: 2015-03-31; 修订日期: 2015-05-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC01B02); 国家自然科学基金项目(41372045, 21177034, 41202021)

作者简介: 郑思灿(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为纳米矿物环境工程材料, E-mail: zhsc0618@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chentianhu168@vip.sina.com

以高纯空气吹脱甲苯配制含甲苯的模拟气体,通过连续进气在双氧水溶液中鼓泡,在动态实验装置中研究光助芬顿反应降解气体中甲苯的作用. 本研究目的在于探讨 UV/Fenton 法降解挥发性有机污染物的可行性,考察芬顿试剂的 pH 值、 H_2O_2 浓度、 Fe^{2+} 浓度的影响和最佳条件,并结合色谱和质谱分析了可能的降解产物甲苯、苯、苯甲醛、苯甲酸、二氧化碳的动态变化过程. 在现有理论上可促进对 UV/Fenton 降解挥发性有机物的认识,以期对挥发性有机物降解提供一种新的途径.

1 材料与方法

1.1 实验流程

实验装置流程图如图 1 所示,把高纯空气从钢瓶中引出来分为两路,一路吹脱甲苯蒸气,另一路作为稀释气体,气体流量均由 D08 系列质量流量计(北京七星华创)控制,两路气体经混气瓶混合均匀后通入自制的光助芬顿催化反应器. 反应装置高 60 cm、直径 5 cm,用石英玻璃管制成,其周围布置 3 支 20 W 的 365 nm 紫外灯管(图 1).

1.2 实验步骤

打开空气阀开关,调节流量计读数来调节甲苯进气浓度,先通 1 h 的气体,使甲苯混合均匀浓度稳定. 向反应器中加入 200 mL 芬顿试剂,打开紫外灯启动反应. 进样针每隔 3 min 取一次样,用色谱测定尾气中甲苯浓度,连续监测 1 h.

1.3 实验条件

控制气体流量 $225 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、紫外灯强度为 60 W 不变,探究溶液初始 pH 值(2.0、3.0、4.0、5.0、6.0)、 H_2O_2 浓度(1、5、10、20、30 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、 Fe^{2+} 浓度(0.1、0.2、0.3、0.4、1

$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)和甲苯初始浓度(260、320、400、560、630 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)对甲苯去除率的影响. 每一个考察因素在同一水平下做两组平行实验以减小实验误差.

1.4 甲苯去除率

通过反应前后气相中甲苯浓度的变化计算获得,即:

$$\eta = [(c_{\text{in}} - c_{\text{out}})/c_{\text{in}}] \times 100\%$$

式中, η 为甲苯去除率 c_{in} 、 c_{out} 分别为入口、出口气体中甲苯浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.5 双氧水浓度检测

用吸量管移取 2.00 mL(约 2 g)双氧水试样,放入 250 mL 容量瓶中,称重 m ,用水稀释至刻度,摇匀. 用移液管吸取上述试液 25.00 mL,置于锥形瓶中,加 10 mL 20% H_2SO_4 ,用 $c(1/5 \text{ KMnO}_4) = 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KMnO_4 标准滴定溶液滴定至溶液呈浅粉色,保持 30 s 不褪为终点. 双氧水浓度计算如下:

$$\text{H}_2\text{O}_2 = \frac{c \cdot V \cdot 0.01701}{m} \times 100\%$$

式中, c 为浓度($0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、 V 为滴定所用的体积(mL)、 m 双氧水称取的质量(g).

1.6 甲苯和产物检测

反应前后甲苯浓度采用科晓 GC1690 气相色谱测定,色谱柱为毛细管柱 RTX-5 型(25 m $\times$ 0.25 μm),柱箱温度 90 $^{\circ}\text{C}$,进样口温度 150 $^{\circ}\text{C}$,检测器温度 150 $^{\circ}\text{C}$,载气为 N_2 ,进样量 80 μL . 尾气中 CO_2 浓度测定采用岛津 GC-2010plus 系统气相在线监测,其中色谱柱为填充柱 PQ 型(2 m $\times$ 2 mm),柱箱温度 70 $^{\circ}\text{C}$,进样口温度 150 $^{\circ}\text{C}$,检测器温度 200 $^{\circ}\text{C}$,TCD 电流 40 mA,载气为 Ar. 尾气成分通过在线质谱仪(Hiden QIC-20 型)监测,模拟气体直接通入到质谱仪,60 min 后待基线走稳,切换到光助芬顿反应系统启动反应.

2 结果与讨论

2.1 不同反应体系对照

光助芬顿反应过程中可能叠加了 Fenton 反应、紫外灯光解、双氧水氧化、光助双氧水氧化等. 为了探索光助芬顿反应催化降解甲苯气体的作用效果,本研究首先进行了上述不同反应体系对照实验. 分别考察了 UV、 H_2O_2 、UV + H_2O_2 、UV + Fe^{2+} 、Fenton、UV + Fenton 这 6 情况下甲苯去除率随反应时间延长的变化情况.

上述 6 种情况下,甲苯去除率变化情况如图 2 所示. 从中可以看出,在只有 UV 或只有 H_2O_2 的反

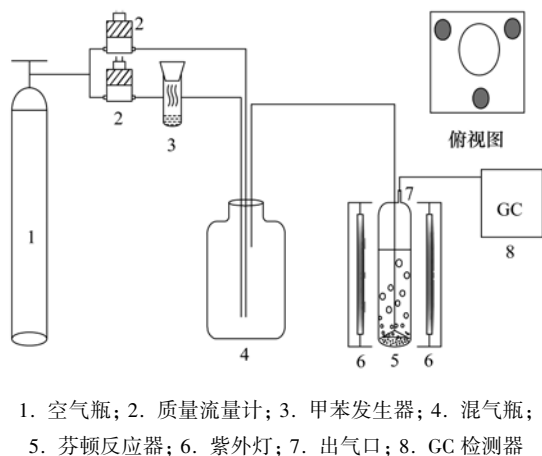
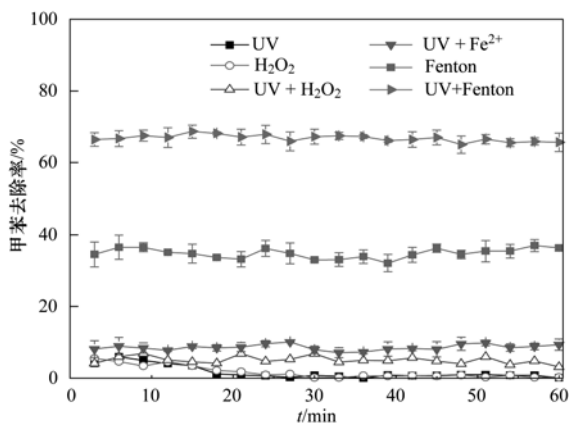


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic of experimental device

应体系中,反应的起始阶段(20 min)甲苯去除率仅为5%左右,但20 min后甲苯去除率接近为零. 前20 min 甲苯的去除归结为反应系统中材料体系和液相体系对甲苯气体的吸附和吸收作用,表明在只有UV 或只有 H_2O_2 的反应体系下甲苯并没有发生降解,同时也表明本文的实验系统对甲苯的吸附、吸收容量很小,对后期实验干扰小. 在 $\text{UV} + \text{H}_2\text{O}_2$ 的反应体系甲苯去除率稳定在5%左右,表明在该反应体系中甲苯有少量降解. 在 $\text{UV} + \text{Fe}^{2+}$ 反应体系中甲苯去除率稳定在10%左右,其去除机制归结为:铁离子在UV照射下与水发生反应产生少量的羟基自由基^[21],如方程式(1)和(2)所示,从而使得少量的甲苯被催化降解. 实验结果表明以上这4种反应体系对甲苯去除率的提高贡献很小甚至没有贡献. 另一方面,单纯的Fenton反应体系中甲苯去除率稳定在35%左右,其作用机制主要归功于芬顿试剂反应生成了大量 $\cdot\text{OH}$,从而增强了甲苯的催化降解过程,提高了甲苯去除率. 而 $\text{UV} + \text{Fenton}$ 反应体系中甲苯去除率有大幅度提升,接近68%,不难推断,光协同Fenton试剂加快了 $\cdot\text{OH}$ 的形成,从而提高了甲苯去除率.

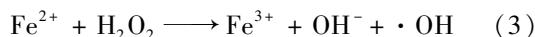
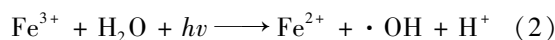
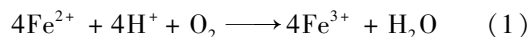
总的来说,UV的存在加快了反应体系中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 转换[方程式(2)和(3)],提高了 $\cdot\text{OH}$ 的产生速率,从而增加了甲苯的去除率. 所以,光助芬顿反应催化降解气体甲苯具有明显的效果,为了研究该反应体系在不同条件下动态反应系统中对降解气体甲苯的作用效果,考察了溶液初始pH值、 H_2O_2 浓度、 Fe^{2+} 浓度和甲苯初始浓度对甲苯去除率的影响,并探究了甲苯降解的作用过程.



甲苯浓度 $400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 气体流量 $225 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,
紫外灯功率 60 W , 初始 pH 值 3.0 , H_2O_2 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,
 Fe^{2+} $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

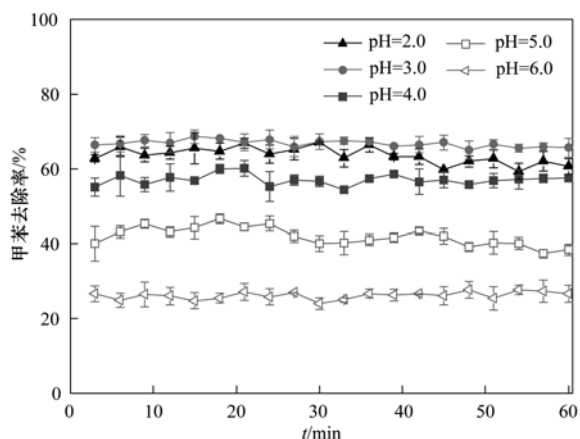
图2 不同反应体系实验对照

Fig. 2 Control experiments of different reaction systems



2.2 pH 的影响

实验前利用5%稀 H_2SO_4 调节芬顿试剂 pH 分别为2、3、4、5、6,得出pH值对光助芬顿反应降解气体甲苯的实验结果(图3). 从图3中可以看出 $\text{UV} + \text{Fenton}$ 反应体系对降解气体甲苯有较宽的pH适宜窗口,在pH为2.0~4.0的范围内,甲苯去除率相对稳定保持在55%~65%,明显高于pH为5和6的反应体系. 当pH为3.0时,甲苯去除率最高,达到68%左右. 当 $\text{pH} < 3.0$ 时,溶液中 H^+ 浓度高,不利于反应方程(2)的发生, Fe^{3+} 不能顺利地还原为 Fe^{2+} ,阻碍了催化反应的进行. 当溶液pH值增高时,溶液中 OH^- 浓度增加,一方面使反应(3)受阻,抑制了 $\cdot\text{OH}$ 的产生,另一方面 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 形成铁氧化物沉淀,减慢了Fenton反应的速率^[20,21],所以图中当pH为5和6的时候,甲苯去除率有大幅下降,只有26%左右. 因此最佳初始pH值应控制在3.0左右.



甲苯浓度 $400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 气体流量 $225 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,
紫外灯功率 60 W , H_2O_2 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,
 Fe^{2+} $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

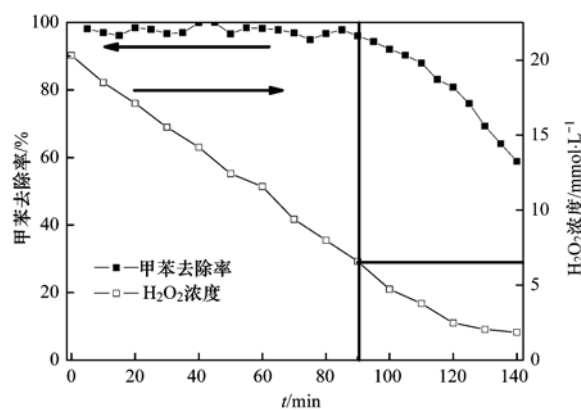
图3 不同pH对甲苯净化效率的影响

Fig. 3 Effect of different pH on toluene removal efficiency

2.3 双氧水浓度的影响

H_2O_2 是反应体系中 $\cdot\text{OH}$ 的来源,因此 H_2O_2 浓度的高低影响 $\cdot\text{OH}$ 产生量的多少,图4为液体中 H_2O_2 浓度随时间的变化,以及对应的甲苯去除率的变化. 可以看出 H_2O_2 浓度随时间延长呈线性减少,当 H_2O_2 浓度 $< 6.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,甲苯去除率开始降低. 由此可以看出 H_2O_2 浓度是制约甲苯降解的重要因素. 通过改变 H_2O_2 浓度,设置不同的 H_2O_2

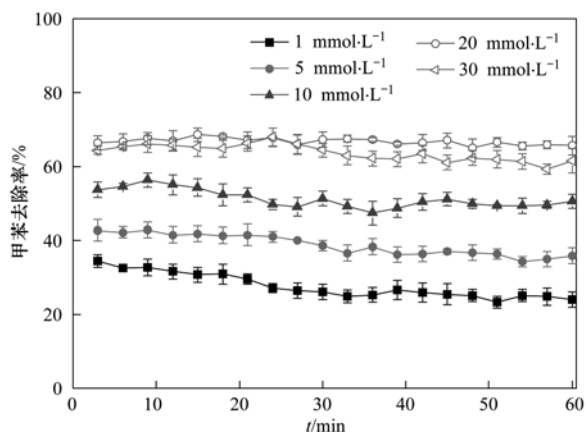
初始浓度为 1、5、10、20、30 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 考察 H_2O_2 浓度对紫外光助芬顿反应降解气体甲苯的影响, 结果见图 5。从中可见, 当 H_2O_2 浓度 $< 20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 甲苯去除率随着 H_2O_2 浓度升高而增加并在实验时间内保持相对稳定的催化降解效果, 但当 H_2O_2 浓度达到 $30 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 甲苯去除率略有降低。分析认为 H_2O_2 浓度的升高增加了 $\cdot\text{OH}$ 的产生, 促进了气体甲苯的催化降解, 因此增加了甲苯去除率; 但 H_2O_2 浓度过高, 产生过量的 $\cdot\text{OH}$ 在没有来得及与有机物反应之前就互相碰撞结合生成了 H_2O_2 , 即发生了自由基自清除作用, 降低了有效的 $\cdot\text{OH}$ 量, 从而降低了甲苯去除率^[22]。所以在实际应用过程中应适当控制双氧水浓度不宜过高, 此实验系统中的最佳 H_2O_2 浓度为 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。



甲苯浓度 $400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 气体流量 $225 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,
紫外灯功率 60 W, 初始 pH 值 3.0, $\text{Fe}^{2+} 0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

图 4 液体中双氧水浓度和甲苯去除率的变化

Fig. 4 Changes in concentration of hydrogen peroxide in liquid and toluene removal efficiency



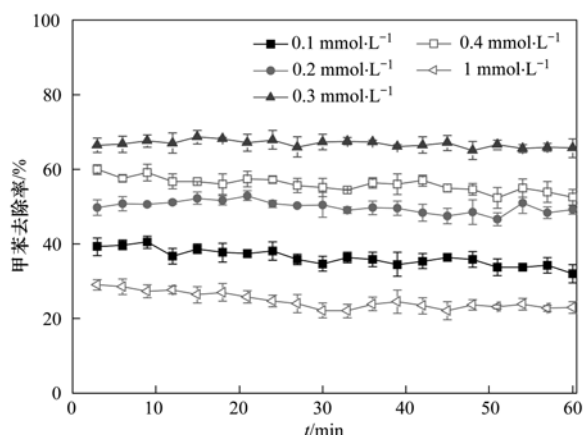
甲苯浓度 $400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 气体流量 $225 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,
紫外灯功率 60 W, 初始 pH 值 3.0, $\text{Fe}^{2+} 0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

图 5 双氧水浓度对甲苯净化效率的影响

Fig. 5 Effect of hydrogen peroxide concentration on toluene removal efficiency

2.4 Fe^{2+} 浓度的影响

通过调节铁盐浓度为 0.1、0.2、0.3、0.4、1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 以考察 Fe^{2+} 浓度对紫外光助芬顿反应降解气体甲苯的影响, 结果见图 6。从中可见, 固定双氧水浓度, Fe^{2+} 浓度在 $0.1 \sim 0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 甲苯去除率随着 Fe^{2+} 浓度的升高从 35% 左右增加到 68%, 但随着 Fe^{2+} 浓度的继续增加到 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 甲苯去除率又降低到 25% 左右。 Fe^{2+} 是催化产生 $\cdot\text{OH}$ 的必要条件, 一定范围内增加 Fe^{2+} 的浓度会促进 H_2O_2 的分解, 产生更多的 $\cdot\text{OH}$, 增强 Fenton 反应, 从而提高了甲苯去除率。从图 5 看出, 这被理解为溶液中过量的 Fe^{2+} 会增加 $\cdot\text{OH}$ 的生成, 过量的 $\cdot\text{OH}$ 不能完全利用, 会与 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 反应形成铁离子的化合物, 而不是和有机物反应, 从而降低甲苯的去除率。



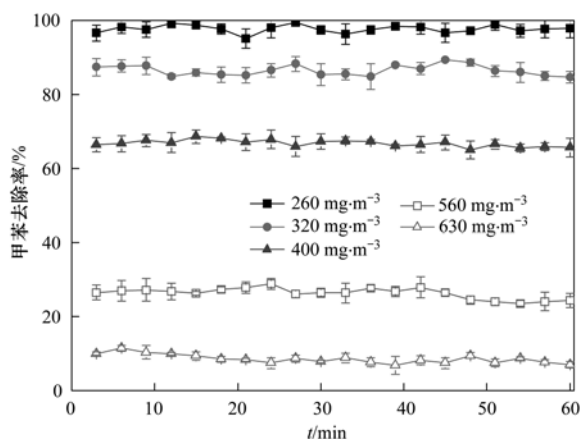
甲苯浓度 $400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 气体流量 $225 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,
紫外灯功率 60 W, 初始 pH 值 3.0, $\text{H}_2\text{O}_2 20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

图 6 Fe^{2+} 浓度对甲苯净化效率的影响

Fig. 6 Effect of Fe^{2+} concentration on toluene removal efficiency

2.5 不同初始甲苯浓度的影响

通过改变气体苯浓度为 260、320、400、560、630 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 考察了不同甲苯初始浓度对降解率的影响, 结果见图 7。从中可见, 紫外光助芬顿反应对甲苯的催化降解效率随着甲苯浓度的升高而明显降低。当甲苯浓度从 $260 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 $630 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 相应的去除率从 99% 降到 10% 左右。但甲苯初始浓度在 $320 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下时, 尾气中的甲苯浓度仍然低于国家规定排放标准 $60 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 能够达到排放要求。从反应过程来看, 显然, 有限的 $\cdot\text{OH}$ 量能氧化的气体甲苯也是有限的, 所以固定 $\cdot\text{OH}$ 量, 增加甲苯浓度必然会降低甲苯与 $\cdot\text{OH}$ 的碰撞、反应几率, 降低了系统的催化降解气体甲苯效果, 从而降低了甲苯去除率。



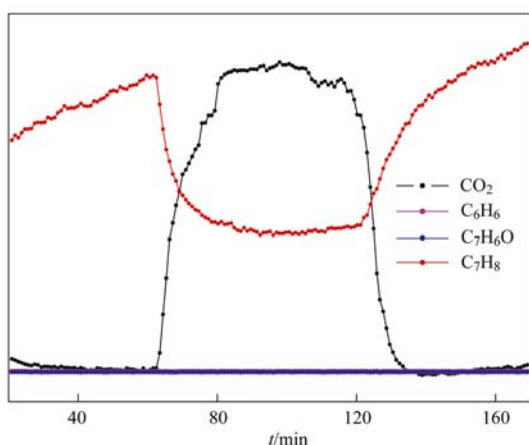
气体流量 $225 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 紫外灯功率 60 W ,
初始 pH 值 3.0 , H_2O_2 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, Fe^{2+} $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

图 7 不同初始甲苯浓度对净化效率的影响

Fig. 7 Effect of different initial concentration
of toluene on purification efficiency

2.6 矿化程度分析

鉴于之前的大多数研究者发现光降解中间产物多为苯和苯甲醛^[23,24], 本实验利用小型质谱仪在线监测光助芬顿反应降解甲苯之后的尾气成分, 包括甲苯、苯、苯甲醛和 CO_2 的信号强度变化(图 8). 结果发现随着 60 min 开始启动反应, 甲苯信号强度迅速下降, CO_2 信号强度迅速升高, 反应 1 h 后, 结束反应, 发现甲苯信号强度又迅速回升, CO_2 信号强度也迅速下降, 最终 CO_2 和甲苯都恢复到反应前的信号强度, 而整个反应期间, 苯和苯甲醛的信号强度没有任何变化. 这表明模拟气体中的甲苯经过光助



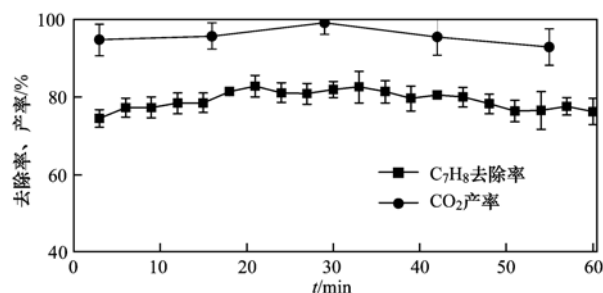
甲苯浓度 $365 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 气体流量 $225 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,
紫外灯功率 60 W , 初始 pH 值 3.0 , H_2O_2 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,
 Fe^{2+} $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

图 8 质谱在线监测尾气组分变化

Fig. 8 Mass spectrometry online monitoring
exhaust component changes

芬顿反应催化降解氧化为 CO_2 , 并没有发现苯和苯甲醛.

在上述实验条件下, 实验过程中同时采集尾气利用气相色谱对 CO_2 和甲苯定量分析, 结果表明甲苯平均去除率在 78% 左右(图 9); 通过 CO_2 产率分析可看出降解掉的甲苯几乎全都被矿化成 CO_2 (CO_2 产率 $= c_0/c_i$, 式中, c_0 实际检测得到的 CO_2 浓度, c_i 为降解掉的甲苯理论上全部转换成的 CO_2 浓度), 这也与质谱监测的结果相符.



甲苯浓度 $365 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 气体流量 $225 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,
紫外灯功率 60 W , 初始 pH 值 3.0 , H_2O_2 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,
 Fe^{2+} $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

图 9 光助芬顿反应催化降解气体中甲苯的 CO_2 产率

Fig. 9 Production rate of CO_2 by Photo-Fenton reaction
catalytic degradation of toluene in gas

3 结论

通过 UV/Fenton 法动态降解甲苯废气实验表明, 紫外光引入大大增强了甲苯的降解率, 甲苯去除率随着 H_2O_2 浓度、 Fe^{2+} 浓度的升高呈现出先升高后下降的趋势, 在 H_2O_2 浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 Fe^{2+} 浓度为 $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、反应初始 $\text{pH} = 3.0$ 的实验条件下, 甲苯具有更好的去除率, 甲苯初始浓度不高于 $320 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 去除率达到 88% , 尾气甲苯浓度达到国家排放标准. 结合原位在线质谱分析和气相色谱对尾气分析, 去除的甲苯全部转化为 CO_2 . 表明 UV/Fenton 法降解甲苯废气具有较大的应用潜力.

参考文献:

- [1] 王海林, 张国宁, 聂磊, 等. 我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3462-3468.
- [2] Li W B, Wang J X, Gong H. Catalytic combustion of VOCs on non-noble metal catalysts [J]. Catalysis Today, 2009, **148**(1-2): 81-87.
- [3] 王铁宇, 李奇锋, 吕永龙. 我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4756-4763.
- [4] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, et al. Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production

- [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 512-518.
- [5] Kimata H. Exposure to road traffic enhances allergic skin wheal responses and increases plasma neuropeptides and neuropeptides in patients with atopic eczema/dermatitis syndrome [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2004, **207**(1): 45-49.
- [6] Sekizawa J, Ohtawa H, Yamamoto H, *et al.* Evaluation of human health risks from exposures to four air pollutants in the indoor and the outdoor environments in Tokushima, and communication of the outcomes to the local people[J]. *Journal of Risk Research*, 2007, **10**(6): 841-851.
- [7] Jensen L K, Larsen A, Mølhav L, *et al.* Health evaluation of volatile organic compound (VOC) emissions from wood and wood-based materials[J]. *Archives of Environmental Health: An International*, 2001, **56**(5): 419-432.
- [8] Huss-Marp J, Eberlein-Koenig B, Darsow U, *et al.* Short term exposure to volatile organic compounds enhances atopy patch test reaction[J]. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2004, **113**(2): S56-S57.
- [9] 黎维彬, 龚浩. 催化燃烧法去除 VOCs 污染物的最新进展[J]. *物理化学学报*, 2010, **26**(4): 885-894.
- [10] Van Durme J, Dewulf J, Sysmans W, *et al.* Abatement and degradation pathways of toluene in indoor air by positive corona discharge[J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(10): 1821-1829.
- [11] Wang J L, Zhong J B, Gong M C, *et al.* Remove cooking fume using catalytic combustion over Pt/La-Al₂O₃ [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(6): 644-646.
- [12] 宋磊, 陈天虎, 李云霞, 等. 凹凸棒石负载的 Cu-Mn-Ce 催化剂上甲苯氧化反应性能[J]. *催化学报*, 2011, **32**(4): 652-656.
- [13] 陈天虎, 施培超, 张先龙, 等. Ni/凹凸棒石催化裂解生物质焦油组分甲苯[J]. *太阳能学报*, 2011, **32**(10): 1506-1510.
- [14] 殷永泉, 郑艳, 苏元成, 等. 气相甲苯光催化降解反应动力学及机理[J]. *过程工程学报*, 2009, **9**(3): 536-540.
- [15] Tokumura M, Morito R, Shimizu A, *et al.* Innovative water treatment system coupled with energy production using photo-Fenton reaction [J]. *Water Science & Technology*, 2009, **60**(10): 2589-2597.
- [16] 王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 等. 光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 208-213.
- [17] Huang Y H, Su H T, Lin L W. Removal of citrate and hypophosphite binary components using Fenton, photo-Fenton and electro-Fenton processes [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(1): 35-40.
- [18] Feitz A J, Guan J, Chattopadhyay G, *et al.* Photo-Fenton degradation of dichloromethane for gas phase treatment [J]. *Chemosphere*, 2002, **48**(4): 401-406.
- [19] Tokumura M, Shibusawa M, Kawase Y. Dynamic simulation of degradation of toluene in waste gas by the photo-Fenton reaction in a bubble column [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, **100**: 212-224.
- [20] Li C J, Ma J, Shen J M, *et al.* Removal of phosphate from secondary effluent with Fe²⁺ enhanced by H₂O₂ at nature pH/neutral pH[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(2-3): 891-896.
- [21] Martí nez-Huitle C A, Brillas E. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009, **87**(3-4): 105-145.
- [22] Gernjak W, Fuerhacker M, Fernández-Ibañez P, *et al.* Solar photo-Fenton treatment-process parameters and process control [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2006, **64**(1-2): 121-130.
- [23] 武江波, 曾祥英, 李桂英, 等. 紫外光照射下甲苯光化学降解的初步研究[J]. *地球化学*, 2007, **36**(3): 328-334.
- [24] 张春洋, 马永亮. UV_{254 nm + 185 nm}光照降解气态甲苯的实验研究[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(6): 898-903.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 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