

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究

王现丽¹, 王世峰², 吴俊峰¹, 濮文虹³, 杨昌柱^{3*}, 张敬东⁴, 杨家宽³

(1. 河南城建学院市政与环境工程学院, 平顶山 467036; 2. 平顶山市综合利用环境保护研究所, 平顶山 467036; 3. 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074; 4. 华中科技大学化学与化工学院, 武汉 430074)

摘要: 以光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液, 试验结果表明, 利用光电 Fenton 技术能快速有效地去除废水中的污染物。在最佳试验条件下, 即初始 pH 为 3.0, H_2O_2 投加量 $65.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, FeSO_4 投加量 $6.53 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ [$n(\text{Fe}^{2+}) : n(\text{H}_2\text{O}_2) = 1:10$], 外加电压为 7.5 V 时, 经光电 Fenton 技术处理 20 min 后污泥脱水液的 COD 去除率可以达到 59.0%。同时 TOC、TN、 NH_4^+-N 及 TP 的去除率也分别达到了 49.3%、20.6%、73.6% 和 96.5%。该项研究为光电 Fenton 技术在废水处理中的应用提供了参考。

关键词: 污泥脱水液; 光电 Fenton 技术; COD 去除; 深度脱水; 影响因素

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0208-06

Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process

WANG Xian-li¹, WANG Shi-feng², WU Jun-feng¹, PU Wen-hong³, YANG Chang-zhu³, ZHANG Jing-dong⁴, YANG Jia-kuan³

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China; 2. Comprehensive Utilization and Environment Protection Institute of Pingdingshan, Pingdingshan 467036, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Photoelectro-Fenton process was developed to treat the sludge liquor produced in deep dehydration. The results indicated that pollutants could be removed efficiently from the sludge liquor. Under the optimum condition of pH 3.0, H_2O_2 concentration of $65.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, FeSO_4 concentration of $6.53 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ [$n(\text{Fe}^{2+}) : n(\text{H}_2\text{O}_2) = 1:10$], 7.5V, the COD removal efficiency reached 59.0% after 20 min treatment. The removal efficiency of TOC, TN, NH_4^+-N and TP could reach 49.3%, 20.6%, 73.6% and 96.5%, respectively. This study would provide the reference for photoelectro-Fenton process in real wastewater treatment.

Key words: sludge liquor; photoelectro-Fenton process; COD removal; deep dehydration; influencing factor

在污泥处理过程中, 为了满足后续处理及资源化利用的需要, 污泥首先要通过深度脱水进行减量化处理。为了提高污泥的脱水性能, 人们尝试使用不同的污泥调理剂对污泥进行深度脱水预处理, 例如粉煤灰^[1~3]、生石灰^[1,2,4,5]、混凝剂^[6~8]、Fenton^[9~11]、表面活性剂^[12~15]等。然而在此过程中产生的污泥深度脱水液含有大量的难降解有机物, 使得该类废水难以采用常规的生物法处理。而目前关于该类废水处理的研究报道很少。

Fenton 技术是目前在有机物降解方面的一个热点, 通过在传统 Fenton 过程中引入光和电的协同作用, 大大提高了该技术对污染物的去除效果。因而光电 Fenton 技术以其独特的优势被广泛应用于处理难降解有机污染物的研究。但目前关于该技术的研究是非常有限的, 主要集中在一些特定污染物的降解, 例如染料^[16~18]及其他有机化合物^[19~24]。被用于实际废水处理的研究很少, 例如 Altin^[25]利用

光电 Fenton 技术处理垃圾渗沥液。

本研究主要分析了光电 Fenton 技术对污泥深度脱水液的处理效果, 以期找到一种有效处理该类废水的方法。以 COD 去除率为考察指标, 研究了不同因素对光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液效果的影响, 同时考察了光电 Fenton 技术对污泥深度脱水液中 TOC、TN、 NH_4^+-N 、TP 等其他污染物的去除效果。

1 材料与方法

试验用污泥深度脱水液取自武汉某污水处理厂。该厂污水处理过程采用 A_2O 工艺, 主要处理对

收稿日期: 2013-02-26; 修订日期: 2013-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078162); 武汉市重点科技攻关项目(201260723226)

作者简介: 王现丽(1980~), 女, 硕士, 主要研究方向为污水处理及资源化利用, E-mail: wj18047@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yangese2009@163.com

象为城市生活污水,污泥含水率为 99%。该脱水液 COD 为 $(821 \pm 35) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 13.6, 电导率 $(13.45 \pm 0.5) \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。该脱水液在使用前进行过滤处理。试验中, H_2O_2 (分析纯), FeSO_4 (分析纯), 浓 H_2SO_4 (分析纯) 以及 NaOH (分析纯) 均为国药集团化学试剂有限公司(中国上海)。试验用水为自制蒸馏水。

光电 Fenton 降解污泥脱水液试验装置见图 1。试验在烧杯中进行(直径 100 mm, 高 120 mm)。石墨电极(37 mm × 30 mm × 3 mm)和一个自制钼网电极(15 mm × 40 mm)分别作为阴极和阳极。外加电压由一个可调直流稳压电源提供。由气体转子流量计控制曝气量。15 W 的紫外灯作为紫外光源,其最大波长 254 nm。用水浴保持试验过程中恒定的反应温度。利用磁力搅拌器保持溶液充分混合。首先在溶液中加入一定量的 FeSO_4 , 充分搅拌后,加入一定量 30% 的 H_2O_2 。 Fe^{2+} 和 H_2O_2 的浓度比用 $n(\text{Fe}^{2+}) : n(\text{H}_2\text{O}_2)$ 表示。试验中以不同的时间间隔取样,然后迅速滴加少量高浓度的 NaOH 溶液将水样的 pH 调至 13.0 左右,同时将水样放在 50℃ 水浴中 1 h, 加速 H_2O_2 的分解,停止氧化反应的进行,同时消除 H_2O_2 对 COD 测定的影响。后将水样离心后取上清液测定 COD。水样 COD 采用国标法进行测定^[26]。TOC、TN 等其他指标采用快测法。

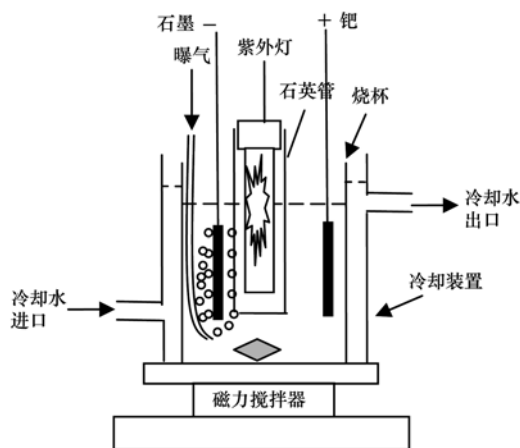


图 1 光电 Fenton 降解污泥脱水液试验装置示意

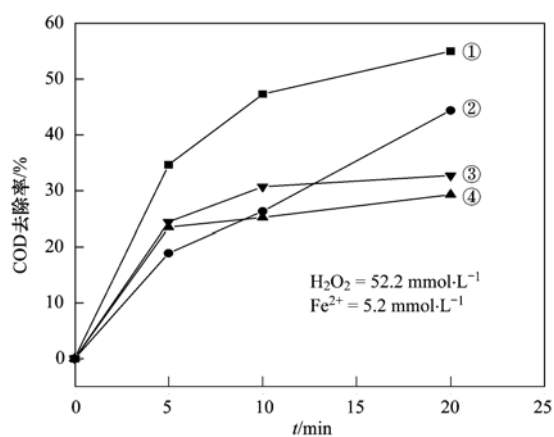
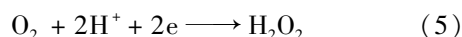
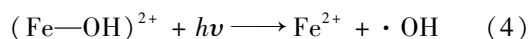
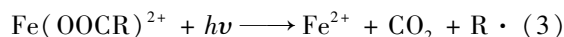
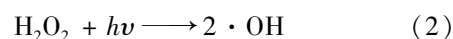
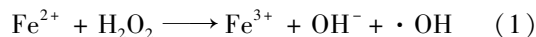
Fig. 1 Experimental setup for the treatment of sludge liquor with photoelectro-Fenton process

2 结果与讨论

2.1 不同处理过程比较

首先比较了不同处理过程,例如传统 Fenton 技术,UV/Fenton 技术、电 Fenton 技术以及光电 Fenton 技术等对污泥脱水液的处理效果。根据

Fenton 技术降解有机污染物原理,由 H_2O_2 产生的 $\cdot\text{OH}$ 在有机物降解中起主要作用[式(1)]。对于传统的 Fenton 过程,只获得较低的 COD 去除率。分析原因是由于在 Fenton 反应过程中产生 Fe^{3+} 和 OH^- ,形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀,仅少量的 Fe^{2+} 参与 Fenton 反应, $\cdot\text{OH}$ 产生量少,因此在降解 20 min 后仅得到一个较低的 COD 去除率。增加 UV 照射后,COD 去除率明显增加。可以解释为在 UV/Fenton 过程中,UV 可以加快 H_2O_2 的分解速率[式(2)],同时能促进 Fe^{2+} 的不断生成[式(3)、(4)],因而有更多的 $\cdot\text{OH}$ 产生。因此相对于传统的 Fenton 过程,UV/Fenton 对污泥脱水液 COD 去除率明显增高。同时,电 Fenton 技术对污泥脱水液的 COD 去除率也明显高于传统的 Fenton 过程。在电 Fenton 技术处理污泥脱水液过程中,在阴极可以原位产生 H_2O_2 [式(5)],同时 Fe^{3+} 可以在阴极得电子被还原成 Fe^{2+} ,这将加速 $\cdot\text{OH}$ 的产生,因而在电 Fenton 过程中,COD 去除率也明显高于传统的 Fenton 过程。对于光电 Fenton 过程,UV 和外加电压能同时加速 $\cdot\text{OH}$ 的产生,因此相对于传统的 Fenton 过程、UV/Fenton 过程以及电 Fenton 过程,光电 Fenton 过程可以获得最高的 COD 去除率(图 2)。



①光电 Fenton, UV, 外加电压 20.0 V, 曝气量 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; ② UV/Fenton; ③ 电 Fenton, 外加电压 20.0 V, 曝气量 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; ④ Fenton

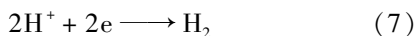
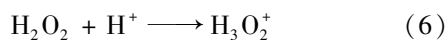
图 2 不同处理方法对 COD 的去除效果

Fig. 2 COD removal ratio curves for sludge liquor treatment with different processes

2.2 不同因素对处理效果的影响

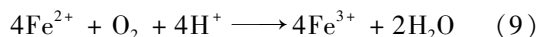
2.2.1 pH 值影响

图 3(a) 显示了在利用光电 Fenton 技术处理污泥脱水液时, 污泥脱水液初始 pH 值从 2.0 增大到 5.0 时 COD 去除率的变化. 污泥脱水液初始 pH 值由高浓度的 H_2SO_4 调节. 从中可以看出, 在反应时间为 20 min 时, pH 为 3.0 时可以达到一个较高的 COD 去除率. 在 pH 为 2.0 时, 只获得一个较低的 COD 去除率. 这可以被解释当 pH 较低时, 高浓度的 H^+ 阻碍了溶液中 $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ 的生成, 抑制了反应 (4) 的进行, 因而在反应过程中 Fe^{2+} 的产生受到了抑制. 同时在较低 pH 条件下, 由于 H_2O_2 与 H^+ 反应生成 H_3O_2^+ [式 (6)]^[27]. 这也将影响 $\cdot\text{OH}$ 的生成. 当增大初始 pH 后, 更多的 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 生成沉淀, 导致 $\cdot\text{OH}$ 的产生量及产生速率降低. COD 去除率也相应降低. 同时试验中发现, 试验停止后, 溶液的 pH 值稍微降低. 分析原因是由于在光电 Fenton 处理污泥脱水液过程中, 阳极反应以及 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 都会消耗 OH^- , 另外, 溶解氧在阴极得电子, H^+ 得电子反应 [式 (7)] 被抑制. 导致溶液 pH 值稍微降低. 根据图 3(a), 初始 pH 3.0 被选择为最佳 pH 值.



2.2.2 曝气速率的影响

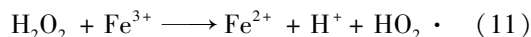
图 3(b) 显示了曝气速率对 COD 去除率的影响. 对于光电 Fenton 过程, 溶解氧可以从阴极得电子生成 H_2O_2 [式 (5)], 因此溶解氧浓度会影响反应过程中 H_2O_2 的产量. 在光电 Fenton 过程中, 溶解氧主要通过两种方式提供, 曝气以及阳极反应 [式 (8)]. 随着溶解氧浓度的升高, H_2O_2 的产量也会增加. 尽管增加曝气量可以增加溶解氧浓度, 但曝气同时也会加速 H_2O_2 的分解生成水, 而这对于利用 H_2O_2 产生 $\cdot\text{OH}$ 降解有机物是不利的. 另外当溶解氧浓度较高时, Fe^{2+} 易被氧化成 Fe^{3+} [式 (9)], 这也会影响 $\cdot\text{OH}$ 的产生, 进而影响废水处理效果. 由图 3(b) 可以看出, 曝气对光电 Fenton 处理污泥脱水液 COD 去除率影响较小, 因此在后续试验中停止曝气.



2.2.3 H_2O_2 投加量的影响

图 3(c) 显示了 H_2O_2 投加量对光电 Fenton 处理污泥脱水液 COD 去除率的影响. 在该部分试验中, 保

持 $n(\text{Fe}^{2+}): n(\text{H}_2\text{O}_2)$ 为 1:10. 随着 H_2O_2 投加量的增加, COD 去除率也随之增大. 主要是由于 H_2O_2 投加量的增加, 有更多的 $\cdot\text{OH}$ 产生. 但是过多的羟基自由基将和 H_2O_2 反应 [式 (10)]^[28], 同时 $\cdot\text{OH}$ 也会氧化 Fe^{2+} , 并且 Fe^{3+} 也会消耗 H_2O_2 [式 (11)]. 这些副反应都会降低 H_2O_2 的利用率. 所以当继续增加 H_2O_2 的投加量时, COD 去除率有所降低. 根据图 3(c), H_2O_2 的最佳投加量为 $65.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.



2.2.4 Fe^{2+} 浓度的影响

图 3(d) 显示了 Fe^{2+} 浓度对光电 Fenton 技术处理污泥脱水液过程中 COD 去除率的影响. 当溶液中没有 Fe^{2+} 存在时, 仅获得一个较低的 COD 去除率. 说明单独在 UV 作用下, H_2O_2 分解产生 $\cdot\text{OH}$ 的速率较低. 当投加 FeSO_4 后, COD 去除率有明显的提高. H_2O_2 在 Fe^{2+} 作用下, 快速产生 $\cdot\text{OH}$, 污泥脱水液中的有机物被快速地氧化分解, 因而 COD 去除率提高. 尽管提高 Fe^{2+} 浓度可以提高 COD 去除效果, 但 Fe^{2+} 同时也被 $\cdot\text{OH}$ 氧化. 另外, 大量产生的 $\cdot\text{OH}$ 将和 H_2O_2 反应消耗 H_2O_2 [式 (10)]. 同时, 由于 Fe^{2+} 浓度的增加, 溶液的透明度降低, UV 的促进作用受到影响, 反应 (1)、(3)、(4) 受到抑制. 再者, 随着 Fe^{2+} 浓度的增加也会形成二次污染问题. 根据图 3(d), Fe^{2+} 的最佳浓度为 $6.53 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2.5 外加电压的影响

在光电 Fenton 技术处理污泥脱水液过程中, 除过 H_2O_2 分解产生 $\cdot\text{OH}$ 氧化废水中的有机物, 同时电解作用以及电 Fenton 作用也有助于提高 COD 的去除率. 从图 3(e) 可以看出, 当外加电压由 5.0 V 增加到 7.5 V 时, COD 去除率逐渐提高. 这主要是由于电解作用以及电 Fenton 作用的加强, 同时有更多的 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} , 因而产生更多的 $\cdot\text{OH}$, COD 去除率逐渐提高. 然而, 当外加电压继续提高时, 副反应 (12)、(13) 的影响也逐渐明显, H_2O_2 逐渐被消耗, 影响 $\cdot\text{OH}$ 的产生. 另外, 随着外加电压的升高, 在阴极表面出现大量的黄色物质. 可能的原因是在阴极附近, 大量的 H^+ 被消耗, 导致阴极附近区域溶液 pH 值升高, 大量的 Fe^{3+} 以及 Fe^{2+} 形成沉淀, 这也将影响 Fenton 反应的进行, 影响反应中 $\cdot\text{OH}$ 的产生. 因而当外加电压由 7.5 V 上升到 10.0 V 时 COD 去除率反而降低. 但是当继续增加外加电压从 10.0 V 到 20.0 V 时, COD 去除率缓慢提高, 分析是因为此过程中电解作用的不断加强. 如图 3(e), 外

加电压为 7.5 V 时和外加电压为 20.0 V 时 COD 去除率变化不大,因此 7.5 V 被选定为最佳外加电压.

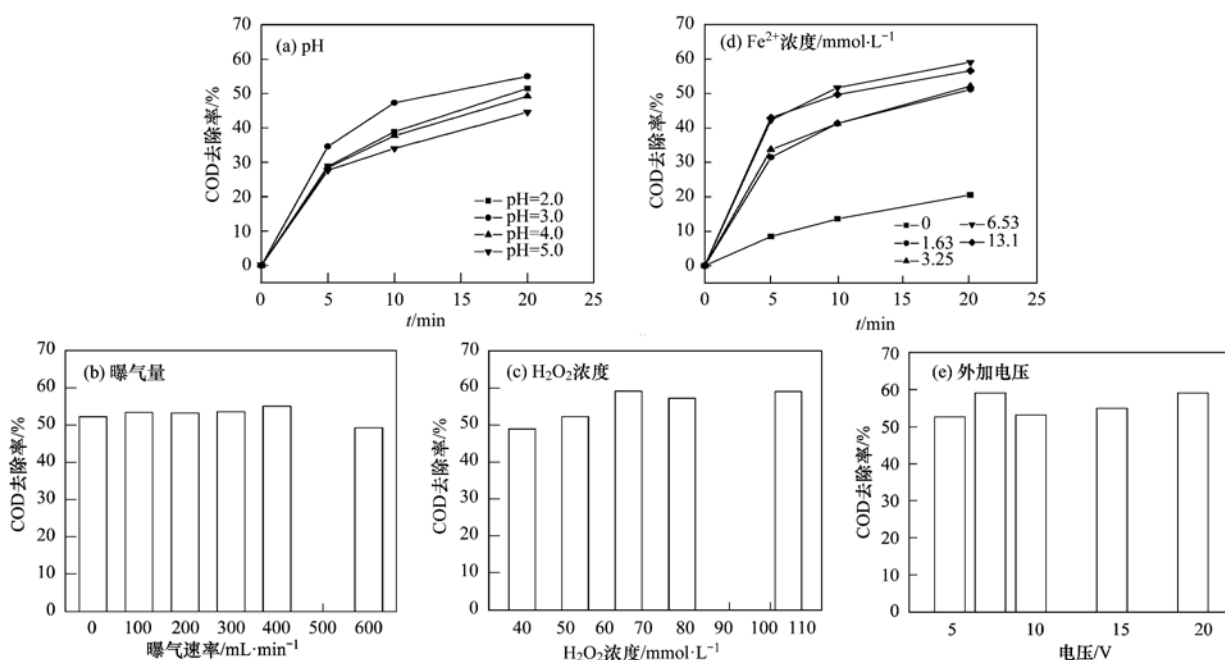
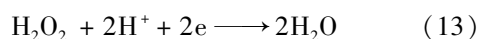
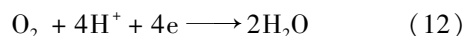


图3 pH 值、曝气量、H₂O₂ 浓度、Fe²⁺ 浓度、外加电压对 COD 去除率的影响

Fig. 3 Influences of pH, aeration rate, hydrogen peroxide concentration, ferrous ion concentration and applied potential on COD removal efficiency

2.3 不同H₂O₂投加次数对 COD 去除率的影响

研究了H₂O₂投加次数对 COD 去除率的影响,在 pH 3.0, H₂O₂ 投加量为 65.3 mmol·L⁻¹, Fe²⁺ 6.53 mmol·L⁻¹以及外加电压为 7.5 V 的条件下,比较了在 20 min 时间内,H₂O₂一次投加、两次投加以及分 4 次投加时对 COD 去除率的影响. 试验结果见图 4,可以看出在该试验条件下,H₂O₂投加次数对 COD 去除率没有影响.

2.4 污泥脱水液处理前后吸光度变化

对原污泥脱水液及利用光电 Fenton 技术处理污泥脱水液 20 min 后的水样进行了全波长扫描分析,如图 5. 原污泥脱水液在 200 ~ 300 nm 之间有强吸收,这主要是由于大分子有机物产生的吸收. 处理后的水样在 200 ~ 300 nm 之间的吸收明显减弱. 说明这些大分子物质大部分被降解.

2.5 最佳条件下对 TOC、TN、NH₄⁺-N、TP 的去除效果分析

在最佳试验条件下,即在初始 pH 为 3.0, H₂O₂ 投加量 65.3 mmol·L⁻¹, FeSO₄ 投加量 6.53 mmol·L⁻¹ [n(Fe²⁺): n(H₂O₂) = 1: 10], 外加电压为 7.5 V 时,经光电 Fenton 技术处理 20 min 后,考

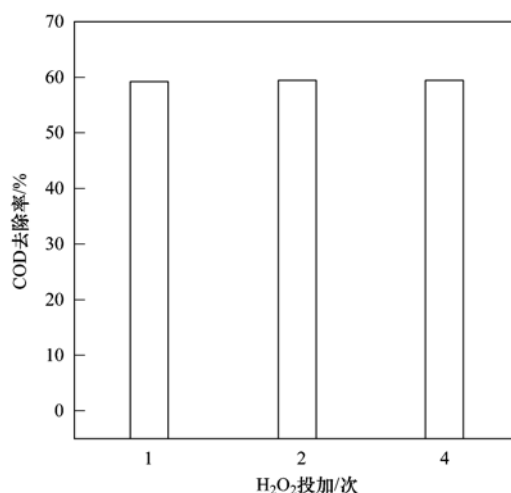


图4 H₂O₂投加次数对 COD 去除率的影响

Fig. 4 Influences of different H₂O₂ dosing modes on COD removal efficiency

察了光电 Fenton 技术对污泥深度脱水液 TOC、TN、NH₄⁺-N、TP 等其他污染物的去除效果.

2.5.1 TOC 去除

污泥深度脱水液经光电 Fenton 技术处理后,原污泥脱水液 TOC 值由 192.38 mg·L⁻¹降低到 95.12 mg·L⁻¹,去除率为 49.3%.

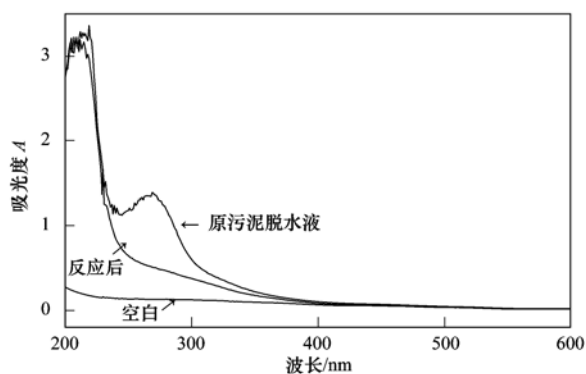


图5 污泥脱水液处理前后吸光度变化

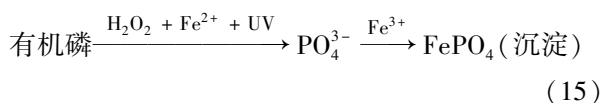
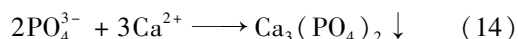
Fig. 5 Absorbance variation of sludge liquor before and after treatment

2.5.2 TN 和 NH_4^+ -N 去除

在最佳试验条件下,测得污泥脱水液经处理前后的 TN 和 NH_4^+ -N 分别由 $102.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $81.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $13.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 及 NH_4^+ -N 的去除率分别达到了 20.6% 和 73.6%。TN 的去除率低于 NH_4^+ -N 的去除率,分析原因是由于在 NH_4^+ -N 被氧化过程中,部分 NH_4^+ -N 转化成 N_2 溢出,而大部分 NH_4^+ -N 被氧化成为 NO_3^- 及 NO_2^- 仍存留在处理液中。

2.5.3 TP 去除

在最佳试验条件下,污泥脱水液经处理前后均未有 PO_4^{3-} 检出,TP 由 $3.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率达到了 96.5%。在原污泥脱水液中没有 PO_4^{3-} 检出是由于在污泥调理过程中加入石灰,形成 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀[式(14)]。同时试验结果发现,污泥脱水液经光电 Fenton 技术处理后仍未有 PO_4^{3-} 检出,可以解释为在利用光电 Fenton 处理污泥脱水液时, H_2O_2 及 Fe^{2+} 后产生的 $\cdot\text{OH}$ 首先将有机磷氧化为 PO_4^{3-} ,而后 PO_4^{3-} 与 Fe^{3+} 作用形成 FePO_4 沉淀,即化学法除磷。因而在污泥脱水液经光电 Fenton 处理后 TP 浓度降低,但仍未有 PO_4^{3-} 检出。其反应过程可表示为式(15)。污泥脱水液中 TP 经光电 Fenton 处理后浓度有明显降低,说明在利用光电 Fenton 技术降解废水中有机物的同时,能对废水中的 TP 有较强的去除效果。



3 结论

(1) 光电 Fenton 技术能快速有效地去除污泥脱

水液的有机污染物。在最佳条件下经光电 Fenton 技术处理 20 min 后,污泥脱水液的 COD 去除率可以达到 59.0%。与传统 Fenton 技术,UV/Fenton 技术,和电 Fenton 技术相比,光电 Fenton 技术可在短时间内获得较高 COD 去除率。

(2) 光电 Fenton 技术对污泥脱水液中其他污染物也能有效地去除,对 TOC、TN、 NH_4^+ -N 以及 TP 的去除率分别达到了 49.3%、20.6%、73.6% 和 96.5%。

参考文献:

- [1] 杨家宽,杨晓,李亚林,等. 基于骨架构建体污泥脱水及其固化土工性能研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2012, 35(2): 133-136.
- [2] 刘欢,李亚林,时亚飞,等. 无机复合调理剂对污泥脱水性能的影响[J]. 环境化学, 2011, 30(11): 1877-1882.
- [3] Chen C Y, Zhang P Y, Zeng G M, et al. Sewage sludge conditioning with coal fly ash modified by sulfuric acid [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 158(3): 616-622.
- [4] 柯明勇. 集美污水处理厂污泥深度脱水技术探讨[J]. 给水排水, 2011, 37(5): 40-43.
- [5] 杨国友,石林,柴妮. 生石灰与微波协同作用对污泥脱水的影响[J]. 环境化学, 2011, 30(3): 698-702.
- [6] 冯晶,王毅力,杨梦龙. 絮凝调理对消化污泥的脱水性能及絮体理化特性的影响研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1421-1430.
- [7] 刘欢,杨家宽,时亚飞,等. 不同调理方案下污泥脱水性能评价指标的相关性研究[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3394-3399.
- [8] 李定龙,张志祥,申晶晶,等. 超声波联合无机混凝剂对污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7): 20-22, 86.
- [9] Tony M A, Zhao Y Q, Tayeb A M. Exploitation of Fenton and Fenton-like reagents as alternative conditioners for alum sludge conditioning[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(1): 101-105.
- [10] Tony M A, Zhao Y Q, Fu J F, et al. Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton's reagent: Effectiveness and optimising study to improve dewaterability [J]. Chemosphere, 2008, 72(4): 673-677.
- [11] Liu H, Yang J K, Shi Y F, et al. Conditioning of sewage sludge by Fenton's reagent combined with skeleton builders [J]. Chemosphere, 2012, 88(2): 235-239.
- [12] Yuan H P, Zhu N W, Song F Y. Dewaterability characteristics of sludge conditioned with surfactants pretreatment by electrolysis [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2308-2315.
- [13] 鹿雯,张登峰,胡开林,等. 阳离子表面活性剂对污泥脱水性能的影响和作用机理[J]. 环境化学, 2008, 27(4): 444-448.
- [14] 李恺,叶志平,李焕文,等. 表面活性剂 CTAC 对活性污泥的脱水性能及其机理研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2010, (2): 76-81.

- [15] 郑怀礼, 唐雪, 沈烈翔, 等. 阳离子 P(AM-DAC) 污泥脱水剂的合成、表征与应用[J]. 重庆大学学报, 2010, **33**(7): 115-122.
- [16] Kusvuran E, Irmak S, Yavuz H I, *et al.* Comparison of the treatment methods efficiency for decolorization and mineralization of Reactive Black 5 azo dye[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, **119**(1-3): 109-116.
- [17] Kusvuran E, Gulnaz O, Irmak S, *et al.* Comparison of several advanced oxidation processes for the decolorization of Reactive Red 120 azo dye in aqueous solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, **109**(1-3): 85-93.
- [18] Khataee A R, Zarei M, Moradkhannejhad L. Application of response surface methodology for optimization of azo dye removal by oxalate catalyzed photoelectro-Fenton process using carbon nanotube-PTFE cathode[J]. Desalination, 2010, **258**(1-3): 112-119.
- [19] Irmak S, Yavuz H I, Erbatur O. Degradation of 4-chloro-2-methylphenol in aqueous solution by electro-Fenton and photoelectro-Fenton processes [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2006, **63**(3-4): 243-248.
- [20] Flox C, Ammar S, Arias C, *et al.* Electro-Fenton and photoelectro-Fenton degradation of indigo carmine in acidic aqueous medium [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2006, **67**(1-2): 93-104.
- [21] Ting W P, Lu M C, Huang Y H. The reactor design and comparison of Fenton, electro-Fenton and photoelectro-Fenton processes for mineralization of benzene sulfonic acid (BSA)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **156**(1-3): 421-427.
- [22] Masomboon N, Ratanatamskul C, Lu M C. Mineralization of 2, 6-dimethylaniline by photoelectro-Fenton process [J]. Applied Catalysis A: General, 2010, **384**(1-2): 128-135.
- [23] Brillas E, Baños M Á, Skoumal M, *et al.* Degradation of the herbicide 2, 4-DP by anodic oxidation, electro-Fenton and photoelectro-Fenton using platinum and boron-doped diamond anodes[J]. Chemosphere, 2007, **68**(2): 199-209.
- [24] Wu J F, Pu W H, Yang C Z, *et al.* Removal of benzotriazole by heterogeneous photoelectro-Fenton like process using ZnFe_2O_4 nanoparticles as catalyst[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(4): 801-807.
- [25] Altin A. An alternative type of photoelectro-Fenton process for the treatment of landfill leachate[J]. Separation and Purification Technology, 2008, **61**(3): 391-397.
- [26] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版) 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [27] Ghoneim M M, El-Desoky H S, Zidan N M. Electro-Fenton oxidation of Sunset Yellow FCF azo-dye in aqueous solutions[J]. Desalination, 2011, **274**(1-3): 22-30.
- [28] Crittenden J C, Hu S M, Hand D W, *et al.* A kinetic model for $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ process in a completely mixed batch reactor [J]. Water Research, 1999, **33**(10): 2315-2328.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, ZHANG Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

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