

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按 (403)

我国化学品的风险评价及风险管理 王铁宇,周云桥,李奇锋,吕永龙 (404)

土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)

中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素 黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)

关中地区冬季PM_{2.5}中碳气溶胶的污染特征及来源解析 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)

利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)

南京夏季市区VOCs特征及O₃生成潜势的相关性分析 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)

北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)

重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)

青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 余成,陈爽,张路 (499)

近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)

舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄煊芳 (513)

模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)

中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)

江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)

巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)

合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)

三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)

pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 王辉,孙波,关小红 (588)

EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)

镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 王婷,朱春山,胡承志 (602)

微生物对砷的氧化还原竞争 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍咏,王明星,袁林江 (609)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)

污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 景明,王磊 (622)

异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫渊辉 (630)

基于新一代测序技术的A²O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析 田美,刘汉湖,申欣 (638)

1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)

纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)

3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)

合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)

芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)

芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)

增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)

基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 王幼奇,白一茹,王建宇 (710)

不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素 王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)

几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)

河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶澍,刘文新 (740)

湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响 罗鹏程,李航,王曙光 (750)

溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)

自组装哑铃状Fe₃O₄微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 黄鑫辰,宗刚,刘焯焯,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)

盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N₂O产生的影响 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)

污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)

《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)

纳米 Ni/Fe 用于去除染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度的研究

舒小铭^{1,2}, 徐灿灿², 刘锐^{2*}, 赵远¹, 陈吕军^{2,3*}

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 用纳米 Ni/Fe 材料深度处理染料生产废水的生物处理出水, 考察了不同 Ni 负载量(质量分数 0~5%)、废水初始 pH 值(4.1~10.0)、Ni/Fe 投加量(1~5 g·L⁻¹)、反应时间(0.5~96 h)下对可吸附性有机卤代物(adsorbable organic halogens, AOX)的去除率和脱色率。结果表明, AOX 和色度去除率随 Ni 负载量的增加先升高后减少, 随废水初始 pH 值的降低和 Ni/Fe 投加量的增加而持续提高。最优化条件为 Ni 负载量 1%、废水初始 pH 4.1 和 Ni/Fe 投加量 3 g·L⁻¹, 该条件下 AOX 和色度的 24 h 去除率分别为 29.2% 和 79.6%, 96 h 去除率分别为 50.6% 和 80.7%。GC-MS 分析表明经材料处理后废水中氯代苯胺类、对硝基苯胺、4-甲氧基-2-硝基苯胺及卤代烷烃等有毒有害物质得到高效去除。

关键词: 纳米 Ni/Fe; 染料生产废水; 可吸附性有机卤代物; 还原脱卤; 色度

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0655-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.02.034

Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe

SHU Xiao-ming^{1,2}, XU Can-can², LIU Rui^{2*}, ZHAO Yuan¹, CHEN Lü-jun^{2,3*}

(1. College of Environment & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Nanoscale Ni/Fe was applied to biologically treated effluent of chemical dyestuff wastewater. The removal rates of adsorbable organic halogens(AOX) and chroma were investigated at different Ni loadings (0-5%), initial wastewater pH (4.1-10.0), Ni/Fe dosage (1-5 g·L⁻¹) and reaction time (0.5-96 h). The results showed that the removal rates of AOX and chroma firstly increased and then decreased with the increase of the Ni loading, while continuously increased with the decrease of the initial wastewater pH and the increase of Ni/Fe dosage. The optimal condition was Ni loading of 1%, initial wastewater pH of 4.1 and Ni/Fe dosage of 3 g·L⁻¹, under which 29.2% of AOX and 79.6% of chroma were removed after 24 h reaction, and 50.6% of AOX and 80.7% of chroma were removed after 96 h reaction. GC-MS analysis revealed that toxicants such as chlorinated anilines, *p*-nitroaniline, 4-methoxy-2-nitroaniline and halogenated hydrocarbons were efficiently removed.

Key words: nanoscale Ni/Fe; chemical dyestuff wastewater; adsorbable organic halogens (AOX); reductive dehalogenation; chroma

染料生产过程中使用大量的卤代苯胺、卤代硝基苯、卤代苯酚类等合成中间体^[1,2], 这些有机卤代物往往具有生物毒性、持久性和生物累积性^[3-5], 通过常规废水处理技术去除效果不佳, 因而在染料生产废水的二级生物处理出水中往往残留有很高的浓度^[6]。有机卤代物种类繁多, 国际上趋向使用可吸附性有机卤代物(adsorbable organic halogens, AOX)综合表征有机卤代物总量^[7]。欧美及日本等发达国家对综合排放废水中的 AOX 制定了严格的排放标准, 我国也自 1996 年开始陆续针对综合排放废水以及造纸、纺织染整、麻纺等行业废水制定了 AOX 排放标准^[8-11]。随着我国对废水 AOX 排放的日益重视, 探索 AOX 高效去除技术势在必行。

零价金属还原脱卤是近几年发展起来的技术。其中零价铁廉价易得, 作为有效脱卤的还原剂被研究得最多^[12-16]。Pd、Ni、Pt 和 Ag 等过渡金属是良好的加氢催化剂, 与零价铁组成双金属材料, 可以克服纳米零价铁易钝化、分散性差和反应活性低等问题^[17-19], 并取得比单金属更好的还原脱卤效果^[20,21]。目前使用双金属材料还原脱卤的研究多集中于纯物质溶液或地下水修复^[22-28], 用于染料脱色

收稿日期: 2015-07-09; 修订日期: 2015-09-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA06A305); 浙江省科技计划项目(2013C31107); 嘉兴市科技计划项目(2014AY21018)

作者简介: 舒小铭(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染防治, E-mail: 1159568779@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: liuruitsinghuazj@gmail.com; chenlj@tsinghua.edu.cn

也取得了较好的效果^[29,30],但针对染料生产废水中 AOX 的去除还鲜见报道。

本研究采用纳米 Ni/Fe 材料深度处理染料生产废水的二级生物处理出水,考察不同 Ni 负载量、废水初始 pH 值、Ni/Fe 材料投加量和反应时间条件下废水中 AOX 和色度的去除效果,最后使用 GC-MS 分析了废水中 AOX 及其他有机污染物的主要组分和处理前后的成分变化,旨在为染料生产废水的 AOX 达标处理提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 实验用水

生产分散、活性、酸性系列染料、助剂及染料中间体的某大型企业,每日产生废水 1.5 万 t,采用调节池→中和池→初沉池→混合池→缺氧池→好氧池→二沉池工艺处理后排入工业园区污水收集管网。该工艺进水和出水的 COD 浓度分别为 3 100 mg·L⁻¹和 345 mg·L⁻¹,COD 去除率较高,达到 89%。相比之下,进水和出水的 AOX 浓度分别为 9.90 mg·L⁻¹和 5.75 mg·L⁻¹,AOX 去除率很低,仅为 42%。活性污泥中 AOX 含量为 2 297 mg·kg⁻¹,远高于一般城市污水厂活性污泥中的含量^[6],说明废水中 AOX 浓度的降低并不是真正的脱卤或生物分解,而是很多被吸附转移至污泥相中。Ni/Fe 还原实验用水为二沉池出水,静置沉淀去除悬浮物后,4℃冷藏备用。

1.2 材料的制备与表征

Ni/Fe 材料的制备参照文献^[17, 27],简述如下:称取 7.467 6 g FeSO₄·7H₂O(分析纯)至三口烧瓶中,用 100 mL 通过氮气的 MilliQ 水溶解,在充分搅拌下逐滴加入 50 mL 浓度为 1.073 mol·L⁻¹的 NaBH₄ 溶液,反应 1 h,制得纳米零价铁颗粒(理论质量为 1.5 g);在强搅拌下,再逐滴加入不同浓度的 NiCl₂·6H₂O 溶液,其中包含 NiCl₂·6H₂O 分别为 0.030 4、0.060 7、0.182 1和 0.303 5 g,反应 1.5 h,制备成 Ni 负载量分别为 0.5%、1%、3%和 5%(Ni 与 Fe⁰ 理论质量分数)的纳米 Ni/Fe 材料。用通过氮气的 MilliQ 水清洗材料 3 次,去除溶液中的 Cl⁻和 SO₄²⁻,再用丙酮清洗 3 次,氮气吹干,并在氮气保护下室温保存备用。

用扫描电子显微镜(FESEM, S-4800, Hitachi, Tokyo, Japan),观察纳米 Ni/Fe 颗粒的表面形貌,并结合电子能谱仪(Energy Distribution Spectroscopy, EDS)观察颗粒表面的元素分布。

1.3 废水处理实验

称取 0.03 ~ 0.15 g Ni/Fe 材料至充氮血清瓶中,加入 30 mL 预先通氮气除氧的实验用水,在氮气保护下加盖密封,超声 1 min 使材料快速均匀地分散于水样中,将血清瓶放入恒温振荡培养箱中振荡(30℃,180 r·min⁻¹)。每隔一定时间取样离心,取上清液测定 AOX 值和色度。除特殊说明外,实验条件:废水初始 pH 为 7.2, Ni/Fe 投加量 3 g·L⁻¹,反应时间为 24 h。

1.4 分析方法

废水中 AOX(采用 Multi X 2500 总有机卤素分析仪,德国耶拿分析仪器股份公司)的测定和有机化合物的 GC-MS 分析参照文献^[6,31]。废水 COD 采用重铬酸钾法^[32];阴离子采用离子色谱仪(美国戴安,ICS-900 型)测定;色度采用吸光度法^[33],预先采用紫外分光光度计(岛津,UV-2450 型)进行全波长扫描,确定水样在处理前后的最大吸收峰所对应的波长均为 366 nm,因此以 366 nm 下的吸光度(UV₃₆₆)来表征水样处理前后色度的变化。

2 结果与讨论

2.1 Ni/Fe 双金属材料表征

图 1 为 Ni/Fe[ω(Ni) = 1%]材料的扫描电镜图,从中可看出 Ni/Fe 颗粒呈明显的球形或类球形。由于 Fe⁰ 颗粒间存在范德华力及磁力作用,大部分纳米 Ni/Fe 颗粒间不可避免地会发生团聚现象,且材料制备过程中的离心操作加剧了纳米颗粒间的团聚,进而形成更大的颗粒或形成链状^[25],颗粒平均粒径为 187.0 nm。纳米 Ni/Fe[ω(Ni) = 1%]材料的能谱分析结果如图 2 所示。Ni 和 Fe 同时存在于纳米颗粒中,Ni 占 Fe 的质量分数为 0.5%,低于理论值(1%),原因在于 Ni 含量太少容易导致能谱分析时选域不均匀^[34]。用原子吸收光谱仪(美国安捷伦科技有限公司,安捷伦 240AA 型)测定材料制备后的滤液中残留的 Ni 浓度,结果显示在滤液中未检出 Ni,表明 Ni 全部负载在 Fe⁰ 的表面,成功制备出了纳米 1% Ni/Fe 材料。不同 Ni 负载量下(0.5% ~ 5%)材料的形貌几乎没有差别,都呈球形或类球形的核-壳结构。

2.2 不同条件下纳米 Ni/Fe 材料处理染料废水生物处理出水的效果

2.2.1 Ni 负载量的影响

不同 Ni 负载量下纳米 Ni/Fe 材料对实验用水中 AOX 和色度的去除效果如图 3 所示。反应时间

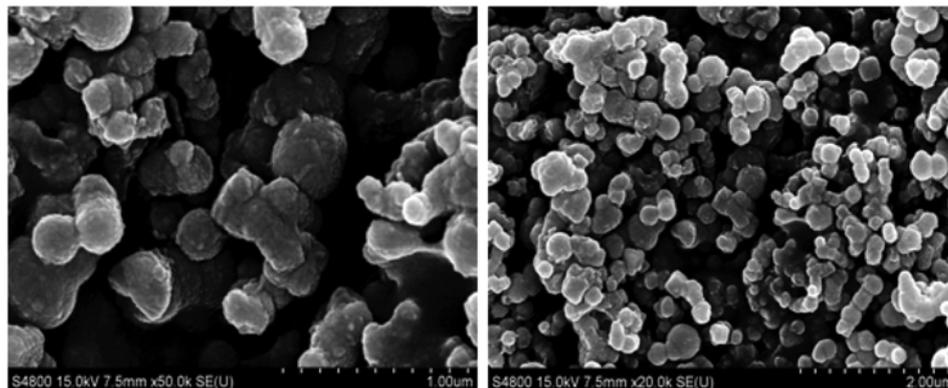


图 1 纳米 Ni/Fe(1%Ni) 材料的扫描电镜

Fig. 1 FESEM images of nanoscale Ni/Fe (1% Ni)

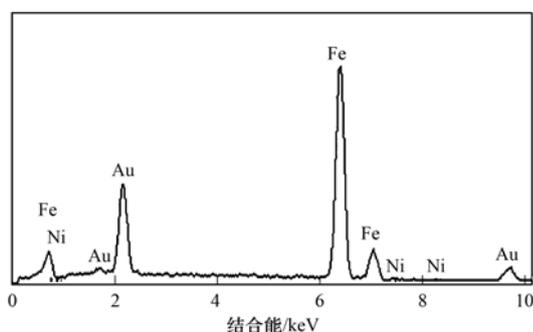


图 2 纳米 Ni/Fe (1%Ni) 材料的能谱分析

Fig. 2 EDS analysis of nanoscale Ni/Fe (1% Ni)

为 24 h 时,不负载 Ni 的实验组对 AOX 和色度的去除率分别为 15.5% 和 75.4%。有 Ni 负载后,随着 Ni 负载量的增加,AOX 和色度去除率都呈现先升高后下降的趋势,在负载量为 1% 时 AOX 和色度去除率达到最大值,分别为 24.5% 和 76.4%。

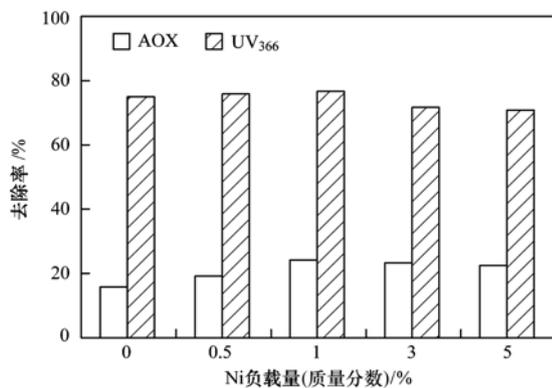


图 3 Ni 负载量对 AOX 去除率及脱色效果的影响

Fig. 3 Influence of Ni loading on AOX removal and decoloration

单金属 Ni 对有机卤代物不具有还原脱卤作用^[35]。与单金属零价铁相比,有 1% Ni 负载的 Ni/Fe 双金属系统对色度去除率变化不大,而 AOX 去除率明显提高,原因在于 Ni 的加入不断将 Fe⁰ 腐蚀

产生的 H₂ 催化成高反应性的活化氢原子(H^{*}),有效提高了有机卤代物的还原脱卤效率^[21]。当把 Ni 负载量提高至 3% 和 5% 后,AOX 和色度去除率都呈现下降趋势,原因在于过多的 Ni 包覆在纳米 Fe⁰ 表面,使得参与腐蚀的 Fe⁰ 表面积减少,纳米 Fe⁰ 与污染物接触的表面活性位减少^[36],从而减少了 H₂ 的产生量,降低了有机卤代物的还原脱卤效率^[23]。

2.2.2 废水初始 pH 的影响

调节实验用水初始 pH,考察不同 pH 条件下纳米 Ni/Fe(1% Ni)材料对实验用水中 AOX 和色度的去除效果,结果如图 4 所示。当废水初始 pH 值为 10.0 时,反应 24 h,AOX 和色度去除率分别为 23.0% 和 75.0%。随着废水初始 pH 值的降低,AOX 和色度去除率逐渐升高,当废水初始 pH 值降至 4.1 时 AOX 和色度去除率分别为 29.2% 和 79.6%,表明低 pH 体系有利于废水中有机卤代物的还原脱卤和色度的去除。

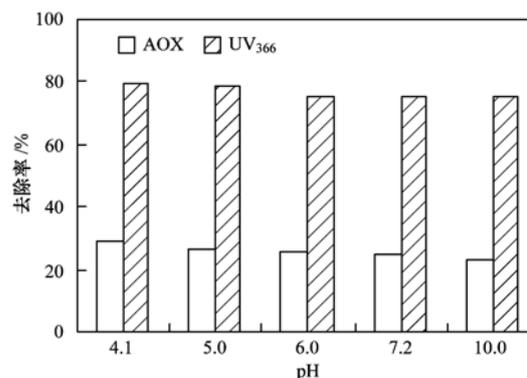


图 4 废水初始 pH 值对 AOX 去除率及脱色效果的影响

Fig. 4 Influence of initial wastewater pH on AOX removal and decoloration

低 pH 促进废水中有机卤代物脱卤原因可能在于: ①纳米 Ni/Fe 材料在制备和储存过程中难免会

被氧化^[17],而低 pH 值可以将颗粒表面的氧化层溶解,使材料颗粒表面活性位显露出来;②低 pH 使 Fe-H₂O 腐蚀加剧,有利于 Fe²⁺ 和 H₂ 生成,并且可防止纳米 Ni/Fe 颗粒表面因氧化层生成覆盖反应位而降低反应活性,Ni 对废水中有机卤代物还原进行催化加氢,推动脱卤反应进行.随着废水 pH 升高,Fe⁰ 表面可能形成铁的氢氧化物钝化层,如 Fe(OH)₂、Fe(OH)₃ 等或是碳酸铁钝化层,阻碍反应的进行^[37].

2.2.3 纳米 Ni/Fe 材料投加量的影响

调节实验用水初始 pH 为 4.1,考察不同材料投加量条件下纳米 Ni/Fe(1% Ni)材料对实验用水中 AOX 和色度的去除效果,结果如图 5 所示.随着材料投加量在 1~5 g·L⁻¹ 范围内增加,AOX 和色度去除率逐渐升高.原因在于材料投加量的增加使得纳米 Ni/Fe 材料体系中的 3 种还原剂,即 Fe⁰ 及其腐蚀产生的 Fe²⁺ 和 H₂ 的量都随之增加,同时催化金属 Ni 的量增多,使得 H₂ 催化转化生成的高反应活性的 H 增多,催化加氢作用增强,因而还原效率得到提高,进而增大了废水 AOX 和色度去除率.但当材料投加量超过 3 g·L⁻¹ 时,投加量的增加对 AOX 和色度去除率的影响不明显,投加量从 3 g·L⁻¹ 增加到 5 g·L⁻¹ 时,AOX 和色度去除率只增加了 1.5% 和 1.8%.因此从成本考虑,纳米 Ni/Fe 材料投加量以 3 g·L⁻¹ 为宜.

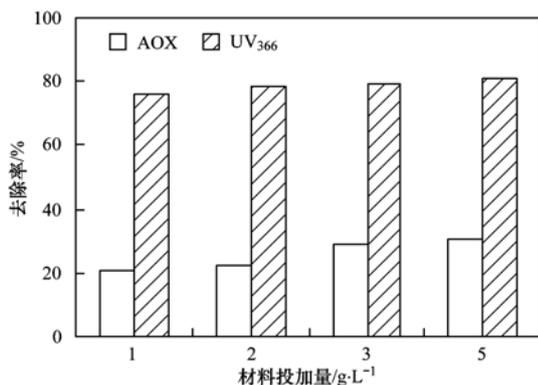


图 5 纳米 Ni/Fe 材料投加量对 AOX 去除率和脱色效果的影响

Fig. 5 Influence of nanoscale Ni/Fe dosage on AOX removal and decoloration

2.2.4 反应时间的影响

调节实验用水初始 pH 为 4.1,考察不同反应时间条件下纳米 Ni/Fe(1% Ni)材料对实验用水 AOX 和色度的去除效果,结果如图 6 所示.反应时间为 0.5 h 时,AOX 和色度去除率分别为 11.8% 和 20.5%,增加反应时间至 24 h 时,AOX 和色度去除

率升高至 29.2% 和 79.6%.继续增加反应时间后 AOX 去除率持续升高,当反应时间为 96 h 时,AOX 去除率为 50.6%,而色度去除率趋于稳定,维持在 79.6%~80.7%.结果表明,适当延长反应时间可以增加 AOX 和色度去除率.用原子吸收光谱仪测定废水中的 Ni²⁺ 浓度,结果显示反应 24 h 和 96 h 的实验用水中未检出 Ni²⁺.

实验用水在处理前后色度的变化如图 7 所示.本研究同时采用了稀释倍数法对实验用水的色度进行表征,实验用水处理前色度为 400 倍,反应 24 h 和 96 h 时色度分别为 100 倍和 75 倍,脱色率分别达到 75% 和 81.3%,与 UV₃₆₆ 表征的脱色率接近.实验用水经 Ni/Fe 材料处理 96 h 后,AOX 和色度均达到污水综合排放标准染料行业的二级标准^[8].

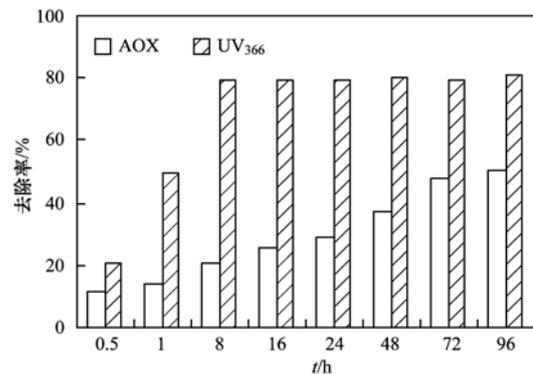


图 6 反应时间对 AOX 去除率和脱色率的影响(pH 4.1)

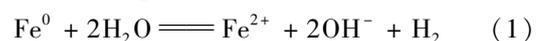
Fig. 6 Influence of reaction time on AOX removal and decoloration (pH 4.1)



图 7 处理前后色度的变化(pH 4.1)

Fig. 7 Chroma variation before and after treatment (pH 4.1)

实验发现,反应 96 h 后反应体系中废水 pH 值有很大程度地升高,由初始的 4.1 升高至 9.4,这主要归因于 Fe⁰ 与 H₂O 的反应^[23],如方程(1)所示.



纳米 Fe⁰ 腐蚀产生的 H₂ 在 Ni 的催化作用下不断转化成高反应性的活化氢原子(H^{*}), 而 H^{*} 又不断取代有机卤代物上的卤素, 使得产生的 H₂ 不断消耗, 进而加速了方程(1)向右进行, 导致 OH⁻ 浓度不断升高, 使反应体系的 pH 值上升.

实验用水经纳米 Ni/Fe 材料处理前后阴离子的变化情况如表 1 所示. 反应 5 min 时, Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 的浓度都增加, 这主要是由于材料在制备过程中会残留部分 Cl⁻ 和 SO₄²⁻, 当材料分散在实验用水中时, 这两种离子浓度就会相应地增加; 当反应 96 h 时, Cl⁻ 和 Br⁻ 浓度增加量基本与 AOX 去除量吻合, 佐证了纳米 Ni/Fe 材料对有机卤代物的还原脱卤作用. 有研究指出, 双金属材料的还原脱卤反应是界

面反应, 有机卤代物先吸附在材料表面, 然后发生脱卤反应^[38], 表明废水中 AOX 的去除是材料的吸附作用和还原脱卤作用的结合, 但材料的吸附作用在较短时间内就会达到吸附平衡, 当反应 0.5 ~ 96 h 时, AOX 去除率由 11.8% 增加至 50.6%, 不可能是仅靠材料吸附去除, 而是材料的还原脱卤起主要作用. 实验还发现, 反应 96 h 时 NO₃⁻ 在废水中未检出, 这是由于废水中 NO₃⁻ 容易被材料还原, 因此在反应前期 NO₃⁻ 会对有机卤代物的还原脱卤产生抑制作用, 阻碍 AOX 的去除; 而 SO₄²⁻ 在废水中会发生如下和反应^[39], 导致最终浓度有所降低.

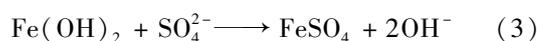
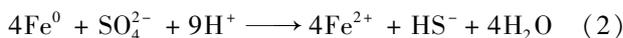


表 1 纳米 Ni/Fe 材料处理前后实验用水中阴离子浓度变化 ($n=3$)/mg·L⁻¹

Table 1 Change of wastewater anions before and after treatment with Ni/Fe bimetals ($n=3$)/mg·L⁻¹

指标	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
实验用水(调 pH 4.1)	997.5	52.8	99.6	2 421.2
反应 5 min	1 093.1	52.9	95.9	2 526.9
反应 96 h	1 094.9	54.2	未检出	2 346.2

在工程应用中, 将废水调至酸性需要耗费较大的成本, 因此本实验考察了在不调废水 pH(即初始 pH 7.2) 条件下纳米 Ni/Fe 材料对 AOX 和色度的去除效果, 如图 8 所示. 与废水初始 pH 4.1 条件相比, 不调废水 pH 的实验组色度去除率变化不大, 但 AOX 去除率明显降低, 当反应 96 h 时, AOX 去除率为 40.4%, 降低了 10.2%. 反应体系中废水 pH 升高至 9.2, 略高于污水综合排放标准(GB 8978-1996)规定的限值 6 ~ 9, 所以处理后的废水需要稍微调节 pH 后才能达标排放. 在不调废水初始 pH 条件下, 增加反应时间可以提高 AOX 和色度去除率, 但效果不如酸性(pH 4.1)条件下好.

2.3 纳米 Ni/Fe 处理前后的废水有机组分分析

使用 GC-MS 分析实验用水经材料处理前后的主要有机组分, 并以峰面积的形式表示各物质的增减情况, 结果如表 2 所示. 处理前水中共检出 14 种主要有机物, 包括氯代苯胺类、卤代烷烃类、硝基苯胺类、酯类、杂环化合物和酚类等, 其中包括 7 种有机卤代物. 绝大部分的有机化合物是有毒有害物质, 具有累积作用, 对水生环境和人体健康可能会造成不良影响, 其中 2,6-二氯-4-硝基苯胺和对硝基苯胺被列入我国优先控制污染物黑名单中.

纳米 Ni/Fe 处理废水 24 h 后, 原水中含有的氯

代苯胺类(除 3,4-二氯苯胺外)、卤代烷烃类和硝基苯胺类未被检出; 酯类、杂环化合物和酚类还大量存在; 新检出了 2,6-二氯-1,4-苯二胺、邻苯二甲酸二丁酯、5-羟基-6,7-呋喃和 2,4-二叔丁基苯酚等. 其中 2,6-二氯-1,4-苯二胺可能是由 2,6-二氯-4-硝基苯胺加氢还原而来. 处理 96 h 后, 24 h 出水中残留的 3,4-二氯苯胺和 2,6-二氯-1,4-苯二胺有较大幅度的减少; 邻苯二甲酸二丁酯、3-苯基-2-丙烯酸三甲基甲硅烷酯、5-羟基-6,7-呋喃、2,4-二叔丁基-6-硝基苯酚和 2,4-二叔丁基苯酚没有检出; 检出 1 种新物质, 即 2-氯-1,4-苯二胺.

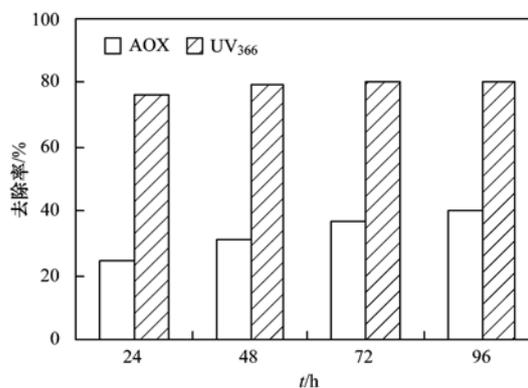


图 8 反应时间对 AOX 去除率和脱色率的影响(pH 7.2)

Fig. 8 Influence of reaction time on AOX removal and decoloration (pH 7.2)

总体而言,实验用水经纳米 Ni/Fe 处理 96 h 后,AOX 去除率超过 50%,其中卤代烷烃类出水中几乎无检出;含硝基的氯代苯胺类基本能够被完全还原成氯代苯胺类,而后再脱氯去除.非有机卤代物中,硝基苯胺类和酚类得到高效去除;酯类和杂环化合物在出水中仍有检出,显示去除效果不佳.纳米 Ni/Fe 对氯代烷烃类和氯代苯胺类的高效去除

作用在其他研究中也报道^[22,23].

本研究仅为染料生产废水中 AOX 达标处理提供初步的技术参考,由于实验规模小,未能对材料的重复利用情况和使用成本进行探讨.今后有必要进一步优化实验条件,开展放大规模的连续通水实验,从技术和经济两方面综合评估技术应用的可行性.

表 2 实验用水处理前后主要有机组分的变化¹⁾

Table 2 Change of the principal organic compounds in wastewater before and after treatment

类别	物质分类	物质	处理前 峰面积(a)	处理 24 h 峰面积(b)	处理 96 h 峰面积(c)	c 相对于 a 的 增减百分比/%	
有机卤代物	氯代苯胺类	3,4-二氯苯胺	619 600	474 373	69 348	-89	
		4-氯-2-硝基苯胺	125 179	0	0	-100	
	有机卤代物	有机卤代物	4,5-二氯-1,2-苯二胺	699 456	0	0	-100
			2-氯-4-硝基苯胺	11 631 696	0	0	-100
			2,6-二氯-4-硝基苯胺	5 701 518	0	0	-100
			2,6-二氯-1,4-苯二胺	0	2 823 501	1 133 831	-60*
			2-氯-1,4-苯二胺	0	0	800 566	—
			卤代烷烃类	1-氯二十七烷	909 074	0	0
1-碘十三烷	819 036	0	0	-100			
非有机卤代物	硝基苯胺类	对硝基苯胺	158 063	0	0	-100	
		4-甲氧基-2-硝基苯胺	708 265	0	0	-100	
	酯类	酯类	邻苯二甲酸二正辛酯	2 165 003	2 358 383	2 658 383	+23
			邻苯二甲酸二丁酯	0	1 008 733	0	-100*
			3-苯基-2-丙烯酸三甲基硅烷酯	5 407 748	10 717 086	0	-100
	杂环化合物	杂环化合物	苯并吡嗪	79 097	70 092	61 092	-23
			2-苯基-1H-吡咯并[2,3-b]吡啶-1-丙腈	5 348 011	0	0	-100
			5-羟基-6,7-咪喃	0	527 157	0	-100*
			酚类	2,4-二叔丁基-6-硝基苯酚	3 050 395	260 463	0
	2,4-二叔丁基苯酚	0	213 258	0	-100*		

1) 数值前的“+”代表增加,“-”代表减少;*为相对于处理 24 h 峰面积减少或增加的百分比

3 结论

(1) 纳米 Ni/Fe 材料对染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度去除率随着 Ni 负载量的增加先升高后降低,随着废水初始 pH 值的降低和材料投加量的增加而持续升高,最佳条件为 Ni 负载量 1%,废水初始 pH 4.1,材料投加量 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,在该条件下反应 96 h,AOX 和色度均达到污水综合排放标准染料行业的二级标准.

(2) 废水中 AOX 去除是纳米 Ni/Fe 材料的吸附作用和还原脱卤作用的结合,且以后者作用为主.

(3) GC-MS 分析表明经纳米 Ni/Fe 材料处理后实验用水中氯代苯胺类、卤代烷烃类和硝基苯胺类等主要有毒有害物质得到高效去除.

参考文献:

[1] Kornaros M, Lyberatos G. Biological treatment of wastewaters from a dye manufacturing company using a trickling filter[J].

Journal of Hazardous Materials, 2006, **136**(1): 95-102.

- [2] Arslan-Alaton I, Tureli G, Olmez-Hanci T. Treatment of azo dye production wastewaters using Photo-Fenton-like advanced oxidation processes: Optimization by response surface methodology[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2009, **202**(2-3): 142-153.
- [3] Aeppli C, Bastviken D, Andersson P, *et al.* Chlorine isotope effects and composition of naturally produced organochlorines from chloroperoxidases, flavin-dependent halogenases, and in forest soil[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(13): 6864-6871.
- [4] Torrades F, García-Montaña J. Using central composite experimental design to optimize the degradation of real dye wastewater by Fenton and photo-Fenton reactions[J]. Dyes and Pigments, 2014, **100**: 184-189.
- [5] Múčka V, Buňata M, Cuba V, *et al.* Radiation induced dechlorination of some chlorinated hydrocarbons in aqueous suspensions of various solid particles[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, **112**: 108-116.
- [6] 申洋洋,刘锐,徐灿灿,等. 印染及染料行业废水生物处理

- 系统中的 AOX 污染研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3304-3310.
- [7] 刘晓剑, 常丽春, 林秀军, 等. 纺织染整行业中 AOX 污染现状及来源分析[J]. 纺织导报, 2012, (6): 127-129.
- [8] GB 8978-1996, 污水综合排放标准[S].
- [9] GB 3544-2008, 制浆造纸工业水污染物排放标准[S].
- [10] GB 4287-2012, 纺织染整工业水污染物排放标准[S].
- [11] GB 28938-2012, 麻纺工业水污染物排放标准[S].
- [12] Mueller N C, Braun J, Bruns J, *et al.* Application of nanoscale zero valent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, **19**(2): 550-558.
- [13] De March D, Filisetti A, Sartorato E, *et al.* Agent-Based model to simulate groundwater remediation with nanoscale zero valent iron[A]. In: Sirakoulis G Ch, Bandini S (Eds.). Cellular Automata: Lecture Notes in Computer Science [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2012, **7495**: 351-359.
- [14] Xia S Q, Gu Z L, Zhang Z Q, *et al.* Removal of chloramphenicol from aqueous solution by nanoscale zero-valent iron particles[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **257**: 98-104.
- [15] Fu F L, Dionysiou D D, Liu H. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **267**: 194-205.
- [16] Hwang Y, Mines P D, Jakobsen M H, *et al.* Simple colorimetric assay for dehalogenation reactivity of nanoscale zero-valent iron using 4-chlorophenol[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2015, **166-167**: 18-24.
- [17] Zhang W H, Quan X, Wang J X, *et al.* Rapid and complete dechlorination of PCP in aqueous solution using Ni-Fe nanoparticles under assistance of ultrasound[J]. Chemosphere, 2006, **65**(1): 58-64.
- [18] Lin C H, Shih Y H, MacFarlane J, *et al.* Amphiphilic compounds enhance the dechlorination of pentachlorophenol with Ni/Fe bimetallic nanoparticles [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **262**: 59-67.
- [19] Wang Z Y, Huang Wei L, Peng P A, *et al.* Rapid dechlorination of 1,2,3,4-TCDD by Ag/Fe bimetallic particles[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **273**: 465-471.
- [20] Shih Y H, Chen M Y, Su Y F. Pentachlorophenol reduction by Pd/Fe bimetallic nanoparticles; Effects of copper, nickel, and ferric cations[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2011, **105**(1-2): 24-29.
- [21] Wei J J, Qian Y J, Liu W J, *et al.* Effects of particle composition and environmental parameters on catalytic hydrodechlorination of trichloroethylene by nanoscale bimetallic Ni-Fe[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(5): 1162-1170.
- [22] Feng J, Lim T T. Pathways and kinetics of carbon tetrachloride and chloroform reductions by nano-scale Fe and Fe/Ni particles: comparison with commercial micro-scale Fe and Zn [J]. Chemosphere, 2005, **59**(9): 1267-1277.
- [23] Xu X H, Wo J J, Zhang J H, *et al.* Catalytic dechlorination of *p*-NCB in water by nanoscale Ni/Fe[J]. Desalination, 2009, **242**(1-3): 346-354.
- [24] Zhang Z, Cissoko N, Wo J J, *et al.* Factors influencing the dechlorination of 2, 4-dichlorophenol by Ni-Fe nanoparticles in the presence of humic acid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **165**(1-3): 78-86.
- [25] Barnes R J, Riba O, Gardner M N, *et al.* Optimization of nanoscale nickel/iron particles for the reduction of high concentration chlorinated aliphatic hydrocarbon solutions [J]. Chemosphere, 2010, **79**(4): 448-454.
- [26] Huang Q, Liu W, Peng P A, *et al.* Reductive dechlorination of tetrachlorobisphenol A by Pd/Fe bimetallic catalysts[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **262**: 634-641.
- [27] Zhao D M, Zheng Y Y, Li M, *et al.* Catalytic dechlorination of 2, 4-dichlorophenol by Ni/Fe nanoparticles prepared in the presence of ultrasonic irradiation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, **21**(5): 1714-1721.
- [28] Han Y L, Yan W L. Bimetallic nickel-iron nanoparticles for groundwater decontamination: Effect of groundwater constituents on surface deactivation[J]. Water Research, 2014, **66**: 149-159.
- [29] 黄理辉, 马鲁铭, 张波, 等. Fe-Cu 法预处理印染废水技术研究[J]. 工业水处理, 2006, **26**(4): 56-58, 90.
- [30] 王子, 马鲁铭. 催化铁还原技术在工业废水处理中的应用进展[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(6): 9-13, 18.
- [31] 邱松凯, 范举红, 黄开坚, 等. 臭氧-曝气生物滤池深度处理垃圾焚烧渗滤液可行性研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2513-2521.
- [32] 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: 211-213, 566-574.
- [33] Sarasa J, Roche M P, Ormad M P, *et al.* Treatment of a wastewater resulting from dyes manufacturing with ozone and chemical coagulation[J]. Water Research, 1998, **32**(9): 2721-2727.
- [34] Xu J, Tang J, Baig S A, *et al.* Enhanced dechlorination of 2,4-dichlorophenol by Pd/Fe-Fe₃O₄ nanocomposites[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **244-245**: 628-636.
- [35] Zhang W X, Wang C B, Lien H L. Treatment of chlorinated organic contaminants with nanoscale bimetallic particles [J]. Catalysis Today, 1998, **40**(4): 387-395.
- [36] Xu J, Dozier A, Bhattacharyya D, *et al.* Synthesis of nanoscale bimetallic particles in polyelectrolyte membrane matrix for reductive transformation of halogenated organic compounds[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2005, **7**(4-5): 449-467.
- [37] 周红艺, 梁思, 曾思思, 等. Fe₃O₄ 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4311-4318.
- [38] Wang X Y, Zhu M P, Liu H L, *et al.* Modification of Pd-Fe nanoparticles for catalytic dechlorination of 2,4-dichlorophenol [J]. Science of the Total Environment, 2013, **449**: 157-167.
- [39] 张晓庆, 朱雪强, 卜丹阳, 等. 地下水中 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 对 Fe⁰ 降解 TCE 的效应研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(11): 46-49.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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