

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

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

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析 徐彬,张泽锋,李艳伟,秦鑫,缪青,沈艳(1911)

南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响 于兴娜,马佳,朱彬,王红磊,严殊祺,夏航(1919)

南京北郊冬季霾天 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究 周瑶瑶,马嫣,郑军,崔芬萍,王荔(1926)

京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 李梦,唐贵谦,黄俊,刘子锐,安俊琳,王跃思(1935)

长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 莫梓伟,牛贺,陆思华,邵敏,勾斌(1944)

贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析 朱兆洲,李军,王志如(1952)

北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征 薛亦峰,闫静,田贺忠,熊程程,李敬东,吴晓清,王玮,朱家昕(1959)

北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征 胡月琪,马召辉,冯亚君,王琛,陈圆圆,何明(1966)

燃煤电厂湿烟筒降雨成因分析 欧阳丽华,庄焯,刘科伟,陈振宇,顾鹏(1975)

Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究 谭增强,牛国平,陈晓文,安振(1983)

办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露 李岫雯,曹辉,倪宏刚(1989)

森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳 黄柯,刘刚,周丽敏,李久海,徐慧,吴丹,洪蕾,陈惠雨,杨伟宗(1998)

北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能 王兵,王晓燕,牛香,张维康,汪金松(2005)

气相中乙酸乙酯光解的光子效率:波长和催化剂的影响 方雪慧,赵洁,舒莉,高永,叶招莲(2010)

长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析 刘洋洋,沈芳,李秀珍(2019)

深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征 刘宝林,张鸿,谢刘伟,刘国卿,王艳萍,王鑫璇,李静,董炜华(2028)

杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义 李静,朱广伟,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军(2038)

小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价 黄莹,李永霞,高甫威,徐民,孙博,王宁,杨健(2046)

调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应 万由鹏,尹魁浩,彭盛华(2054)

三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系 张磊,蔚建军,付莉,周川, Douglas G. Haffner(2061)

藻华聚集的环境效应:对漂浮植物水葫芦光合作用的影响 包先明,顾东祥,吴婷婷,石祖良,刘国锋,韩士群,周庆(2070)

巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究 李超,王丹,杨金燕,王燕,丁士明(2077)

贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征 肖时珍,蓝家程,袁道先,王云,杨龙,敖向红(2085)

长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义 李广,章新平,张立峰,王跃峰,邓晓军,杨柳,雷超桂(2094)

元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征 张小娟,宋维峰,吴锦奎,王卓娟(2102)

植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究 黄俊杰,沈庆然,李田(2109)

Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究 丁春生,马海龙,傅洋洋,赵世督,李东兵(2116)

三维花状结构 α-FeOOH 协同 H₂O₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠 许俊鸽,李云琴,黄华山,苑宝玲,崔浩杰,付明来(2122)

UV/H₂O₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素 冯欣欣,杜尔登,郭迎庆,李华杰,刘翔,周方(2129)

钼掺杂 TiO₂ 光催化降解全氟辛酸 刘晴,喻泽斌,张睿涵,李明洁,陈颖,王莉,匡瑜,张搏,朱有慧(2138)

低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7 吴朋,吴军,高士祥,孙成,蒋正方(2147)

纳米 Fe₃O₄/CeO₂-H₂O₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解 孙正男,杨琦,纪冬丽,郑琳(2154)

流变相法制备包覆型 CMC-Fe⁰ 及降解水中 TCE 的研究 樊文井,成岳,余淑贞,范小丰(2161)

Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究 祁文智,王凡,王辉,施钦,逢磊,卞兆勇(2168)

锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制 肖少丹,刘露,姜理英,陈建孟(2175)

铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,王虹(2185)

聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附 张奕奕,廖运文,高和军,王忠志,帅超(2195)

大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径 杨敏,李亚明,魏源送,吕鑑,郁达伟,刘吉宝,樊耀波(2203)

污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究 孙衍卿,孙震,张景来(2210)

不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征 张海芹,王翻翻,李月寒,陈重军,沈耀良(2216)

基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素 贾瑞来,魏源送,刘吉宝(2222)

蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究 雍佳君,成小英(2232)

不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析 王润芳,王琴,张红,齐嵘(2239)

石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应 王佳楠,石妍云,郑力燕,王喆,蔡章,刘杰(2245)

Shewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化 司友斌,孙林,王卉(2252)

根表铁氧化物胶膜对水稻吸收镉的影响 马微,鲍艳宇(2259)

不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响 禄兴丽,廖允成(2266)

城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化 李晓燕,张舒婷(2274)

中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征 李彬,吴山,梁金明,梁文立,陈桂贤,李拥军,杨国义(2283)

经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟 张云惠,刘伟健,程芳芳,熊冠男,杨笑寒,王歆,陶澍,邢宝山,刘文新(2292)

生物炭输入对土壤本有机碳矿化的影响 陈威,胡学玉,陆海楠(2300)

改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用 曾炜铨,宋波,袁立竹,黄宇妃,伏凤艳(2306)

蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制 曾燕君,周志军,赵秋香(2314)

焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价 杨阳,蔡怡敏,白艳莹,陈卫平,杨秀超(2320)

《环境科学》征订启事(1965) 《环境科学》征稿简则(2115) 信息(1925, 2076, 2084, 2146)

Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究

丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵

(浙江工业大学建筑工程学院, 杭州 310014)

摘要: 为了降低饮用水在氯消毒过程中产生的消毒副产物(DBPs)溴氯乙腈(BCAN)对人体带来的健康危害,采用 Fe/Cu 催化还原的方法降解饮用水中低浓度的 BCAN,考察了 BCAN 的降解效果和其影响因素,探讨了其降解机制及动力学规律. 结果表明,Fe/Cu 具有更强的还原降解 BCAN 的能力,与零价铁相比,Fe/Cu(质量比为 10:1)的降解效率是其 1.5 倍. 随着 Fe/Cu 投加量的增加,BCAN 的去除率有明显的提高,对于初始浓度为 $20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BCAN 溶液,当 Fe/Cu(质量比为 10:1)投加量由 $5 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $10 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,反应 150 min 后,去除率由 51.1% 增加到 89.5%. BCAN 降解效率随着温度的升高逐渐提高,BCAN 初始浓度的变化对 Fe/Cu 去除 BCAN 的去除效果影响不大,Fe/Cu 降解 BCAN 符合一级反应动力学规律.

关键词: 饮用水; 消毒副产物; 溴氯乙腈; Fe/Cu 催化还原; 动力学

中图分类号: X131.2; R123.6 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2116-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.027

Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction

DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, ZHAO Shi-du, LI Dong-bing

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The paper used the method of iron copper catalyst reduction to degrade low concentrations of bromochloroacetonitrile (BCAN) to lighten the damage to human being, which is a kind of disinfection by-products (DBPs) produced during the chlorination process of drinking water. The removal efficiency of BCAN and its influencing factors were investigated. The mechanism of degradation and kinetics were also explored. The results indicated that iron copper had a greater degradation ability towards BCAN, and the degradation rate of iron copper (mass ratio of 10:1) was 1.5 times that of the zero-valent iron. The removal of BCAN increased obviously with the increase of Fe/Cu dosage. When the initial concentration was set at $20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, after a reaction time of 150 min, removal of BCAN was improved from 51.1% to 89.5% with the increase of iron copper (mass ratio of 10:1) dosage from $5 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ to $10 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. The temperature also had great impact on BCAN removal and the removal increased with the increase of temperature. However, BCAN removal did not change a lot with the variation of the initial concentration of BCAN when it was at a low level. The BCAN degradation by iron copper catalytic reduction followed the first-order kinetics model.

Key words: drinking water; disinfection by-products (DBPs); bromochloroacetonitrile (BCAN); iron copper catalytic reduction; kinetics

饮用水消毒是 20 世纪最有效的公共健康措施之一,为预防饮水流行病提供了有效保障^[1]. 然而在饮用水消毒杀菌的同时会产生多种 DBPs,对人体健康构成潜在的威胁^[2~4]. 长期以来,水处理工作者对在各类型的消毒剂中产生不同种类的 DBPs 进行了大量研究^[5],至今大约 600 多种消毒副产物被相继报道^[6],其中以含氮消毒副产物(nitrogenous disinfection by-products, N-DBPs)毒性最大,分布范围最广^[7,8].

目前对 N-DBPs 的研究主要集中在卤代乙腈(HANs)、亚硝胺(其代表为亚硝基二甲胺,NDMA)和卤代硝基甲烷(HNMs)三类物质上^[9]. 其中卤代乙腈(HANs)是饮用水消毒后常见的一类 DBPs. 调查发现^[10~12],氯、氯胺、二氧化氯和臭氧等消毒方式中都会形成 HANs,它包含氯乙腈(CAN)、二氯乙

腈(DCAN)、三氯乙腈(TCAN)、溴氯乙腈(BCAN)、碘乙腈(IAN)、溴乙腈(BAN)及二溴乙腈(DBAN),对哺乳动物的细胞具有遗传毒性^[13],比 HAAs 的毒性强^[14,15]. 调查研究发现^[16,17],DCAN 和 BCAN 是 HANs 中浓度较高的二种,并且 BCAN 的毒性是高于 DCAN 的^[18]. 因此,对 BCAN 开展研究具有重要意义.

美国科学家 Sweeny^[19]第一次把铁用于处理氯代脂肪烃溶液,后来 Gillham 等^[20,21]阐述污染的地下水可以被铁修复,从此零价铁处理被污染的水成为一个研究热点. 在降解污染物质的反应上,加入

收稿日期: 2015-01-12; 修订日期: 2015-03-08

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y5110339); 浙江省公益性技术应用研究计划项目(2012C23055)

作者简介: 丁春生(1965~),男,博士,教授,主要研究方向为水质控制理论与技术, E-mail: dingcs99@163.com

适量催化剂(Pd、Ni 和 Cu 等)的零价铁比单纯零价铁反应进行得更快. 楚文海等^[22]运用 Fe/Cu 催化还原的方法降解饮用水消毒副产物三氯乙酸,取得了较好的效果. 对于 HANs 的毒理性前人已做过相关研究^[23],但用 Fe/Cu 催化还原降解饮用水中 BCAN 的研究,尚未见报道.

本研究采用 Fe/Cu 催化还原方法降解 BCAN,观察其在不同条件下的降解效果,并分析其降解机制.

1 材料与方法

1.1 试剂和仪器

EPA 551B 标准品(2 000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,溶于丙酮),甲基叔丁基醚(MTBE)(含内标 1,2-二溴丙烷 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),还原铁粉,铜粉,无水硫酸钠. 去离子水,由实验室自制. 试验采用自配水作原水来确保 BCAN 浓度的稳定. 将 EPA 551B 标准品溶于去离子水中,配制试验相应浓度的原水.

本试验分析仪器气质联用仪(GCMS-QP2010plus)、自动进样器(AOC-20I,GC-2010,E)、自动进样针(221-34618),均由岛津国际贸易(上海)有限公司生产;电子天平(BS223S),由 Sartorius 生产;恒温振荡器(HYG- II Refrigerator shaker),由华利达生产;恒温往复式摇床(IKS KS 130 basic),由 IKS 生产;电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9146A 型),由上海精宏试验设备有限公司生产;移液枪(1 000 μL),由 dragon 生产;超声波扫频清洗机(SB1000DTY),由宁波新芝生物科技有限公司生产.

1.2 试验方法

1.2.1 Fe/Cu 质量比对降解 BCAN 的影响

在一系列 250 mL 的磨口锥形瓶中,依次加入 Fe/Cu 质量比为 20:1、10:1 和 8:1 的混合物以及单独 Fe(其中 Fe 的质量都为 1 g),然后各取 100 mL 浓度为 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BCAN 溶液到锥形瓶内. 将锥形瓶放入恒温摇床中振荡,pH = 7.5,温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$,转速为 130 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. 每隔一定时间,取水样测定剩余 BCAN 浓度.

1.2.2 投加量对 BCAN 降解效果的影响

在一系列 250 mL 的磨口锥形瓶中,依次加入质量为 0.5、0.8、1.0、1.5 和 2.0 g 的 Fe/Cu 混合物(Fe/Cu 质量比为 10:1),然后各取 100 mL 浓度为 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BCAN 溶液到锥形瓶内,此时 Fe/Cu 的投加量分别为 5、8、10、15 和 20 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 将锥形瓶

放入恒温摇床中振荡,pH = 7.5,温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$,转速为 130 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. 每隔一定时间,取水样测定剩余 BCAN 浓度.

1.2.3 温度对去除 BCAN 的影响

在一系列 250 mL 的磨口锥形瓶中,依次加入质量为 1.0 g 的 Fe/Cu 混合物(Fe/Cu 质量比为 10:1),然后各取 100 mL 浓度为 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ BCAN 溶液到各锥形瓶内. 放入恒温摇床中振荡,pH = 7.5,设置不同温度(20、30、40 $^{\circ}\text{C}$),转速为 130 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. 每隔一定时间,取水样测定剩余 BCAN 浓度.

1.2.4 BCAN 初始浓度对去除 BCAN 的影响

在一系列 250 mL 的磨口锥形瓶中,依次加入质量为 1g 的 Fe/Cu 混合物(Fe/Cu 质量比为 10:1),然后各取 100 mL 初始浓度不同的 BCAN 溶液到各锥形瓶内. 将锥形瓶放入恒温摇床中振荡,pH = 7.5,温度控制在 20 $^{\circ}\text{C}$,转速为 130 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. 每隔一定时间,取水样测定剩余 BCAN 浓度.

试验中,Fe/Cu 催化还原反应在数小时内完成,BCAN 的自身水解可以忽略.

1.3 分析方法

1.3.1 水样的预处理过程

样品首先液液萃取(LLE)进行富集,然后用气相色谱/质谱(GC/MS)进行检测. ①取 25 mL 待测水样到加有 8 g 无水硫酸钠的 40 mL 样品瓶中,并立即摇动使完全溶解. 使用前无水硫酸钠在马弗炉中 600 $^{\circ}\text{C}$ 烘 2 h,起到强化萃取剂作用. ②准确取 2 mL MTBE 到样品瓶中,密封后在恒温往复式摇床上摇晃 5 min,等待 5 min 让水相和有机相分层. ③提取 1 mL 的醚层,进入 GC-MS 中分析.

1.3.2 分析条件

色谱条件:进样口温度为 150 $^{\circ}\text{C}$,检测器温度为 250 $^{\circ}\text{C}$,离子源:电子轰击离子源(EI),电子能量:70 eV,柱头压强为 109.2 kPa,进样量为 1 μL ,无分流进样,溶剂延迟时间为 5 min.

程序升温条件:初始温度为 35 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min;以 20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升高至 120 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min;以 30 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升高至 160 $^{\circ}\text{C}$;以 20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升高至 180 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min.

色谱柱为 Rtx-5 (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm , USA Agilent Technologies) 毛细管色谱柱,载气为高纯 He.

测试采用内标法,抵消操作中产生的系统误差,提高分析精确度. 得到标准曲线的相关系数大于 0.99,具有良好的直线线性. BCAN 的特征离子为

m/z 74, 参考离子为 m/z 76 和 m/z 155, 保留时间为 6.012 min.

2 结果与讨论

2.1 Fe/Cu 质量比对降解 BCAN 的影响

Fe/Cu 质量比对降解 BCAN 效果的影响, 试验结果如图 1 所示.

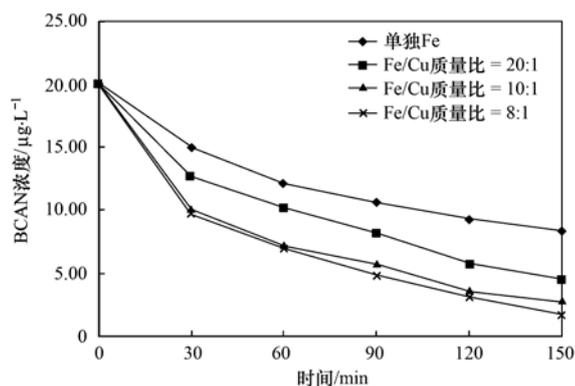


图 1 Fe/Cu 质量比还原降解 BCAN 效果

Fig. 1 Effect of iron and copper mass ratios on the removal of BCAN

从图 1 可知, 单独 Fe 经过 150 min 反应后, 对 BCAN 的降解率仅为 57.85%, 而 Fe/Cu 质量比为 20:1、10:1 和 8:1 的混合物经过 150 min 反应后对 BCAN 的降解率分别为 77.1%、86.15% 和 91.6%。这是因为 Fe/Cu 混合物中的 Cu 具有很好的催化作用, 表面镀载大量细微颗粒铜的金属铁, 在反应液中形成无数的微电池, BCAN 的还原降解可以通过电化学电极反应来进行。在铁铜微电解体系中, 铜作为催化剂可以明显地提高体系的氧化还原电位, 加

速铁屑的腐蚀, 从而加快微电解反应的进行。在铜的含量较少的时候, 增加铜的质量可以增强催化效应, 较快地提高反应速率^[24], 且腐蚀微电池的化学反应速度比金属铁的化学腐蚀更快^[25], 并且 Cu 具有独特的内部金属晶格结构和电子排布, 有利于有机物在 Fe/Cu 表面的反应进行^[26]。进而对 BCAN 具有较高的去除率。但随着 Cu 含量进一步增加, 降解效率变化不大, 这是因为在反应物充分的条件下, 催化剂的量越多, 浓度越高, 与反应物接触的量就越多, 反应的速率越大, 但催化剂的量增加到一定值以后, 催化剂与反应物的接触达到了饱和, 速率减小。考虑到经济性, 以下试验均取 Fe/Cu 质量比为 10:1 研究 BCAN 的还原降解特性。由图 1 可见, 与单独 Fe 相比, Fe/Cu (质量比为 10:1) 的降解效率是单独 Fe 的 1.5 倍。

对不同 Fe/Cu 质量比与 BCAN 还原降解的反应速率常数进行线性拟合, 得到图 2、表 1。

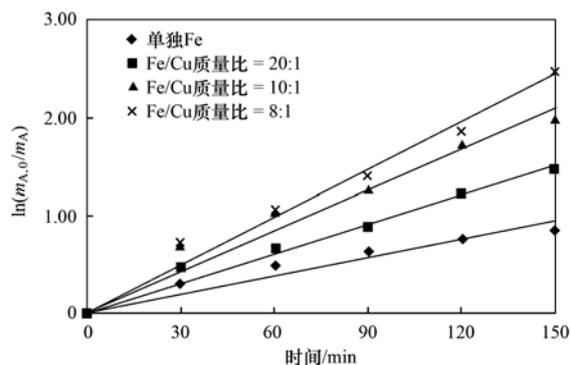


图 2 不同 Fe/Cu 质量比还原去除 BCAN 的 $\ln(m_{A,0}/m_A)$ 与时间的关系

Fig. 2 Relationship between $\ln(m_{A,0}/m_A)$ and time at different iron and copper mass ratios

表 1 不同 Fe/Cu 质量比条件下的反应速率方程和速率常数

Table 1 Reaction rate equations and correlation coefficients at different iron and copper mass ratios

序号	Fe/Cu 质量比	线性方程	K 值	线性系数 R^2
1	单独 Fe	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.00330t$	0.00330	0.9347
2	20:1	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.0102t$	0.0102	0.9781
3	10:1	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.0141t$	0.0141	0.9512
4	8:1	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.0163t$	0.0163	0.9802

由图 2 可知, Cu 具有良好的催化作用, Fe/Cu 混合物比单独 Fe 去除 BCAN 的反应速率大大增加, 且随着 Cu 含量的增加, Fe/Cu 去除 BCAN 的反应速率增大。由图 2、表 1 可以看出拟合后 $\ln(m_{A,0}/m_A)$ 与反应时间呈直线关系, 相关系数分别为 0.9781、0.9512、0.9802, 相关性较好, 说明 Fe/Cu 还原降解 BCAN 的过程符合一级反应。

2.2 投加量对 BCAN 降解效果的影响

Fe/Cu 投加量对降解 BCAN 效果的影响如图 3。

由图 3 中可以看出, 投加量为 5、8、10、15 和 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Fe/Cu 混合物经过 150 min 反应后对 BCAN 的降解率分别为 51.1%、71.1%、86.15%、89.5% 和 92%。可见 Fe/Cu 投加量在 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以

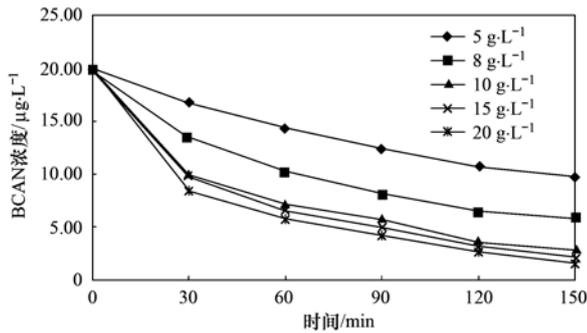


图3 Fe/Cu 投加量对降解 BCAN 效果的影响

Fig. 3 Effect of the dosages of iron and copper on the removal of BCAN

下,随着 Fe/Cu 投加量的增加,BCAN 降解效率有明显的提高,这是因为在反应物 BCAN 充分的条件下,

表2 不同 Fe/Cu 投加量条件下的反应速率方程和速率常数

Table 2 Reaction rate equations and correlation coefficients at different dosages of iron and copper

序号	Fe/Cu 投加量/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	线性方程	K 值	线性系数 R^2
1	5	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.005\ 00t$	0.005 00	0.989 7
2	8	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.009\ 20t$	0.009 20	0.952 3
3	10	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.014\ 1t$	0.014 1	0.951 2
4	15	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.015\ 6t$	0.015 6	0.969 5
5	20	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.017\ 4t$	0.017 4	0.958 7

由表2可知,随着 Fe/Cu 投加量的增加,反应速率常数增加.主要是随着 Fe/Cu 量的增加,Fe/Cu 中的复相微电池增加,加快 Fe 的腐蚀^[28],电化学反应速度加快,进而提高脱氯速率.

2.3 温度对去除 BCAN 的影响

温度对 Fe/Cu 去除 BCAN 效果的影响如图4.

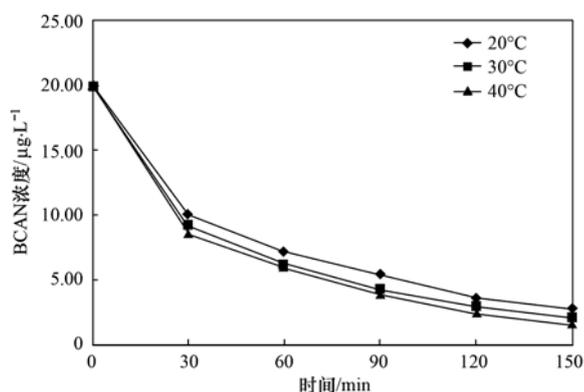


图4 温度对 Fe/Cu 去除 BCAN 的影响

Fig. 4 Effect of temperature on the removal of BCAN by iron and copper

由图4中可知,BCAN 降解效率随着温度的升高有所增大.在温度分别为 20、30 和 40°C,Fe/Cu 投加量为 $10\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,初始浓度为 $20\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BCAN

随着 Fe/Cu 投加量的增加,在反应液体系内原电池数量增加,从而使更多的 BCAN 在阴极铜上得到电子,加快了电化学作用的效果.而当 Fe/Cu 投加量超过 $10\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,随着 Fe/Cu 投加量的增加,BCAN 降解效率变化不大,这是因为 Fe/Cu 投加量与反应物的接触达到了饱和,BCAN 降解效率增加不明显.考虑到经济性,以下试验 Fe/Cu 投加量均为 $10\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

增加 Fe/Cu 投加量可以加快 BCAN 降解效率,这是因为随着 Fe/Cu 投加量的增加,增大了 BCAN 反应的零价铁表面积浓度和具有催化作用的 Cu 的量^[27],从而有利于反应的进行.

对不同 Fe/Cu 投加量与 BCAN 还原降解的反应速率常数进行线性拟合,得到表2.

溶液,反应进行到 150 min 时,BCAN 的降解效率分别达到 86.15%、89.6% 和 92.5%.这是因为随着温度的升高,BCAN 分子的平均动能增大,分子运动速度加快,与铜铁接触速率增高,有利于 BCAN 分子的传质,提高化学反应速率^[29],且单位体积内活化分子数增多,反应速率增大,提高了 BCAN 的降解率.

将图4中的数据进行线性拟合,结果如表3所示.可见,随着温度的升高,Fe/Cu 去除 BCAN 反应速率常数相应的增加,反应速率相应地增快.

2.4 BCAN 初始浓度对去除 BCAN 的影响

BCAN 初始浓度对 Fe/Cu 去除 BCAN 效果的影响如图5.

由图5可知,当初始浓度分别为 10、20、30 和 $40\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BCAN 反应进行到 150 min 时,BCAN 的降解效率分别达到 83.75%、86.15%、88.7% 和 90.1%.可见,随着 BCAN 初始浓度的增加,BCAN 的降解效率有一定的提高,但增幅不大.分析认为,由于 BCAN 通过得到 Fe 所释放的电子从而实现还原降解,当 BCAN 初始浓度在较低范围时,Fe/Cu 含量相对于 BCAN 是过量的,能够充分得到 Fe 所释放的电子,随着 BCAN 初始浓度的增加,增大了 BCAN

表 3 不同温度条件下的反应速率方程和速率常数

Table 3 Reaction rate equations and correlation coefficients at different temperatures

序号	温度/°C	线性方程	K 值	线性系数 R ²
1	20	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.014 2t$	0.014 2	0.951 3
2	30	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.016 2t$	0.016 2	0.951 1
3	40	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.018 0t$	0.018 0	0.970 8

和 Fe/Cu 双金属接触反应的几率,更多的 BCAN 得到电子进而被降解,去除率增加,但到 BCAN 初始浓度增加到一定的浓度,过多的 BCAN 争夺 Fe 所释放的电子,达到了饱和状态. 由于 BCAN 本身不易被

降解,该几率就显得不强,所以 BCAN 的去除率增加缓慢.

将图 5 中的数据点进行线性拟合,结果如表 4 所示.

表 4 不同 BCAN 初始浓度条件下的反应速率方程和速率常数

Table 4 Reaction rate equations and correlation coefficients at different initial concentration of BCAN

序号	BCAN 初始浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	线性方程	K 值	线性系数 R ²
1	10	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.013 8t$	0.013 8	0.944 7
2	20	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.014 2t$	0.014 2	0.951 3
3	30	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.015 4t$	0.015 4	0.966 6
4	40	$\ln(m_{A,0}/m_A) = 0.016 1t$	0.016 1	0.980 3

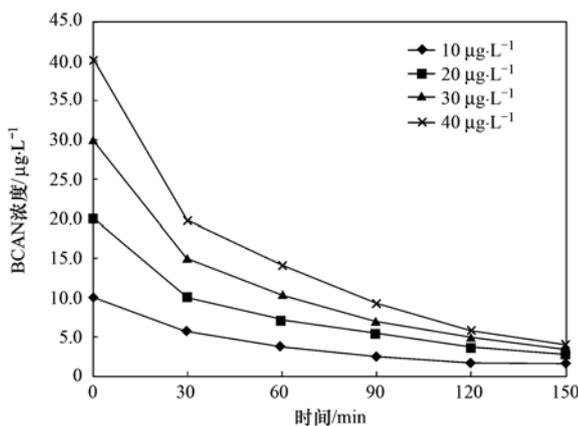


图 5 不同 BCAN 初始浓度条件下 Fe/Cu 去除 BCAN 的效果

Fig. 5 Effect of different initial concentrations of BCAN on the BCAN removal by iron and copper

从表 4 中可见,当 BCAN 初始浓度为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,速率常数为 0.013 8,当 BCAN 初始浓度增加到 $40 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,速率常数为 0.016 1,可见 BCAN 初始浓度的增加,反应速率常数变化不大.

3 结论

(1) Fe/Cu 具有更强的还原降解 BCAN 的能力,与零价铁相比,Fe/Cu(质量比为 10:1)的降解效率是其 1.5 倍. 这是因为 Fe/Cu 混合物中的 Cu 具有很好的催化作用,可加快原电池反应,并且 Cu 具有独特的内部金属晶格结构和电子排布,有利于有机物在 Fe/Cu 表面的反应进行.

(2) 随着 Fe/Cu 投加量增加,BCAN 的去除率

有明显的提高,这是因为随着 Fe/Cu 投加量的增加,在反应液体系内原电池数量增加,加快了 BCAN 降解效率,从而有利于反应的进行.

(3) 随着温度的升高,BCAN 降解效率有所提高. 这是因为随着温度的升高,分子运动速率加快以及增加活化分子数,使降解过程进行得更好.

(4) BCAN 初始浓度的变化对 Fe/Cu 去除 BCAN 的去除效果影响不大,Fe/Cu 降解 BCAN 符合一级反应动力学规律.

参考文献:

- [1] Hrudey S E. Chlorination disinfection by-products, public health risk tradeoffs and me [J]. *Water Research*, 2009, **43** (8): 2057-2092.
- [2] Gan W, Guo W, Mo J, *et al.* The occurrence of disinfection by-products in municipal drinking water in China's Pearl River Delta and a multipathway cancer risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447C**: 108-115.
- [3] Sharma V K, Zboril R, McDonald T J. Formation and toxicity of brominated disinfection byproducts during chlorination and chloramination of water: A review [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 2014, **49**(3): 212-228.
- [4] 丁春生. 饮用水中三氯硝基甲烷的形成过程与控制技术研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [5] Croue J P, Korshin G V, Benjamin M M. *Characterization of natural organic matter in drinking water* [M]. Denver: American Water works Association, 2000.
- [6] 丁春生, 张涛, 徐洋洋, 等. 铁还原去除饮用水中三氯硝基甲烷的性能研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, **47** (12): 2202-2207.
- [7] Plewa M J, Muellner M G, Richardson S D, *et al.* Occurrence,

- synthesis, and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity of haloacetamides; an emerging class of nitrogenous drinking water disinfection byproducts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(3): 955-961.
- [8] 丁春生, 邹邦文, 缪佳, 等. 饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3113-3118.
- [9] 楚文海, 高乃云. 饮用水含氮消毒副产物卤化硝基甲烷研究进展[J]. *给水排水*, 2008, **34**(7): 34-36.
- [10] 朱明秋, 高乃云. 饮用水中典型含氮消毒副产物卤乙腈的生成和控制研究进展[J]. *水处理技术*, 2013, **39**(8): 1-4, 9.
- [11] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 20-33.
- [12] Krasner S W. The formation and control of emerging disinfection by-products of health concern[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, **367**(1904): 4077-4095.
- [13] Ueno H, Moto T, Sayato Y, *et al.* Disinfection by-products in the chlorination of organic nitrogen Compounds; by-products from kynurenine [J]. *Chemosphere*, 1996, **33**(8): 1425-1433.
- [14] Osgood C, Sterling D. Dichloroacetonitrile, a by-product of water chlorination, induces aneuploidy in drosophila [J]. *Mutation Research*, 1991, **261**(2): 85-91.
- [15] Curieux F L, Giller S, Gauthier L. Study of the genotoxic activity of six halogenated acetonitriles, using the SOS chromotest, the Ames-fluctuation test and the newt micronucleus test [J]. *Mutation Research*, 1995, **341**(4): 289-302.
- [16] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [17] Chu W H, Gao N Y, Deng Y, *et al.* Formation of nitrogenous disinfection by-products from pre-chloramination [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(7): 1187-1191.
- [18] Richardson S D, Plewa M J, Wagner E D, *et al.* Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research[J]. *Mutation Research*, 2007, **636**(1-3): 178-242.
- [19] Sweeny K H. American water works association research foundation [A]. In: *Water Reuse Symposium* [C]. Denver, USA, 1979. 1487.
- [20] Gillham R W, O'Hannesin S F. Modern Trends in Hydrology [A]. In: *International Association of Hydrologists Conference* [C]. IAH: Hamilton, Canada, 1992. 10.
- [21] Gillham R W, O'Hannesin S F. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero - valent iron[J]. *Ground Water*, 1994, **32**(6): 958-967.
- [22] 楚文海, 高乃云, 赵世焜, 等. Fe/Cu 催化还原去除饮用水消毒副产物三氯乙酸[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, **37**(10): 1355-1359.
- [23] 于洋, 韦霄, 张志勇. 饮用水中卤乙腈的形成和毒性研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2014, **31**(8): 741-745.
- [24] 姜迎春. 改进型微电解法处理炼焦废水的研究[J]. *化工时刊*, 2014, **28**(11): 5-10, 55.
- [25] 涂传青, 马鲁铭. 金属铁还原降解 2,4-二硝基甲苯的实验研究[J]. *环境科学与管理*, 2005, **30**(5): 33-34.
- [26] 樊金红, 徐文英, 高延耀, 等. Fe-Cu 催化还原法处理硝基苯类化合物废水[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(7): 945-948.
- [27] 涂传青. 金属铁与电解法还原降解有机物反应机理和影响因素的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [28] Yak H K, Lang Q Y, Wai C M. Relative resistance of positional isomers of polychlorinated Biphenyls toward reductive dechlorination by zerovalent iron in subcritical water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(13): 2792-2798.
- [29] 张岚, 董晓丽, 张新欣, 等. 草酸改进铁/铜微电解体系降解活性艳蓝 KN-R[J]. *大连工业大学学报*, 2011, **30**(6): 429-432.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smeectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发行人