

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮	(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健	(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋	(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红	(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军	(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅	(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲	(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵	(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静	(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰	(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅	(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰	(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林	(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷	(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠	(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军	(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻	(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌	(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永	(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴	(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋	(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成	(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青	(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏	(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国	(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红	(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋	(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰	(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅	(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙	(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣	(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪	(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松	(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌	(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州	(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军	(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静	(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟	(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强	(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才	(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红	(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红	(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛	(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩	(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英	(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵	(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰	(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军	(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野	(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰	(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙	(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷	(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥	(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁	(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)	信息(1490,1496,1586,1743)

污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究

王红娟, 齐飞, 封莉, 张立秋*

(北京林业大学环境科学与工程学院, 北京市水体污染源控制技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以城市污水处理厂脱水污泥和玉米芯为原料, 氯化锌为活化剂制备污泥基活性炭(SAC), 考察其催化臭氧氧化去除水中稳定性药物布洛芬(IBP)的效能. 试验中对比考察了单独臭氧氧化、单独 SAC 吸附、SAC 催化臭氧氧化这 3 种工艺对水中 IBP(初始浓度为 $500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 的去除效果, 同时研究了臭氧与 SAC 投加量对催化效果的影响. 结果表明, 单独臭氧氧化对 IBP 的去除率随臭氧浓度的增加而增加, 当臭氧浓度由 $0.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, IBP 的去除率由 44.4% 提高到 100%; 单独 SAC 对 IBP 的吸附去除效果较差, 即使 SAC 投加量增至 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 吸附时间为 40 min 时, IBP 的吸附去除率仅为 44.56%; SAC 催化臭氧氧化工艺中, IBP 去除速率大大加快, 在反应的初始阶段(0~5 min) SAC 催化臭氧氧化对 IBP 的去除率要远远高于单独臭氧氧化和单独 SAC 吸附二者作用之和. 臭氧与 SAC 的投加量对 IBP 的催化氧化去除效果具有较大影响. SAC 催化臭氧氧化 IBP 分为瞬时需氧阶段反应(0~5 min)和慢速反应(5~40 min)两阶段. 快速反应阶段以 $\cdot\text{OH}$ 与 IBP 反应为主, 慢速反应阶段残余臭氧浓度很低, 此时主要以 SAC 吸附去除 IBP 为主.

关键词: 臭氧; 污泥基活性炭; 催化; 臭氧氧化; 布洛芬

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1591-06

Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob

WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, ZHANG Li-qiu

(Key Laboratories of Water Pollution Control Technology, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Catalytic ozonation of ibuprofen (IBP) from aqueous solution in the presence of sludge-based activated carbon (SAC) prepared from sewage sludge and corn cob was studied. For comparative purposes, experiments of adsorption on SAC, single ozonation, and ozonation in the presence of SAC were carried out and the effects of the amount of SAC and O_3 on the treatment of IBP were studied. There was an increase in the degradation efficiency of IBP with the increasing ozone concentration in the process of ozonation alone. After 40 min for ozonation, the degradation efficiency of IBP was nearly 44.4% with the ozone dosage of $0.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Compared with the ozone dosage of $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, IBP entirely degraded after 40 min. The property of SAC for IBP is not excellent, approximately 44.56% of the IBP is adsorbed on $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC after 40 min. The presence of SAC during ozonation increased the rate of degradation of IBP. In the first stage of the reaction (0-5 min), the simultaneous combination of ozone and SAC leads to degradation rates slightly higher than the sum of single ozonation and single adsorption. The degradation of IBP was influenced by the amount of SAC and O_3 in the SAC catalytic ozonation system. When the concentration of O_3 was $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC needed to be added in the reaction to a complete conversion of IBP. When the concentration of ozone increased to $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, IBP was completely removed at $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC in approximately 20 min. The removal of IBP can be divided into two-phases, an initial rapid removal phase of IBP called instantaneous ozone demand (IOD) (Phase I), followed by a rather slow decomposition phase (Phase II). In the Phase I, $\cdot\text{OH}$ was responsible for the improvement of IBP removal effectiveness. In the Phase II, since the low ozone concentration, the removal of IBP mainly due to the adsorption effect on SAC.

Key words: ozone; activated carbon made from sludge and corn cob; catalytic; ozonation; ibuprofen

近年来, 新型药物类污染物 (pharmaceuticals, PhACs) 在地表水环境中的不断出现引起了各国学者越来越广泛的关注^[1,2]. 布洛芬 (IBP) 是一种常见的非甾类消炎镇痛药物, 在我国的珠江、海河、辽河和黄河等水体中均有检出^[3,4]. 研究表明^[5], 常规的生物处理工艺对 IBP 有较好的去除效果, 去除率可达 70%, 但生物处理的最终产物具有和 IBP 类似的

生态学毒性. 因此, 研究有效去除水中微量 IBP 的深

收稿日期: 2011-07-22; 修订日期: 2011-09-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目 (YX2011-12); 国家自然科学基金项目 (51178046); 教育部新世纪优秀人才项目 (NCEF-08-0732)

作者简介: 王红娟 (1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高级氧化技术处理水中微量药物类有机污染物, E-mail: wanghj828@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangliqiu@163.com

度处理技术非常必要。

IBP 性质稳定,其与臭氧分子的反应速率常数^[6]仅有 $9.6 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$ 。但有研究表明^[6] IBP 与羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 的反应速率常数却高达 $(7.4 \pm 1.2) \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$,因此高级氧化工艺是一种有效去除 IBP 的方法。自从 Jans 等^[7]发现活性炭是一种加速臭氧分解并生成 $\cdot\text{OH}$ 的促进剂以后,活性炭催化臭氧氧化作为一种高级氧化技术被广泛研究^[8-12]。目前,以脱水污泥为主要原料制备污泥基活性炭备受关注^[13-16],研究主要集中在如何改善污泥基活性炭吸附性能方面^[17,18],但对其催化性能的研究尚鲜见报道。由于污泥中缺少有利于活性炭孔隙结构发育的纤维素和半纤维素,在前期的研究中加入了玉米芯作为增碳剂,由此制备的污泥基活性炭 (SAC),其表面官能团丰富;同时剩余污泥中活性金属的含量较高 (如: $\text{Fe } 1852 \sim 11777 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu } 232 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Mn } 182 \sim 218 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这些活性金属在制备活性炭过程中可能在炭表面形成活性金属氧化物,使得污泥基活性炭具备一定的催化臭氧氧化潜力。因此,本研究以 SAC 为催化剂,臭氧为氧化剂,考察 SAC 催化臭氧氧化去除水中微量药物 IBP 的实际效果。

1 材料与方法

试验中所用溶液均由去离子水配成,IBP 购于美国 Sigma-Aldrich,纯度 $\geq 98\%$ 。试验所用其它试剂均为分析纯。配制 IBP 储备液浓度为 $16.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。IBP 浓度分析采用高效液相色谱 HPLC (Waters2695,美国 Waters 公司)和 UV 检测器 (Waters2998,美国 Waters 公司),色谱柱为 Waters Symmetry C18 ($4.6 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, $5 \mu\text{m}$) (美国 Waters 公司),色谱条件:流动相为甲醇/(2%醋酸溶液)/乙腈 (体积比) = 5:35:40,流速 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,柱温 40°C ,检测波长为 220 nm 。

污泥基活性炭以脱水污泥和玉米芯为原料,其中污泥取自北京市清河污水处理厂中未经消化的脱水污泥,玉米芯取自河北省承德市农村,玉米芯和污泥均采用植物破碎机破碎,过 3 mm 的筛备用。取质量比为 1:1 的脱水污泥和玉米芯粉末,加入氯化锌作为活化剂,在马弗炉 (F0210C, Yamato, 日本) 中由室温升至 600°C 进行焙烧,在此状态下保持 10 h ,随后冷却制得 SAC,之后碾磨,过筛选取粒径在 $0.10 \sim 0.15 \text{ mm}$ 的部分备用。

采用美国康塔公司 QuadraSorb Station 4 型自动

比表面积与孔隙度分析仪,以高纯 N_2 为吸附质,在液氮温度 (77.00 K) 下对制备的活性炭进行氮吸附测定,得到活性炭的比表面积、孔容和孔径分布;采用 Vidic^[19] 滴定法测定表面官能团。SAC 的总比表面积为 $712.81 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,微孔的比表面积为 $661.9 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,SAC 的总孔孔容为 $0.48 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,微孔孔容为 $0.38 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,中孔孔容为 $0.40 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。SAC 表面官能团以酸性基团为主,包括 $1.1936 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 酚羟基和 $0.9678 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 羧基,碱性官能团含量为 $1.497 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

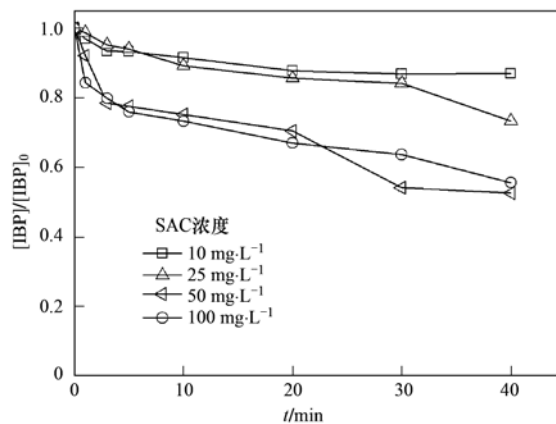
臭氧发生器 (3S-A5, 北京同林科技) 以氧气为气源。试验采用间歇反应,反应器由玻璃制成,有效容积 500 mL ,向该反应器中加入 300 mL 去离子水,通过控制氧气流量、臭氧发生器电压和通气时间调节水中溶解性臭氧质量浓度。停止通气后,迅速向反应器内加入 9.4 mL IBP 储备液 ($16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 SAC,使 IBP 初始浓度为 $500 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。开启磁力搅拌器,转速为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,在不同时间间隔取样,用 $0.2 \text{ mL Na}_2\text{SO}_3$ ($24 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 终止氧化反应。臭氧尾气用 KI 溶液吸收,水中溶解性臭氧浓度用靛蓝法^[20]测定。

试验过程中,分别开展单独臭氧氧化、单独 SAC 吸附和 SAC 催化臭氧氧化 3 种工艺对 IBP 的去除效果。此外,分别改变臭氧投加量和 SAC 投加量,考察其对 SAC 催化臭氧氧化去除 IBP 效果的影响。

2 结果与讨论

2.1 单独 SAC 吸附 IBP 效果

不同 SAC 投加量对 IBP 的吸附效果如图 1 所示。可以看出,在吸附反应的前 5 min ,SAC 对 IBP 的吸附速率较快;IBP 的吸附去除率随 SAC 投加量的



$[\text{IBP}]_0 = 500 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 6.0 \pm 0.5$, $T = (21 \pm 2)^\circ\text{C}$

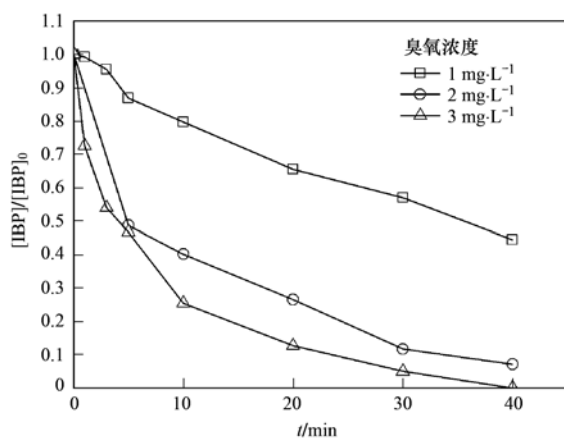
图1 SAC 投加量对 IBP 吸附效果影响

Fig. 1 Adsorption of IBP on SAC

增加而增加,但 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SAC 投加量对 IBP 的吸附去除效果相差不大. 总体来看, SAC 对 IBP 的吸附效果不太理想, SAC 投加量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,经过 40 min 的吸附作用, IBP 的吸附去除率仅为 13.03%, 即使 SAC 投加量增加至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,经过 40 min 的吸附作用, IBP 的吸附去除率也只能达到 44.56%. 前期研究发现 SAC 表面以酸性官能团为主,其表面零电荷 pH 值为 2.79,在 $\text{pH } 6.0 \pm 0.5$ 的条件下,其表面带有负电荷,而 IBP 的 pK_a 为 4.9,并且含有一个羧基,在当前反应条件下, IBP 主要以其负离子形式存在,由于静电排斥作用, SAC 对 IBP 的吸附作用较弱.

2.2 单独臭氧氧化对 IBP 的去除效果

不同臭氧投加量条件下,单独臭氧氧化对 IBP 的去除效果如图 2 所示. 随着臭氧投加量的增加, IBP 的去除率随之增加,当臭氧浓度由 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高到 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, IBP 的去除率快速提高, IBP 的去除率由 55.6% 升高到 92.9%; 当臭氧投加量继续增加至 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, IBP 去除率继续增加,但增速变缓. 臭氧投量为 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氧化反应时间为 40 min 时, IBP 去除率达到 100%.



$[\text{IBP}]_0 = 500 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 6.0 \pm 0.5$, $T = (21 \pm 2) ^\circ\text{C}$

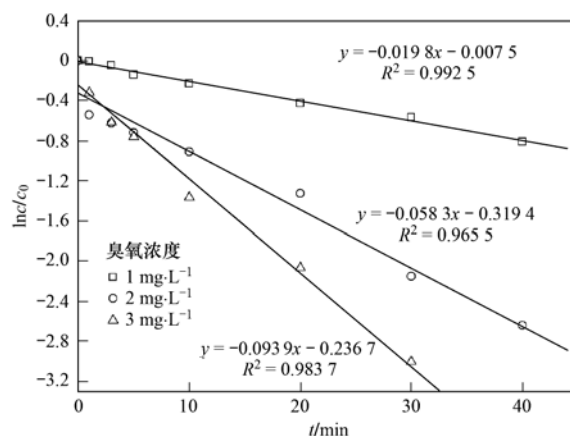
图2 不同臭氧投加量对 IBP 去除效果影响

Fig. 2 Degradation of IBP from water by single ozonation

图 3 为不同臭氧投量下,单独臭氧氧化去除 IBP 的假一级反应动力学拟合. 可以看出,臭氧氧化 IBP 的表观速率常数随臭氧投量增加而增加,当臭氧投量由 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,反应动力学常数由 0.0198 min^{-1} 升高至 0.0939 min^{-1} , 升高大约 4 倍.

2.3 SAC 催化臭氧氧化去除水中 IBP 效能

SAC 催化臭氧氧化、单独臭氧氧化、单独 SAC 吸附这 3 种工艺对水中 IBP 的去除效果对比如图 4

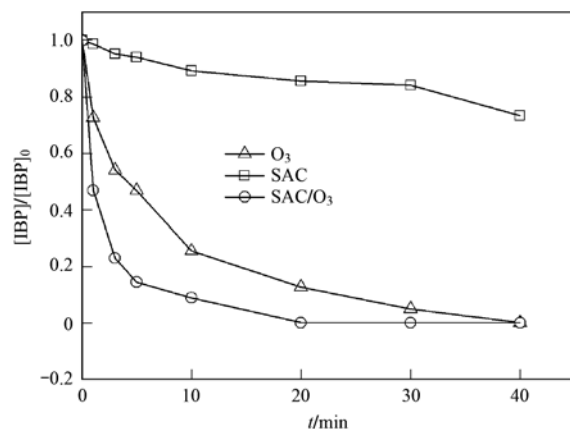


$[\text{IBP}]_0 = 500 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 6.0 \pm 0.5$, $T = (21 \pm 2) ^\circ\text{C}$

图3 单独臭氧氧化 IBP 的假一级反应动力学拟合

Fig. 3 Pseudo first-order kinetics of IBP during single ozonation

所示. 明显看出,在 SAC/臭氧体系中, IBP 的去除速率大大提高, IBP 完全去除的反应时间由单独臭氧氧化的 40 min 缩短至 20 min. 当反应时间为 5 min 时,单独臭氧氧化对 IBP 的去除率为 53.29%, 单独 SAC 对 IBP 的吸附去除率仅为 5.97%, 而 SAC 催化臭氧氧化对 IBP 的去除率却达到了 85.53%, 远远高于单独臭氧氧化和单独 SAC 吸附二者去除作用之和,说明 SAC/臭氧反应体系中应该产生了氧化能力更强的活性物种.



$[\text{O}_3] = 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $[\text{SAC}] = 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

$[\text{IBP}]_0 = 500 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 6.0 \pm 0.5$, $T = (21 \pm 2) ^\circ\text{C}$

图4 SAC 催化臭氧氧化去除水中 IBP 效能

Fig. 4 Catalytic ozonation of IBP from water by SAC

2.4 臭氧投加量对 SAC 催化臭氧去除 IBP 的影响

在 SAC 投量为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,考察了臭氧投加量分别为 0.75、1、2、3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对 IBP 的去除效果,如图 5 所示. 可以看出,在低臭氧投加量条件下 ($0.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), IBP 的去除效果相对较差,去除率均低于 50%; 当臭氧投加量增加至 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上时, IBP 的去除率快速提高. 分析

可能的原因^[21]有:①SAC 表面有较丰富的官能团,能够与臭氧发生催化反应,促进臭氧分解产生·OH,从而加速了 IBP 的分解;②SAC 有较大的比表面积,可将 IBP 和臭氧分子同时富集到其表面,进而提高臭氧直接氧化去除 IBP 的速度.但从前面的试验结果分析,SAC 投量为 25 mg·L⁻¹,其 IBP 接触反应 40 min 时,仅可以吸附 26.77% 的 IBP,因此第 2 种可能原因在 SAC/臭氧反应体系中作用很小.

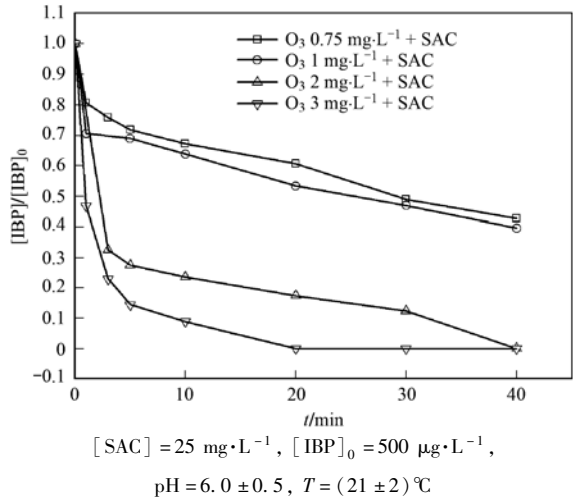


图 5 不同臭氧投加量对 SAC 催化臭氧去除 IBP 的影响
Fig. 5 Effect of ozone concentration on IBP removal by catalytic ozonation by SAC

2.5 不同 SAC 投量对其催化臭氧去除 IBP 效果影响

从图 6 可以看出,当臭氧投加量为 1.0 mg·L⁻¹,SAC 投加量分别为 10、25 和 50 mg·L⁻¹ 时,IBP 的去除效果并不理想;当 SAC 投加量增加至 100 mg·L⁻¹ 时,经过 40 min 的反应,IBP 的去除

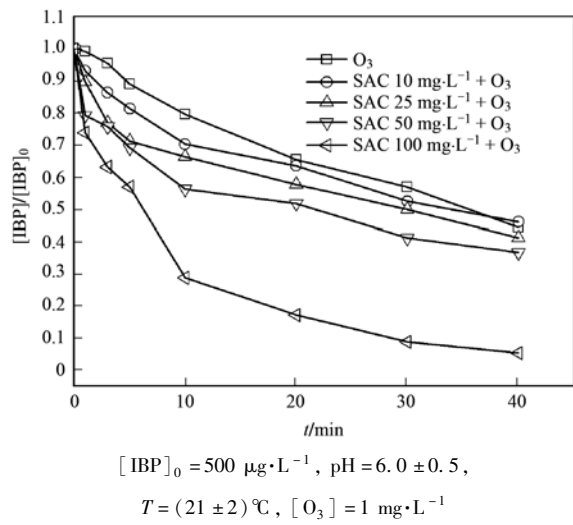


图 6 不同 SAC 投加量对 IBP 的催化效果
Fig. 6 Effect of SAC concentration on IBP removal by catalytic ozonation by SAC

率达到了 94.8%. 动力学拟合表明,SAC 催化臭氧氧化 IBP 符合假一级反应动力学.表 1 为在臭氧投量为 1.0 mg·L⁻¹,不同 SAC 投加量下 IBP 的一级降解速率常数.可以看出,SAC 催化臭氧氧化 IBP 的反应可分为两段,第一段为快速反应阶段(0~5 min),第二段是慢速反应阶段(5~40 min).在快速反应阶段,SAC 的加入很明显提高了 IBP 的降解速率,并且随着 SAC 投加量的增加,IBP 的去除率也随之增加,当 SAC 投量为 100 mg·L⁻¹ 时,IBP 的降解速率是单独臭氧氧化去除 IBP 速率的 5 倍.一般认为,在快速反应阶段会有·OH 产生^[22],其与 IBP 的反应速率常数高达 10⁹ L·(mol·s)⁻¹,因此 IBP 的去除率得到显著提高.而在慢速反应阶段,IBP 的降解速率低于快速反应阶段,这是因为在快速反应阶段,SAC 可以促进臭氧分解产生·OH,造成臭氧大量消耗,到了慢速反应阶段,臭氧浓度已经很低,与 SAC 作用产生的自由基量也随之减少,而单独 SAC 吸附对 IBP 的去除速率要远远慢于·OH 存在时.这说明·OH 在 SAC 催化臭氧氧化 IBP 反应体系中占据主要地位.而在慢速反应阶段,SAC 投加量为 10、25 和 50 mg·L⁻¹ 时,去除 IBP 的表观速率常数低于单独臭氧氧化,单独臭氧氧化去除 IBP 的两阶段的反应速率常数都相差不多,这说明只有臭氧存在时,氧化 IBP 的反应以一个直接反应与间接反应都存在的稳定状态进行.但当 SAC 存在时,SAC 可加速臭氧的分解,使得臭氧浓度降低较快.在慢速反应阶段,臭氧浓度很低,低于单独臭氧存在时的臭氧浓度(见图 7),此时的间接反应所占比重减少,主要是 SAC 吸附去除 IBP 为主.当 SAC 投加量为 100 mg·L⁻¹ 和 50 mg·L⁻¹ 时,SAC 对 IBP 的吸附效果相差不多.但是在臭氧存在条件下,二者对 IBP 的去除速率相差较大,这说明 SAC 在反应体系中起到的主要作用不是富集臭氧和 IBP,而是与臭氧作用形成·OH.有研究表明^[23],活性炭在催化臭氧氧化有机物的反应中,可能如同碱性溶液中 OH⁻ 作用一样,能引发臭氧链式分解反

表 1 SAC 催化臭氧氧化 IBP 速率常数

Table 1 Pseudo-first-order rate constants of IBP degradation in the catalytic ozonation processes				
SAC 投加量 /mg·L ⁻¹	第一阶段表观速率常数 /min ⁻¹	R ²	第二阶段表观速率常数 /min ⁻¹	R ²
0	0.028 0	0.914 8	0.018 9	0.988 9
10	0.039 8	0.971 8	0.014 5	0.987 9
25	0.067 1	0.962 3	0.015 8	0.992 6
50	0.063 2	0.796 2	0.015 2	0.969 0
100	0.102 7	0.860 9	0.057 9	0.996 9

应,加速臭氧分解生成如 $\cdot\text{OH}$ 等自由基. 在本研究中 SAC 与臭氧如何作用产生 $\cdot\text{OH}$ 需要进一步深入研究.

从图 7 可以看出, SAC 的加入显著提高了臭氧的分解速率,且随着 SAC 投加量的增加,臭氧的分解速率加快. 这说明 SAC 的增加有助于臭氧分解产生 $\cdot\text{OH}$. 这一说法与很多活性炭催化臭氧氧化有机物的反应机制一致^[23~25]. 在 SAC 投加量分别为 10、25、50 和 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,反应 20 min 后,臭氧的剩余浓度分别为 56.81%、34.01%、29.92% 和 11.74%,验证了前面所述在慢速反应阶段,臭氧浓度已经很低,因此 $\cdot\text{OH}$ 的产生量也随之减少.

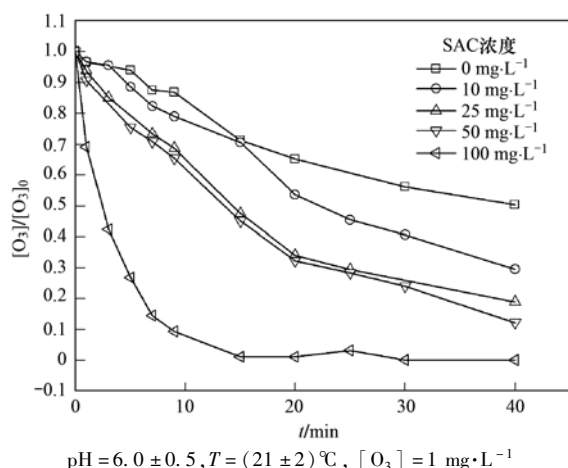


图 7 不同 SAC 投加量对臭氧衰减的影响

Fig. 7 Effect of SAC dose on the ozone decomposition in the presence of SAC

3 结论

(1) 单独臭氧氧化对布洛芬的去除率随着臭氧投加量的增加而增加,臭氧浓度增加至 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应时间为 40 min 时, IBP 浓度低于检出限.

(2) SAC 对 IBP 的吸附效果不佳,活性炭浓度增加至 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, IBP 的吸附去除率仅为 44.56%.

(3) SAC 具有较好的催化活性,能够加速对 IBP 的去除,并且随着臭氧浓度和活性炭浓度增加,催化活性越来越显著.

(4) 在 SAC 存在时,臭氧对 IBP 的去除分为快速反应阶段和慢速反应阶段,快速反应阶段可能以 $\cdot\text{OH}$ 与 IBP 反应为主,而慢速反应阶段以单独 SAC 吸附去除 IBP 为主.

(5) SAC 可以催化臭氧分解,随着 SAC 投加量的增加,臭氧分解速率加快, SAC 的介入有利于臭氧链式反应的进行.

参考文献:

- [1] Halling-Sørensen B, Nielsen S N, Lanzky P F, *et al.* Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment—a review[J]. *Chemosphere*, 1998, **36**(2): 357-393.
- [2] Löffler D, Römbke J, Meller M, *et al.* Environmental fate of pharmaceuticals in water/sediment systems[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(14): 5209-5218.
- [3] Zhao J L, Ying G G, Wang L, *et al.* Determination of phenolic endocrine disrupting chemicals and acidic pharmaceuticals in surface water of the Pearl Rivers in South China by gas chromatography-negative chemical ionization-mass spectrometry[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(2): 962-974.
- [4] Wang L, Ying G G, Zhao J L, *et al.* Occurrence and risk assessment of acidic pharmaceuticals in the Yellow River, Hai River and Liao River of north China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3139-3147.
- [5] Carballa M, Omil F, Alder A C, *et al.* Comparison between the conventional anaerobic digestion of sewage sludge and its combination with a chemical or thermal pre-treatment concerning the removal of pharmaceuticals and personal care products[J]. *Water Science and Technology*, 2006, **53**(8): 109-117.
- [6] Huber M M, Canonica S, Park G Y, *et al.* Oxidation of pharmaceuticals during ozonation and advanced oxidation processes[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(5): 1016-1024.
- [7] Jans U, Hoigné J. Activated carbon and carbon black catalyzed transformation of aqueous ozone into OH-radicals[J]. *Ozone: Science & Engineering*, 1998, **20**(1): 67-90.
- [8] Valdés H, Zaror C A. Heterogeneous and homogeneous catalytic ozonation of benzothiazole promoted by activated carbon: kinetic approach[J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(7): 1131-1136.
- [9] Boehm H P. Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment[J]. *Carbon*, 2002, **40**(2): 145-149.
- [10] Sánchez-Polo M, Leyva-Ramos R, Rivera-Utrilla J. Kinetics of 1, 3, 6-naphthalenetrisulphonic acid ozonation in presence of activated carbon[J]. *Carbon*, 2005, **43**(5): 962-969.
- [11] Faria P C C, Órfão J J M, Pereira M F R. Ozone decomposition in water catalyzed by activated carbon: influence of chemical and textural properties[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, **45**(8): 2715-2721.
- [12] 刘海龙, 焦茹媛, 赵霞, 等. 活性炭催化臭氧氧化表面活性剂的研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 699-704.
- [13] Zhang F S, Nriagu J O, Itoh H. Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge[J]. *Water Research*, 2005, **39**(2-3): 389-395.
- [14] Rio S, Coq L L, Faur C, *et al.* Preparation of adsorbents from sewage sludge by steam activation for industrial emission treatment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2006, **84**(4): 258-264.
- [15] Graham N, Chen X G, Jayaseelan S. The potential application of activated carbon from sewage sludge to organic dyes removal[J].

- Water Science and Technology, 2001, **43**(2): 245-252.
- [16] Chen X G, Jeyaseelan S, Graham N. Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge [J]. Waste Management, 2002, **22**(7): 755-760.
- [17] Seredych M, Bandosz T J. Sewage sludge as a single precursor for development of composite adsorbents/catalysts[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, **128**(1): 59-67.
- [18] Rozada F, Otero M, Morán A, *et al.* Adsorption of heavy metals onto sewage sludge-derived materials [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(14): 6332-6338.
- [19] Vidic R D, Tessmer C H, Uranowski L J. Impact of surface properties of activated carbons on oxidative coupling of phenolic compounds[J]. Carbon, 1997, **35**(9): 1349-1359.
- [20] Bader H, Hoigné J. Determination of ozone in water by the indigo method[J]. Water Research, 1981, **15**(4): 449-456.
- [21] 马军, 张涛, 陈忠林, 等. 水中羟基氧化铁催化臭氧分解和氧化痕量硝基苯的机理探讨[J]. 环境科学, 2005, **25**(2): 78-82.
- [22] Álvarez P M, García-Araya J F, Beltrán F J, *et al.* The influence of various factors on aqueous ozone decomposition by granular activated carbons and the development of a mechanistic approach[J]. Carbon, 2006, **44**(14): 3102-3112.
- [23] 隋铭皓, 马军. 臭氧/活性炭对硝基苯的去除效果研究[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(10): 70-73.
- [24] Von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part I. Ozonation of drinking water: part I. Oxidation kinetics and product formation[J]. Water Research, 2003, **37**(7): 1443-1467.
- [25] Beltrán F J, Pocostales P, Alvarez P, *et al.* Diclofenac removal from water with ozone and activated carbon [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **163**(2-3): 768-776.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingtian, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人