

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

**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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 ..... 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM<sub>2.5</sub>区域来源解析 ..... 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 ..... 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM<sub>10</sub>中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 ..... 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM<sub>2.5</sub>中硫酸盐来源 ..... 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 ..... 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>2.5-10</sub>中水溶性无机离子特征 ..... 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 ..... 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 ..... 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 ..... 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 ..... 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 ..... 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 ..... 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 ..... 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 ..... 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 ..... 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 ..... 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 ..... 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 ..... 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 ..... 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 ..... 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 ..... 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 ..... 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 ..... 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 ..... 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 ..... 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 ..... 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 ..... 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面HNO<sub>3</sub>的光解 ..... 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 ..... 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 ..... 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 ..... 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 ..... 李静,李文英(1385)

Fe<sup>3+</sup>对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N<sub>2</sub>O释放的影响 ..... 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 ..... 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 ..... 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD<sub>5</sub>/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 ..... 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 ..... 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 ..... 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 ..... 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 ..... 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 ..... 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 ..... 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 ..... 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 ..... 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钨交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 ..... 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 ..... 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 ..... 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 ..... 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 ..... 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

## γ 辐照降解水中的盐酸环丙沙星的研究

祝胜男<sup>1</sup>, 郭照冰<sup>1\*</sup>, 赵永富<sup>2</sup>, 葛鑫<sup>1</sup>, 魏英<sup>1</sup>, 陈姝<sup>1</sup>, 王静<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省农业科学研究院原子能农业利用研究所, 南京 210044)

**摘要:** 本研究重点考察初始浓度、pH 值、不同添加剂、复合污染物对盐酸环丙沙星 γ 辐照降解效果的影响。结果表明, γ 辐照可以有效去除盐酸环丙沙星; 低浓度和强酸性条件有利于盐酸环丙沙星的 γ 辐照降解; 引入 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、甲醇后, 盐酸环丙沙星的降解受到抑制, 可以推断盐酸环丙沙星降解主要基于·OH 自由基的氧化和直接受到辐照激发降解。选择具有致癌性的污染物 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与盐酸环丙沙星混合后辐照, 两种污染物的去除率均得到提高, 在吸收剂量为 400 Gy 时, 盐酸环丙沙星与 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的去除率分别提高 18.74% 与 1.81%。100 mg·L<sup>-1</sup> 盐酸环丙沙星经过 6 000 Gy γ 辐照降解后, TOC 与 COD 的去除率分别为 15.22% 与 61.44%。

**关键词:** γ 辐照; 盐酸环丙沙星; 降解; 复合污染; ·OH 自由基氧化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1332-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.026

## Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation

ZHU Sheng-nan<sup>1</sup>, GUO Zhao-bing<sup>1\*</sup>, ZHAO Yong-fu<sup>2</sup>, GE Xin<sup>1</sup>, WEI Ying<sup>1</sup>, CHEN Shu<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Application of Atomic Energy in Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Effects of initial concentrations, pH values, different additives and composite pollutants on ciprofloxacin hydrochloride removal using γ irradiation were investigated. The experiments results showed γ irradiation could effectively remove ciprofloxacin hydrochloride; low initial concentration and strongly acidic condition were favorable for CIP removal using γ irradiation; the degradation of CIP was inhibited upon the addition of CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> and methanol, which indicated that the degradation of CIP might be mainly ascribed to ·OH oxidation and the direct decomposition of CIP molecules induced by irradiation. BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> showed a synergistic effect with CIP in degradation of the composite pollutants when mixed together with CIP for γ irradiation, and the removal rates of both pollutants were improved. At an absorbed dose of 400 Gy, the removal rates of CIP and BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> were increased by 18.74% and 1.81%, respectively. The removal rates of TOC and COD were 15.22% and 61.44%, respectively, when the 100 mg·L<sup>-1</sup> CIP was degraded by γ irradiation at the absorbed dose of 6 000 Gy.

**Key words:** γ irradiation; ciprofloxacin hydrochloride; degradation; composite pollution; ·OH oxidation

随着生活水平的不断提高,人们对身体健康和生态环境越来越关注,环境中残留的抗生素受到人们的广泛重视<sup>[1]</sup>。盐酸环丙沙星(CIP)属于第三代喹诺酮类抗生素,喹诺酮类是一类较新的抗生素,体内代谢率低于 25%,大部分以原药形式排出体外<sup>[2]</sup>。研究表明,喹诺酮类抗生素广泛存在于水环境<sup>[3]</sup>、土壤<sup>[4]</sup>、河流沉积物<sup>[5,6]</sup>、动植物体<sup>[7]</sup>、动物粪便<sup>[8]</sup>中。环境中残留的抗生素使细菌产生耐药性<sup>[9]</sup>,对人类和生态系统造成潜在危害<sup>[10,11]</sup>。

目前,国内外对水体中的 CIP 的降解方法主要有 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 联合光降解<sup>[12,13]</sup>、TiO<sub>2</sub><sup>[14]</sup>、O<sub>3</sub><sup>[15]</sup>、超声<sup>[16]</sup>、吸附<sup>[17]</sup>等。但是这些方法都需要另外添加试剂,容易产生二次污染,且降解不彻底。γ 辐照已经证明是非常有前途的高级氧化方法<sup>[18,19]</sup>。它的基本原理是:水受到辐射分解,生成羟基自由基

(·OH)、氢原子(H·)、水合自由电子(e<sub>aq</sub><sup>-</sup>)以及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 等具有极高化学反应活性的物质<sup>[20]</sup>,然后与水中有机污染物发生一系列反应,使污染物降解为易生物降解的物质甚至矿化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sup>[21,22]</sup>。它不需要额外加入试剂,反应速率快,有广泛的适用性,γ 辐照多用来去除难降解的有机污染物<sup>[23~25]</sup>。最近,抗生素因为其难以被传统水处理工艺去除<sup>[26]</sup>,γ 辐照降解抗生素越来越受到关注<sup>[27~30]</sup>。γ 辐照降解 CIP 的研究未见文献报道。本文主要研究

收稿日期: 2014-10-02; 修订日期: 2014-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373023); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013007-03); 江苏省高校科研成果产业化推进项目; 江苏省“333 高层次人才培养工程”项目; 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(201410300011Z)

作者简介: 祝胜男(1989~),女,硕士,主要研究方向为环境污染控制, E-mail: zhushengnan1234@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: guocumt@nuist.edu.cn

CIP 在不同影响因子下的降解效果,并初步探讨  $\gamma$  辐照降解 CIP 的机制,以期为辐照去除抗生素废水提供理论依据,同时为  $\gamma$  辐照去除复合污染提供一个新的研究思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

CIP (纯度 > 98.0%, 日本 TCI), 甲醇  $\text{CH}_3\text{OH}$ 、乙腈  $\text{CH}_3\text{CN}$  为色谱纯 (美国 TEDIA 公司), 其他试剂均为国产分析纯。实验用水均为超纯水, 电阻率为  $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  (美国 ELGA 公司)。

$\gamma$  辐照源为  $^{60}\text{Co}$  源 (江苏省农业科学院原子能所辐照中心 II 号辐照装置, 放射性活度为  $1.85 \times 10^{16} \text{ Bq}$ ), 保持所有样品距放射源中心的距离相同, 吸收剂量根据辐照时间调节, 用重铬酸银剂量计跟踪测定样品吸收的剂量。

主要实验仪器有 Waters e2695 Alliance HPLC 高效液相色谱仪 (美国 Waters 公司), 配有色谱柱 ( $4.6 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}, 5 \mu\text{m}$ , Agilent ZORBAX SB-C18) 和检测器 (Waters2998 PDA Detector 二级阵列管检测器); ICS-2000 离子色谱仪 (美国 Dionex 公司), 配有阴离子分析柱 (IonpacAs II-HC)、电导检测器和抑制器 (ASRS-4mm); 5B-1B 型多功能消解器 (青岛连华科技); CARY50 紫外可见分光光度计 (美国 Varian 公司); 有机碳分析仪 (德国 Elementar 公司)。

### 1.2 实验方法

将浓度为 1、2、10、20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 CIP 溶液, 进行不同剂量的  $\gamma$  辐照, 以研究 CIP 的初始浓度和吸收剂量对其降解效果的影响; 使用  $\text{NaOH}$  和  $\text{H}_2\text{SO}_4$  调节溶液的 pH, 使浓度为 20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 CIP 溶液的 pH 分别为 3、5、7、9、11, 之后进行不同剂量的  $\gamma$  辐照, 以研究溶液体系的酸碱性和对 CIP 降解效果的影响。

保持体系中 CIP 的浓度为 20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  的浓度分别为 10  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 20  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 甲醇的浓度分别为 0.5  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 1  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 进行不同剂量的  $\gamma$  辐照, 以考察不同添加剂对 CIP 降解效果的影响, 并初步探讨 CIP 的降解机制; 保持体系中 CIP 的浓度为 50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{BrO}_3^-$  的浓度为 5  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 以研究 CIP 与  $\text{BrO}_3^-$  的复合污染在不同剂量的  $\gamma$  辐照下的降解效果。

辐照浓度为 100  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 CIP 溶液, 用以研究 CIP 降解前后溶液中 TOC 和 COD 的变化。

### 1.3 分析方法

CIP 降解前后的浓度采用高效液相色谱仪进行测定。流动相: A 为 0.025  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  磷酸 (三乙胺调节  $\text{pH} = 3.0 \pm 0.1$ ), B 为乙腈, A: B = 85: 15, 流速: 1.0  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 柱温:  $30^\circ\text{C}$ , 进样量: 20  $\mu\text{L}$ , 检测波长: 277 nm;  $\text{BrO}_3^-$  处理前后的浓度用离子色谱测定。流动相: 30  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  KOH, 流速: 1  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 进样量: 25  $\mu\text{L}$ ; CIP 溶液辐照前后的 COD 采用重铬酸钾法测定; CIP 溶液辐照前后的 TOC 使用有机碳分析仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 CIP 的初始浓度对其 $\gamma$ 辐照降解的影响

初始浓度对  $\gamma$  辐照降解 CIP 的影响如图 1 所示, CIP 的降解效果受初始浓度的影响较大。在同一初始浓度下, 随着吸收剂量的增加, CIP 去除率升高, 但去除速率降低, 这可能是由于随着 CIP 的逐渐降解,  $\gamma$  辐照产生的  $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{H}\cdot$ 、 $\text{e}_{\text{aq}}^-$  等活性物质与 CIP 的碰撞几率减少, 导致反应速率降低。在同一剂量条件下, 初始浓度越低, CIP 的降解率越高。

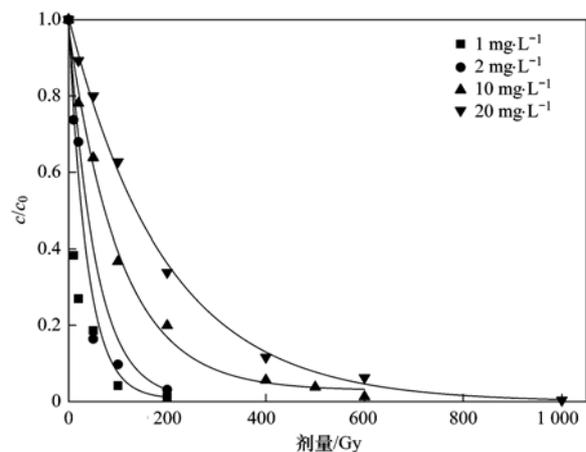


图 1 初始浓度对 CIP 的  $\gamma$  辐照降解的影响

Fig. 1 Effect of initial concentrations on the degradation of CIP under  $\gamma$  irradiation

随着吸收剂量的增加, CIP 的浓度不断降低且去除速率逐渐减少, 所以对 CIP 的去除率和吸收剂量进行了准一级反应动力学分析, 如式 1 所示:

$$-\ln[c/c_0] = kD \quad (1)$$

式中,  $c$  为辐照后浓度,  $c_0$  为初始浓度,  $k$  为降解剂量常数,  $D$  为吸收剂量。

经计算, 初始浓度为 1、2、10 和 20  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 降解剂量速率常数分别是 0.0185、0.0164、0.0067、0.0054  $\text{Gy}^{-1}$ , 相关系数分别为 0.9709、0.9081、0.9806、0.9911。说明 CIP 的降解过程符合准一级动力学模型, 其降解过程可以用准一级动

力学模型来描述,这表明  $\gamma$  辐照对低浓度 CIP 的去除效果更好. 当初始浓度分别为 1、2、10、20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, CIP 的去除率达到 95% 时, 所需的剂量分别为 106.66、120.15、399.37、584.83 Gy, 由此可见  $\gamma$  辐照可以有效降解 CIP, 且初始浓度越低所需的剂量越小.

2.2 pH 值对 CIP 的  $\gamma$  辐照降解效果的影响

溶液的 pH 对  $\gamma$  辐照降解 CIP 的影响如图 2 所示, pH 值一定程度上影响 CIP 的去除. 相同剂量时, 强酸性条件对 CIP 的去除有一定的促进作用. 这主要归因于不同 pH 条件下, 水经过  $\gamma$  辐照产生的活性粒子的数量会发生变化, 继而引起不同的反应. 在酸性条件时, 还原性的水合电子  $e_{\text{aq}}^-$  会被  $\text{H}^+$  所消耗[式(2)], 所以由  $e_{\text{aq}}^-$  引起的降解效率降低;  $e_{\text{aq}}^-$  的数量减少, 与  $\cdot\text{OH}$  反应几率降低,  $\cdot\text{OH}$  浓度升高, 与  $\cdot\text{OH}$  有关的反应增强[式(3)]; 碱性条件下,  $\text{OH}^-$  迅速与氧化性的  $\cdot\text{OH}$  反应, 生成弱氧化性的  $\text{O}^-$ , 从而降低水中的  $\cdot\text{OH}$  浓度[式(4)]<sup>[31]</sup>, 与  $\cdot\text{OH}$  有关的反应被削弱. CIP 在酸性条件下的降解受到促进, 表明 CIP 的  $\gamma$  辐照降解的反应途径可能是通过与  $\cdot\text{OH}$  反应完成的. 而  $\text{pH}=5$  时 CIP 的降解略微受到抑制, 这可能与溶液的 pH 值影响环丙沙星在水中的存在形态有关,  $\text{pH} 6.62 \sim 4.12$  时 CIP 分子共轭程度变大<sup>[32]</sup>.

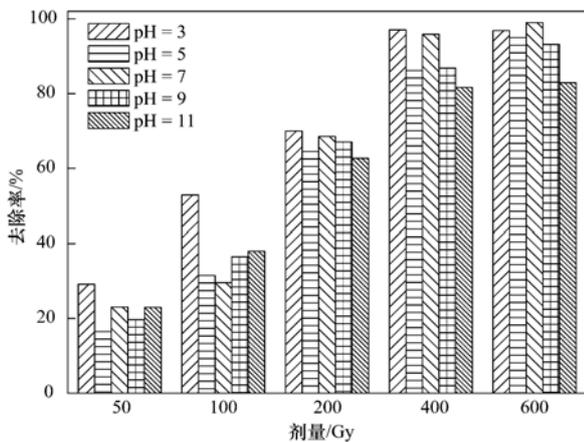
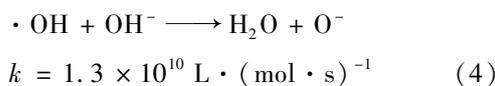
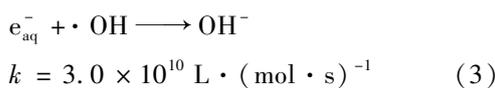
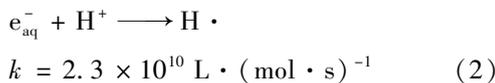


图 2 pH 值对 CIP 的  $\gamma$  辐照降解的影响

Fig. 2 Effect of pH on the degradation of CIP under  $\gamma$  irradiation

低剂量时, 酸性条件的促进效果明显. 在吸收剂量为 100 Gy, 溶液的 pH 为 3、5、7、9、11 时, CIP 的去除率分别为 52.88%、31.49%、29.57%、36.50%、37.99%. 而吸收剂量为 600 Gy, 溶液的 pH 为 3、5、7、9、11 时, CIP 的去除率分别为 96.85%、94.95%、98.99%、93.15%、82.90%, 说明在高剂量时, 酸性条件的促进效果不明显. 这是由于随着剂量增大, 辐照产生的活性粒子逐渐增多, 加速与 CIP 的反应.

2.3 各种添加剂对 CIP 的  $\gamma$  辐照降解的影响

$\text{CO}_3^{2-}$ 、甲醇对 CIP 的  $\gamma$  辐照降解的影响如图 3 所示.  $\text{CO}_3^{2-}$ 、甲醇的加入都可以一定程度地抑制 CIP 的降解效果, 且浓度越高抑制程度越强.

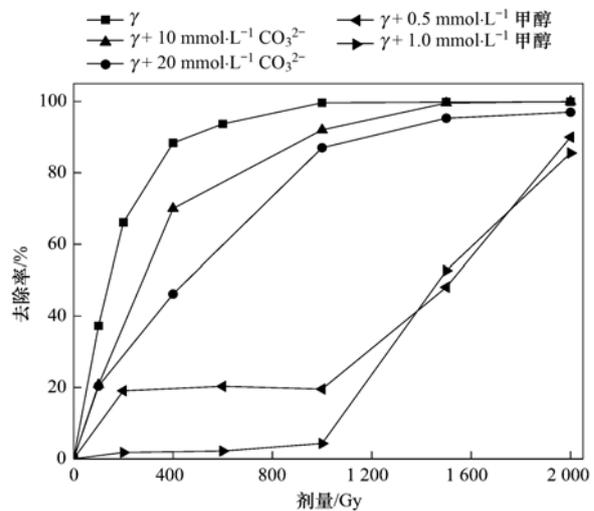


图 3 各种添加剂对 CIP 的  $\gamma$  辐照降解的影响

Fig. 3 Effects of various additives on the degradation of CIP under  $\gamma$  irradiation

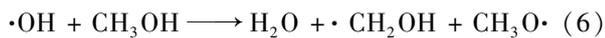
从中可以看出, 在吸收剂量是 400 Gy 时, 空白样的去除率为 88.36%, 体系中分别含有 10  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 20  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{CO}_3^{2-}$  时, 去除率为 69.99% 和 46.17%.  $\text{CO}_3^{2-}$  易与  $\cdot\text{OH}$  反应生成  $\text{OH}^-$  和  $\text{CO}_3^-$  [式(5)], 使溶液中的  $\cdot\text{OH}$  减少, 从而减少  $\cdot\text{OH}$  与 CIP 的反应几率<sup>[20]</sup>. 由此可见, CIP 的降解可能是基于  $\cdot\text{OH}$  的氧化.

为了进一步验证辐照降解 CIP 的机制, 选取甲醇作为  $\cdot\text{OH}$  自由基的消除剂, 降解效果的影响如图 3 所示. 从中可以看出, 在吸收剂量是 200 Gy 时, 空白样的去除率为 99.62%, 体系中分别含有 0.5  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 1  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  甲醇时, 去除率为 19.08% 和 1.77%. 甲醇与  $\cdot\text{OH}$  反应迅速, 而与溶剂中的  $e_{\text{aq}}^-$  和  $\text{H}\cdot$  的反应则弱得多[式(6)~(8)]. 甲醇大量消耗了水溶液中的  $\cdot\text{OH}$ , 抑制由  $\cdot\text{OH}$  引起的 CIP 去

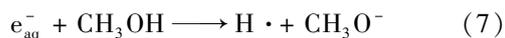
除<sup>[20,21]</sup>. 当吸收剂量小于1 000 Gy时, 甲醇对 CIP 降解的抑制效应明显, 而随着吸收剂量的不断增大, 辐照可以直接作用于环丙沙星分子, 所以吸收剂量大于1 000 Gy后, CIP 的降解率迅速升高. 说明环丙沙星的降解除了基于 $\cdot\text{OH}$ 的氧化, 也存在环丙沙星本身受到辐照激发后的直接分解.



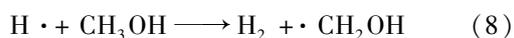
$$k = 3.9 \times 10^8 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$$



$$k = 4.7 \times 10^8 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$$



$$k = 1.0 \times 10^4 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$$



$$k = 2.6 \times 10^6 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$$

#### 2.4 复合污染对 CIP 的 $\gamma$ 辐照降解的影响

由上述实验结果可知, CIP 的降解主要通过 $\cdot\text{OH}$ 与其相互作用.  $\gamma$  辐照产生的活性粒子,  $e_{\text{aq}}^-$  和 $\cdot\text{OH}$ 可以反应生成  $\text{OH}^-$  [式(4)], 减少  $e_{\text{aq}}^-$  的数量, 就能减少 $\cdot\text{OH}$ 和  $e_{\text{aq}}^-$  复合, 从而增大 $\cdot\text{OH}$ 的数量, 促进 CIP 的降解. 基于这一思路, 选择具有氧化性的物质( $\text{BrO}_3^-$ )与 CIP 混合后进行  $\gamma$  辐照处理, 氧化性物质可以消耗  $e_{\text{aq}}^-$ , 这样可以提高 CIP 的去除率.  $\text{BrO}_3^-$  对 CIP 的  $\gamma$  辐照降解的影响如图 4 所示.

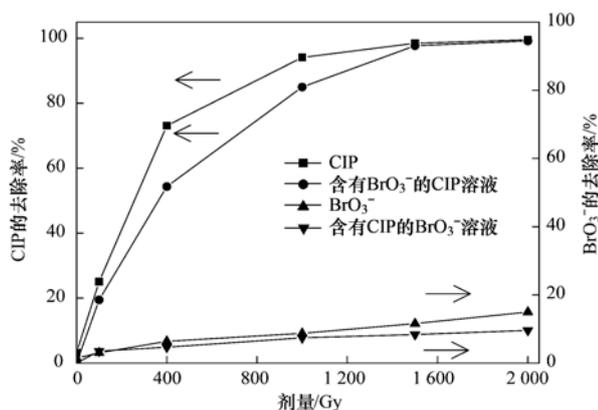


图 4  $\text{BrO}_3^-$  对 CIP 的  $\gamma$  辐照降解的影响

Fig. 4 Effects of  $\text{BrO}_3^-$  on the degradation of CIP under  $\gamma$  irradiation

从图 4 中可以看出,  $\text{BrO}_3^-$  与 CIP 复合污染在  $\gamma$  辐照条件下表现出一定的协同效应.  $\text{BrO}_3^-$  促进 CIP 的降解, 同时 CIP 也略微促进  $\text{BrO}_3^-$  的降解.  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{BrO}_3^-$  和  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CIP}$  混合后, 不辐照时, CIP 去除率为 3.20%,  $\text{BrO}_3^-$  去除率为 1.51%, 说明  $\text{BrO}_3^-$  可以直接与 CIP 反应, 有较少的  $\text{BrO}_3^-$  和 CIP 降解. 在吸收剂量是 400 Gy 时, CIP 的去除率

为 73.08%,  $\text{BrO}_3^-$  的去除率为 6.71%. 而相同剂量下, 单独辐照 CIP 溶液和  $\text{BrO}_3^-$  溶液, 去除率分别仅为 54.34% 和 4.89%. 这说明 CIP 和  $\text{BrO}_3^-$  复合后辐照的去除率都有不同程度的提高.

而溴酸盐作为潜在的致癌物, 很难被常规的水处理技术去除, 主要来源于含溴的原水在臭氧等高级氧化后形成<sup>[33]</sup>, 在我国很多地区均能检测到<sup>[34,35]</sup>. 与 CIP 复合后联合  $\gamma$  辐照, 两种物质的去除率均能得到一定程度的提高, 这为提高污染物的去除率以及辐照去除复合污染物提供了新思路.

#### 2.5 $\gamma$ 辐照降解前后 CIP 的 TOC 和 COD 变化比较

CIP 的  $\gamma$  辐照前后 TOC 和 COD 的变化如图 5 所示.  $\gamma$  辐照后 CIP 的浓度、TOC 和 COD 都有不同程度的减少. 从中可以看出,  $\gamma$  辐照过后  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CIP}$  的 TOC 变化并不明显. 吸收剂量分别为 400、1 000、2 000、4 000、6 000 Gy 时, TOC 的去除率只有 1.05%、5.61%、10.80%、10.83%、15.22%; COD 的去除率为 44.80%、46.59%、55.04%、57.09%、61.44%; 而 CIP 的去除率达到 42.28%、67.44%、89.70%、93.35%、99.75%.

吸收剂量是 6 000 Gy 时, CIP 辐照过后, COD 的去除率在 61.44%, 这说明经过辐照后体系有机物总量减少, 污染的程度减弱; TOC 的去除率仅为 15.22%, 但是 CIP 的去除率已经接近 100%. 这说明 CIP 经过  $\gamma$  辐照降解为其他物质. 但是只有一小部分矿化为无机物, 所以 TOC 的去除并不明显. 若要进一步矿化, 则需要加大剂量, 但是成本增加, 所以可以将  $\gamma$  辐照做为预处理, 再结合生物法等其他方法去除污染物.

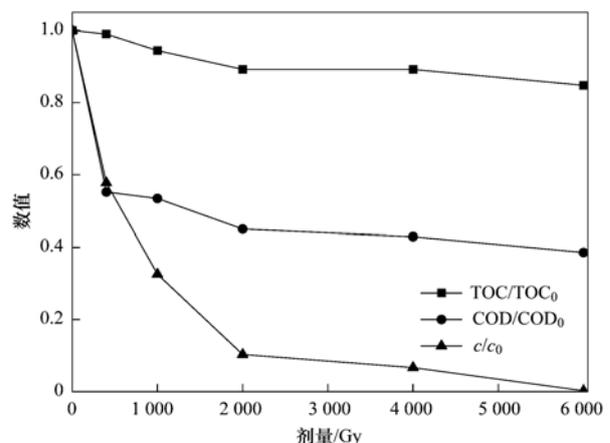


图 5 辐照前后 CIP 浓度、TOC 及 COD 的变化

Fig. 5 Changes in concentration of CIP, TOC and COD under  $\gamma$  irradiation

### 3 结论

(1)  $\gamma$  辐照可以有效去除 CIP,且降解过程符合一级动力学模型。低的初始浓度和强酸性条件有利于 CIP 的  $\gamma$  辐照去除。

(2) 引入  $\text{CO}_3^{2-}$ 、甲醇,会抑制 CIP 的  $\gamma$  辐照降解,说明  $\gamma$  辐照降解环丙沙星主要基于其本身受到辐照激发后降解和  $\cdot\text{OH}$  的进攻降解。

(3) CIP 经过  $\gamma$  辐照降解后, TOC 与 COD 数值均在一定程度上降低,部分 CIP 被矿化。

(4)  $\text{BrO}_3^-$  与 CIP 混合后进行  $\gamma$  辐照,表现出明显的协同降解效应,为复合污染物的  $\gamma$  辐照去除提供新视野。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Kümmerer K. Pharmaceuticals in the environment: sources, fate, effects and risks[M]. Berlin; Springer, 2008. 1-150.
- [ 2 ] Haque M M, Muneer M. Photodegradation of norfloxacin in aqueous suspensions of titanium dioxide [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **145**(1-2): 51-57.
- [ 3 ] 徐维海, 张干, 邹世春, 等. 典型抗生素类药物在城市污水处理厂中的含量水平及其行为特征 [ J ]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1779-1783.
- [ 4 ] 邵义萍, 莫测辉, 吴小莲, 等. 东莞市蔬菜基地土壤中喹诺酮类抗生素的污染特征研究 [ J ]. 环境科学学报, 2011, **31**(4): 839-845.
- [ 5 ] Jiang Y H, Li M X, Guo C S, *et al.* Distribution and ecological risk of antibiotics in a typical effluent-receiving river (Wangyang River) in north China [ J ]. Chemosphere, 2014, **112**: 267-274.
- [ 6 ] 聂湘平, 何秀婷, 杨永涛, 等. 珠江三角洲养殖水体中喹诺酮类药物残留分析 [ J ]. 环境科学, 2009, **30**(1): 266-270.
- [ 7 ] 吴小莲, 莫测辉, 严青云, 等. 东莞市蔬菜基地蔬菜中喹诺酮类抗生素污染特征及健康风险 [ J ]. 中国环境科学, 2013, **33**(5): 910-916.
- [ 8 ] 邵义萍, 罗晓栋, 莫测辉, 等. 广东省畜牧粪便中喹诺酮类和磺胺类抗生素的含量与分布特征研究 [ J ]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1188-1193.
- [ 9 ] Ruiz J. Mechanisms of resistance to quinolones: target alterations, decreased accumulation and DNA gyrase protection [ J ]. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2003, **51**(5): 1109-1117.
- [ 10 ] Galatti L, Giustini S E, Sessa A, *et al.* Neuropsychiatric reactions to drugs: an analysis of spontaneous reports from general practitioners in Italy [ J ]. Pharmacological Research, 2005, **51**(3): 211-216.
- [ 11 ] Gould J W, Mercuric M G, Elmets C A. Cutaneous photosensitivity diseases induced by exogenous agents [ J ]. Journal of the American Academy of Dermatology, 1995, **33**(4): 551-573.
- [ 12 ] De Lima Perini J A, Perez-Moya M, Nogueira R F P. Photo-Fenton degradation kinetics of low ciprofloxacin concentration using different iron sources and pH [ J ]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2013, **259**: 53-58.
- [ 13 ] 何占伟, 刘国光, 刘海津, 等. 水体中不同形态氮对环丙沙星溶液光降解影响 [ J ]. 环境科学学报, 2011, **31**(11): 2409-2415.
- [ 14 ] An T C, Yang H, Li G Y, *et al.* Kinetics and mechanism of advanced oxidation processes ( AOPs ) in degradation of ciprofloxacin in water [ J ]. Applied Catalysis B: Environmental, 2010, **94**(3-4): 288-294.
- [ 15 ] De Witte B, Van Langenhove H, Demeestere K, *et al.* Ciprofloxacin ozonation in hospital wastewater treatment plant effluent: Effect of pH and  $\text{H}_2\text{O}_2$  [ J ]. Chemosphere, 2010, **78**(9): 1142-1147.
- [ 16 ] De Bel E, Dewulf J, Witte B D, *et al.* Influence of pH on the sonolysis of ciprofloxacin: biodegradability, ecotoxicity and antibiotic activity of its degradation products [ J ]. Chemosphere, 2009, **77**(2): 291-295.
- [ 17 ] 高鹏, 莫测辉, 李彦文, 等. 高岭土对喹诺酮类抗生素吸附特性的初步研究 [ J ]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1740-1744.
- [ 18 ] Getoff N. Radiation-induced degradation of water pollutants: state of the art [ J ]. Radiation Physics and Chemistry, 1996, **47**(4): 581-593.
- [ 19 ] Wang J L, Wang J Z. Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **143**(1-2): 2-7.
- [ 20 ] 吴明红, 包伯荣. 辐射技术在环境保护中的应用 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 1-200.
- [ 21 ] Basfar A A, Mohamed K A, Al-Abduly A J, *et al.* Radiolytic degradation of atrazine aqueous solution containing humic substances [ J ]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(3): 948-953.
- [ 22 ] Borrelly S I, Cruz A C, Del Mastro N L, *et al.* Radiation processing of sewage and sludge. A review [ J ]. Progress in Nuclear Energy, 1998, **33**(1): 3-21.
- [ 23 ] 万建信, 何仕均, 孙伟华, 等. 造纸废水的电离辐射预处理工艺研究 [ J ]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1638-1643.
- [ 24 ] 彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 等. 氯酚溶液的  $\gamma$  辐照还原降解研究 [ J ]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1411-1415.
- [ 25 ] 李杰, 徐殿斗, 徐刚, 等. 四溴双酚 A 的辐照降解研究 [ J ]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1587-1590.
- [ 26 ] Watkinson A J, Murby E J, Costanzo S D. Removal of antibiotics in conventional and advanced wastewater treatment: Implications for environmental discharge and wastewater recycling [ J ]. Water Research, 2007, **41**(18): 4164-4176.
- [ 27 ] Guo Z B, Zhou F, Zhao Y F, *et al.* Gamma irradiation-induced sulfadiazine degradation and its removal mechanisms [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2012, **191**: 256-262.
- [ 28 ] Sánchez-Polo M, López-Peñalver J, Prados-Joya G, *et al.* Gamma irradiation of pharmaceutical compounds, nitroimidazoles, as a new alternative for water treatment [ J ]. Water Research, 2009, **43**(16): 4028-4036.

- [29] Yu S, Lee B, Lee M, *et al.* Decomposition and mineralization of cefaclor by ionizing radiation: kinetics and effects of the radical scavengers[J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(11): 2106-2112.
- [30] Kim H Y, Jeon J, Yu S, *et al.* Reduction of toxicity of antimicrobial compounds by degradation processes using activated sludge, gamma radiation, and UV[J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(10): 2480-2487.
- [31] Basfar A A, Khan H M, Al-Shahrani A A. Trihalomethane treatment using gamma irradiation; kinetic modeling of single solute and mixtures [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2005, **72**(5): 555-563.
- [32] 刘翠格, 徐怡庄, 魏永巨, 等. 环丙沙星的光谱性质、质子化作用与荧光量子产率[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(9): 1446-1450.
- [33] Butler R, Godley A, Lytton L, *et al.* Bromate environmental contamination: Review of impact and possible treatment [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2005, **35**(3): 193-217.
- [34] 杨永亮, 刘崴, 刘晓端, 等. 辽宁省西部和沈阳地区河水及地下水中溴的分布与污染特征[J]. *环境化学*, 2009, **28**(6): 924-928.
- [35] 张萍, 史亚利, 蔡亚岐, 等. 离子色谱-质谱联用测定瓶装水中的高氯酸盐和溴酸盐[J]. *环境化学*, 2007, **26**(4): 544-546.

## CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America .....	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Beijing in January 2013 .....	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai .....	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM <sub>10</sub> -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen .....	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014 .....	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>2.5-10</sub> in Mountain Background Region of East China in Spring .....	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves .....	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province .....	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen .....	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes .....	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards .....	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen .....	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport .....	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary .....	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season .....	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event .....	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources .....	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period .....	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary .....	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake .....	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond .....	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer .....	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study .....	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using $\gamma$ Irradiation .....	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony .....	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation .....	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol .....	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO <sub>3</sub> on the $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Films Under 308 nm UV Light .....	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode .....	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis .....	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i> .....	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water .....	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process .....	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System .....	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD <sub>5</sub> /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor .....	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing .....	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province .....	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain .....	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil .....	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions .....	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County .....	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure .....	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead .....	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling .....	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content .....	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area .....	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase .....	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs .....	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

# 《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行