

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 ..... 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 ..... 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 ..... 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM<sub>2.5</sub>中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 ..... 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 ..... 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM<sub>2.5</sub>中碳组分的污染特征 ..... 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM<sub>2.5</sub>排放特性分析 ..... 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 ..... 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 ..... 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细微颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究 ..... 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 ..... 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 ..... 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 ..... 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 ..... 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 ..... 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 ..... 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 ..... 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 ..... 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 ..... 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 ..... 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 ..... 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 ..... 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 ..... 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 ..... 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 ..... 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 ..... 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 ..... 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 ..... 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 ..... 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 ..... 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 ..... 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 ..... 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 ..... 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 ..... 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 ..... 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 ..... 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 ..... 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 ..... 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

*Fontibacter* sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 ..... 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 ..... 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 ..... 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 ..... 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 ..... 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 ..... 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 ..... 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次分布特征 ..... 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ<sup>13</sup>C值的影响 ..... 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NO、CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放的影响 ..... 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM<sub>2.5</sub>能力研究 ..... 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 ..... 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO<sub>2</sub>排放的时空特点分析 ..... 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 ..... 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

# Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA 可见光催化剂的制备及其降解 2-氯苯酚的研究

王冉<sup>1</sup>, 周雪峰<sup>2</sup>, 胡学香<sup>2</sup>, 胡春<sup>2\*</sup>

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 通过沉积-沉淀法将Cu<sub>2</sub>O、Ag-AgBr负载在介孔 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (MA)上制备了等离子体诱导可见光催化剂Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA. 研究了其在可见光照( $\lambda > 420$  nm)下的催化性能. 通过XRD、XPS和UV-vis吸收光谱的去卷积分析表明, 表面银以Ag<sup>+</sup>和Ag<sup>0</sup>形式共存. 结果表明, Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA对难降解有机物2-氯苯酚(2-CP)显示出很高的可见光催化去除效率. 同时Cu<sub>2</sub>O的掺入, 显著抑制了降解过程中Ag<sup>+</sup>的溶出. 自由基捕获剂的影响实验表明, h<sup>+</sup>、O<sub>2</sub><sup>-</sup>和·OH是反应中最重要的活性物种.

**关键词:** Cu<sub>2</sub>O; 可见光催化剂; 等离子体; 2-CP; 活性物种

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2014)09-3417-05 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2014.09.023

## Synthesis of Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol

WANG Ran<sup>1</sup>, ZHOU Xue-feng<sup>2</sup>, HU Xue-xiang<sup>2</sup>, HU Chun<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA plasmon photocatalyst was prepared by the co-deposition of Cu<sub>2</sub>O and Ag-AgBr nanoparticles on mesoporous alumina (MA). The samples were characterized by means of X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and diffuse reflectance UV-vis spectra (UV-vis DRS). The results showed that both Ag<sup>+</sup> and Ag<sup>0</sup> existed on the surface. The photocatalytic activity of the samples prepared were evaluated by degradation of 2-chlorophenol (2-CP) under visible light ( $\lambda > 420$  nm) irradiation. The results showed that the catalyst had high photocatalytic activity for the degradation of 2-CP. Meanwhile, the doping of Cu<sub>2</sub>O nanoparticles significantly inhibited the release of silver ions during the photocatalytic reaction, which improved the photostability of the catalyst. Analyses on the effects of various scavengers showed that h<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup> and ·OH radicals were the primary active species.

**Key words:** Cu<sub>2</sub>O; visible-induced photocatalyst; plasmon; 2-CP; active species

光催化氧化技术能有效去除水中难降解的有机污染物, 在环境水污染治理方面有着广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>. 金属/半导体纳米复合材料已经被广泛地应用于光催化领域<sup>[4,5]</sup>. 人们发现贵金属纳米颗粒, 尤其是Ag和Au, 由于表面电子共振产生的Plasmon效应<sup>[6-8]</sup>, 具有很强的可见光吸收, 由此而开发出了许多纳米贵金属/半导体复合的等离子体共振诱导可见光催化剂. 如聂龙辉等<sup>[9]</sup>利用沉积-沉淀法及光还原法制备了Ag@AgBr等离子体光催化剂, 此催化剂表现出很好的可见光催化活性及稳定性. Zhou等<sup>[10]</sup>将Ag-AgBr均匀分散到介孔氧化铝表面制备了Ag-AgBr/MA可见光催化剂, 通过Plasmon诱导协助机制能够高效催化降解有毒有机污染物. 但Ag-AgBr/MA在光催化降解有机物的过程中, Ag纳米粒子受光激发光致电子向AgBr导带转移, 而失去电子成为Ag<sup>+</sup>, 进而溶到水中, 容易导致水体的二次

污染. 这一过程是由等离子体诱导可见光催化剂的电子转移机制所决定的. 有研究者合成了Ag-AgI/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[11]</sup>和Au-Ag-AgI/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[12]</sup>等离子诱导可见光催化剂, 通过Au和Ag双贵金属纳米粒子的协同作用, 加快了光催化反应过程中的电子转移, 有效抑制了Ag-AgI/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>降解有机物过程中Ag<sup>+</sup>释放; 同时, 电子转移速率的加快, 也提高了Ag-AgI/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的光催化效率. 这说明, 适当的电子供体可以及时给被激发的Ag纳米粒子提供电子, 加快电子的转移效率, 降低反应过程中Ag<sup>+</sup>的溶出, 同时可以加快光催化降解有机物的反应速率.

Cu<sub>2</sub>O是一种典型的p-型半导体材料, 其禁带宽

收稿日期: 2014-02-09; 修订日期: 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(21125731, 51221892)

作者简介: 王冉(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光催化,  
E-mail: wangran0914@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: huchun@cees.ac.cn

度约为  $2.2 \text{ eV}^{[13,14]}$ , 是具有最高导带位置的半导体之一, 导带位置为  $-1.4 \text{ eV}$ , 易于传递电子给其它的半导体及金属. 因此,  $\text{Cu}_2\text{O}$  掺杂的催化剂可能具有更快的电子转换效率和更好的光催化效果. 笔者将  $\text{Cu}_2\text{O}$  和  $\text{Ag-AgBr}$  纳米颗粒相互结合并均匀分布在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  载体表面制备了  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  复合可见光催化剂, 系统研究了其对有机污染物的降解活性及贵金属离子溶出的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原料

实验所用的表面活性剂聚氧乙烯/聚氧丙烯/聚氧乙烯三嵌段共聚物 EO20PO70EO20 (P123) 来自于 Sigma Aldrich 公司, 其它试剂包括异丙醇铝, 无水葡萄糖, 五水硫酸铜, 十六烷基三甲基溴化铵, 抗坏血酸, 氢氧化钠, 硝酸银, 溴化钾, 氨水 (25%), 硝酸, 均来自于北京化学试剂公司. 所有化学试剂均是分析纯. 所有的溶液都用去离子水配制.

### 1.2 催化剂的制备

以异丙醇铝为前驱体, 葡萄糖为模板合成了介孔氧化铝 MA<sup>[15]</sup>, 用水热法合成了纳米氧化亚铜 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) 颗粒<sup>[16]</sup>. 采用沉积-沉淀法, 合成了  $\text{Ag-AgBr/MA}^{[10]}$ .  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  的制备如下: 准确称取一定量的  $\text{Cu}_2\text{O}$  和  $0.6 \text{ g}$  MA 加到  $60 \text{ mL}$  去离子水中, 依次加入  $0.13 \text{ g}$  KBr 和  $1.1 \text{ g}$  P123, 超声搅拌. 接着逐滴加入溶于  $2 \text{ mL}$  氨水 (25%) 的  $0.13 \text{ g}$   $\text{AgNO}_3$ , 避光搅拌过夜, 将溶液过滤, 水洗,  $100^\circ\text{C}$  烘干, 得到的材料在  $500^\circ\text{C}$  下煅烧  $3 \text{ h}$ , 即可制得  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$ . 通过改变  $\text{Cu}_2\text{O}$  的投加量, 可制备不同  $\text{Cu}_2\text{O}$  掺杂量的  $x \text{ Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  (其中  $x$  为投加  $\text{Cu}_2\text{O}$  的质量). 不特别标明的话,  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  的  $\text{Cu}_2\text{O}$  掺杂量为  $0.08 \text{ g}$ .

### 1.3 催化剂的表征

采用 Scintag-XDS-2000 型 X 射线衍射仪测定了催化剂的晶体结构; 采用英国 Kratos 公司 AXIS Ultra X 射线光电子能谱 (XPS) 对  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  中各元素形态及含量进行分析; 采用 Hitachi UV-3010 型紫外-可见分光光度计测定固体催化剂的紫外可见漫反射吸收光谱.

### 1.4 催化剂可见光下降解 2-CP

以 2-CP 为目标物考察所制备样品的可见光催化性能. 室温下将  $0.1 \text{ g}$  催化剂加入到  $60 \text{ mL}$  浓度为  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 2-CP 溶液中, 于暗处搅拌  $30 \text{ min}$ , 使其达到吸附平衡. 然后在  $150 \text{ W}$  球形氙灯的照射

下 (利用滤光片将波长小于  $420 \text{ nm}$  的光滤掉), 进行可见光光催化降解. 每隔固定时间取样, 经  $0.45 \mu\text{m}$  的膜过滤, 然后用高效液相色谱仪 (1200 series; Agilent) 测定 2-CP 的浓度. 测定条件为: Eclipse XDB-C18 柱 ( $5 \mu\text{m}$ ,  $4.6 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ; Agilent), 检测波长为  $275 \text{ nm}$ ; 流动相为甲醇: 水 ( $60:40$ ), 进样量为  $20 \mu\text{L}$ , 流速为  $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . 使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, OPTIMA 2000 Perkin Elmer Co.) 分析反应过程中溶液里的  $\text{Ag}^+$  浓度.

## 2 结果与讨论

### 2.1 催化剂的表征

图 1 为不同样品的 X 射线衍射 (XRD). 根据 X 衍射标准谱图对比可知, 合成的  $\text{Cu}_2\text{O}$  为立方相  $\text{Cu}_2\text{O}$  (JCPDS 65-3288).  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  样品中, 观察到明显的  $\text{AgBr}$  (JCPDS 06-0438) 的衍射峰, 特征峰出现在  $2\theta$  为  $26.72^\circ$ 、 $30.96^\circ$ 、 $44.35^\circ$ 、 $55.04^\circ$ 、 $64.47^\circ$ 、 $73.26^\circ$  处; 而  $2\theta$  为  $44.30^\circ$  和  $64.44^\circ$  处的衍射峰说明有  $\text{Ag}^0$  (JCPDS 65-2871) 的存在. 由于合成的 MA 结晶较差, 所以在  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  样品中没有体现. 另外,  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/Al}_2\text{O}_3$  样品中没有  $\text{Cu}_2\text{O}$  的特征衍射峰出现, 这可能是由于  $\text{Cu}_2\text{O}$  的粒径过小或是其在载体上的高度分散造成的.

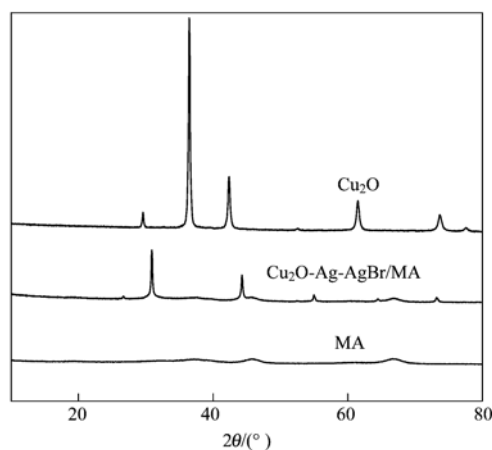


图 1 催化剂 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of the photocatalysts

进一步通过 XPS 分析了  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/Al}_2\text{O}_3$  表面元素价态 (图 2). 由于  $\text{Ag}^+$  和  $\text{Ag}^0$  的结合能接近, XPS 峰无法区分, 所以需要 Ag 元素进行 AES 分析, 如图 2(a) 所示. 可以发现, Ag 的 AES 能谱只有一个峰, 位置在  $1132 \text{ eV}$ , 通过公式  $\alpha$  (俄歇参数) =  $\text{BE}(\text{Ag}3d\ 5/2) - \text{Auger}(\text{M}5\text{VV}) + 1486.71$  (特征

能量, eV)<sup>[17]</sup>, 计算其俄歇参数为 722.78 eV, 归于  $\text{Ag}^+$ , 说明表面态银主要以  $\text{Ag}^+$  形式存在. XPS 含量分析表明, 表面 Ag 元素的含量占 1.16%, Br 元素的含量占 0.63%, 高于 AgBr 中 Ag 与 Br 的化学计量比, 说明表面仍有  $\text{Ag}^0$  的存在. 图 2(b) 为  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/Al}_2\text{O}_3$  表面 Cu 的 XPS 分峰结果. 可以看出,  $\text{Cu}2p_{3/2}$  处有两个主峰(结合能分别为 932.5 eV 和 934.4 eV) 以及一个“shake up”峰. 图中结合能为 934.4 eV 处出现的峰与图中出现的“shake up”峰是与 O 相关联的  $\text{Cu}^{2+}$  的特征 XPS 峰<sup>[18,19]</sup>, 而 932.5 eV 处出现的峰是  $\text{Cu}^+$  存在的特征峰<sup>[20]</sup>. 这说明 0.08  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/Al}_2\text{O}_3$  表面的铜以  $\text{Cu}^+$  和  $\text{Cu}^{2+}$  的形式共存, 表面  $\text{Cu}^+:\text{Cu}^{2+}$  为 52.07%:47.93%.

图 3(a) 为  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr}$  的去卷积波谱图, 图 3(b) 是  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  与 MA 的紫外可见吸收谱.  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr}$  的去卷积波谱图是由  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  的吸收谱扣减 MA 的吸收谱, 进一步对  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr}$  的吸收谱进行 Kubelka-Munk 转化、去卷积为不同银物种与铜物种的 Gaussian 波带而得到. 229 nm 处的吸收主要归于高度分散的  $\text{Ag}^+$ , 275 nm 吸收带归于 AgBr 上小的  $\text{Ag}_n^{\delta+}$  簇, 382 nm 处的吸收归于  $\text{Ag}^0$  纳米颗粒<sup>[21]</sup>. 322 nm 与 362 nm 的吸收分别归于  $\text{Cu}^+$  与  $\text{Cu}^{2+}$ <sup>[22]</sup>. 475 nm 处的吸收是由 Ag 纳米粒子的等离子体共振产生的. 通过这些波谱带的相对强度, 得到相应的不同银物种的百分比含量. 通过计算得知, 在  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  表面  $\text{Ag}^+:\text{Ag}^0$  为 61.37%:38.63%.

## 2.2 可见光催化降解 2-CP 活性

图 4 为不同  $\text{Cu}_2\text{O}$  掺杂量的  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  催化剂在可见光照射下对 2-CP 的降解曲线. 由图可见,  $\text{Cu}_2\text{O}$  的掺入提高了 Ag-AgBr/MA 的活性, 且随

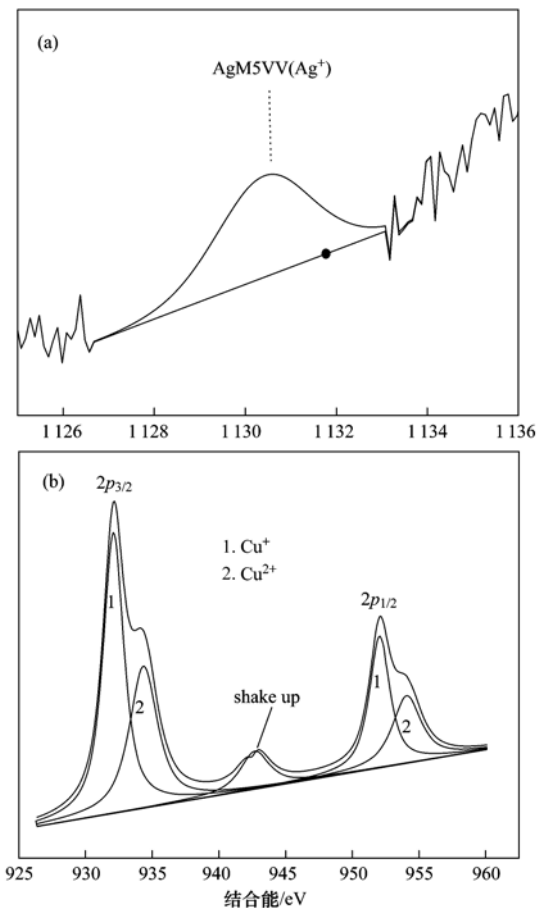


图 2  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  表面 Ag 的 AES 谱和 Cu 的 XPS 谱

Fig. 2 Ag AES and Cu2p XPS spectra for  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$

着掺入量的提高, 催化剂的降解速率不断提高. 当  $\text{Cu}_2\text{O}$  掺杂量为 0.02 g 和 0.04 g 时,  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  分别在 25 min 和 20 min 内将 2-CP 降解完全, 而 0.08 g 时,  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  在 15 min 内即可完全降解 2-CP. 然而, 当掺杂量进一步提高到 0.12 g 时, 催化剂活性有所下降. 由此确定  $\text{Cu}_2\text{O}$  的最佳掺

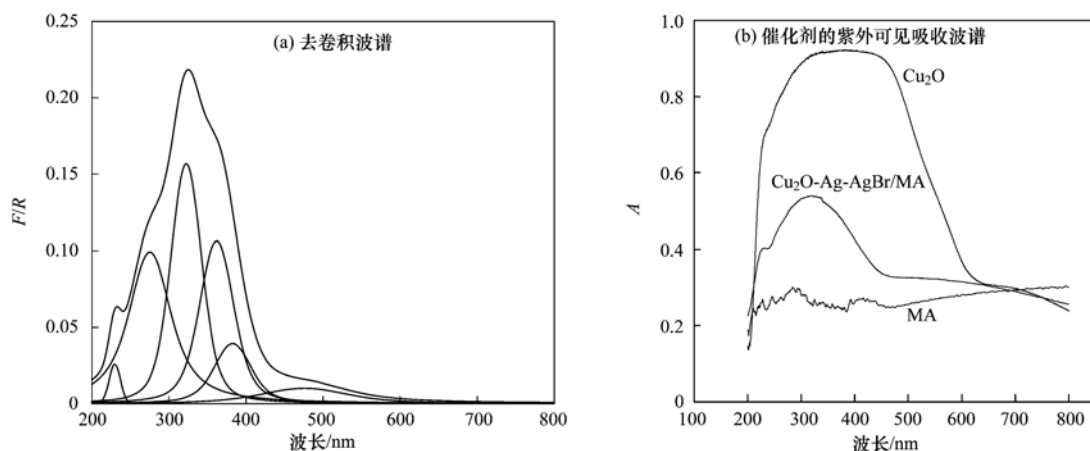
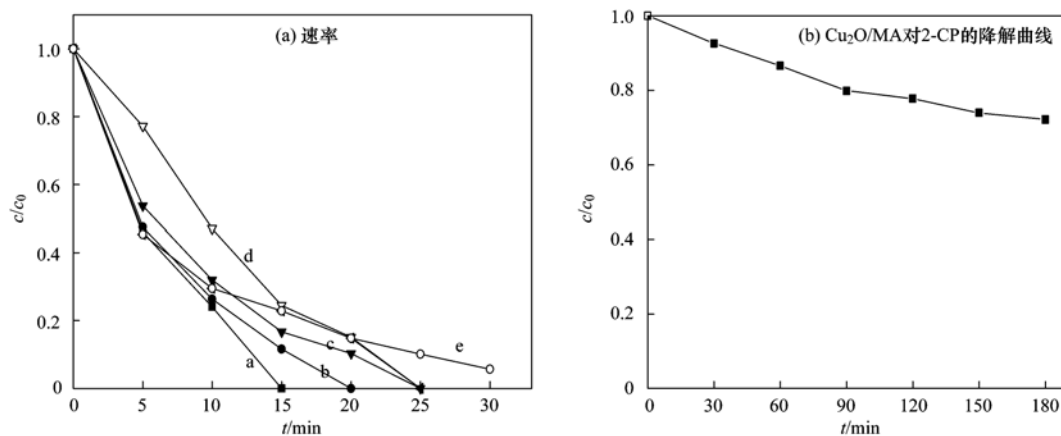


图 3  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr}$  去卷积波谱

Fig. 3 Deconvoluted subbands of  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr}$



a. 0.08 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA; b. 0.04 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA; c. 0.02 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA; d. Ag-AgBr/MA; e. 0.12 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA

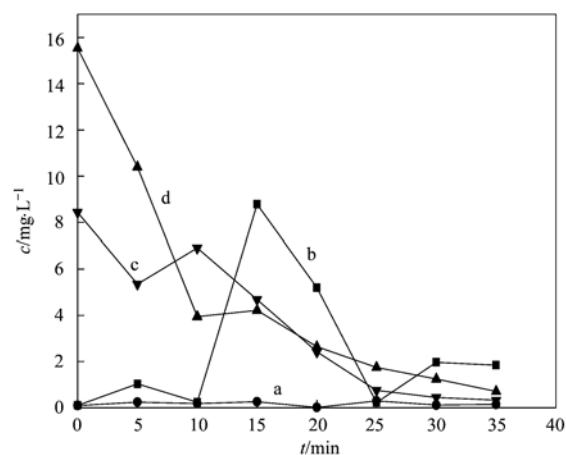
图4 Cu<sub>2</sub>O掺杂量对Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化降解2-CP的速率的影响

Fig. 4 Effect of Cu<sub>2</sub>O amount on the photodegradation of 2-CP by Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA with visible light

杂量为0.08 g. 而在Cu<sub>2</sub>O/MA体系中,可见光照3 h 仅有30%的2-CP发生降解. 这主要是因为,虽然Cu<sub>2</sub>O具有较强的可见光吸收,能够被光激发产生电子,但大部分电子在被界面的吸附氧或界面溶液中的溶解氧夺取之前,又重新和空穴复合了,所以其光催化效率很低<sup>[23]</sup>. 由此可见,Cu<sub>2</sub>O的掺杂,与AgBr、Ag<sup>0</sup>产生耦合作用,提高了Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化降解2-CP的活性,而且当Cu<sub>2</sub>O的掺杂量为0.08 g时,Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA具有最高的可见光催化活性.

### 2.3 可见光催化降解2-CP过程中Ag<sup>+</sup>溶出

图5给出了不同催化剂可见光催化降解2-CP反应过程中,溶液中Ag<sup>+</sup>浓度随时间的变化. 从中可以看出,Ag-AgBr/MA催化剂体系中,水中Ag<sup>+</sup>浓度随着反应时间的延长而逐渐减少,从15.5 mg·L<sup>-1</sup>减少到0.7 mg·L<sup>-1</sup>,说明释放到溶液中的Ag<sup>+</sup>随着反应的进行能够被重新光还原到催化剂表面. 而Cu<sub>2</sub>O掺杂后,在相同条件下,Ag<sup>+</sup>溶出都有所下降,特别是0.08 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA体系中,在整个反应过程中水中Ag<sup>+</sup>浓度始终低于0.2 mg·L<sup>-1</sup>. 同时,在整个降解2-CP过程中没有检测到Cu<sup>2+</sup>的溶出. 在Ag<sup>+</sup>释放得到抑制的同时,并没有增加Cu<sup>2+</sup>的释放. 进一步经过光照后的催化剂进行XPS分析,Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA表面Cu<sup>+</sup>:Cu<sup>2+</sup>为42.20%:57.80%. 其百分比并没有明显的变化,说明催化剂具有好的稳定性. 以上结果说明,Cu<sub>2</sub>O的掺入不仅能提高Ag-AgBr/MA可见光催化降解2-CP的活性,而且可以显著抑制反应过程中Ag<sup>+</sup>的释放,从而避免了水体的二次污染.



a. 0.08 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA; b. 0.04 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA; c. 0.02 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA; d. Ag-AgBr/MA

图5 不同Cu<sub>2</sub>O掺杂量的Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化降解2-CP过程的Ag<sup>+</sup>浓度变化

Fig. 5 Effect of Cu<sub>2</sub>O amount on the Ag<sup>+</sup> dissolution during the photodegradation of 2-CP by Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA under visible irradiation

### 2.4 Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA的可见光光催化机制

为了研究Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化反应的机制,考察了不同自由基捕获剂对Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化降解2-CP的影响. 从图6中可以看出,在Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA悬液中加入HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>后,显著抑制了2-CP的可见光催化降解率,而加入叔丁醇后,2-CP的降解速率有所下降但仍可在30 min内降解完全. 研究发现,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>在催化剂表面具有很强的吸附,吸附的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>与催化剂表面的h<sup>+</sup>或者吸附的·OH反应,导致催化活性下降. 而·OH捕获剂叔丁醇在催化剂表面上没有吸附,主要捕获溶液中的·OH. 此外,在2-CP光催化降解实验中,加入O<sub>2</sub><sup>-</sup>淬

灭剂对苯醌后, 2-CP 的降解被较强的抑制, 这说明  $\text{O}_2^-$  参与了反应. 以上结果说明,  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  反应体系中存在的  $\text{h}^+$ 、 $\cdot\text{OH}$  以及  $\text{O}_2^-$  是主要的活性氧物种.

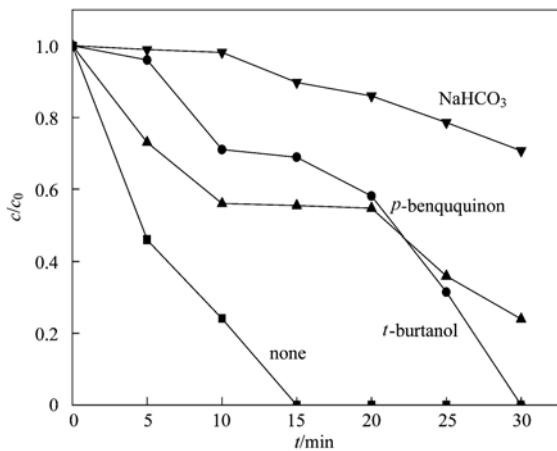


图6 可见光下,不同捕获剂( $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )对  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  可见光催化降解 2-CP 的影响

Fig. 6 Degradation kinetics of 2-CP in  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  suspension under visible irradiation with different scavengers ( $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )

### 3 结论

利用沉积沉淀法制备了  $\text{Cu}_2\text{O}$  掺杂的  $\text{Ag-AgBr/MA}$  可见光催化剂.  $\text{Cu}_2\text{O}$  的掺杂提高了  $\text{Ag-AgBr/MA}$  的可见光催化降解活性, 其最佳掺杂量为  $0.08 \text{ g}$ ;  $\text{Cu}_2\text{O-Ag-AgBr/MA}$  可见光催化降解有机物反应过程中  $\text{Ag}^+$  的溶出始终控制在  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 避免了对水体的二次污染; 催化反应体系中的主要活性物种为  $\text{h}^+$ 、 $\text{O}_2^-$  和  $\cdot\text{OH}$ .

#### 参考文献:

[1] Zheng Y, Pan Z M, Wang X C. Advances in photocatalysis in China[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2013, **34**(3): 524-535.

[2] 邓安平, 杨静, 汪淑廉, 等. 混晶纳米  $\text{TiO}_2$  的制备及其光催化降解有毒有机污染物[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2965-2972.

[3] 阳海, 曾健, 黎源, 等. 氙灯/ $\text{TiO}_2$  体系下敌草隆光催化降解动力学研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3137-3142.

[4] Subramanian V, Wolf E E, Kamat P V. Catalysis with  $\text{TiO}_2/\text{Gold}$  nanocomposites effect of metal particle size on the fermi level equilibration [J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, **126**(15): 4943-4950.

[5] 甘礼华, 刘明贤, 张霄英, 等. 掺铁  $\text{TiO}_2$ -活性炭复合材料的制备及其光催化活性[J]. 同济大学学报, 2008, **36**(4): 538-542.

[6] Zhu J, Li J J, Yuan L, et al. Optimization of three-layered Au-Ag bimetallic nanoshells for triple-bands surface plasmon resonance[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2012, **116**

(21): 11734-11740.

[7] Kochuveedu S T, Kim D P, Kim D H. Surface-plasmon-induced visible light photocatalytic activity of  $\text{TiO}_2$  nanospheres decorated by Au nanoparticles with controlled configuration[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2012, **116**(3): 2500-2506.

[8] Mahmoud M A, El-Sayed M A. Different plasmon sensing behavior of silver and gold nanorods [J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, **4**(9): 1541-1545.

[9] 聂龙辉, 黄征青, 徐洪涛, 等.  $\text{Ag@AgBr}$  光催化剂的制备及其可见光催化降解亚甲基蓝反应性能[J]. 催化学报, 2013, **33**(7): 1209-1216.

[10] Zhou X F, Hu C, Hu X X, et al. Plasmon-assisted degradation of toxic pollutants with  $\text{Ag-AgBr/Al}_2\text{O}_3$  under visible-light irradiation[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2010, **114**(6): 2746-2750.

[11] Hu C, Peng T W, Hu X X, et al. Plasmon-induced photodegradation of toxic pollutants with  $\text{Ag-Ag/Al}_2\text{O}_3$  under visible-light irradiation [J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, **132**(2): 857-862.

[12] Peng T W, Hu C, Hu X X, et al. Enhanced photodegradation of toxic pollutants on plasmonic  $\text{Au-Ag-Ag/Al}_2\text{O}_3$  under visible irradiation[J]. Catalysis Letters, 2012, **142**(5): 646-654.

[13] Li J T, Cushing S K, Bright J, et al.  $\text{Ag@Cu}_2\text{O}$  core-shell nanoparticles as visible-light plasmonic photocatalysts [J]. ACS Catalysis, 2013, **3**(1): 47-51.

[14] Yang L X, Luo S L, Li Y, et al. High efficient photocatalytic degradation of *p*-nitrophenol on a unique  $\text{Cu}_2\text{O/TiO}_2$  *p-n* heterojunction network catalyst [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(19): 7641-7646.

[15] Xu B J, Xiao T C, Yan Z F, et al. Synthesis of mesoporous alumina with highly thermal stability using glucose template in aqueous system [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2006, **91**(1-3): 293-295.

[16] Gou L F, Murphy C. Solution-phase synthesis of  $\text{Cu}_2\text{O}$  nanocubes[J]. Nano Letters, 2003, **3**(2): 231-234.

[17] Hu C, Lan Y Q, Qu J H.  $\text{Ag/AgBr/TiO}_2$  visible light photocatalyst for destruction of azodyes and bacteria[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2006, **110**(9): 4066-4072.

[18] Kundakovic L, Flytzani-Stephanopoulos M. Reduction characteristics of copper oxide in cerium and zirconium oxide systems [J]. Applied Catalysis A, 1998, **171**(1): 13-29.

[19] 陈渊, 周科朝, 黄苏萍, 等. 水热法制备 Cu 掺杂可见光催化剂  $\text{BiVO}_4$  及其光催化性能研究[J]. 无机材料学报, 2012, **27**(1): 19-25.

[20] Espinos J P, Morales J, Caballero A, et al. Interface effects for Cu, CuO, and  $\text{Cu}_2\text{O}$  deposited on  $\text{SiO}_2$  and  $\text{ZrO}_2$ . XPS determination of the valence of copper in Cu/ $\text{ZrO}_2$  catalysts [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2002, **106**(27): 6921-6929.

[21] Bethke K A, Kung H H. Supported Ag catalysts for the clean reduction of NO with  $\text{C}_3\text{H}_6$  [J]. Journal of Catalysis, 1997, **172**(1): 93-102.

[22] Mesu J G, Eerden A J, Groot F F, et al. Synchrotron radiation effects on catalytic systems as probed with a combined In-Situ UV-Vis/XAFS spectroscopic setup [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2005, **109**(9): 4042-4047.

[23] 徐晨洪, 韩优, 迟名扬. 基于  $\text{Cu}_2\text{O}$  的光催化研究[J]. 化学进展, 2010, **22**(12): 2290-2297.

## CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region .....	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years .....	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> at Mount Waliguan, China .....	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shanghai Urban Area .....	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> During Typical Winter Days in Wuxi City .....	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM <sub>2.5</sub> from Blast Furnace Iron Making .....	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing .....	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis .....	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles .....	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls .....	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir .....	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China .....	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments .....	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park .....	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River .....	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China .....	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation .....	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland .....	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation .....	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River .....	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas .....	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu <sub>2</sub> O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol .....	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7 .....	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation .....	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland .....	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process .....	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor .....	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes .....	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content .....	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant .....	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater .....	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration .....	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map .....	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd <sup>2+</sup> on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i> .....	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales .....	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai .....	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2 .....	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model .....	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City .....	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .....	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil .....	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape .....	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms .....	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China .....	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ <sup>13</sup> C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province .....	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition .....	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM <sub>2.5</sub> .....	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process .....	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO <sub>2</sub> Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis .....	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry .....	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)



# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行