

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

**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

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 ..... 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 ..... 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征及其对大气能见度的影响 ..... 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM<sub>10</sub> 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 ..... 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 ..... 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 ..... 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 ..... 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 ..... 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 ..... 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 ..... 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 ..... 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 ..... 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 ..... 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 ..... 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 ..... 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 ..... 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 ..... 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 ..... 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 ..... 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 ..... 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 ..... 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 ..... 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 的制备及其太阳光下降解土霉素 ..... 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 ..... 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 ..... 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 ..... 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 ..... 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 ..... 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 ..... 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 ..... 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 ..... 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物<sup>15</sup>N自然丰度对长期氮施加的响应 ..... 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 ..... 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 ..... 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 ..... 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 ..... 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 ..... 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 ..... 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe<sup>3+</sup> 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 ..... 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用水安全性 ..... 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 ..... 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 ..... 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 ..... 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 ..... 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 ..... 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 ..... 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 ..... 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 ..... 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO<sub>2</sub> 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 ..... 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 ..... 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

# 水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响

汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦\*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 选取沙丁胺醇 (salbutamol, SAL) 为目标污染物, 研究了 3 种碳纳米管 (CNTs, 单壁碳纳米管 SCNT、羟基衍生化多壁碳纳米管 MWNT-OH 和羧基衍生化多壁碳纳米管 MWNT-COOH) 对有机污染物在模拟太阳光照下降解的影响; 并且研究了 CNTs 与天然水体中光活性物质三价铁离子 ( $\text{Fe}^{3+}$ ) 的相互作用. 结果表明, 3 种 CNTs 能够通过竞争吸收光子, 即光屏蔽作用抑制 SAL 光解; 同时又能通过光致激发产生单线态氧 ( $^1\text{O}_2$ ) 促进光解反应, 两种作用机制同时存在, 在绝大多数情况下, 抑制作用占主导地位. 此外, CNTs 还能通过静电吸附作用使水体中的光活性物质  $\text{Fe}^{3+}$  失活, 从而影响有机污染物在天然水体中的光化学行为.

**关键词:** 碳纳米管; 光降解; 铁离子; 沙丁胺醇; 单线态氧

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2906-05 DOI: 10.13227/j.hjx.2015.08.024

## Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment

WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, ZHOU Lei, ZHANG Ya, YANG Xi\*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

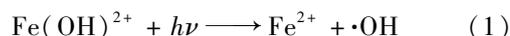
**Abstract:** The influence of CNTs on the photolysis of organic pollutant was investigated by studying the photodegradation kinetics of SAL under 1 000 W Xenon lamp, in the presence of three kinds of CNTs (SCNT, MWNT-COOH, MWNT-OH). In addition, the interaction between CNTs and  $\text{Fe}^{3+}$  was also investigated. The results showed that the photodegradation of salbutamol followed pseudo-first-order kinetics, which could be inhibited by all three kinds of CNTs through light screening effect. Formation of singlet oxygen was detected during the photolysis, using the molecular probe furfuryl alcohol. All three kinds of CNTs could absorb electrons through competition, i. e., inhibit SAL photodegradation by light screening effect; meanwhile, the CNTs could generate singlet oxygen through photoexcitation to promote the photodegradation reaction. Both mechanisms coexisted, and in most cases, the inhibition effect was dominant. In addition, CNTs could inactivate the photoactive substance  $\text{Fe}^{3+}$  in the water body by electrostatic adsorption, and affect the photochemical behavior of organic pollutants in natural water body.

**Key words:** carbon nanotube; photodegradation; iron ion; salbutamol; singlet oxygen

近年来,碳纳米管因其优良的理化特性在众多领域广泛使用,不可避免地进入天然水体,关于碳纳米管的毒性<sup>[1]</sup>、其在光催化处理有机污染物领域的应用<sup>[2,3]</sup>以及作为吸附剂的应用<sup>[4,5]</sup>等方面已有大量研究工作,但是它们对天然水体中有机污染物环境行为的影响的研究却十分匮乏<sup>[6]</sup>. 光化学过程是有机污染物在自然界中发生的重要过程之一,对于其转化和归趋有着极为重要的影响. 而国内外近年来对碳纳米管光化学行为的研究更为关注碳纳米管自身的光化学活性<sup>[7-14]</sup>,对于碳纳米管与天然水体中的活性物质之间的相互作用的研究较为匮乏. 因此,研究碳纳米管及其与天然水体活性物质共同对有机物光解过程的影响具有较高的理论和实践意义.

天然水体中存在很多光活性物质,如三价铁离子. 偏酸性条件下,三价铁离子主要以  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$  形态存在,  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$  光照能够产生  $\cdot\text{OH}$ , 如式(1)所示<sup>[15]</sup>. 碳纳米管具有巨大的表面积和表面疏水性,

表面带有负电荷,对有机污染物以及金属离子具有很强的吸附能力<sup>[16]</sup>,因此,研究碳纳米管对三价铁离子光化学活性的影响具有很大的意义.



本研究选取了沙丁胺醇 (SAL) 作为目标污染物. 沙丁胺醇作为广泛使用的临床药物,在环境中广泛检出,一些水体环境中浓度高达  $471 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[17]</sup>. 研究指出 SAL 对人体的心脏和肝肾具有一定的毒性<sup>[18]</sup>.

本文研究了 3 种碳纳米管 (SCNT、MWNT-OH 和 MWNT-COOH) 对 SAL 光解的影响,探究 CNTs 对 SAL 光解速率的影响; 以呋喃甲醇 (furfuryl alcohol, FFA) 作为单线态氧的分子探针,探讨了 CNTs 光致产生单线态氧的能力以及单线态氧对 SAL 光解速

收稿日期: 2015-01-09; 修订日期: 2015-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20977045, 21177056); 中央高校基本科研业务费专项 (1112021101)

作者简介: 汪祺 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: wanghuangshu@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: yangxi@nju.edu.cn

率的影响. 通过 CNTs 与  $\text{Fe}^{3+}$  的吸附实验探究了碳纳米管与  $\text{Fe}^{3+}$  之间的相互作用及其对  $\text{Fe}^{3+}$  光化学活性的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂

沙丁胺醇 (Salbutamol, 纯度  $\geq 98\%$ ); 色谱级甲醇、异丙醇, 购自 Tedia 公司; 色谱级甲酸, 购自美国 ROE 公司; SCNT (纯度  $\geq 97\%$ )、MWNT-OH (纯度  $\geq 97\%$ ) 和 MWNT-COOH (纯度  $\geq 97\%$ ) 购自深圳纳米港有限公司, 直径 20 ~ 40 nm、长度 5  $\mu\text{m}$ 、比表面积 30 ~ 50  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ; 呋喃甲醇 (FFA, 纯度  $\geq 99\%$ ), 购自 Sigma-Aldrich 公司; Milli-Q 超纯水 (Milli-pore, 18  $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ); 其余试剂均为分析纯, 购自南京化学试剂有限公司.

### 1.2 仪器

光化学反应器 (XPA-II 型, 配 1000W 氙灯, 南京胥江机电厂); 高效液相色谱仪 (Agilent 1200, 带紫外检测器, 美国); 精密 pH 计 (Sartorius PB-10, 德国); TOC 分析仪 (Shimadzu 2200, 日本); 紫外可见分光光度计 (Shimadzu UV-2450, 日本); 火焰原子吸收分光光度计 (Thermo M6, 美国).

### 1.3 实验方法

光降解实验在 XPA-II 型光化学反应器内进行. 采用 1 000 W 氙灯 (北京电光源研究所) 作为模拟太阳光源, 并使用光量子测量仪 (北京师范大学) 测得其在 365 nm 处的辐照强度为 350  $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 氙灯灯管置于一双层玻璃冷阱内部 (壁厚 4 mm, 可滤除 290 nm 以下的紫外光), 玻璃冷阱由外接的自来水进行冷却. 溶液装于 50 mL 带盖的石英试管 (外径 2.8 cm, 内径 2.6 cm, 长度 18.2 cm), 试管垂直并等距置于冷阱外侧. 装置开启后, 使氙灯预热 10 min, 开始光照反应, 定时取样 1 mL, 用 0.22  $\mu\text{m}$  孔径水相针式滤器 (安谱, 中国上海) 滤掉碳纳米管后用高效液相色谱分析.

吸附实验在旋转培养仪上进行. 样品溶液置于 40 mL 带盖的玻璃吸附瓶, 使用橡皮筋固定, 以固定速率匀速转动, 定时取样 2 mL, 用 0.22  $\mu\text{m}$  孔径水相针式滤器 (安谱, 中国上海) 滤掉碳纳米管, 滤液使用火焰原子吸收分光光度计或高效液相色谱分析.

SAL 的浓度由高效液相色谱分析. 分析条件: Agilent TC-C18 色谱柱 (250 mm  $\times$  4.6 mm, i. d. 5  $\mu\text{m}$ ), 柱温 30 $^{\circ}\text{C}$ , 流动相为甲醇/甲酸 (体积比 0.5%) = 15/85, 流速为 1  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 检测波长为

224 nm, 进样量 20  $\mu\text{L}$ .

$\text{Fe}^{3+}$  的浓度由火焰原子吸收分光光度计分析. 分析条件: Thermo 空心阴极铁灯, 2 mL 样品溶液用 1% (体积比) 硝酸 (优级纯) 酸化, 吸取时间 2 ~ 3 s, 吸收波长 248.3 nm.

## 2 结果与讨论

### 2.1 CNTs 对 SAL 降解速率的影响

如图 1 所示, SAL 的直接光解遵循准一级动力学. 在中性条件 ( $\text{pH} = 6.5$ ) 下, 20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  SAL 直接光解速率为  $5 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$ . 在避光条件下, 进行碳纳米管对沙丁胺醇的吸附实验, 6 h 内, SAL 在 3 种碳纳米管分散液中的浓度变化不超过 2.4%, 实验结果表明 3 种碳纳米管对 SAL 无吸附作用. 由表 1 中数据可知, 3 种碳纳米管的存在能够抑制 SAL 的光解. 为深入探讨 3 种 CNTs 对 SAL 光解的影响机制, 本研究着重分析了光屏蔽效应以及自由基作用.

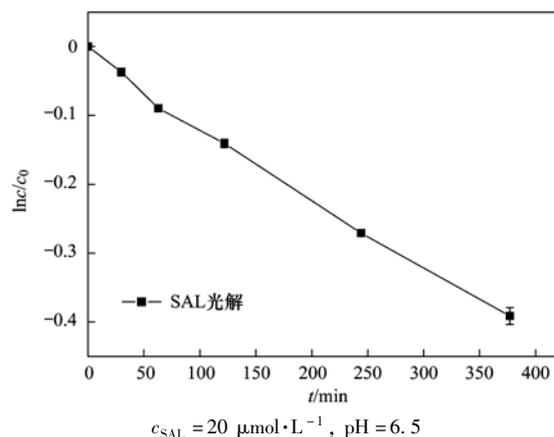


图 1 SAL 直接光解

Fig. 1 Direct photolysis of salbutamol

#### 2.1.1 CNTs 的光屏蔽作用

3 种碳纳米管在 280 ~ 330 nm 范围具有较强的吸收, 与 SAL 的吸收峰有一定的重叠, 可能存在光屏蔽的机制. 因此, 在深入探讨 CNTs 对 SAL 光解的影响机制时, 需要将光屏蔽的影响因素首先扣除. 使用紫外可见分光光度计扫描溶液在 280 ~ 330 nm 的吸光度, 代入公式 (2), 可以计算在某一特定波长下 3 种碳纳米管对 SAL 的屏蔽因子  $S_{\lambda}$  [19, 20]. 然后, 利用公式 (3) 进行计算, 可以求得 3 种碳纳米管在 280 ~ 330 nm 范围内的平均光屏蔽因子.

$$S_{\lambda} = \frac{1 - 10^{-\alpha_{\lambda} l}}{2.303 \alpha_{\lambda} l} \quad (2)$$

$$S_{280 \sim 330} = \frac{\int_{280}^{330} S_{\lambda} d\lambda}{330 - 280} \quad (3)$$

式中,  $\alpha_\lambda$  是特定波长衰减系数 ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $l$  (1.885 cm) 是反应中的光程差. 结果如表 1 所示. 碳纳米管浓度越高, 光屏蔽因子数值越小. 碳纳米管浓度越高, 实验测得其吸光度越高, 透光率越低, 吸收的光子越多, 其屏蔽作用越强. 将光屏蔽因子代入公式 (4)<sup>[21]</sup> 进行计算, 得出不同浓度的 3 种碳纳米管对 SAL 光解影响的动力学参数 ( $k_{\text{CNTs}}$ ) (表 1).

$$k_{\text{CNTs}} = k_{\text{obs}} - k_0 \times S_\lambda \quad (4)$$

表 1 3 种碳纳米管对 SAL 光降解影响的动力学参数

Table 1 Kinetics parameters of the influence of 3 types of CNTs on the photolysis of salbutamol

纳米管种类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$S_\lambda$	$k_{\text{obs}} \times 10^{-4}/\text{min}^{-1}$	$k_{\text{CNTs}} \times 10^{-4}/\text{min}^{-1}$
无碳纳米管	0.00	1.000	4.76	0.000
	0.10	0.987	5.22	0.522
SCNT	1.00	0.815	4.03	0.151
	10.00	0.210	2.29	1.287
MWNT-COOH	0.10	0.985	5.48	0.791
	1.00	0.864	4.13	0.017
	10.00	0.312	2.48	0.994
MWNT-OH	0.10	0.981	5.92	1.250
	1.00	0.849	3.86	-0.181
	10.00	0.272	2.63	1.334

### 2.1.2 CNTs 光致产生 $^1\text{O}_2$

扣除对 SAL 的光屏蔽作用后, 碳纳米管对 SAL 光降解起促进作用, 推测可能是由于碳纳米管光照产生活性氧自由基 (ROS). 有研究表明, 羧基衍生化单壁碳纳米管 (SWCNT-COOH) 水溶液在光照条件下可以产生活性氧<sup>[7, 8]</sup>. 本文选取呋喃甲醇作为检测单线态氧的分子探针, 研究 MWNT-COOH、MWNT-OH 与 SCNT 产生 $^1\text{O}_2$ 的能力, 并通过曝气实验验证 $^1\text{O}_2$ 对 SAL 降解的影响.

由公式 (5) ~ (8) 可以算出 $^1\text{O}_2$ 的稳态浓度 ( $c_{[{}^1\text{O}_2]_{\text{ss}}}$ ), 结果见表 2.

$$-\frac{dP}{dt} = k_1 \times c_{[{}^1\text{O}_2]_{\text{ss}}} \times c_p = k_{\text{exp}} \times c_p \quad (5)$$

$$k_{\text{exp}} = k_1 \times c_{[{}^1\text{O}_2]_{\text{ss}}} \quad (6)$$

$$\ln \frac{c_p}{c_{p0}} = -k_{\text{exp}} \times t \quad (7)$$

$$k_{\text{FFA}, {}^1\text{O}_2} = \frac{k_{\text{exp}}}{c_{[{}^1\text{O}_2]_{\text{ss}}}} \quad (8)$$

式中,  $k_1$  为 FFA 与 $^1\text{O}_2$ 反应的速率常数,  $c_p$  为 FFA 的浓度,  $k_{\text{exp}}$  为实验测得 FFA 的反应速率常数, 即  $-\ln(c_p/c_{p0})$  与反应时间关系曲线的斜率. FFA 与 $^1\text{O}_2$ 的反应速率常数为  $1.2 \times 10^8 \text{ L}\cdot(\text{mol}\cdot\text{s})^{-1}$ <sup>[22]</sup>. 结果表明, 3 种 CNTs 都有产生 $^1\text{O}_2$ 的能力,  $^1\text{O}_2$ 的稳态

式中,  $k_{\text{CNTs}}$  代表除屏蔽效应外, 由碳纳米管的光化学效应引起的 SAL 降解速率常数的变化 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $k_{\text{obs}}$  代表实验测得的, 在碳纳米管存在环境中, SAL 的降解速率常数 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $k_0$  代表 SAL 直接光解的速率常数 ( $\text{min}^{-1}$ ). 由表 1 数据可知, 在较高浓度和较低浓度的 CNTs 环境中, 扣除屏蔽效应后, CNTs 对 SAL 的光解具有促进作用. 但是在  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  浓度的 CNTs 环境中, 这种促进作用并不明显.

浓度在  $10^{-14} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  数量级, 并且浓度为  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的碳纳米管比浓度为  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的碳纳米管产生 $^1\text{O}_2$ 的能力强.

表 2 3 种碳纳米管光致产生 $^1\text{O}_2$ 的稳态浓度

Table 2 Steady state concentrations of  $^1\text{O}_2$  generated by three CNTs under irradiation

纳米管种类	CNTs 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$^1\text{O}_2$ 稳态浓度 $\times 10^{-14}$ / $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
无碳纳米管	0.00	0.36
SWCNT	1.00	0.83
	10.00	1.71
MWNT-COOH	1.00	0.83
	10.00	2.15
MWNT-OH	1.00	1.11
	10.00	1.53

为了验证 $^1\text{O}_2$ 对 SAL 降解的影响, 本研究采取了曝气实验. 有文献报道多数含苯环的有机污染物激发三重态的能量大于  $250 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 而从 $^3\text{O}_2$ 激发到 $^1\text{O}_2$ 只需要  $94 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 因此在光照条件下, 有机物的激发三重态与溶解氧之间可能发生能量转移导致 $^1\text{O}_2$ 的产生<sup>[23]</sup>. 曝氮气可以减少溶液中溶解氧的含量, 从而抑制 $^1\text{O}_2$ 的产生. 将样品溶液通入氮气 30 min, 将样品管液封后进行光照实验, 曝氮气后 SAL 的降解速率为  $3.9 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ , 比起对照组直接光

解速率的  $6.0 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$  明显降低, 实验证明  $^1\text{O}_2$  对 SAL 的光解具有促进作用, CNTs 可以通过自身光照产生  $^1\text{O}_2$  促进 SAL 光解。

## 2.2 CNTs 在 $\text{Fe}^{3+}$ -SAL 体系中对 SAL 光解的影响

天然水体中  $\text{Fe}^{3+}$  具有一定的光化学活性<sup>[24]</sup>。在酸性条件下,  $\text{Fe}^{3+}$  ( $20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 存在时 SAL 的降解速率 ( $66.2 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ ) 明显高于其直接光解速率 ( $4.3 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ ); 加入足量的  $\cdot\text{OH}$  淬灭剂异丙醇 ( $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 后, SAL 的降解速率明显降低, 如图 2 所示, 证明三价铁离子在酸性条件下主要是通过光致产生  $\cdot\text{OH}$ , 加速 SAL 的降解。

加入 MWNT-OH 和 MWNT-COOH 后, 与对照组相比, SAL 的降解明显受到了抑制, 如图 3 所示。碳纳米管是由石墨层构成, 具有大量  $\pi-\pi$  共轭电子,

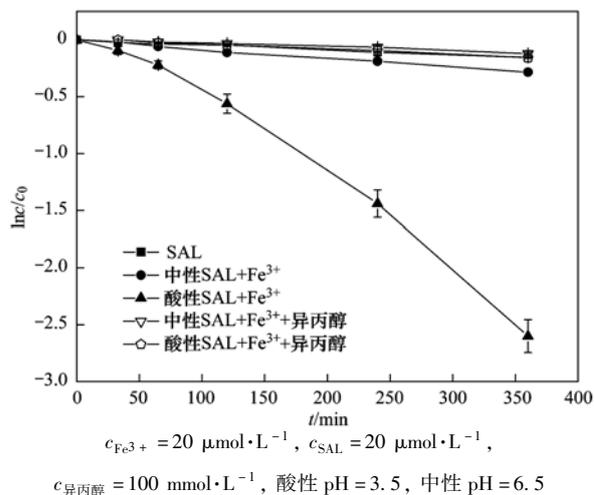


图 2  $\text{Fe}^{3+}$  对 SAL 光解的影响

Fig. 2 Influence of  $\text{Fe}^{3+}$  on the photodegradation of salbutamol

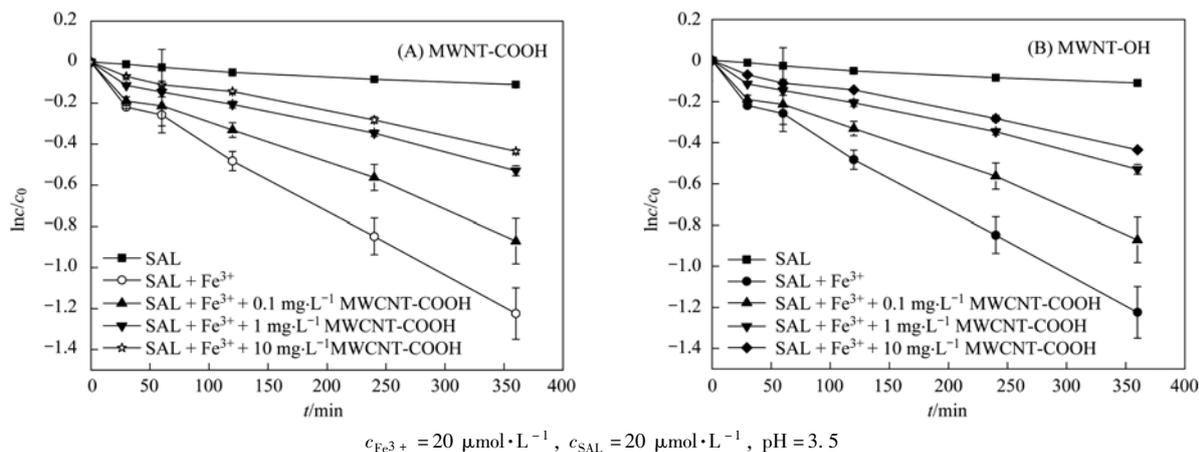


图 3 MWNT-COOH 与 MWNT-OH 对  $\text{Fe}^{3+}$ -SAL 体系中 SAL 光降解的影响

Fig. 3 Influence of MWNT-COOH and MWNT-OH on the photodegradation of salbutamol in the presence of  $\text{Fe}^{3+}$

表面带负电荷,  $\text{Fe}^{3+}$  带正电, 易与碳纳米管表面发生静电吸附, 从而影响其光化学活性。基于碳纳米管对金属离子的吸附效应, 在环境领域中, 将碳纳米管应用于吸附去除水体中的重金属离子 ( $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  等) 的技术也日趋成熟<sup>[25-28]</sup>。

以 MWNT-COOH 为例, 图 4 是吸附实验中测得  $\text{Fe}^{3+}$  在 CNTs 分散液中的浓度变化, 在 100 min 内,  $\text{Fe}^{3+}$  的浓度由  $20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  降到  $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 然后达到吸附平衡, 浓度趋于稳定, 从而推出在 CNTs 与  $\text{Fe}^{3+}$  混合后发生静电吸附, 被吸附到碳纳米管表面的  $\text{Fe}^{3+}$  失去光化学活性。

## 3 结论

(1) SAL 的直接光解符合准一级反应动力学; SCNT、MWNT-COOH、MWNT-OH 能通过光屏蔽效应抑制 SAL 光解, 且 CNTs 浓度越大, SAL 降解速率

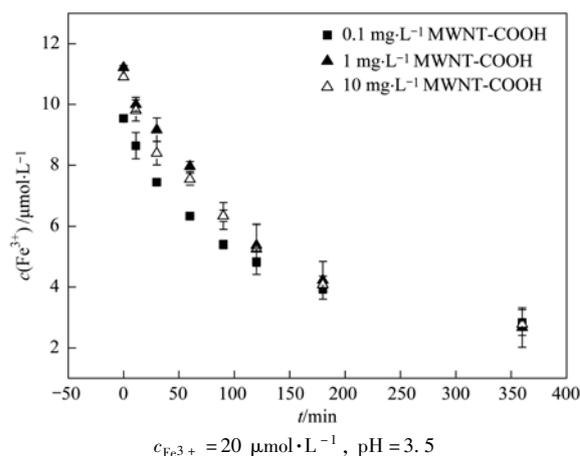


图 4 MWNT-COOH 分散液中  $\text{Fe}^{3+}$  的浓度变化

Fig. 4 Change of the  $\text{Fe}^{3+}$  concentration in MWNT-COOH dispersion

越慢。

(2) SCNT、MWNT-COOH、MWNT-OH 在光照

下能产生稳态浓度 $10^{-14} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $^1\text{O}_2$ ,并通过 $^1\text{O}_2$ 促进 SAL 的光降解.

(3)CNTs 对 SAL 光解的影响有两种机制:光屏蔽效应及自由基作用. 在较高( $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )及较低浓度( $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的 CNTs 环境中,光屏蔽效应占主导地位;在  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的浓度下,两者比较接近.

(4)酸性条件下  $\text{Fe}^{3+}$  能产生  $\cdot\text{OH}$  从而促进 SAL 光解. MWNT-COOH、MWNT-OH 通过静电吸附抑制  $\text{Fe}^{3+}$  的光化学活性,从而影响 SAL 的光解速率.

#### 参考文献:

- [1] 禹露,唐志强,梁跃,等. 碳纳米管材料的释放途径、生态毒性及环境归趋[J]. 化工新型材料, 2014, **42**(8): 1-3, 25.
- [2] 续丽丽,李巧玲,万郁楠,等. Ag-TiO<sub>2</sub>/CNTs 的复合及光催化性能[J]. 化工新型材料, 2014, **42**(3): 114-117.
- [3] Mahmoodi N M. Synthesis of magnetic carbon nanotube and photocatalytic dye degradation ability [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(9): 5595-5604.
- [4] 赵兴兴,于水利,王哲. 氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 663-668.
- [5] 徐立恒,张明,陈锋. 碳纳米管基复合吸附剂的制备及其吸附性能[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1443-1448.
- [6] Wiesner M R, Lowry G V, Jones K L, *et al.* Decreasing uncertainties in assessing environmental exposure, risk, and ecological implications of nanomaterials [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(17): 6458-6462.
- [7] Chen C Y, Jafvert C T. Photoreactivity of carboxylated single-walled carbon nanotubes in sunlight: reactive oxygen species production in water[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(17): 6674-6679.
- [8] Chen C Y, Jafvert C T. The role of surface functionalization in the solar light-induced production of reactive oxygen species by single-walled carbon nanotubes in water[J]. Carbon, 2011, **49**(15): 5099-5106.
- [9] Bitter J L, Yang J, Milani S B, *et al.* Transformations of oxidized multiwalled carbon nanotubes exposed to UVC (254 nm) irradiation [J]. Environmental Science: Nano, 2014, **1**(4): 324-337.
- [10] Humeres E, de Souza E P, Debacher N A, *et al.* Photolysis of Phenylalanine in the Presence of Oxidized Carbon Nanotubes[J]. Langmuir, 2015, **31**(1): 164-170.
- [11] Hou W C, BeigzadehMilani S, Jafvert C T, *et al.* Photoreactivity of Unfunctionalized Single-Wall Carbon Nanotubes Involving Hydroxyl Radical: Chiral Dependency and Surface Coating Effect [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(7): 3875-3882.
- [12] Maeda Y, Hasuike Y, Ohkubo K, *et al.* Photochemical Behavior of Single-Walled Carbon Nanotubes in the Presence of Propylamine[J]. Chemphyschem, 2014, **15**(9): 1821-1826.
- [13] Qu X L, Alvarez P J J, Li Q L. Photochemical Transformation of Carboxylated Multiwalled Carbon Nanotubes: Role of Reactive Oxygen Species [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(24): 14080-14088.
- [14] Hwang Y S, Qu X L, Li Q L. The role of photochemical transformations in the aggregation and deposition of carboxylated multiwall carbon nanotubes suspended in water [J]. Carbon, 2013, **55**: 81-89.
- [15] Sedlak D L, Hoigne J. The role of copper and oxalate in the redox cycling of iron in atmospheric waters [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1993, **27**(14): 2173-2185.
- [16] Gao J, Xu D D, Ma L L, *et al.* Research progress in the adsorption of pollutants on carbon nanotubes in water [J]. New Chemical Materials, 2011, **39**(11): 6-8.
- [17] Bound J P, Voulvoulis N. Predicted and measured concentrations for selected pharmaceuticals in UK rivers; Implications for risk assessment [J]. Water Research, 2006, **40**(15): 2885-2892.
- [18] Libretto S E. A review of the toxicology of salbutamol (albuterol) [J]. Archives of Toxicology, 1994, **68**(4): 213-216.
- [19] Guerard J J, Miller P L, Trouts T D, *et al.* The role of fulvic acid composition in the photosensitized degradation of aquatic contaminants [J]. Aquatic Sciences, 2009, **71**(2): 160-169.
- [20] Miller P L, Chin Y P. Photoinduced degradation of carbaryl in a wetland surface water [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, **50**(23): 6758-6765.
- [21] Zeng C, Ji Y F, Zhou L, *et al.* The role of dissolved organic matters in the aquatic photodegradation of atenolol [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **239-240**(18): 340-347.
- [22] Haag W R, Hoigne J, Gassman E, *et al.* Singlet Oxygen in Surface Waters—Part 1: Furfuryl alcohol as a trapping agent [J]. Chemosphere, 1984, **13**(5-6): 631-640.
- [23] Zepp R G, Hoigne J, Bader H. Nitrate-induced photooxidation of trace organic-chemicals in water [J]. Environmental Science & Technology, 1987, **21**(5): 443-450.
- [24] 邓南圣,吴峰. 环境光化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [25] 许乾慰,陈丽丽. 表面活性剂对多壁碳纳米管吸附  $\text{Pb}^{2+}$  的影响[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(3): 44-47, 51.
- [26] 王红娟,周爱林,梁家华. 改性多壁碳纳米管对  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Co}^{2+}$  的竞争吸附研究[J]. 化工环保, 2009, **28**(6): 482-486.
- [27] 杨迎春,张丽,冉静,等. 改性碳纳米管对  $\text{Fe}^{3+}$  的吸附研究 [J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(Z1): 1-2, 39.
- [28] Sun W L, Xia J, Shan Y C. Comparison kinetics studies of Cu(II) adsorption by multi-walled carbon nanotubes in homo and heterogeneous systems; Effect of nano-SiO<sub>2</sub> [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **250**: 119-127.

## CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method .....	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing .....	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants .....	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM <sub>2.5</sub> and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China .....	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM <sub>10</sub> .....	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data .....	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin .....	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications .....	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River" .....	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City .....	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River .....	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau .....	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China .....	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory .....	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang .....	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region .....	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment .....	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ , $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China .....	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth .....	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application .....	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope .....	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment .....	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation .....	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline .....	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal .....	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems .....	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor .....	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone .....	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China .....	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China .....	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant $^{15}\text{N}$ Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China .....	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau .....	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere .....	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus .....	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation .....	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carries on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil .....	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag .....	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism .....	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation .....	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L. ....	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L. ....	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil .....	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable .....	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms .....	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation .....	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature .....	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure .....	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO <sub>2</sub> Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit .....	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs .....	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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