

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 ..... 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 ..... 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM<sub>2.5</sub>浓度日变化及气象条件影响分析 ..... 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 ..... 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 ..... 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 ..... 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 ..... 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 ..... 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 ..... 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH<sub>3</sub>和N<sub>2</sub>O)减排效果比较:以夏玉米季为例 ..... 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O通量的观测 ..... 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>分压特征分析 ..... 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 ..... 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 ..... 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 ..... 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 ..... 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 ..... 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 ..... 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 ..... 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 ..... 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 ..... 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 ..... 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 ..... 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 ..... 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 ..... 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 ..... 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 ..... 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 ..... 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce<sup>3+</sup>与Cu<sup>2+</sup>协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 ..... 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 ..... 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO<sub>2</sub>光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 ..... 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 ..... 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 ..... 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 ..... 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 ..... 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 ..... 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 ..... 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 ..... 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 ..... 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 ..... 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 ..... 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 ..... 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 ..... 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羟基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>的吸附特性 ..... 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 ..... 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 ..... 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 ..... 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 ..... 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 ..... 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 ..... 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 ..... 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

# 石墨烯-TiO<sub>2</sub> 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解

徐琪, 周泽宇, 王洪涛

(清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 针对基于石墨烯-TiO<sub>2</sub> 的光催化剂多为粉末状, 用于处理实际淋洗液时难以有效回收这一问题, 研究以氧化石墨烯和粉末 TiO<sub>2</sub> 为前驱物使用水热法结合类溶胶凝胶涂布法制备出了可重复使用的石墨烯-TiO<sub>2</sub> 纳米管复合板, 复合板的宏观形貌均一, 催化剂在板的大部分区域上以层数较少的形式负载. 应用制备的复合板对土壤淋洗液体系中的五氯酚 (pentachlorophenol, PCP) 进行光催化降解, 在太阳光照下可在 30 min 内完全去除污染物, 比无催化剂条件下的降解速率提高 5 倍以上; 以氙灯作为模拟太阳光源, 降解速率提高 10 倍. 复合板经长时间浸泡和重复使用后, 光催化活性无明显下降, 具有长期使用的潜力. 复合板的制备解决了催化剂的固定化问题, 有利于分离回收等后续处理.

**关键词:** 石墨烯-TiO<sub>2</sub> 纳米管; 复合板; 土壤淋洗; 五氯酚; 光催化

**中图分类号:** X131 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2016)08-3079-07 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2016.08.032

## Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol

XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Considering that the photocatalysts used in research are generally in powder form, which increase the difficulty of efficient recycle in practice, this research focused on the generation of graphene-titanium dioxide nanotubes catalytic board. Graphene oxide and TiO<sub>2</sub> powder were used as precursors; the sol-gel like coating method along with hydrothermal method was adopted to synthesize the catalytic board. The generated board presented a uniform surface morphology and in its most regions, the catalyst was loaded in the form of a single layer or few layers. During the photodegradation process in the eluent system, under solar irradiation, the removal ratio of the pentachlorophenol (PCP) could reach almost 100% within 30 min, the degradation rate was increased by more than 5 times compared with the eluent without addition of photocatalyst; while under xenon lamp, the degradation rate was increased by 10 times. After long-time soaking and repeated use, the photocatalytic activity of the board did not decrease obviously, which is suitable for long-term use. The application of the board could solve the problem of immobilized catalyst and enable catalyst recycling in subsequent processing.

**Key words:** graphene-titanium dioxide nanotubes; catalytic board; soil washing; PCP; photocatalysis

五氯酚 (pentachlorophenol, PCP) 和多氯联苯 (polychlorinated biphenyl, PCBs) 等氯代芳香族有机物是一类曾被广泛应用的人造持久性污染物<sup>[1]</sup>. 土壤淋洗是对持久性有机污染物污染土壤常用的修复技术<sup>[2~4]</sup>, 相较于其他处理技术, 淋洗结合光催化修复技术可针对性地去目标污染物, 因其反应条件温和、矿化率高、无需氧化助剂而成为持久性有机污染土壤修复的前沿技术. 作为常用催化剂 TiO<sub>2</sub><sup>[5,6]</sup> 与石墨烯复合生成的石墨烯-TiO<sub>2</sub> 光催化剂, 其降解性能明显优于单纯 TiO<sub>2</sub><sup>[7,8]</sup>. 尽管石墨烯-TiO<sub>2</sub> 复合光催化剂在尺度上已远大于 TiO<sub>2</sub> 颗粒本身, 但目前实验室能合成的复合光催化剂在宏观上仍为粉末状, 不利于其从实际土壤淋洗液中分离. 因此, 复合光催化剂的固定化仍是待解决的问题.

本研究通过制备石墨烯-TiO<sub>2</sub> 纳米管光催化剂涂层, 将催化剂固化于玻璃板表面以合成可进行工程应用的光催化复合板, 并对其物化性质及催化性能进行解析.

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验材料、化学试剂与反应釜

实验用表面活性剂 TX-100 (Triton X-100) 为化学纯, 购自西陇化工股份有限公司; 溶剂甲醇为分析纯, 购自美国 Fisher 公司; 氧化石墨烯购自南京先锋

收稿日期: 2015-12-07; 修订日期: 2016-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371472); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2011ZX07317-001)

作者简介: 徐琪 (1989 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境工程学, E-mail: 570949755@qq.com

纳米公司; 纯度 99% 的  $\text{TiO}_2$  购自美国 Sigma-Aldrich 公司; 氢氧化钠(NaOH, 纯度 96%), 购自天津市光复科技发展有限公司; 盐酸(HCl, 纯度 36% ~ 38%), 购自北京化工厂; 超纯水. 目标污染物 PCP 纯度大于 99%, 购自美国 Sigma-Aldrich 公司. 反应釜由可承受高温(200℃)高压(100 MPa)的不锈钢框架和 100 mL 聚四氟乙烯衬胆两部分组成.

### 1.2 复合板制备

取 24 g NaOH 溶于 30 mL 超纯水中, 待完全溶解后称取 1 g  $\text{TiO}_2$  加入其中, 使用磁力搅拌器持续搅拌至  $\text{TiO}_2$  不产生明显沉淀. 取 50 mg 氧化石墨烯均匀分散于超纯水中, 补充超纯水至 60 mL 后搅拌至混均, 将悬浊液置于水热反应釜<sup>[9,10]</sup>中, 在 150℃ 下反应 24 h<sup>[11]</sup>. 冷却后用超纯水清洗水热产物, 添加 HCl 并搅拌使体系维持在  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl, 持续搅拌 1 h<sup>[12-14]</sup>. 用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜进行过滤清洗, 得到石墨烯钛酸纳米管. 产物在添加少量水继续搅拌后呈类溶胶状, 取 76.2 mm × 25.4 mm 玻璃板插入溶液中再缓慢提出, 胶状溶液附着于玻璃板表面. 将均匀涂布石墨烯-钛酸纳米管的玻璃板干燥, 置入管式电磁炉在氮气保护下, 加热至 400℃ 并维持 2 h, 冷却后得到石墨烯- $\text{TiO}_2$  光催化剂复合板.

### 1.3 复合板微观结构研究

使用 Hitachi S-5500 型扫描透射电子显微镜(STEM), 外加 5 kV 加速电压<sup>[15]</sup>分析复合板表面光催化剂的微观形貌、表面特征、微粒分布状况等. STEM 电镜样品制备方法: 将待测复合板切割成 3 mm × 7 mm 以下片状结构, 用硅胶将其一侧粘于铜板上, 放入烘箱使硅胶完全烘干, 获得 STEM 样品.

### 1.4 PCP 污染土壤淋洗实验

根据已有研究中表面活性剂浓度对氯代芳香族有机物污染土壤淋洗效果的研究报道, 使用浓度为  $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的 TX-100 表面活性剂作为淋洗剂, 以水土比 20:1<sup>[16]</sup>对 PCP 污染土壤进行淋洗. 在 40 mL 玻璃试剂瓶中添加 1.0 g 污染土壤及 20.0 mL 淋洗剂. 土壤与淋洗剂混均后, 将其放入恒温摇床, 在 25℃、150  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  下, 连续振荡 24 h 达吸附平衡<sup>[16]</sup>. 淋洗液用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后测定其中 PCP 浓度作为光催化降解淋洗液的初始体系. 3 次重复, 取平均值作为实验结果.

### 1.5 淋洗液中 PCP 光催化降解实验

使用光催化反应装置对淋洗液体系中的 PCP 进行模拟太阳光光催化降解实验时, 使用恒温避光系统(20℃), 以 400 W 氙灯模拟太阳光源. 反应器

直径 150 mm, 底面积 176  $\text{cm}^2$ . 取 7 片复合催化板并排放置于反应器底部, 7 片复合板总面积为 135  $\text{cm}^2$ , 可覆盖 77% 的有效光照区域. 将 100 mL 待处理淋洗液加入反应器中静置 30 min 达到吸附-解吸平衡, 测量 PCP 的相对浓度. 打开光源或将其整体置于太阳光下进行 60 min 光催化降解反应, 以无催化剂的光降解反应作为对照. 定时取样 1.0 mL, 与等体积甲醇溶剂混合振荡, 确保催化剂表面残留 PCP 被完全洗脱, 然后用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜进行过滤, 测定溶液中 PCP 及淋洗剂 TX-100 等的浓度.

### 1.6 PCP 浓度分析方法

使用高效液相色谱法(High-Performance Liquid Chromatography)对各时间段不同淋洗液体系中 PCP、TX-100 等的浓度进行测定<sup>[15]</sup>. 测定仪器及方法如下. 高效液相色谱仪: HPLC, 1260 型色谱仪, 紫外检测器, 安捷伦公司, 美国; 高效液相色谱柱: TC-C18 反相色谱柱, 25  $\mu\text{m}$ , 4.6 mm × 250 mm. 分析条件: 柱温 35℃, 紫外检测器波长分段设为 254、280、249 nm, 分别对应中间产物、TX-100 和 PCP 的特征响应波长. 流动相: 70% 甲醇以及 1% 乙酸水溶液, 流速  $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ . 流动相可过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜并超声脱气后使用.

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合板表面特征分析

胶状催化剂前驱物石墨烯-钛酸纳米管完全覆盖玻璃载体, 经过高温焙烧后表面光催化剂无脱落, 载体与光催化剂结合紧密, 负载性质稳定. 但受重力影响, 覆盖尚不十分均匀, 有待后续完善.

玻璃载体涂布石墨烯-钛酸纳米管焙烧前后表面微观形貌的对比如图 1 所示. 焙烧对催化剂的微观形貌改变不大, 催化剂仍以纳米管形式较为均匀地分布在载体表面, 只有少部分纳米管有变形并存在管与管之间烧结在一起的现象. 与粉末状结构中交错生长的钛纳米管不同, 水热反应的持续搅拌, 使复合板表面的钛纳米管有定向排列趋势. 复合板大部分区域由层数较少的催化剂所覆盖, 部分区域存在多层叠置情况<sup>[17,18]</sup>. 同时, 石墨烯的高比表面积<sup>[19]</sup>和  $\pi-\pi$  键作用<sup>[20-22]</sup>, 使其能更有效地吸附污染物, 它的高导电性<sup>[23]</sup> [ $2 \times 10^5 \text{ cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$ ] 能使催化剂上产生的光生电子迅速转移至石墨烯, 抑制光生空穴-电子对的复合<sup>[24,25]</sup>, 提高催化性能<sup>[8,26,27]</sup>.

图2为复合板边缘处不同比例的扫描电镜图,

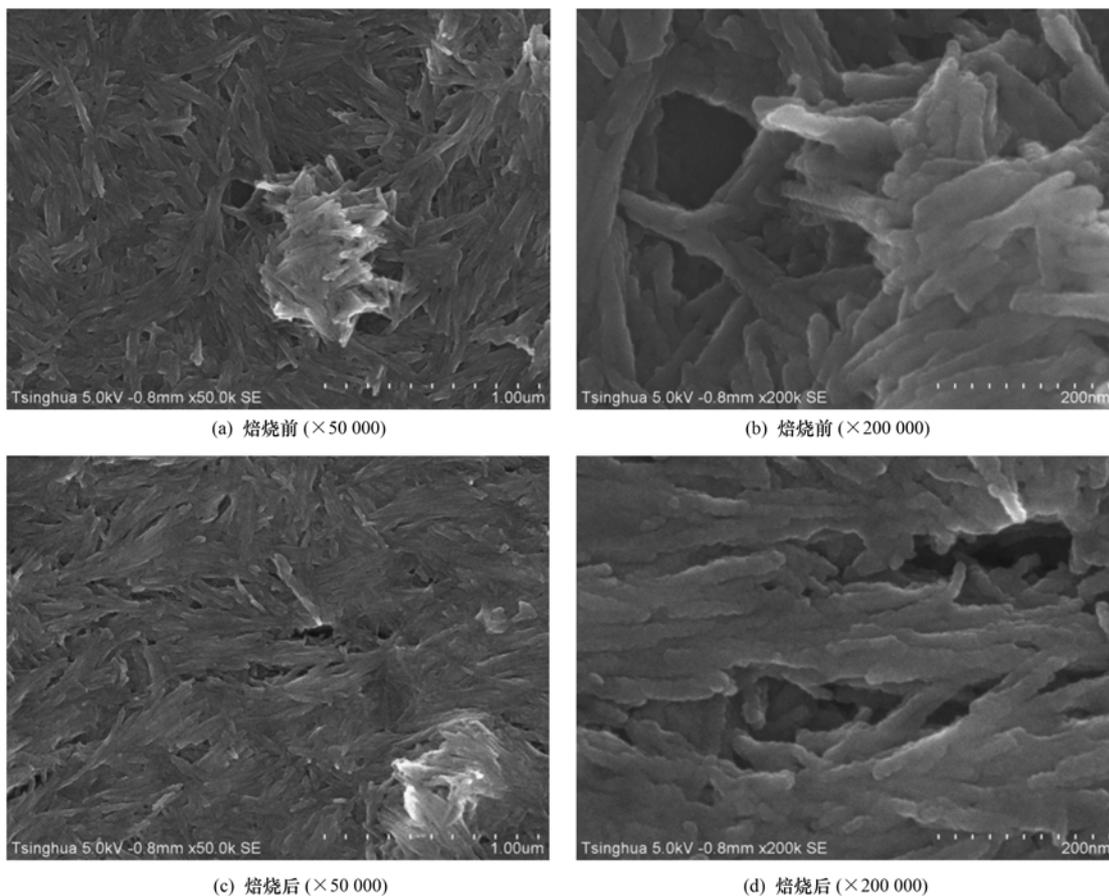


图 1 石墨烯-钛酸纳米管复合板在焙烧前后的微观形貌电镜扫描图

Fig. 1 Scanning electron microscopy of grapheme-titanate nanotubes before and after calcination

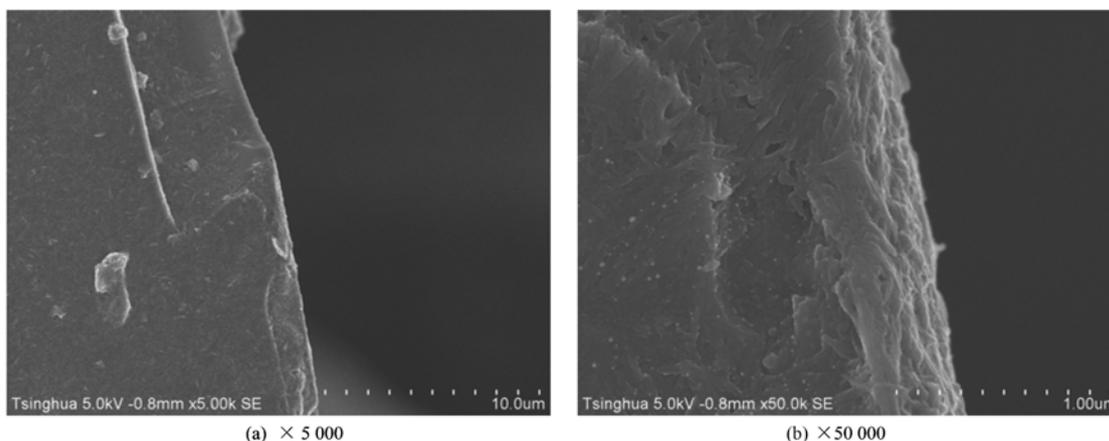


图 2 复合板边缘微观形貌电镜扫描图

Fig. 2 Scanning electron microscopy of catalytic board edge

可以看出复合板表面催化剂负载较为均匀平缓,有利于其微观形貌的维持,催化剂不易剥落。

## 2.2 复合板对淋洗液中 PCP 的光催化降解研究

### 2.2.1 太阳光下 PCP 的光催化降解

在太阳光照射下,使用制备的复合板对淋洗液中 PCP 进行光催化降解,结果如图 3 所示,其中,  $c_0$  为淋洗液体系中 PCP 的初始浓度,其一级反应动力

学拟合曲线见图 4。

经暗反应吸附平衡后,复合板对淋洗液中 PCP 的吸附量约为 30%; 经 5 min 的太阳光照后, PCP 相对浓度快速下降至 23%; 反应至 30 min 时即基本完成降解, 残留率小于 1%。对照组中 PCP 在反应至 5、30 和 60 min 时的相对浓度分别为 87%、42% 和 23%。

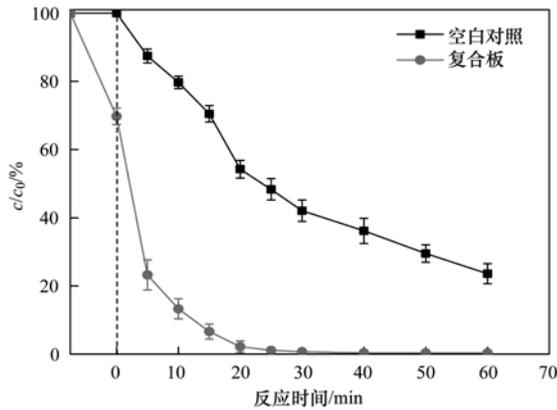


图3 太阳光下复合板光催化降解PCP的相对浓度随时间变化曲线

Fig. 3 Variation of PCP relative concentration with time decomposed by catalytic board under solar irradiation

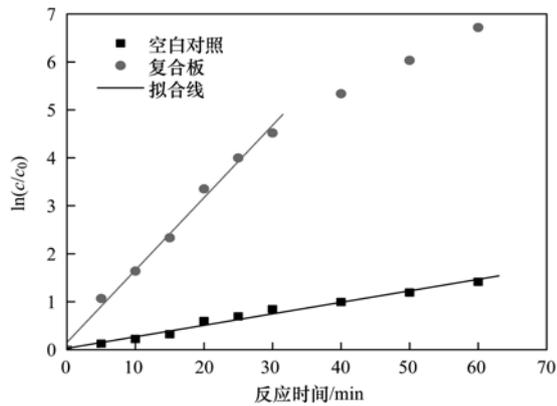


图4 太阳光下PCP降解反应动力学拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of pseudo-first-order reaction for PCP degradation under solar irradiation

对PCP降解反应的拟一级动力学方程拟合结果表明,在0~30 min时拟合度较高( $R^2 = 0.991$ ),反应动力学常数 $k = 0.1502 \text{ min}^{-1}$ ,30 min之后由于淋洗液中PCP浓度过低,造成复合板与污染物的接触率下降,导致降解速率降低.在实际应用时可通过使淋洗液流动来增加复合板与污染物的接触率.同等条件下,对照组的反应动力学常数 $k_0 = 0.0244 \text{ min}^{-1}$ ( $R^2 = 0.982$ ),约为有光催化剂情况下降解速率的16.2%.

### 2.2.2 模拟太阳光下PCP的光催化降解

为提高实验的稳定性和可对比性,使用氙灯作为模拟太阳光源研究复合板光催化剂的性能,结果如图5所示,其一级反应动力学拟合曲线见图6.

在光照初期,在复合板催化剂的作用下,PCP降解反应异常迅速,不符合拟一级反应动力学方程.推测其机制认为可能是光生空穴捕获作用,催化剂

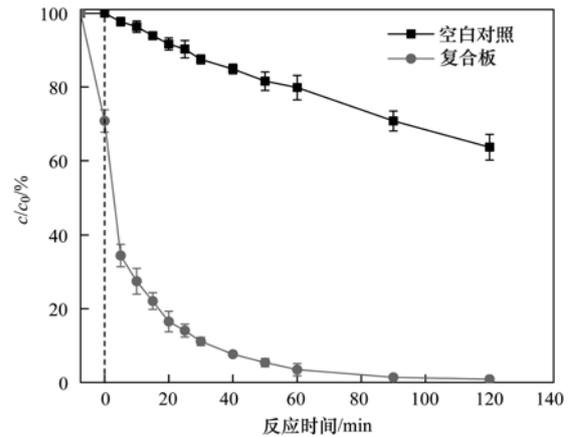


图5 模拟太阳光下复合板光催化降解PCP的相对浓度随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of PCP relative concentration with time decomposed by catalytic board under xenon lamp

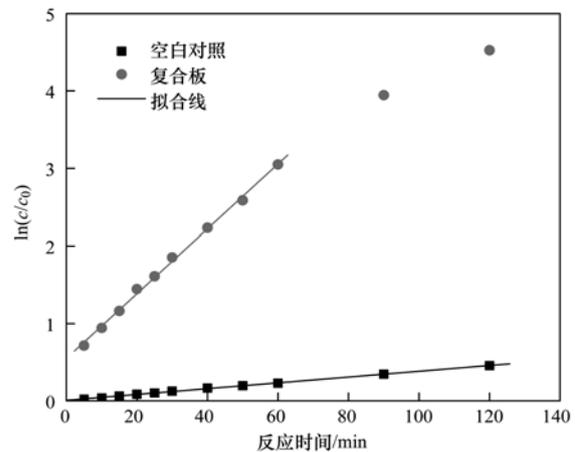


图6 模拟太阳光下PCP降解反应动力学拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of pseudo-first-order reaction for PCP degradation under xenon lamp

吸收光能后,光生电子迅速转移至石墨烯表面,使 $\text{TiO}_2$ 表面产生大量光生空穴,它们高速捕获淋洗液中的PCP.为了验证上述推断,在120 min光催化降解完成后(淋洗液中PCP浓度趋0),迅速将复合板取出,用甲醇溶液清洗,并标定至100 mL,测得复合板吸附的PCP其相对浓度约为21%(以淋洗液初始体系中PCP浓度为参考),证明了上述推断.因此,在进行拟一级反应动力学方程拟合时应排除吸附阶段.反应60 min后体系中的PCP浓度过低,影响复合板对污染物的降解,故选用5~60 min内光催化反应速率进行拟合.在模拟太阳光照下,复合板催化反应的动力学常数 $k = 0.0418 \text{ min}^{-1}$ ( $R^2 = 0.997$ );同等条件下,对照组的反应动力学常数 $k_0$ 仅为 $0.0038 \text{ min}^{-1}$ ( $R^2 = 0.998$ ).

与粉末状光催化剂比较,使用复合板催化剂时

淋洗液中 PCP 去除速率有所上升. 以未添加催化剂的空白组作为对照, 在太阳光照下, 复合板催化反应的动力学常数约为同等条件下空白组的 6 倍以上, 而粉末催化反应的速率仅比空白组的速率提高了 4 倍左右; 在模拟太阳光照下, 复合板和粉末催化反应速率分别比无催化剂条件下提高了约 11 倍和 7 倍. 实验数据见表 1.

表 1 光催化降解 PCP 拟一级动力学常数

Table 1 Pseudo-first-order rate constant of PCP degradation			
光照条件	项目	$k/\text{min}^{-1}$	$R^2$
太阳光照	复合板	0.150	0.991
	空白组	0.024 4	0.982
	粉末催化剂	0.126	0.993
	空白组	0.030 4	0.997
模拟太阳光照	复合板	0.041 8	0.997
	空白组	0.003 80	0.998
	粉末催化剂	0.082 1	0.988
	空白组	0.011 1	0.999

虽然粉末状光催化剂在淋洗液中均匀悬浮, 与污染物充分接触, 距光源较近的催化剂颗粒能大量吸收入射光能, 产生光生空穴-电子对, 但两者易复合, 降低了有效性<sup>[26]</sup>; 距光源较远的催化剂颗粒由于光源被遮挡, 虽能吸附污染物但降解能力下降. 复合板中距光源最近的光催化剂位于与污染物接触能力最有利的位置, 吸附污染物后可高效降解; 复合板的透光率很低, 未得到利用的光能较少; 另外复合板位于光催化装置底部, 上方 PCP 溶液可直接吸收紫外光能对污染物进行光降解, 也提高了总降解效率.

### 2.2.3 复合板的重复使用性能

光催化剂复合板的重复使用性能是其能否实际应用的关键. 使用光催化复合板, 每次以相同实验方式测试其对淋洗液中 PCP 的降解速率. 每次测试完毕后, 去除淋洗液, 用超纯水对复合板进行清洗, 烘干以备下次使用. 每次实验在模拟太阳光下进行 120 min, 各次降解曲线以及降解速率对比见图 7.

10 次重复使用实验的结果显示, 随着使用次数的增加, 复合板对于淋洗液中 PCP 的降解速率略有下降, 但幅度很小, 且在每次反应结束时淋洗液中 PCP 均被完全降解. 复合板光催化活性的小幅降低主要是冲洗过程中复合板表面部分催化剂剥落造成的, 此外, 烘干也可能对钛纳米管的性质有一定影响.

在实际应用中, 复合板需持续对淋洗液中污染物进行催化降解, 因此连续浸泡实验更能客观地反

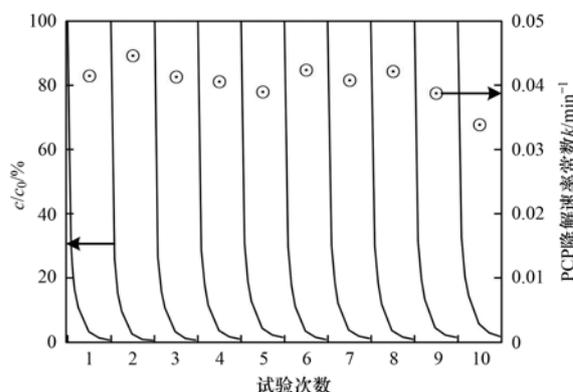


图 7 复合板重复使用次数对五氯酚光催化降解的影响

Fig. 7 Effect of catalytic board reuse times on PCP photodegradation efficiency

映复合板在持续使用过程中的光催化性能. 在模拟太阳光下, 依照 1.5 节所述方法对淋洗液进行处理, 每次处理后将已处理淋洗液取出, 再重新加入 100 mL 待处理淋洗液于光催化装置中, 并以封口膜密封防止水份挥发, 在黑暗状态下静置一周. 次周相同时间点对该淋洗液进行光催化降解, 实验重复进行 5 周. 每次降解过程中的 PCP 降解曲线和去除速率对比如图 8 所示.

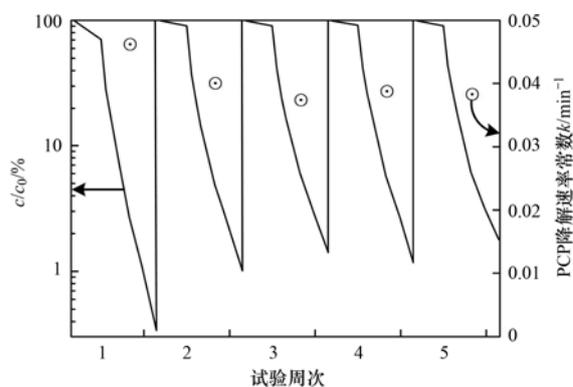


图 8 复合板持续使用时间对五氯酚光催化降解的影响

Fig. 8 Effect of catalytic board using time on PCP photodegradation efficiency

首次使用时, 由于反应前复合板表面未吸附污染物, 达吸附-解吸平衡时, 淋洗液中 PCP 浓度较低, 故首次实验光催化反应起点的 PCP 相对浓度较低, 反应结束时淋洗液中 PCP 浓度较小. 随后, 由于复合板表面已吸附部分污染物, 每次加入待处理淋洗液后, PCP 的吸附-解吸平衡浓度有一定程度的升高, 反应结束时残留量也有小幅上涨. 但每次光照反应完成时, 体系中 PCP 浓度均维持在 1% 左右, 复合板光催化活性在持续使用后无明显下降. 表明光催化剂复合板性能稳定, 具有长期重复使用的潜力.

### 3 结论

(1)使用水热法制备出石墨烯-TiO<sub>2</sub> 纳米管光催化剂,使用类溶胶凝胶涂布法制备出石墨烯-TiO<sub>2</sub> 光催化剂复合板,催化剂在大部分区域以层数较少的形式负载于复合板表面,负载效果良好. 在微观形貌上,高温焙烧会使纳米管产生微小形变,但对复合板光催化性能影响不大.

(2)在太阳光下使用复合板对淋洗液中的 PCP 进行光催化降解时,可在 30 min 内几乎完全去除污染物,降解速率相对于无催化剂情况提高了 5 倍以上;而使用氙灯作为模拟太阳光源时,降解速率提高了 10 倍以上. 由此可见,复合板对 PCP 的降解反应具有良好的催化性能.

(3)复合板经长时间浸泡和重复使用后,光催化性能没有明显下降,适合长期循环利用.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Todaka T, Hirakawa H, Hori T, *et al.* Concentrations of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, polychlorinated dibenzofurans, and non-*ortho* and mono-*ortho* polychlorinated biphenyls in blood of Yusho patients[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(10): 1983-1989.
- [ 2 ] Ye M, Sun M M, Kengara F O, *et al.* Evaluation of soil washing process with carboxymethyl- $\beta$ -cyclodextrin and carboxymethyl chitosan for recovery of PAHs/heavy metals/fluorine from metallurgic plant site[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(8): 1661-1672.
- [ 3 ] Liu Y J, Aizawa M, Peng W Q, *et al.* Carbon nanosheet-titania nanocrystal composites from reassembling of exfoliated graphene oxide layers with colloidal titania nanoparticles[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2013, **197**: 329-336.
- [ 4 ] Liu J W, Han R, Wang H T, *et al.* Photoassisted degradation of pentachlorophenol in a simulated soil washing system containing nonionic surfactant Triton X-100 with La-B codoped TiO<sub>2</sub> under visible and solar light irradiation[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2011, **103**(3-4): 470-478.
- [ 5 ] Chiu W H, Lee K M, Hsieh W F. High efficiency flexible dye-sensitized solar cells by multiple electrophoretic depositions[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, **196**(7): 3683-3687.
- [ 6 ] Zhang Y H, Tang Z R, Fu X Z, *et al.* TiO<sub>2</sub>-graphene nanocomposites for gas-phase photocatalytic degradation of volatile aromatic pollutant: is TiO<sub>2</sub>-graphene truly different from other TiO<sub>2</sub>-carbon composite materials? [J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(12): 7303-7314.
- [ 7 ] Hu X T, Zhu J X, Ding Q. Environmental life-cycle comparisons of two polychlorinated biphenyl remediation technologies: incineration and base catalyzed decomposition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **191**(1-3): 258-268.
- [ 8 ] Pan X Y, Yang M Q, Tang Z R, *et al.* Noncovalently functionalized graphene-directed synthesis of ultralarge graphene-based TiO<sub>2</sub> nanosheet composites: tunable morphology and photocatalytic applications[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, **118**(47): 27325-27335.
- [ 9 ] Yang N L, Zhai J, Wang D, *et al.* Two-dimensional graphene bridges enhanced photoinduced charge transport in dye-sensitized solar cells[J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(2): 887-894.
- [ 10 ] Perera S D, Mariano R G, Vu K, *et al.* Hydrothermal synthesis of graphene-TiO<sub>2</sub> nanotube composites with enhanced photocatalytic activity[J]. *ACS Catalysis*, 2012, **2**(6): 949-956.
- [ 11 ] 周泽宇. 石墨烯-二氧化钛纳米管对淋洗液五氯酚光催化降解研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [ 12 ] 周琪. 石墨烯基二氧化钛纳米复合材料的制备与光催化性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [ 13 ] 路瑞娟. 氮掺杂石墨烯/二氧化钛杂化材料的制备及其光催化降解染料[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [ 14 ] Yang X F, Qin J L, Li Y, *et al.* Graphene-spindle shaped TiO<sub>2</sub> mesocrystal composites: facile synthesis and enhanced visible light photocatalytic performance [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **261**: 342-350.
- [ 15 ] Li P F, Zhou H, Cheng X H. Nano/micro tribological behaviors of a self-assembled graphene oxide nanolayer on Ti/titanium alloy substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2013, **285**: 937-944.
- [ 16 ] 张亚新. 淋洗结合石墨烯-TiO<sub>2</sub> 光催化修复五氯酚污染土壤研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [ 17 ] Wang F, Zhang K. Reduced graphene oxide-TiO<sub>2</sub> nanocomposite with high photocatalytic activity for the degradation of rhodamine B[J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2011, **345**(1-2): 101-107.
- [ 18 ] Zhang Y P, Pan C X. TiO<sub>2</sub>/graphene composite from thermal reaction of graphene oxide and its photocatalytic activity in visible light[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, **46**(8): 2622-2626.
- [ 19 ] Schniepp H C, Li J L, McAllister M J, *et al.* Functionalized single graphene sheets derived from splitting graphite oxide[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, **110**(17): 8535-8539.
- [ 20 ] Guo S J, Dong S J. Graphene nanosheet: synthesis, molecular engineering, thin film, hybrids, and energy and analytical applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, **40**(5): 2644-2672.
- [ 21 ] Zhang M, Gao B, Yao Y, *et al.* Synthesis, characterization, and environmental implications of graphene-coated biochar [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **435-436**: 567-572.
- [ 22 ] Kamat P V. Graphene-based nanoassemblies for energy conversion[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2011, **2**(3): 242-251.
- [ 23 ] Zhu Y W, Murali S, Cai W W, *et al.* Correction: graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications [J]. *Advanced Materials*, 2010, **22**(46): 5226.

- [24] Wu X S, Sprinkle M, Li X B, *et al.* Epitaxial-graphene/graphene-oxide junction: an essential step towards epitaxial graphene electronics [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101** (2): 026801.
- [25] Song J L, Yin Z Y, Yang Z J, *et al.* Enhancement of photogenerated electron transport in dye-sensitized solar cells with introduction of a reduced graphene oxide-TiO<sub>2</sub> junction [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2011, **17**: 10832-10837.
- [26] Anandan S, Rao T N, Sathish M, *et al.* Superhydrophilic graphene-loaded TiO<sub>2</sub> thin film for self-cleaning applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, **5**(1): 207-212.
- [27] Huang Q W, Tian S Q, Zeng D W, *et al.* Enhanced photocatalytic activity of chemically bonded TiO<sub>2</sub>/graphene composites based on the effective interfacial charge transfer through the C-Ti bond[J]. *ACS Catalysis*, 2013, **3**(7): 1477-1485.

---

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2015年10月21日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2014年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2014年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分76.00,排名第一,总被引频次7733,影响因子1.294.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2014年度《环境科学》综合评价总分76.00,在被统计的33种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

## CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China .....	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China .....	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date .....	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang .....	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain .....	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City .....	..... SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City .....	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case .....	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin .....	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation .....	..... FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons .....	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir .....	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed .....	..... WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai .....	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River .....	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream .....	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch .....	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	..... CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area .....	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region .....	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China .....	..... WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River .....	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland .....	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers .....	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands .....	..... ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce <sup>3+</sup> and Cu <sup>2+</sup> Ions .....	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor .....	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol .....	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO <sub>2</sub> in Aqueous Solution .....	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater .....	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor .....	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment .....	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia .....	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition .....	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid .....	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province .....	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics .....	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties .....	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method .....	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions .....	..... ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges .....	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions .....	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid .....	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization .....	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA .....	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance .....	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils .....	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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