

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铨, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机胺的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铨, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 小莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)
《环境科学》征订启事(553)	
《环境科学》征稿简则(655)	
信息(664, 755, 885)	

微米 SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明 B

朱红庆^{1,2}, 杨兵², 魏世强¹, 杨静静^{2*}, 张进忠^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆化工职业学院环境与质量检测学院, 重庆 401228)

摘要: 为发展低耗和环境友好的有机物降解技术, 采用光催化还原制备微米级碳化硅 (SiC)/石墨烯复合材料, XRD、FTIR、Raman 光谱、XPS 和 SEM 等手段表征其物相组成和形貌结构, 并以罗丹明 B (RhB) 为模拟污染物, 研究了复合材料在可见光照射下的光催化活性和稳定性; 通过活性物种捕获实验初步探讨了 RhB 的光催化降解机制。结果表明, SiC 与石墨烯复合延长了光生电子和光生空穴的寿命, 提高了材料的光催化活性与稳定性。当 SiC/石墨烯配比为 1:0.8 时, 光照 60 min 时 RhB 的降解率可以达到 92.7%, 降解过程符合一级反应动力学方程。光催化降解 RhB 过程中, 主要活性物种的贡献依次为: 光生空穴 (h^+) > 超氧阴离子自由基 ($\cdot O_2^-$) > 光生电子 (e^-) > 羟基自由基 ($\cdot OH$)。

关键词: 碳化硅 (SiC); 石墨烯; 复合材料; 光催化降解; 罗丹明 B (RhB)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0756-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908089

Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation

ZHU Hong-qing^{1,2}, YANG Bing², WEI Shi-qiang¹, YANG Jing-jing^{2*}, ZHANG Jin-zhong^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Environment and Quality Test Department, Chongqing Chemical Industry Vocational College, Chongqing 401228, China)

Abstract: To develop low consumption and an environmentally friendly degradation technology for organic pollutants, micro-SiC/graphene composite materials were synthesized by photocatalytic reduction, and the composition and morphology of the prepared materials were characterized by XRD, FTIR, Raman spectroscopy, XPS, and SEM. Rhodamine B (RhB) was selected as the simulated pollutant to investigate the photocatalytic activity and stability of composite materials under visible light irradiation. The degradation mechanism was preliminarily discussed by active species capture experiments. Results show that the lives of photogenerated electron and photogenerated hole of SiC were prolonged when combined with graphene, which improved the photocatalytic activity and stability of composite materials. The degradation efficiency of RhB reached 92.7% with the composite material of SiC/graphene ratio (1:0.8) under 60 min irradiation, and the degradation process accorded with the first-order reaction kinetic equation. The contribution of main active species for photocatalytic degradation followed with a decreasing order of photogenerated hole (h^+), superoxide anion radical ($\cdot O_2^-$), photogenerated electron (e^-), and hydroxyl radical ($\cdot OH$).

Key words: SiC; graphene; composite materials; photocatalytic degradation; Rhodamine B (RhB)

能源过度消费和人口快速增长加剧了能源短缺与环境污染, 吸附、电解、膜分离、离子交换、絮凝沉淀、氧化还原、生物处理和光催化降解等废水处理技术不断发展。近年来, 在紫外光照射下催化降解有机物取得了重大进展, 但紫外光在太阳光谱中的比例不到 4%, 可见光占据 43%。要使光催化真正成为高效、低耗的处理技术, 充分利用可见光尤为关键^[1], 半导体参与的光催化过程是利用太阳能的一种有效方式。因此, 用响应可见光的半导体光催化剂发展低耗和环境友好的有机物降解技术非常必要^[2]。

根据化学组成和能带结构, 光催化剂包括等电子体光催化剂、含金属光催化剂和无金属光催化剂这 3 种类型。尽管前两类光催化剂的活性较高, 但它们大多含有稀有金属, 其来源少、成本高, 限制了它们的实际应用。无金属光催化剂储量丰富、价格低廉, 具有广阔的发展潜力。近年来发现一些具有可见

光催化活性的无金属半导体光催化剂, 如红磷^[3]、 $g-C_3N_4$ ^[4] 和 SiC^[5] 等。特别是 SiC, 其禁带宽度由晶型决定, 其中立方晶型 SiC (3C-SiC) 的禁带宽度为 2.4 eV, 可直接利用可见光, 还具有硬度大、耐磨和抗腐蚀等物理特性^[6,7]。然而, 受表面电子结构和比表面积等因素的影响, 3C-SiC 对可见光的利用率有限, 急需提升其光催化性能。目前, SiC 基光催化性能提升方法主要有形貌调控 (如 SiC 纳米线^[8]、SiC 纳米薄片^[9])、离子掺杂 (如 B 掺杂^[5])、金属或金属氧化物负载 (如 Pt^[10]、 Cu_2O ^[11])、与其它半导体复合 (如 SiC/ $BiVO_4$ ^[12]、SiC/ TiO_2 ^[13]、SiC/

收稿日期: 2019-08-11; 修订日期: 2019-09-18

基金项目: 重庆市教委科学技术研究重点项目 (KJZD-K201804501); 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目 (cstc2018jszx-zdyfmxX0002)

作者简介: 朱红庆 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: hongqzhu@yeah.net

* 通信作者, E-mail: hahajing1229@163.com; jzhzhang@swu.edu.cn

C₃N₄^[14])和负载石墨烯(纳米 SiC/石墨烯^[15])等. 石墨烯的电子迁移率高[20 000 cm²·(V·s)⁻¹]及比表面积大(~2 600 m²·g⁻¹)^[16,17],在光催化降解有机废水中能充分发挥其优势.将 SiC 与石墨烯构建复合异质结,可以解决光生电子和光生空穴的复合问题,提高其对污染物的吸附能力. Yang 等^[18]用纳米 SiC 与被还原的氧化石墨烯构建复合物,提高了可见光催化分解水的产氢能力,但光催化剂易失活,限制了其实际应用. Zhu 等^[19]用热解石墨烯包覆的六方晶型 SiC(6H-SiC, 60~120 μm)催化降解罗丹明 B,但是 6H-SiC 的禁带宽度为 3.45 eV,只能响应紫外光.若能用响应可见光的微米级 3C-SiC 半导体与石墨烯形成光催化活性强的复合材料,解决纳米材料在实际应用中易失活、难分散和造成二次污染的问题^[20,21],具有重要的理论意义与实用价值.

本研究以 5 μm 的 SiC 和氧化石墨烯为原料,采用光催化还原法制备 SiC/石墨烯复合材料,以染料废水中常见的罗丹明 B 为模拟污染物,考察复合材料的光催化活性,通过活性物种捕获实验初步分析了 SiC/石墨烯对罗丹明 B 的光催化降解机制.

1 材料与方法

1.1 主要试剂与材料

SiC(粒径为 5 μm,陕西西科博尔有限公司);氧化石墨烯(GO,纯度≥98%,中科院成都有机化学有限公司);罗丹明 B(RhB,分析纯,天津市光复精细化工研究所).其它试剂均为分析纯(中国国药集团).

1.2 主要仪器

紫外可见分光光度计(TU1901,北京普析通用仪器有限责任公司);氙灯光源(300 W,配 420 nm 截至滤光片,北京中教金源科技有限公司);X-射线衍射仪(XRD, 3 kW, Rigaku Smartlab, 日本);傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, PerkinElmer, 美国);拉曼显微光谱仪(Raman, XploRA PLUS HORIBA Scientific, 美国);场发射扫描电子显微镜(SEM, Quanta 400 FEG, 美国);X-射线光电子能谱仪(XPS, ESCALAB 250XI, 美国);电化学工作站(CHI 660E, 上海辰华仪器公司).

1.3 SiC/石墨烯复合材料的制备

将 30 mg SiC 微米粒子超声分散 1 h,得到 SiC 分散液;分别取 3、9、15、24 和 30 mg GO 于 200 mL 20% 的乙醇-水溶液中,超声分散 1 h,得到均匀的 GO 分散液.在剧烈搅拌下,分别将 GO 分散液缓慢滴入 SiC 分散液中,在高压汞灯下光催化还原 4 h,用 0.45 μm 滤膜减压抽滤,蒸馏水、无水乙醇洗涤,

得到的固体产物在 60℃ 真空干燥 12 h,研磨,获得的 SiC/石墨烯复合材料分别记为 SiC/G(1:0.1)、SiC/G(1:0.3)、SiC/G(1:0.5)、SiC/G(1:0.8)和 SiC/G(1:1).

1.4 材料表征与光电性能测试

用 XRD 分析复合材料的物相组成和微观结构,以 Cu 靶 Kα 为 X-射线源;FTIR 和 Raman 光谱分析复合物的物质组分;SEM 观察复合物的微观形貌;XPS 定性分析复合物表面元素.

用电化学工作站测试复合材料的光电流.取 10 mg SiC/石墨烯复合材料,超声分散于 100 mL 的 0.5 mol·L⁻¹ Na₂SO₄ 溶液中,氙灯照射,以 Pt 片为工作电极和对电极,饱和甘汞电极为参比电极,偏压为 0.6 V,在时间-电流模式下进行测试.

1.5 光催化活性测试

取 10 mg 复合材料于 100 mL 浓度为 10 mg·L⁻¹ 的 RhB 中,磁力搅拌下暗反应 10 min,加入 0.5 mL H₂O₂,氙灯(λ≥420 nm)照射,每隔 10 min 取反应液样品,离心分离,在 554 nm 处测定上清液的吸光度,计算 RhB 的去除率,考察复合材料的光催化活性.每个实验重复 3 次,用平均值加减标准偏差表示结果.

1.6 活性物种捕获实验

为研究复合材料对 RhB 的光催化降解机制,以 EDTA 二钠盐(EDTA-2Na, 5 mmol·L⁻¹)、2-丙醇(IPA, 2.5 mL·L⁻¹)、1,4-苯醌(BQ, 2 mmol·L⁻¹)和 AgNO₃(0.025 mmol·L⁻¹)分别为活性物种光生空穴(h⁺)、羟基自由基(·OH)、超氧阴离子自由基(·O₂⁻)和电子(e⁻)的捕获剂,加入到光催化降解 RhB 体系中,确定催化降解过程中的主要活性物种.

2 结果与讨论

2.1 材料表征与光电性能测试

2.1.1 XRD 分析

图 1 为 SiC 和 SiC/石墨烯复合材料的 XRD 图谱.可以看出,2θ 为 35.6°、41.5°、60.1°和 71.8°分别对应 3C-SiC 的(111)、(200)、(220)、(311)和(222)晶面衍射峰^[22];在 2θ 为 10.3°处出现明显的 GO(001)特征衍射峰,峰强随复合材料中 GO 含量的增加而增加.在复合材料的 XRD 图谱中,除 GO 的特征衍射峰外,其余基本与纯 SiC 一致,说明 SiC 与石墨烯成功复合,且复合后其晶型未发生明显变化.

2.1.2 FTIR 光谱分析

图 2 为 SiC、GO 和 SiC/石墨烯复合材料的红外光谱图.可以看出,所有材料在 3 455 cm⁻¹和 1 636 cm⁻¹均出现—OH 的振动吸收峰,可能来自于材料

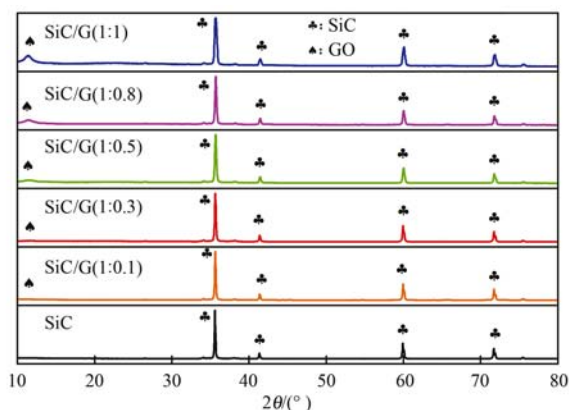


图1 SiC和SiC/石墨烯复合材料的XRD图

Fig. 1 XRD patterns of SiC and SiC/graphene composite materials

表面C—OH和吸附水中的—OH^[23];871 cm⁻¹处的宽峰对应SiC的Si—C振动,随着石墨烯含量的增加,SiC振动吸收峰逐渐减弱,说明SiC表面逐渐被石墨烯包裹.与GO比较,可明显观察到复合材料振动吸收峰减少,其原因是复合材料表面GO被还原,官能团减少.

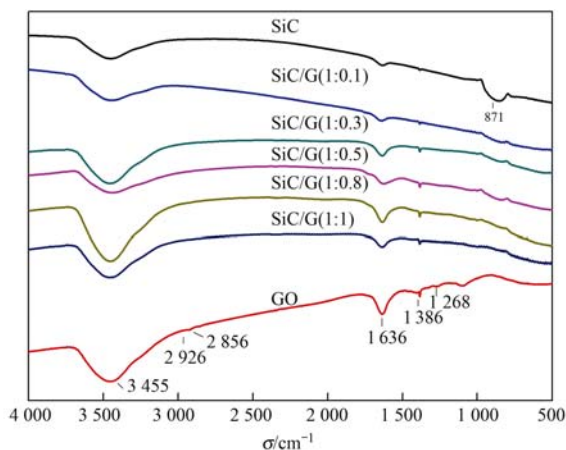


图2 SiC、GO和SiC/石墨烯复合材料的FTIR图

Fig. 2 FTIR spectra of SiC, GO and SiC/graphene composite materials

2.1.3 Raman 光谱分析

Raman光谱进一步证明SiC和石墨烯复合物的存在及GO的还原情况(图3).可以看出,在1361.2 cm⁻¹和1585.9 cm⁻¹处SiC/G(1:0.8)和GO都分别出现显著的D带和G带峰,D峰代表无序的碳原子,G峰代表sp²杂化轨道的碳原子,D峰和G峰强度比(I_D/I_G)可用于评估石墨烯的还原程度^[24].与GO比较,在光催化还原石墨烯过程中sp²杂化轨道的碳原子含量增加和无序碳原子的减少,使得SiC/G(1:0.8)的G峰强度大大增加;根据谱图的D峰和G峰强度,计算获得GO和SiC/G(1:0.8)的I_G/I_D分别为1.06和1.20,表明光照后复合物中的GO被成功还原.SiC/G(1:0.8)在789.8 cm⁻¹和969 cm⁻¹

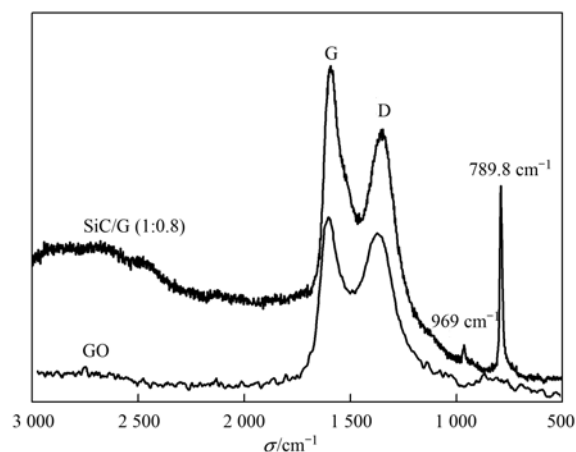


图3 GO和SiC/G(1:0.8)的Raman光谱图

Fig. 3 Raman spectra of GO and SiC/G(1:0.8)

出现3C-SiC的特征峰,表明复合材料中SiC和石墨烯的同时存在.

2.1.4 XPS 分析

图4表示SiC/G(1:0.8)的XPS谱图.C 1s谱图中284.8 eV对应C—C键,286.8 eV和288.6 eV分别对应C—O和O=C—O键^[25],283.2 eV对应3C-SiC中的C—Si键^[26];Si 2p谱图中101.2 eV和103.5 eV分别对应Si—C和Si—O键.XPS分析表明SiC/G复合材料被成功制备.

2.1.5 SEM 分析

图5表示SiC和SiC/石墨烯复合材料的SEM图.可以看出,SiC的粒径约为5 μm,表面光滑且无杂质[图5(a)和5(b)];与石墨烯复合后,SiC表面不再光滑,少量褶皱状石墨烯负载在SiC上[图5(c)和5(d)];随着复合材料中石墨烯含量的增加,SiC颗粒被成片的石墨烯包裹,分散独立的SiC颗粒逐渐减少[图5(e)和5(h)];当SiC/G配比达到1:0.8时,SiC颗粒分散在石墨烯结成的大网上,但可清晰看到石墨烯的褶皱状和其上镶嵌的SiC轮廓[图5(i)和5(j)];当SiC/G配比达到1:1时,石墨烯的褶皱状几乎消失,包覆SiC的石墨烯也变得更加致密且厚实[图5(k)和5(l)],这可能影响SiC对光的吸收,进而降低光催化效率.

2.1.6 光电性能分析

在可见光(λ≥420 nm)照射下测试SiC、SiC/G(1:0.8)和SiC/G(1:1)的光电流,获得如图6所示的结果.光照时3种材料均产生稳定的光电流,但复合材料的光电流明显高于纯SiC,表明复合材料中SiC产生的光生电子与光生空穴得到有效分离.SiC/G(1:1)产生的光电流低于SiC/G(1:0.8),其原因可能是SiC的有效受光面积减少,进而降低光电流的产生.

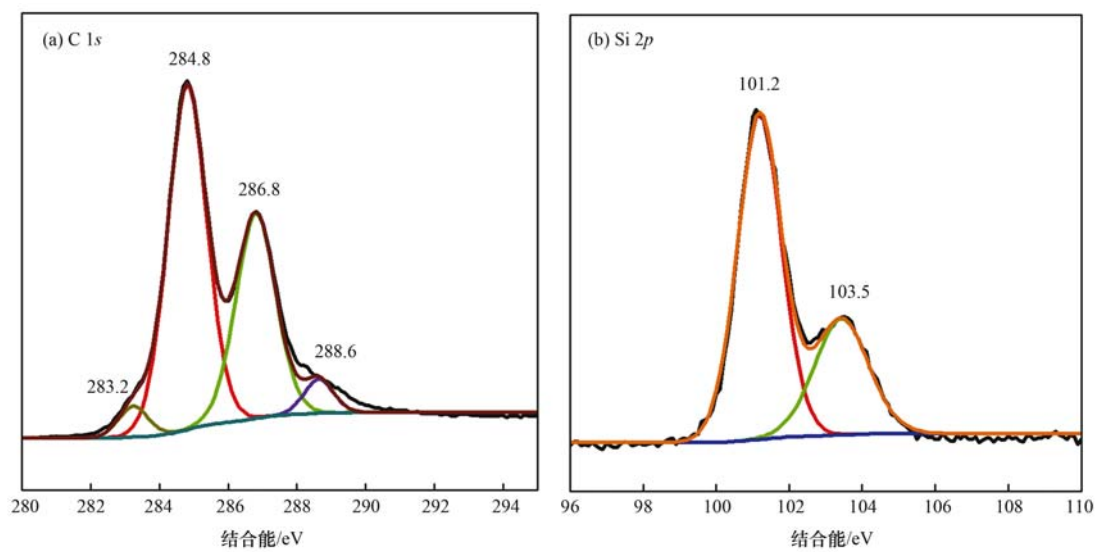
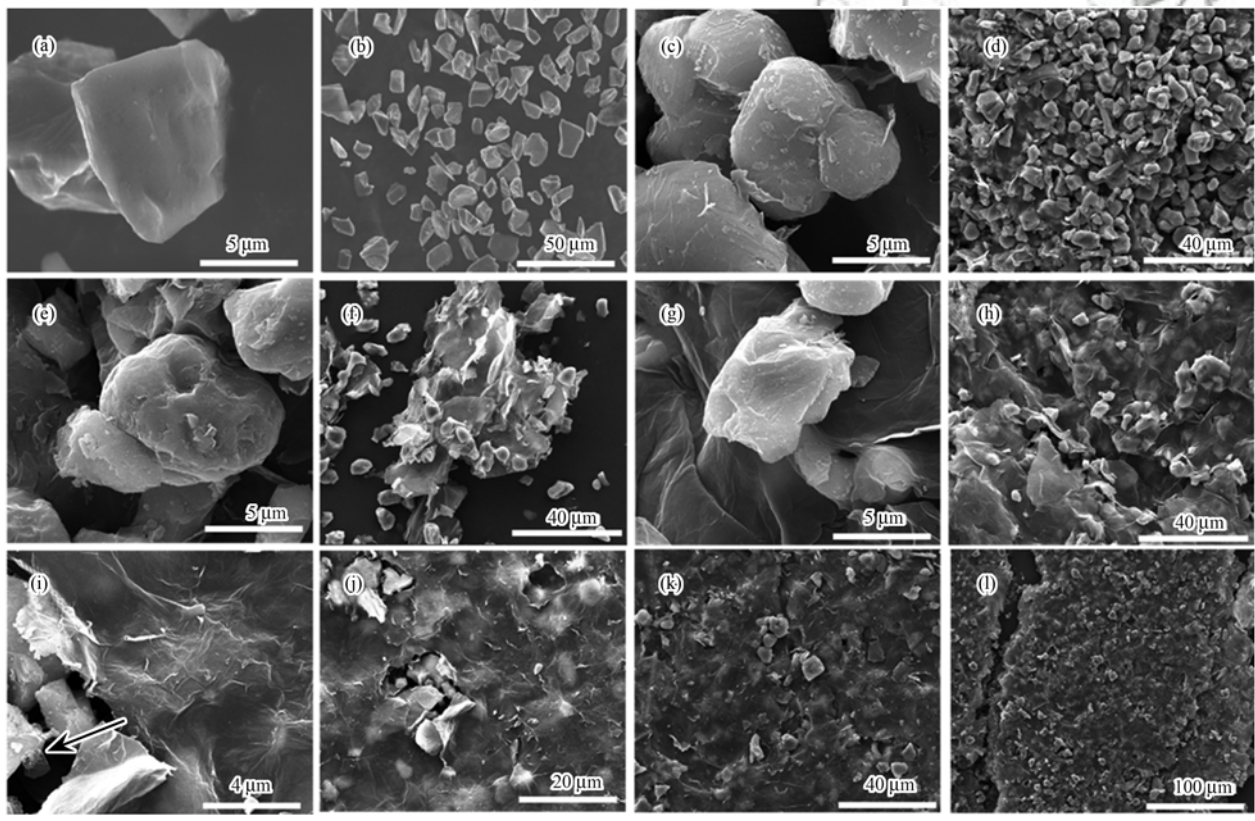


图 4 SiC/G(1:0.8) 的 XPS 图谱
Fig. 4 XPS spectra of SiC/G (1:0.8)



(a) ~ (b) :SiC; (c) ~ (d) :SiC/G(1:0.1); (e) ~ (f) :SiC/G(1:0.3);
(g) ~ (h) :SiC/G(1:0.5); (i) ~ (j) :SiC/G(1:0.8); (k) ~ (l) :SiC/G(1:1)

图 5 SiC 和 SiC/石墨烯复合材料的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of SiC and SiC/graphene composite materials

2.2 罗丹明 B 的光催化降解

比较不同条件下石墨烯、SiC、SiC/石墨烯复合材料对 RhB 的作用情况,获得如图 7 所示的结果.可以看出,纯 SiC 对 RhB 的降解率仅为 20% (曲线 2);随着材料中石墨烯含量的增加,RhB 浓度的下降趋势逐渐增大(曲线 3、4、6、9 和 10),说明提高 SiC 与石墨烯的配比可以显著提升材料的光催化降

解能力,SiC/G(1:0.8) 和 SiC/G(1:1) 的光催化活性非常接近,光照 60 min 时 RhB 的去除率达到 92.7%. 在纯石墨烯存在下,光照和黑暗反应时 RhB 浓度显著降低,且变化趋势一致(曲线 7 和 8),表明石墨烯强烈吸附 RhB^[27],但无明显的光催化降解作用.在只加 H₂O₂ 光照 60 min 时,RhB 溶液的降解率约为 10% (曲线 1);在 SiC/G(1:0.8) 存在下,不加

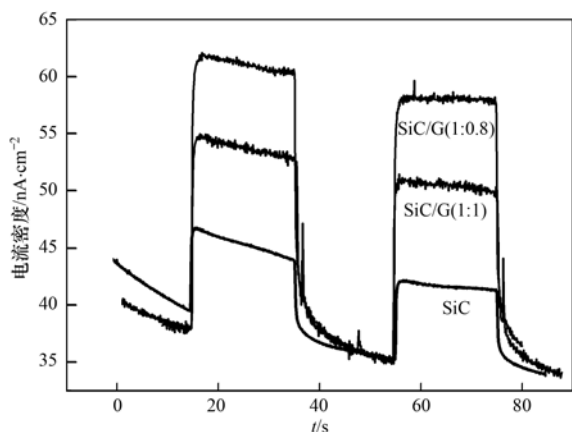


图6 可见光照射下 SiC、SiC/G (1:0.8) 和 SiC/G (1:1) 的瞬态光电流曲线

Fig. 6 Transient photocurrent curves of SiC, SiC/G (1:0.8), and SiC/G (1:1) under visible light radiation

H_2O_2 光照时 RhB 浓度下降缓慢 (曲线 5), 说明 H_2O_2 对 RhB 光解具有辅助作用.

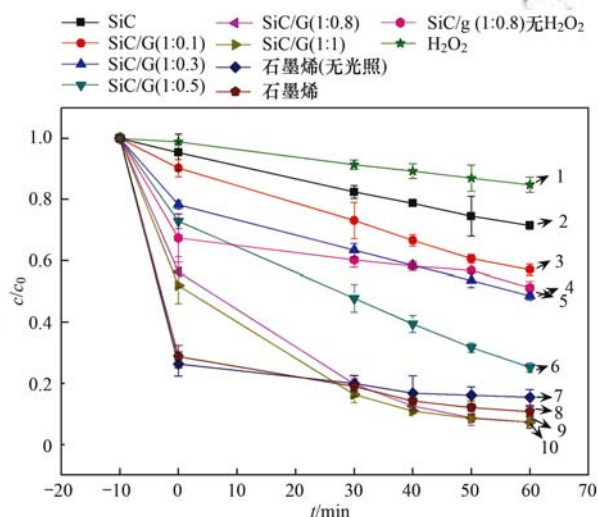


图7 SiC、石墨烯、SiC/G 对 RhB 的可见光降解

Fig. 7 Degradation of RhB with SiC, graphene, and SiC/G composites under visible light irradiation

拟合实验数据, 获得不同配比复合材料催化降解 RhB 的动力学特征 (图 8). 可以看出, SiC、SiC/石墨烯复合材料催化降解 RhB 均符合一级反应动力学方程, 决定系数 (R^2) 均大于 0.97, 获得 SiC/G (1:0.1)、SiC/G (1:0.3)、SiC/G (1:0.5)、SiC/G (1:0.8) 和 SiC/G (1:1) 催化降解 RhB 的速率常数分别为: 0.007 7、0.007 9、0.017 9、0.034 0 和 0.030 9 min^{-1} , 远高于纯 SiC 催化降解的速率常数 (0.004 8 min^{-1}). 比较发现, SiC/G (1:0.8) 与 FeOCl/H_2O ^[28]、 $\text{Fe}_3O_4 @ \text{ZnO}-\text{Ce}$ ^[29] 催化降解 RhB 的能力相当, 高于 Zhu 等^[19] 用热解石墨烯包覆的 6H-SiC 在紫外光照下的降解速率 (0.021 min^{-1}).

图 9 考察了复合材料的光催化稳定性, 发现重复使用 SiC/G (1:0.8) 3 次, RhB 的降解率保持

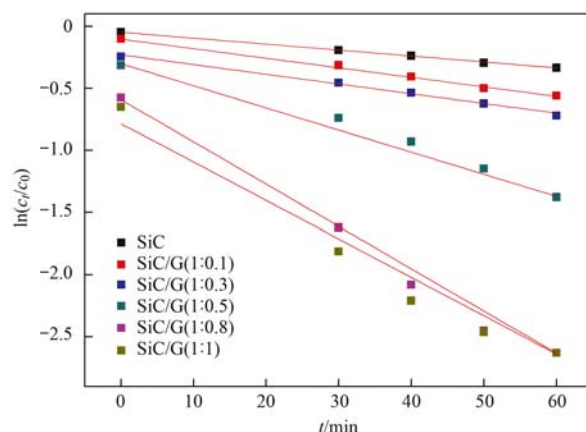


图8 SiC、SiC/G 光催化降解 RhB 的动力学曲线

Fig. 8 Photocatalytic degradation kinetic curves of RhB with SiC and SiC/graphene composites

在 90% 左右, 说明复合材料具有较高的光催化稳定性.

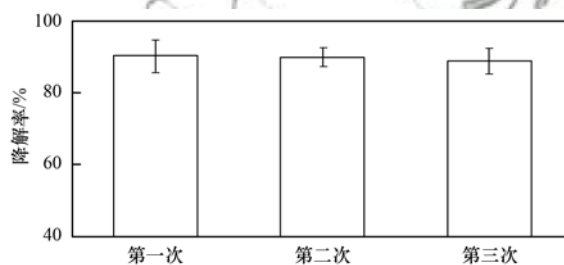


图9 SiC/G (1:0.8) 可见光下降解 RhB 循环实验

Fig. 9 Cycling runs for RhB degradation with SiC/G (1:0.8) under visible light irradiation

2.3 罗丹明 B 的光催化降解机制

图 10 为活性物种捕获实验结果. 可以看出, 当加入 EDTA-2Na、IPA、BQ 和 AgNO_3 降解 60 min 时, RhB 的降解效率从 92.7% 分别下降至 49.5%、86.2%、61.1% 和 67.3%, 说明在光降解过程中起作用的活性基团依次为 $h^+ > \cdot O_2^- > e^- > \cdot OH$.

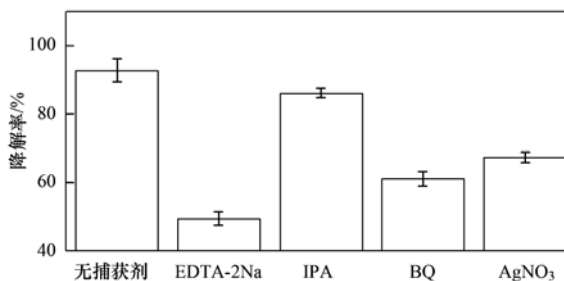


图10 SiC/G (1:0.8) 光催化降解 RhB 过程中活性物种的捕获

Fig. 10 Trapping experiments of active species in photocatalytic degradation of RhB with SiC/G (1:0.8)

基于实验和材料表征结果, 推测 SiC/石墨烯复合材料光催化降解 RhB 的可能机制 (图 11). SiC 表面被大量石墨烯包覆, 在可见光照射下 SiC 被激发产生 e^- 和 h^+ , e^- 转移到 SiC 表面的石墨烯上并通过石墨烯进行传导, 有效地避免了 e^- 和 h^+ 复合, 提

高了 e^- 的分离效率, 延长了 e^- 和 h^+ 的寿命. 部分裸露 SiC 表面的 h^+ 可直接氧化石墨烯表面的 RhB; 被激发产生的 e^- 可以与石墨烯表面吸附的 RhB 和 O_2 反应, 降解 RhB 或生成 $\cdot O_2^-$. H_2O_2 在整个反应体系中, 可辅助复合材料产生更多的 $\cdot O_2^-$ 和 $\cdot OH$, 共同作用于 RhB, 提高了 RhB 的降解效率.

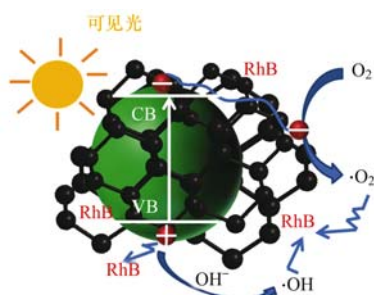


图 11 SiC/石墨烯光催化降解 RhB 的可能机制

Fig. 11 Possible photocatalytic degradation mechanism of RhB with SiC/graphene composite

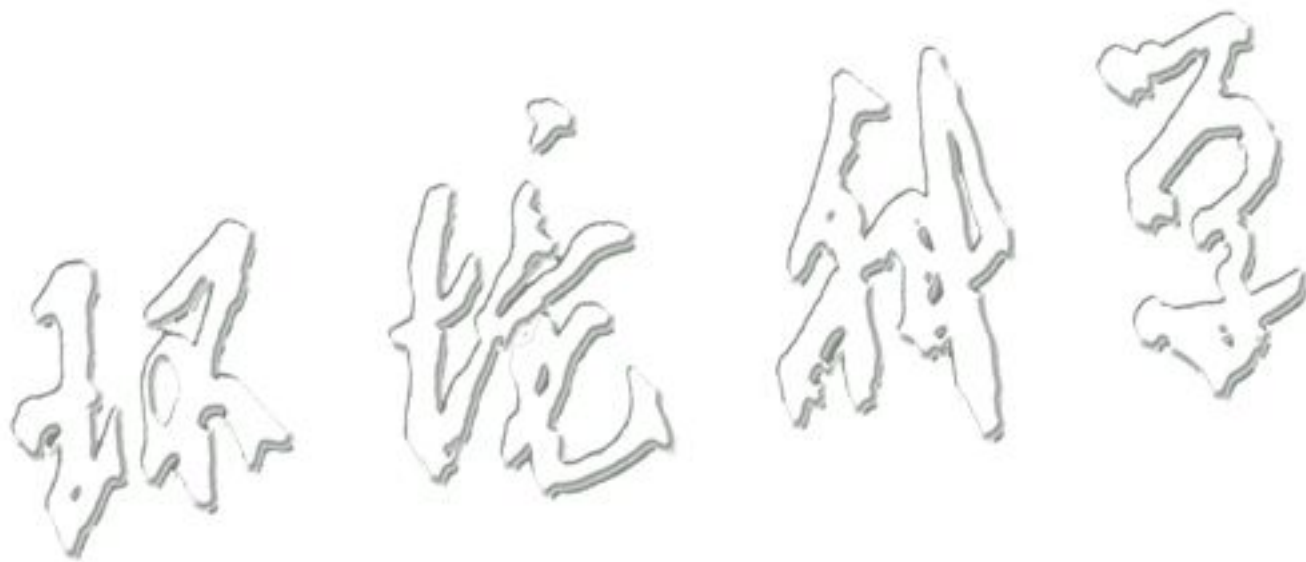
3 结论

通过光催化还原法成功制备 SiC/G 复合材料, 在可见光照射下 SiC/G(1:0.8) 对 RhB 降解具有明显的催化效果, 降解过程符合一级反应动力学特征. SiC 与石墨烯复合有效提高了光生电子和光生空穴的分离效率, 延长了它们的寿命, 显著提升了 RhB 的光催化降解.

参考文献:

- [1] Wang X N, Wang F L, Sang Y H, *et al.* Full-spectrum solar-light-activated photocatalysts for light-chemical energy conversion [J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, **7**(23): 1700473.
- [2] Digdaya I A, Han L H, Buijs T W F, *et al.* Extracting large photovoltages from a-SiC photocathodes with an amorphous TiO_2 front surface field layer for solar hydrogen evolution [J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, **8**(5): 1585-1593.
- [3] 石志盛, 董新法, 耿建铭. 红磷- TiO_2 复合光催化剂的制备及其光催化产氢性能 [J]. *可再生能源*, 2016, **34**(2): 274-278.
Shi Z S, Dong X F, Geng J M. Preparation and photocatalytic H_2 production performance of red phosphorus- TiO_2 composites [J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, **34**(2): 274-278.
- [4] 张志贝, 李小明, 陈飞, 等. g- C_3N_4/Bi_2S_3 复合物的制备及可见光催化降解 MO [J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2393-2400.
Zhang Z B, Li X M, Chen F, *et al.* Preparation of visible-light-induced g- C_3N_4/Bi_2S_3 photocatalysts for the efficient degradation of methyl orange [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2393-2400.
- [5] Yang T, Chang X W, Chen J H, *et al.* B-doped 3C-SiC nanowires with a finned microstructure for efficient visible light-driven photocatalytic hydrogen production [J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(19): 8955-8961.
- [6] Casady J B, Johnson R W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: a review [J]. *Solid-State Electronics*, 1996, **39**(10): 1409-1422.
- [7] Wesch W. Silicon carbide: synthesis and processing [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1996, **116**(1/4): 305-321.
- [8] Zhou W M, Yan L J, Wang Y, *et al.* SiC nanowires: a photocatalytic nanomaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(1): 013105, doi: 10.1063/1.2219139.
- [9] Fan X J, Ye R Q, Peng Z W, *et al.* The synthesis of size-controlled 3C-SiC nanoflakes and their photoluminescent properties [J]. *Nanotechnology*, 2016, **27**(25): 255604, doi: 10.1088/0957-4484/27/25/255604.
- [10] Akikusa J, Khan S U M. Photoelectrolysis of water to hydrogen in p-SiC/Pt and p-SiC/n- TiO_2 cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, **27**(9): 863-870.
- [11] Li H L, Lei Y G, Huang Y, *et al.* Photocatalytic reduction of carbon dioxide to methanol by Cu_2O/SiC nanocrystallite under visible light irradiation [J]. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 2011, **20**(2): 145-150.
- [12] 杨静静, 韦莹莹, 何勇平, 等. SiC/ $BiVO_4$ 复合材料光催化降解亚甲基蓝 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **43**(5): 31-36.
Yang J J, Wei Y Y, He Y P, *et al.* On photocatalytic degradation of methylene blue by SiC/ $BiVO_4$ composite [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, **43**(5): 31-36.
- [13] Zhang J, Liu L Z, Yang L, *et al.* 3C-SiC nanocrystals/ TiO_2 nanotube heterostructures with enhanced photocatalytic performance [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(23): 231902, doi: 10.1063/1.4882164.
- [14] Yang J J, Peng Y, Yang B, *et al.* Enhanced photocatalytic degradation of Rhodamine B over metal-free SiC/ C_3N_4 heterostructure under visible light irradiation [J]. *Materials Research Express*, 2018, **5**(8): 085511, doi: 10.1088/2053-1591/aad3df.
- [15] Huang D H, Yin L F, Niu J F. Photoinduced hydrodefluorination mechanisms of perfluorooctanoic acid by the SiC/graphene catalyst [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(11): 5857-5863.
- [16] Geim A K. Graphene: status and prospects [J]. *Science*, 2009, **324**(5934): 1530-1534.
- [17] Allen M J, Tung V C, Kaner R B. Honeycomb carbon: a review of graphene [J]. *Chemical Reviews*, 2010, **110**(1): 132-145.
- [18] Yang J J, Zeng X P, Chen L J, *et al.* Photocatalytic water splitting to hydrogen production of reduced graphene oxide/SiC under visible light [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(8), doi: 10.1063/1.4792695.
- [19] Zhu K X, Guo L W, Lin J J, *et al.* Graphene covered SiC powder as advanced photocatalytic material [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(2), doi: 10.1063/1.3676042.
- [20] Kim Y. Nanowastes treatment in environmental media [J]. *Environmental Health and Toxicology*, 2014, **29**, doi: 10.5620/eht.e2014015.
- [21] Musee N. Nanowastes and the environment: potential new waste management paradigm [J]. *Environment International*, 2011, **37**(1): 112-128.
- [22] Iwanowski R J, Fronc K, Paszkowicz W, *et al.* XPS and XRD study of crystalline 3C-SiC grown by sublimation method [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 1999, **286**(1-2): 143-147.
- [23] Szabó T, Berkesi O, Forgó P, *et al.* Evolution of surface functional groups in a series of progressively oxidized graphite oxides [J]. *Chemistry of Materials*, 2006, **18**(11): 2740-2749.

- [24] Moon I K, Lee J Y, Ruoff R S, *et al.* Reduced graphene oxide by chemical graphitization[J]. *Nature Communications*, 2010, **1** (1), doi: 10.1038/ncomms1067.
- [25] Wang Y W, Guo X N, Dong L L, *et al.* Enhanced photocatalytic performance of chemically bonded SiC-graphene composites for visible-light-driven overall water splitting [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, **38** (29): 12733-12738.
- [26] Tengeler S, Kaiser B, Ferro G, *et al.* The (001) 3C SiC surface termination and band structure after common wet chemical etching procedures, stated by XPS, LEED, and HREELS[J]. *Applied Surface Science*, 2018, **427**: 480-485.
- [27] 常青, 江国栋, 胡梦璇, 等. 石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究[J]. *环境科学*, 2014, **35** (5): 1804-1809.
Chang Q, Jiang G D, Hu M X, *et al.* Adsorption of methylene blue from aqueous solution onto magnetic Fe₃O₄/graphene oxide nanoparticles[J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (5): 1804-1809.
- [28] 张少朋, 陈瑀, 白淑琴, 等. 氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明 B[J]. *环境科学*, 2019, **40** (11): 5009-5014.
Zhang S P, Chen Y, Bai S Q, *et al.* Catalytic degradation of rhodamine B by FeOCl activated hydrogen peroxide [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (11): 5009-5014.
- [29] 张凯龙, 施妙艳, 倪貌貌, 等. 优化内浸式 Ce 掺杂 ZnO 光催化降解罗丹明 B[J]. *中国环境科学*, 2019, **39** (4): 1447-1455.
Zhang K L, Shi M Y, Ni M M, *et al.* Optimization of internal immersed irradiation and photocatalytic degradation of rhodamine B with Ce doped ZnO particles [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39** (4): 1447-1455.



CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)