

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明 (1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水平 (8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思 (15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳 (21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远 (27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋 (34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨 (39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋 (45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇 (51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙 (61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁 (69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍 (77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军 (84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元 (91)
湘江沉积物铜和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山 (98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男 (108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟 (116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强 (121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军 (129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新 (137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦 (145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民 (150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳 (156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐 (163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直 (169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺 (177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴 (182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓 (188)
污水厂微曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇 (194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根 (198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文 (204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢 (209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立楠,何宝燕,李跃鹏 (217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳 (226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南 (231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛 (237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福 (244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	于志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏 (251)
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾 (257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远 (263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文 (271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林 (277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国 (283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博 (288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇 (293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,贾玉娟 (302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少峰,黄永锋 (308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲 (315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎 (321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志 (328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易 (336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强 (347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文	
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛 (357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正 (364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强 (373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维 (379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新 (385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌 (395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌 (401)
《环境科学》征订启事 (26)	《环境科学》征稿简则 (68)
信息 (76,144,301,400)	专辑征稿通知 (394)

负载型 TiO_2 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究

张小娜¹, 周少奇^{1,2,3*}, 周晓¹

(1. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641; 3. 污染控制与生态修复广东省普通高等学校重点实验室, 广州 510006)

摘要: 以钛酸四丁酯 (TBOT) 为钛源, 硝酸镧为镧源, 尿素为氮源, 采用溶胶-凝胶法合成了 La-N 共掺杂的 TiO_2 光催化剂, 并探究了其对于孔雀石绿氧化降解的性能。结果表明该反应遵循一级动力学, 得到动力学模型; 其中外加偏电压的反应分级数 (0.935 8) 高于 pH 的反应分级数 (0.611 9) 以及初始浓度的反应分级数 (0.335), 表明外加偏电压对反应的影响最大。模型值与实验值吻合良好 (R^2 为 0.910 ~ 0.996 1), 说明该反应动力学模型能较好地描述光电催化降解孔雀石绿过程。

关键词: 孔雀石绿; La-N 共掺杂; TiO_2 ; 光电催化; 动力学

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0188-06

Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO_2 on Malachite Green

ZHANG Xiao-na¹, ZHOU Shao-qi^{1,2,3}, ZHOU Xiao¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Key Laboratory of Environmental Protection and Eco-Remediation of Guangdong Regular Higher Education Institutions, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: La-N co-doped TiO_2 photocatalyst was synthesized by a sol-gel method, which used tetrabutyl titanate (TBOT) as the Ti resource, lanthanum nitrate as the La resource and urea as the N resource. The performance in the photocatalytic oxidation degradation of malachite green was investigated. The results showed that the reaction could be reasonably represented by first order kinetics, and a kinetic model was established; the reaction order of voltage (0.935 8) was higher than that of pH (0.611 9) and that of initial concentration (0.335), indicating that voltage has the greatest impact on the reaction. The model data fitted well with experimental data (R^2 0.910-0.996 1), which indicates that the kinetic model can well describe the process of photocatalytic degradation of malachite green.

Key words: malachite green; La-N co-doped; TiO_2 ; photoelectrocatalytic; kinetic

染料废水一直是工业中难处理的废水之一^[1,2], 其成分复杂、色度高、可生化性差, 即使是染料组分很低的废水排到水体中也会导致生态系统的破坏^[3], 国内外学者长期致力于寻找新型、价格低廉的去除方法^[4~7]。目前对于染料废水的处理方法主要有吸附法、生物法、高级氧化法, 其中光催化技术以其氧化能力强、设备简单、操作条件容易控制、无二次污染等特点, 已成为环境治理工作中的一个热点。

目前以金属氧化物 TiO_2 为催化剂的光催化技术报道较多^[8~11], 由于纳米 TiO_2 的禁带宽度为 3.2 eV, 只有入射光波长不大于 387.5 nm 时才能被激发, 而这部分波长的光只是太阳光谱中的很小一部分^[12], 因此国内外的学者都致力于对 TiO_2 进行改性^[13~15], 研究表明, 掺入金属离子可以扩展 TiO_2 的

光响应范围^[16], 而掺入非金属离子可以抑制光生载流子的复合^[17,18]。故本研究选用掺入金属离子 La 和非金属离子 N 二者协同作用对 TiO_2 进行改性, 并以泡沫镍为载体^[19], 以孔雀石绿 (malachite green, MG) 为目标降解物, 研究改性后的催化剂的催化活性; 同时考察了该光电催化过程中的溶液初始浓度、pH 值、外加偏电压、反应温度等影响因素, 拟合了实验数据并建立了动力学模型, 得到了该动力学方程的参数, 以期对染料废水降解的工程实施提供理论参考和工程依据。

收稿日期: 2012-03-19; 修订日期: 2012-05-16

基金项目: 广州市重大科技项目 (2008DLB2080500); 广东省教育厅高层次人才计划项目; 亚热带建筑科学国家重点实验室项目 (2012ZB06, 2013ZC03)

作者简介: 张小娜 (1987 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: 535917937@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: fcsqzhou@scut.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验药品与仪器

药品: 无水乙醇 (AR); 冰醋酸 (AR); 钛酸丁酯 (AR); 硝酸铜; 尿素; 孔雀石绿; 实验用水均为蒸馏水。

仪器: Unico 2800 UV/VIS 紫外可见分光光度计; pH S-25 型 pH 计 (上海精科雷磁); 恒温水槽。

1.2 催化剂的制备

溶胶-凝胶法制备 TiO₂: 室温下, 向烧杯中加入 25 mL 无水乙醇、10 mL 冰醋酸、10 mL 蒸馏水混合形成 A 液; 并将称好的硝酸铜和尿素放入 A 液, 由 15 mL 钛酸丁酯、25 mL 无水乙醇、10 mL 冰醋酸混合形成 B 液; 将 A、B 溶液放在磁力搅拌器上搅拌 30 min, 完成后将 B 溶液滴加到 A 溶液中, 继续搅拌 30 min, 完毕后静置得到均匀的溶胶。将预处理过的泡沫镍浸入到溶胶液中, 浸渍提拉 2 次, 置于干燥箱中烘干; 待溶胶干燥后取出, 用玛瑙研钵研磨至粉末, 将粉末和泡沫镍一起放入马弗炉, 于 400℃ 下焙烧 2.5 h 即得 La-N 共掺杂的 TiO₂ 催化剂^[20]。

1.3 实验方法

室温下, 量取一定浓度的孔雀石绿溶液 1 000 mL 于 2 L 烧杯中, 将烧杯置于恒温水槽中以调节反应温度。实验用紫外灯作为光源, 功率为 8 W, 将其悬置在烧杯上, 以制备的 La-N 共掺杂的催化剂为正极, 碳棒为负极, 与恒压稳定电流相连向反应体系施以偏压。实验过程中不断向烧杯中鼓入空气以提供足量的溶解氧。由于孔雀石绿的导电性很差, 因此需要加入一定量的 Na₂SO₄ 做为电解质。

1.4 检测指标与方法 UV₆₁₅ 值

配制浓度为 20 mg·L⁻¹ 的孔雀石绿溶液, 由于孔雀石绿在 615 nm 处有最大的吸收峰, 因此可通过 UV₆₁₅ 的变化来反映孔雀石绿的降解程度, 依据下式计算不同时刻 MG 的降解率^[21]:

$$\alpha = \frac{c_0 - c}{c_0} \times 100\% = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, A₀ 为孔雀石绿溶液的初始吸光度; A 为不同反应时刻孔雀石绿溶液的吸光度; c₀ 为溶液的初始浓度 (mg·L⁻¹); c 为不同反应时刻孔雀石绿溶液的浓度 (mg·L⁻¹)。

2 结果与讨论

2.1 不同反应条件的影响

为了解光电催化的协同作用对 MG 降解的影响, 对 20 mg·L⁻¹ 的孔雀石绿溶液进行了催化剂吸附、电催化、光催化和光电催化降解的比较实验, 降解情况如图 1 所示。其中吸附剂吸附脱色率很小, 光和电分别单独存在的情况下, MG 都发生比较明显的降解, 其中电解下 MG 的脱色率为 82%, 高于光解下的 44%。而光电共同作用下 MG 的脱色率最大, 达到了 94%, 这说明光电在孔雀石绿的降解过程中起到了协同作用。

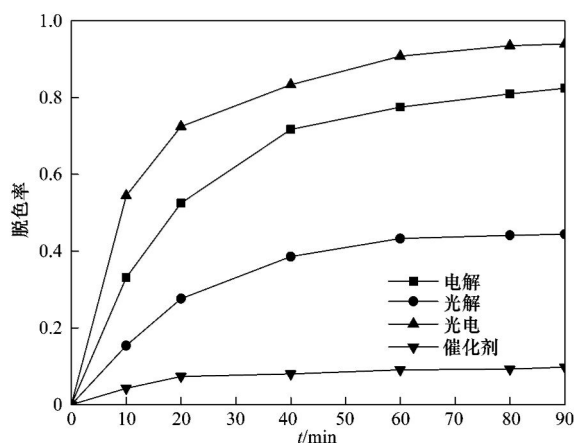


图 1 不同反应条件下 MG 的降解

Fig. 1 Degradation of MG under different reaction conditions

2.2 MG 光电催化降解动力学模型的建立

动力学研究是光电催化降解有机物研究的重要内容之一, 通过对动力学研究, 可以揭示反应的内在规律, 提高对染料废水的处理效率。为研究 MG 光电催化降解的反应动力学规律, 本实验在温度为 303 K, 外加偏电压为 3 V, pH 值为 6, 初始浓度为 20 mg·L⁻¹ 的条件下, 针对电解质投加量分别为 0.1、0.5、1.0 和 1.5 mg·L⁻¹ 的孔雀石绿溶液进行了实验, 结果如图 2 所示。

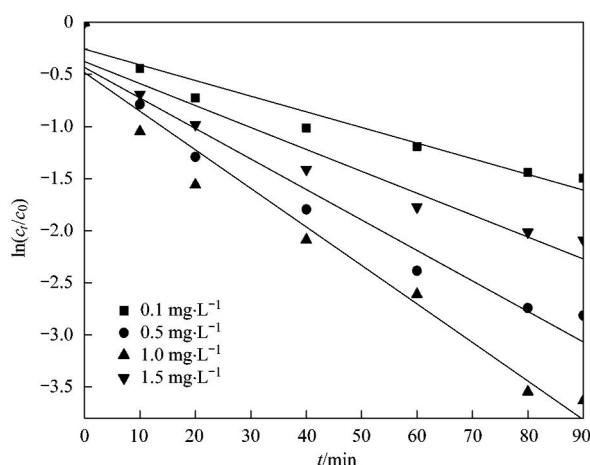


图 2 MG 光电催化降解反应动力学

Fig. 2 Kinetics of MG photocatalytic degradation

从图2中可以看出, $\ln(c_t/c_0)$ 与 t 之间存在着良好的线性相关性, 其相关系数分别为 0.908、0.927、0.906 和 0.948. 说明 MG 光电催化降解反应遵循一级动力学, 可初步表达为:

$$\ln(c_t/c_0) = kt \tag{2}$$

表 1 不同操作条件对初始反应速率的影响

Table 1 Effect of various operating conditions on the initial degradation rate of MG								
编号	初始 pH	初始浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	偏电压 /V	温度 /K	拟合的一级动力学方程 $\ln(c_0/c_t)(y)-t$	反应速率常数 $(k)/\text{min}^{-1}$	相关系数 (R^2)	$\ln k(y)-\ln k_0(x)^{1)}$
P-3	3	20	3	303	$y = -0.019t - 0.2745$	0.019	0.925	$y = 0.6119x - 4.6342$ ($R^2 = 0.9961$)
P-4	4	20	3	303	$y = -0.0229t - 0.3704$	0.0229	0.9267	
P-5	5	20	3	303	$y = -0.0256t - 0.322$	0.0256	0.9471	
P-6	6	20	3	303	$y = -0.0293t - 0.4334$	0.0293	0.9393	
P-7	7	20	3	303	$y = -0.0262t - 0.4311$	0.0262	0.9263	
C ₀ -1	6	10	3	303	$y = -0.0212t - 0.3735$	0.0212	0.9235	$y = 0.3358x - 24.6004$ ($R^2 = 0.9101$)
C ₀ -2	6	20	3	303	$y = -0.0293t - 0.4334$	0.0293	0.9393	
C ₀ -3	6	30	3	303	$y = -0.0301t - 0.3193$	0.0301	0.9698	
C ₀ -4	6	40	3	303	$y = -0.0197t - 0.214$	0.0197	0.9628	
E-1	6	20	0	303	$y = -0.0067t - 0.0737$	0.0067	0.9273	$y = 0.9358x - 4.6429$ ($R^2 = 0.9115$)
E-2	6	20	1	303	$y = -0.0085t - 0.1281$	0.0085	0.9356	
E-3	6	20	2	303	$y = -0.0233t - 0.3042$	0.0233	0.9488	
E-4	6	20	3	303	$y = -0.0293t - 0.4334$	0.0293	0.9393	
E-5	6	20	4	303	$y = -0.0307t - 0.3233$	0.0307	0.9728	
E-6	6	20	5	303	$y = -0.0227t - 0.2651$	0.0227	0.9552	
T-1	6	20	3	283	$y = -0.0125t - 0.1951$	0.0125	0.9318	
T-2	6	20	3	293	$y = -0.0204t - 0.3513$	0.0204	0.9253	
T-3	6	20	3	303	$y = -0.0293t - 0.4334$	0.0293	0.9393	
T-4	6	20	3	313	$y = -0.0302t - 0.5709$	0.0302	0.9206	
T-5	6	20	3	323	$y = -0.0309t - 0.3684$	0.0309	0.9652	

1) k_0 分别为 $t=0$ 时溶液的 pH、初始浓度、外加偏电压和温度的初始值

2.2.1 溶液 pH 的影响

调节溶液 pH 值分别为 3、4、5、6、7, 在温度为 303 K, 外加偏电压为 3 V, 初始浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下进行实验, 实验结果如图 3 所示. 从图 3 和表 1 可以看出, 初始 pH 值对 MG 光电催化降解有较大的影响, 酸性条件下降解速率随着初始 pH 的增加而增加, pH 为 6 时达到最大值 0.0293 min^{-1} . 然而当 pH 继续增加到 7 时, 反应速率常数下降为 0.0262 min^{-1} , 这是因为 TiO_2 的等电点为 $6.3^{[22]}$, 当溶液的初始 pH 为 6 时, TiO_2 的表面电荷为中性, 有利于对降解产生的超氧负离子等活性物质的吸附^[22], 而溶液初始 pH 为 7 时, TiO_2 的表面电荷呈现为碱性, 与绿色碱性染料孔雀石绿之间存在静电排斥, 影响孔雀石绿分子在 TiO_2 表面的吸附, 进而影响光电催化反应的进行.

2.2.2 初始浓度的影响

为了探究初始浓度对 MG 光电催化降解反应的影响, 分别配制浓度为 10、20、30 及 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 MG 溶液进行 4 组对比实验, 同时控制反应温度为

式中, c_0 为溶液的初始浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), c_t 为溶液在 t 时刻的 MG 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), k 为反应速率常数. 通过建立线性回归模型得到反应速率 k (见表 1), 从而建立 MG 光电催化降解反应动力学模型.

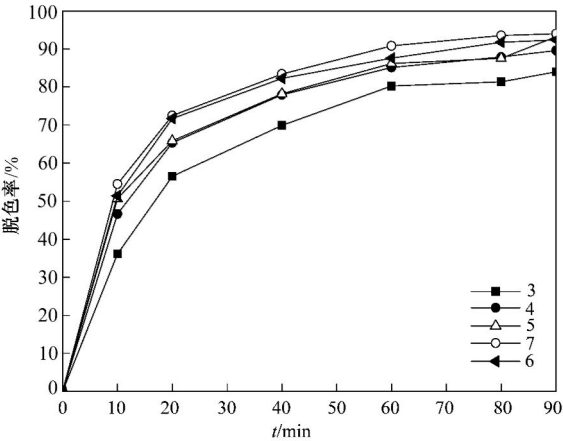


图 3 初始 pH 值对 MG 降解的影响

Fig. 3 Effects of initial pH on the degradation rate of MG

303 K, 外加偏电压为 3 V, pH 值为 6, 电解质 Na_2SO_4 的投量为 0.5 g , 实验结果如图 4 所示. 由图 4 和表 1 可知, 随着 MG 初始浓度的增加, 反应速率常数 k 先增大后减小, 分别为 0.0212 、 0.0293 、 0.0301 和 0.0197 min^{-1} . 由于光催化反应主要发生在催化剂表面^[23], 随着溶液浓度的增大, 越来越多的孔雀

石绿分子聚集在催化剂表面,反应速率和降解率也不断增加,但是当吸附达到饱和后,继续增加孔雀石绿的浓度并不会继续增加反应速率. 染料颜色的加深,会对紫外光产生掩蔽和散射作用,影响对光的吸收,同时处于激发态的 MG 分子也会互相作用而导致其淬灭^[24]. 因此到达一定值后继续增加溶液浓度其反应速率常数和脱色率反而会下降.

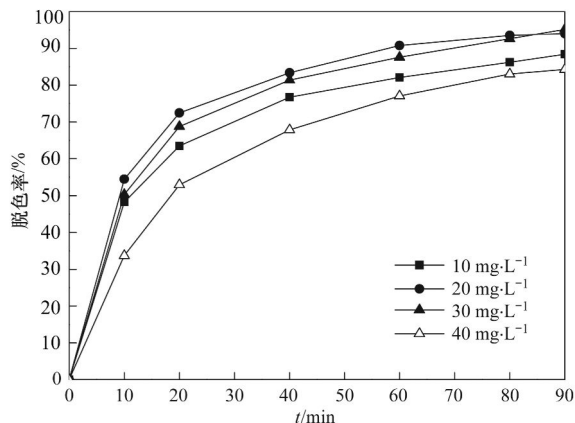


图4 初始浓度对 MG 降解的影响

Fig. 4 Effects of initial concentrations on the degradation rate of MG

2.2.3 外加偏电压对 MG 降解的影响

图5所示为外加偏电压分别为0、1、2、3、4、5 V 时 MG 的降解情况,从图5及表1可以看出,电压 <5 V 时,反应速率常数和脱色率随外加偏电压的增大而增大,4 V 时反应速率常数 k 和降解率分别为 0.0307 min^{-1} 、94.7%,而继续增大到 5V 时,反应速率常数 k 和脱色率分别减小到 0.0227 、89.2%. Li 等^[25]研究表明外加偏压与表观速率常数之间呈抛物线关系,由表1知 k 的表达式为:

$$k = -0.00183E^2 + 0.01352E + 0.00319 \quad (3)$$

由式(3)可知最佳外加偏电压值为 3.7 V,此时 k 达到最大值,这是因为在不改变光强的情况下,光生载流子的数量是一定的,当其充分分离后继续增加电压会导致光催化降解的副反应增强,产生多种中间产物与 MG 分子竞争活性基团,光催化降解效率随之减小.

2.2.4 温度对反应的影响

在 pH 值为 6,外加偏电压为 3 V,初始浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,改变溶液的反应温度以确定温度对 MG 降解反应的影响,如图6所示. 从图6和表1可以看出,反应速率常数 k 和脱色率随着反应温度的增加而增加. 从分子动力学角度来说,温度升高可以增加分子的平均动能,提高分子间的碰撞频率,从而加快反应的进行. 温度从 283 K 增加到 293 K

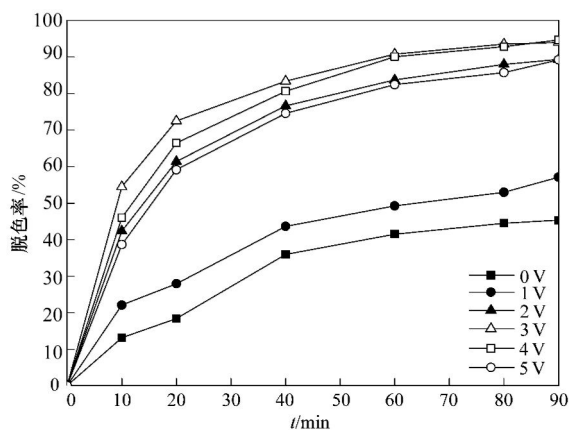


图5 外加偏电压对 MG 降解的影响

Fig. 5 Effects of voltage on the degradation rate of MG

时,反应速率常数 k 从 0.0125 min^{-1} 提高到 0.0204 min^{-1} ,增加了 63%,当温度继续增加反应速率常数 k 的增加幅度不断减小. 在实际应用中,反应温度并不好控制,而且增加温度会提高处理费用,考虑到工程的可行性,本实验控制反应温度在室温 303 K 左右.

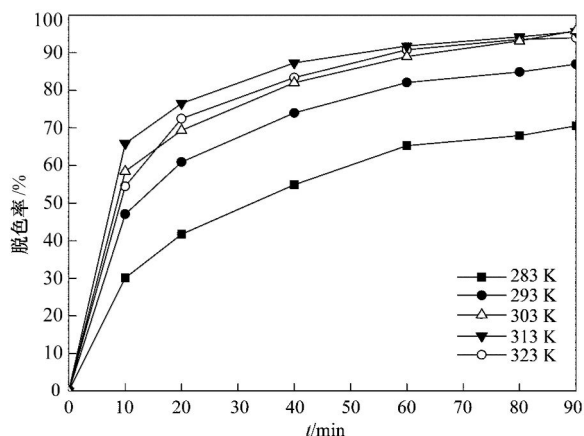


图6 温度对 MG 降解的影响

Fig. 6 Effects of temperature on the degradation rate of MG

2.3 反应动力学模型的建立

式(2)中反应速率常数 k 值大小主要与 MG 初始浓度(c_0)、外加偏电压(E)、溶液的特定 pH 值(P)、反应温度(T)有关,经验公式可表达为:

$$k = f(c_0, E, P, T) = A \exp(-E_a/RT) [c_0]^a [E]^b [P]^c \quad (4)$$

式中, A 为指前因子 (min^{-1}); E_a 为反应活化能 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$); R 为普适常数 [$8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$]; T 为温度 (K); a 、 b 、 c 分别为初始浓度、外加偏电压、溶液 pH 的反应分级数,均为常数.

由表1的线性方程数据分别确定初始浓度的分级数 a 为 0.335,外加偏电压的分级数 b 为 0.9358,

pH 的分级数 c 为 0.611 9. 同时由表 1 可知, 在温度为 283 ~ 323 K 时, 反应速率常数 k 分别为 0.012 5、0.020 4、0.029 3、0.030 2、0.030 9 min^{-1} , 对 $\ln k - 1/T$ 作图得:

$$\ln k = -2049.7/T + 3.0233 \quad (5)$$

即 $E_a/RT = 2049.7$ ($E_a = 1.7 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

代入式(4)得:

$$k = A \exp(-E_a/RT) [c_0]^a E^b P^c \\ = A \exp(-17000/RT) c_0^{0.335} E^{0.9358} P^{0.6119} \quad (6)$$

将温度为 283 K 对应的 k 值代入式(6)中得 $A = 1.93$. 将所得数值代入式(2)中进而确定本实验中光电催化降解 MG 的反应动力学模型为:

$$\ln(c_0/c_t) = 1.93 \exp(-17000/RT) \\ c_0^{0.335} E^{0.9358} P^{0.6119} t \quad (7)$$

为验证上述动力学模型的准确性, 将 pH 为 6, 初始浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 外加偏电压为 4 V, 温度为 318 K 条件下理论数据与实验数据进行比较, 结果如图 7 所示, 从中可以看出实验数据和理论数据吻合良好, 说明此动力学模型很好地描述了 MG 光电催化降解的反应规律.

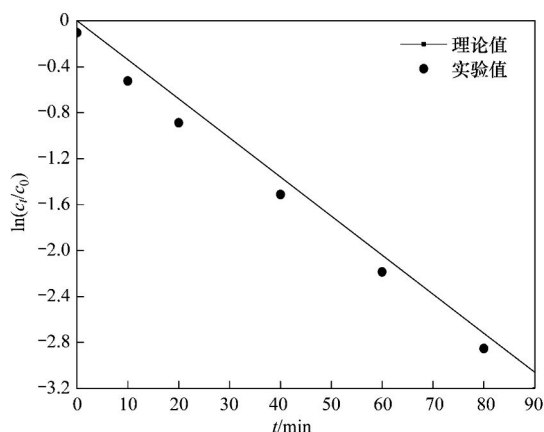


图 7 理论数据与实验数据的比较

Fig. 7 Comparison of theoretical data and experimental data

3 结论

(1) 采用浸渍提拉法制备了 La-N 共掺杂的纳米二氧化钛催化剂, 在以其为电极降解 MG 的过程中光电起到了很好的协同作用, MG 的降解率达到 94%, 比光催化提高了 50%, 比电催化提高了 12%.

(2) 在溶液初始浓度为 10 ~ 30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 3 ~ 6, 外加偏电压为 0 ~ 4 V, 温度为 283 ~ 323 K 的实验范围内, MG 的氧化降解符合一级反应动力学模型, 反应总级数为 1.882 7, 其中外加偏电压的反应分级数为 0.935 8, 高于初始浓度和 pH 的分级

数, 表明外加偏电压对光催化反应速率的影响最大.

(3) 经验证 MG 氧化降解反应的模型值与实验值较为接近, 表明上述动力学模型准确性良好; 反应的活化能 E_a 为 $17000 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 表明反应较易发生.

参考文献:

- [1] Şolpan D, Güven O. Decoloration and degradation of some textile dyes by gamma irradiation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, **65**(4-5): 549-558.
- [2] Chun H, Yizhong W, Hongxiao T. Preparation and characterization of surface bond-conjugated $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ and photocatalysis for azo dyes [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2001, **30**(3-4): 277-285.
- [3] Nelson C R, Hites R A. Aromatic amines in and near the Buffalo River[J]. Environmental Science & Technology, 1980, **14**(9): 1147-1149.
- [4] Pimol P, Khanidtha M, Prasert P. Influence of particle size and salinity on adsorption of basic dyes by agricultural waste: dried Seagrape (*Caulerpa lentillifera*) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(6): 760-768.
- [5] Robinson T, Chandran B, Nigam P. Removal of dyes from a synthetic textile dye effluent by biosorption on apple pomace and wheat straw[J]. Water Research, 2002, **36**(11): 2824-2830.
- [6] Arami M, Limaee N Y, Mahmoodi N M, et al. Removal of dyes from colored textile wastewater by orange peel adsorbent: equilibrium and kinetic studies [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, **288**(2): 371-376.
- [7] Eren E, Afsin B. Investigation of a basic dye adsorption from aqueous solution onto raw and pre-treated bentonite surfaces[J]. Dyes and Pigments, 2008, **76**(1): 220-225.
- [8] Esparza P, Borges M E, Díaz L, et al. Photodegradation of dye pollutants using new nanostructured titania supported on volcanic ashes[J]. Applied Catalysis A: General, 2010, **388**(1-2): 7-14.
- [9] Liu Y, Ohko Y, Zhang R, et al. Degradation of malachite green on Pd/WO_3 photocatalysts under simulated solar light [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **184**(1-3): 386-391.
- [10] Mahapatra S, Madras G, Row T N G. Structural and photocatalytic activity of lanthanide (Ce, Pr, and Nd) molybdoxovanadates[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2007, **111**(17): 6505-6511.
- [11] Liu Z Y, Sun D D, Guo P, et al. An efficient bicomponent $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ nanofiber photocatalyst fabricated by electrospinning with a side-by-side dual spinneret method[J]. Nano Letters, 2007, **7**(4): 1081-1085.
- [12] In S, Orlov A, Berg R, et al. Effective visible light-activated B-doped and B, N-codoped TiO_2 photocatalysts[J]. Journal of the American Chemical Society, 2007, **129**(45): 13790-13791.
- [13] Zhou J, Takeuchi M, Ray A K, et al. Enhancement of photocatalytic activity of P25 TiO_2 by vanadium-ion implantation under visible light irradiation [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, **311**(2): 497-501.

- [14] Anpo M, Takeuchi M. The design and development of highly reactive titanium oxide photocatalysts operating under visible light irradiation[J]. *Journal of Catalysis*, 2003, **216**(1-2): 505-516.
- [15] Anpo M, Kim T H, Matsuoka M. The design of Ti-, V-, Cr-oxide single-site catalysts within zeolite frameworks and their photocatalytic reactivity for the decomposition of undesirable molecules-The role of their excited states and reaction mechanisms[J]. *Catalysis Today*, 2009, **142**(3-4): 114-124.
- [16] Chiou C H, Juang R S. Photocatalytic degradation of phenol in aqueous solutions by Prdoped TiO₂ nanoparticles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**(1): 1-7.
- [17] Marques S M, Tavares C J, Oliveira L F, *et al.* Photocatalytic degradation of C. I. Reactive Blue 19 with nitrogen-doped TiO₂ catalysts thin films under UV/visible light [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2010, **983**(1-3): 147-152.
- [18] Asahi R, Morikawa T, Ohwaki T, *et al.* Visible-light photocatalysis in nitrogen-doped titanium oxides [J]. *Science*, 2001, **293**(5528): 269-271.
- [19] 苏理成, 储成林, 董寅生, 等. 泡沫镍负载 N 掺杂 TiO₂ 及其可见光催化降解甲醛的性能[J]. *无机材料学报*, 2010, **25**(7): 753-757.
- [20] Xu A W, Gao Y, Liu H Q, The preparation, characterization, and their photocatalytic activities of rare-earth-doped TiO₂ nanoparticles[J]. *Journal of Catalysis*, 2002, **207**(2): 151-157.
- [21] 阎文静, 闫峰, 鹿平, 等. 锐钛型纳米 TiO₂ 光催化性能的研究[J]. *微纳电子技术*, 2007, **44**(9): 875-877, 891.
- [22] Li X, Li F. Study of Au/Au³⁺-TiO₂ photocatalysts toward visible photooxidation for water and wastewater treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(11): 2381-2387.
- [23] El-Morsi T M, Budakowski W R, Abd-El-Aziz A S, *et al.* Photocatalytic degradation of 1, 10-dichlorodecane in aqueous suspensions of TiO₂: a reaction of adsorbed chlorinated alkane with surface hydroxyl radicals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(6): 1018-1022.
- [24] 尚汴卿, 陆兆仁, 袁琴华, 纳米氧化锌晶体的制备与光催化性质[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2004, **30**(5): 29-33.
- [25] Li X Z, Li F B, Fan C M, *et al.* Photoelectrocatalytic degradation of humic acid in aqueous solution using a Ti/TiO₂ mesh photoelectrode[J]. *Water Research*, 2002, **36**(9): 2215-2224.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolofop- <i>p</i> -ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

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: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊