

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439)	
《环境科学》征稿简则 (2479)	
信息 (2152, 2231, 2286)	

可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A

张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康*

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 目前, 过硫酸盐的常规活化方法研究已经逐步成熟, 但因成本过高或催化剂难以回收和二次污染等问题严重制约了其实际应用. 本研究通过构建染料自活化体系, 探讨了染料在活化过二硫酸盐发生自脱色以及降解其他污染物方面的应用潜能. 结果表明, 染料在可见光照射下可活化过二硫酸盐, 不仅可以实现染料自脱色, 而且可以降解其他污染物, 罗丹明 B 与双酚 A 的降解率最高分别可达 80% 和 90%. 这一过程即包含了自由基反应途径, 也包含了非自由基反应途径. 体系中所产生的活性氧化物质包含: 超氧自由基、硫酸根自由基、羟基自由基和单线态氧. 染料自脱色效率与染料初始浓度、PS 投加量和溶液初始 pH 等有关, 同时, 染料及其他污染物的初始浓度对其他污染物的降解有很大影响. 这为过二硫酸盐的活化提供了一种经济环保的新思路, 在未来染料废水的处理中拥有广阔应用前景.

关键词: 光催化; 染料; 过二硫酸盐 (PS); 自由基反应; 非自由基反应; 污水深度处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2353-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010097

Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation

ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, JIN Peng-kang*

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Although the activation method of permonosulfate has been gradually developed, its practical application is severely restricted by the high cost and difficult recovery of the catalyst, thereby resulting in secondary pollution. In this study, the application potential of self-decolorization of dyes and degradation of other pollutants through persulfate (PS) activation was examined by building a self-decolorization system. The results showed that the dyes could activate PS under visible light irradiation, which could realize not only the self-decolorization of dyes, but also the degradation of other pollutants. The degradation rates of rhodamine B and bisphenol A could reach 80% and 90%, respectively. This process included both free radical reaction pathways and nonradical reaction pathways. The active oxidants produced in the system included superoxide radicals, sulfate radicals, hydroxyl radicals, and singlet oxygen. The self-decolorization efficiency of dyes was related to the type of dyes, initial concentration of the dyes, dosage of PS, and initial pH of the solution. Meanwhile, the initial concentrations of the dyes and other pollutants had a great influence on the degradation of other pollutants. This study provides a new idea for economic and environmental protection in the PS activation method, and has broad application prospects in the treatment of printing and dyeing wastewater.

Key words: photocatalysis; dye; persulfate (PS); radical reaction; nonradical reaction; advanced wastewater treatment

近年来,染料废水已成为主要的工业有害废水之一^[1]. 据统计,我国染料产量占世界总产量的65%以上,在生产及使用过程中约有10%~20%的染料释放到水体中^[2,3]. 染料废水普遍存在可生化性差、组成复杂和毒性大等特点^[4],导致传统的水处理工艺难以对其进行有效处理^[5,6]. 利用强氧化性自由基处理污染物的高级氧化技术在处理印染废水方面有着显著的效果^[7,8].

基于过硫酸盐的高级氧化技术由于其适用范围广、效率高、便于运输和储存等优点在近几年得到了广泛关注^[9,10]. 过一硫酸盐 (peroxymonosulfate, PMS) 与过二硫酸盐 (persulfate, PS) 氧化剂未经活化时对污染物的降解效果有限,一经活化后可产生具有强氧化能力的硫酸根自由基 ($\text{SO}_4^{\cdot-}$)^[11,12],进而反应生成羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)^[13],使得污染物迅速降解. 因此,关于过硫酸盐活化方法的探究成为当前学

者们研究的热点问题. 目前,过硫酸盐的活化方法主要有热活化、紫外光活化、过渡金属活化等^[14~16]. 其中,热活化与紫外光活化需要依靠外部能量,导致废水处理成本大幅增加,而过渡金属活化存在催化剂不易回收,产生二次污染等问题,均严重制约了其在工业上的应用^[17,18].

最新研究表明,过硫酸盐在无需催化剂和外部能量的条件下也可以被有机化合物活化,例如苯酚和部分染料等^[19~21]. 而利用染料自身实现过硫酸盐的活化,既避免了催化剂制备复杂、回收重复利用困难、能耗过高的问题,又可以在实现染料自脱色的基

收稿日期: 2020-10-17; 修订日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51708443); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0400701); 陕西省教育厅重点项目 (18JS057); 陕西高校新型智库项目

作者简介: 张怡晨 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水与废水的深度处理技术, E-mail: 1003262558@qq.com

* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

础上降解其他污染物,大大减少水处理成本,对染料废水的处理具有重要意义,但该技术仍处于起步阶段,相关研究较少。

本文以罗丹明 B 染料自脱色效果为评价指标,探究了可见光照射条件下染料对过二硫酸盐(PS)的活化能力.分别考察了染料初始浓度、PS 投加量和溶液初始 pH 等因素对染料自脱色效果的影响,并结合自由基淬灭实验和电子顺磁共振光谱讨论了相应机制.同时,在有其他污染物双酚 A(bisphenol A, BPA)存在的条件下,探究了染料自脱色体系对 BPA 的降解效果.提出了光照-染料-过二硫酸盐-其他污染物光化学自降解体系,以期为后续“以废治废”印染废水处理新工艺的开发提供思路。

1 材料与方法

1.1 实验试剂

双酚 A(BPA)色谱纯(99.0%),5,5-二甲基-1-氧化吡咯啉(DMPO)和超氧化物歧化酶(SOD),均购于阿拉丁试剂(上海)有限公司;过(二)硫酸钾(优级纯)、罗丹明 B(分析纯)、甲醇(分析纯)、叔丁醇(分析纯)和糠醇(分析纯),均购于天津科密欧化学试剂有限公司;实验用水均为超纯水(18.2 MΩ·cm),由 Milli-Q gradient 超纯水系统提供。

1.2 实验仪器

双光束紫外可见分光光度计(TU-1910,北京普析通用仪器有限责任公司);高效液相色谱仪(LC-2010AHT,日本岛津);电子自旋共振波谱仪(ZMXmicro-6/1,德国布鲁克公司)。

1.3 染料自活化过硫酸盐实验

染料自降解实验采用定制的反应器,光源为 300 W 氙灯,并安装 400 nm 滤光片(CEL-HXF300,中国北京中教 Au-light 有限公司),平均光强为 105 mW·cm⁻²,光距反应液中心约 15 cm.反应液为 100 mL 10 mg·L⁻¹的罗丹明 B(自由基捕获实验中罗丹明 B 为 20 mg·L⁻¹)与 2 mmol·L⁻¹的过二硫酸盐(PS)混合溶液,在磁力搅拌下反应 60 min 评价其光化学活性.在设定的时间间隔点取反应溶液 2 mL,加入到已添加 0.5 mL 甲醇淬灭剂的取样管中.采用紫外可见分光光度计在罗丹明 B 的最大吸收波长 554 nm 处测定样品吸光度值。

1.4 染料活化过硫酸盐降解 BPA 实验

双酚 A 的降解实验装置与染料自降解实验相同.反应液为 100 mL 10 mg·L⁻¹的罗丹明 B、5 mg·L⁻¹的双酚 A 与 2 mmol·L⁻¹的 PS 混合溶液.反应 60 min 评价其光化学活性.在设定的时间间隔点每次取 0.8 mL 水样后,迅速与已准备在小瓶中的

0.2 mL 甲醇淬灭剂混合.使用高效液相色谱仪(日本岛津 LC-2010AHT)测定双酚 A 浓度.色谱柱为 250 mm×4.6 mm GS-120-5-C18 5 μm(苏州环球公司).测量双酚 A 的流动相为乙腈和超纯水,体积比为 60:40,流速为 1 mL·min⁻¹,检测波长为 278 nm。

2 结果与讨论

2.1 染料自活化过硫酸盐结果与分析

2.1.1 染料自活化总体性能

为探究染料能否在无外加催化剂的条件下实现自脱色,选择罗丹明 B 为模型污染物,对比了相同反应条件下罗丹明 B 在不同体系中的降解率.由图 1 可见,在可见光-罗丹明 B(Vis-RhB)体系中,即不存在过二硫酸盐的条件下反应 60 min,罗丹明 B 没有发生任何降解.说明单纯的可见光照射并不能促进染料的降解,过二硫酸盐在该降解反应中起到重要作用.在无可见光照的过二硫酸盐-罗丹明 B(PS-RhB)体系中,罗丹明 B 也仅仅降解了 7%.过二硫酸盐本身具有一定的弱氧化性^[15],能够氧化少量染料致其脱色.而在可见光-过二硫酸盐-罗丹明 B 体系(Vis-PS-RhB)中,罗丹明 B 的去除率大大增加,高达 80%.说明在可见光与 PS 共同存在的条件下,罗丹明 B 发生自降解.这归因于罗丹明 B 受可见光照射后产生光生电子活化 PS,产生了活性氧化物质,从而实现染料自降解^[20]。

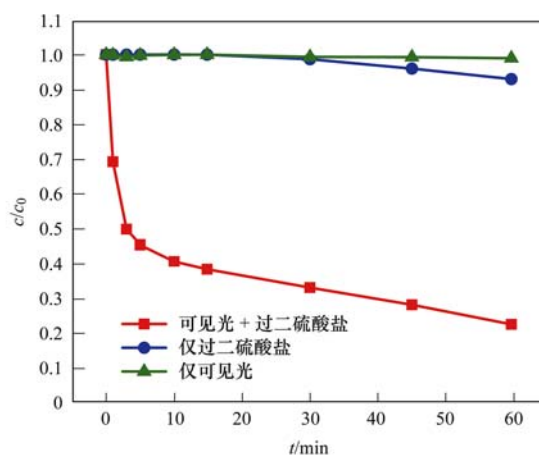


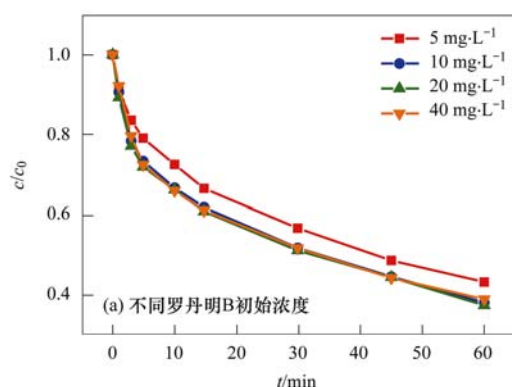
图 1 不同体系中罗丹明 B 的降解效率

Fig. 1 Comparison of the rhodamine B degradation efficiency in different systems

2.1.2 不同 RhB 初始浓度对其自降解效果的影响

可见光-过二硫酸盐-染料光化学体系(Vis-PS-Dye)中,不同初始浓度的罗丹明 B 溶液自降解效果如图 2(a)所示.当罗丹明 B 初始浓度由 5 mg·L⁻¹增长至 10 mg·L⁻¹时,染料自降解率由 57% 提升至 62%.这是由于随着染料浓度的增大,其中的染料分子数增多,受可见光激发后,体系中产生更多光

生电子,从而能够提高 PS 的活化效率,生成更多活性氧化物质促进染料脱色^[20]. 然而,随着罗丹明 B 浓度的进一步增大,由 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,染料的自脱色效果几乎没有变化,仍保持在 62% 左右. 这是由于染料浓度的进一步升高,使得溶液的透光率降低^[22],光生电子产率相对较低. 浓度染料光化学体系并没有大幅度提升;同时,初始的染料污染物分子数也随之增多,最终导致更高浓度染料体系脱色效果没有明显提升. 基于此,后续实验开展以 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ RhB 为主要研究对象.



2.1.3 PS 投加量对 RhB 降解效果的影响

图 2(b) 所示为 RhB 初始浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,不同 PS 投加量对 Vis-PS-RhB 体系染料自脱色效果的影响. 当反应体系未添加 PS 时,罗丹明 B 几乎没有降解,说明在光照条件下,PS 活化产生的自由基对罗丹明 B 的脱色具有重要意义. 随着体系中 PS 浓度由 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增大至 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,RhB 的脱色率由 60% 提高至 80%. 这是由于随着 PS 浓度的增大,PS 与受光激发的染料碰撞效率提升,有利于染料中光生电子向过硫酸盐传递^[20],从而使体系内活性氧化物质的量有所提高^[18],强化染料的脱色效果.

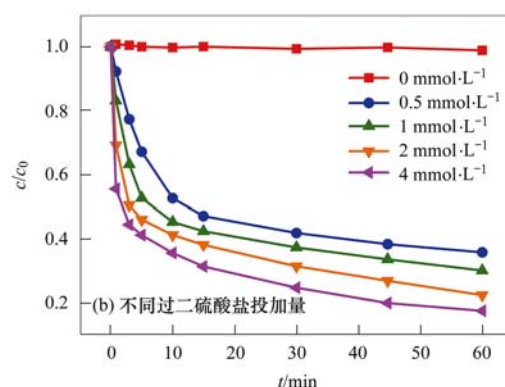


图 2 可见光-过二硫酸盐-罗丹明 B 体系中罗丹明 B 初始浓度与过二硫酸盐投加量对罗丹明 B 降解效果的影响

Fig. 2 Effects of the initial concentration of rhodamine B and the dosage of persulfate on the degradation of rhodamine B in the visible light-persulfate-rhodamine B system

2.1.4 溶液初始 pH 值对 RhB 降解效果的影响

图 3 所示为可见光-过二硫酸盐-罗丹明 B (Vis-PS-RhB) 体系中,不同初始 pH 的罗丹明 B 溶液自脱色效率. 当罗丹明 B 溶液的初始 pH 值为 2.7 时,染料自脱色效率为 83%, pH 上升至 3.1 时,自脱色效率依旧高达 81%,pH 调节至 4.9 时,自脱色效率为 77%,pH 为 6.1 时,自脱色效率可达 75%. 而在碱性条件下,溶液初始 pH 为 9.4 时,自脱色效率降低至

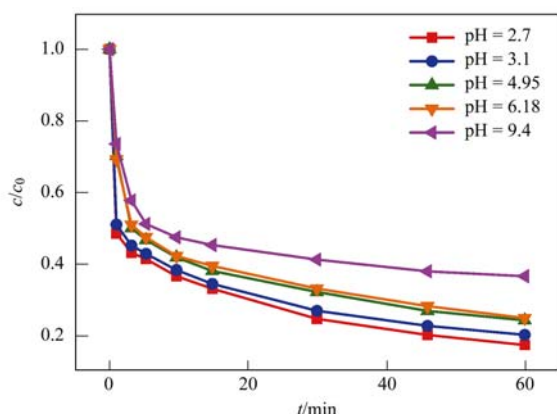
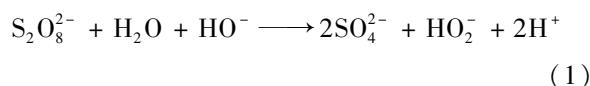


图 3 可见光-过二硫酸盐-罗丹明 B 体系中 pH 对罗丹明 B 降解效果的影响

Fig. 3 Effect of pH on the degradation of rhodamine B in the visible light-persulfate-rhodamine B system

64%. 发现体系自脱色效率随着 pH 的升高而逐渐降低,说明在 RhB-PS-Vis 光化学体系中,染料自脱色反应在酸性条件下更容易进行.

这是由于罗丹明 B 是一种阳离子染料,其在水中主要以阳离子 (RhB^+) 和两性离子 ($\text{RhB}^\pm$) 的形式存在^[23]. 当溶液 pH 值小于其电离常数 ($\text{pK}_a = 3.7$) 时,它以阳离子形式存在^[20]; 反之,当溶液 pH 值大于其 pK_a 时,由于其羧基的去质子化,它以两性离子的形式存在^[20,23]. 碱性条件下,过二硫酸盐以 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 形式存在^[24],因此,此时 RhB 与 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 之间存在静电斥力,阻碍了光生电子从罗丹明 B 分子到 PS 的转移,不利于罗丹明 B 的降解. 同时,有研究表明,过硫酸盐在碱性条件下可能会迅速分解[式 (1)]^[24],因此碱性条件不利于 Vis-PS-RhB 体系中染料自脱色反应的进行.



2.2 染料活化过硫酸盐降解 BPA 结果与分析

2.2.1 染料自活化降解 BPA 的总体性能

为探究可见光-过二硫酸盐-染料 (Vis-PS-Dye) 光化学体系能否在实现染料自脱色的同时,降解体系内其他污染物,实现“以废治废”,在上述 Vis-PS-

RhB 体系中添加典型内分泌干扰物双酚 A (BPA), 其中 PS 浓度为 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 罗丹明 B 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, BPA 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 如图 4 所示, 在 60 min 降解过程中, 罗丹明 B 脱色率达到 80%, 同时 BPA 的降解率达到 35%, 实现了在无外加固体催化剂的条件下, 依靠染料污染物在可见光照条件下自身对过硫酸盐的活化作用, 使得体系中的两种污染物均有不同程度的降解, 真正体现了“环境友好, 以废治废”的污染治理新思路.

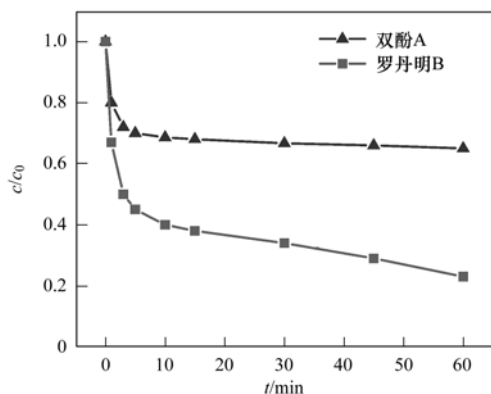
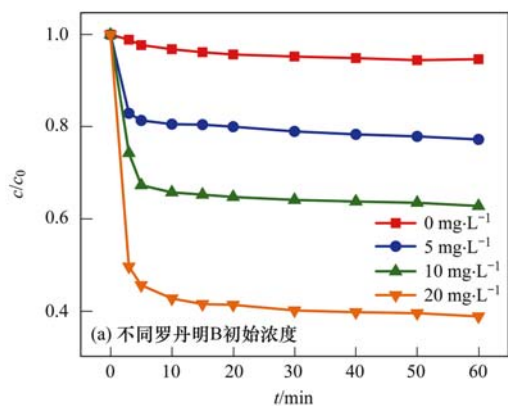


图 4 可见光-过二硫酸盐-罗丹明 B-双酚 A 体系中罗丹明 B 与双酚 A 的降解效率

Fig. 4 Comparison of the rhodamine B and bisphenol A degradation efficiencies in the visible light-persulfate-rhodamine B-bisphenol A system

2.2.2 不同 RhB 初始浓度对 BPA 降解影响

可见光-过二硫酸盐-染料-双酚 A 光化学体系 (Vis-PS-Dye-BPA) 中, 不同初始浓度的罗丹明 B 溶液自降解效果如图 5(a) 所示. 罗丹明 B 初始浓度为 0 时, 双酚 A 几乎没有降解, 可见若体系内无染料, 双酚 A 不能单独发生光化学反应从而降解, 罗丹明 B 初始浓度由 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增长至 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, BPA 的降解率随其浓度的增大而增大, 由 23% 提升至 62%. 这是由于浓度增大使得体系中存在更多染料



分子, 受可见光激发后进而产生更多光生电子^[20], 提高了 PS 的活化效率, 大量的氧化活性物质促进了双酚 A 的降解.

2.2.3 不同 BPA 初始浓度对其降解效果的影响

可见光-过二硫酸盐-染料光化学体系 (Vis-PS-Dye) 中, 罗丹明 B 初始浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 体系对不同初始浓度的双酚 A 溶液的降解效果如图 5(b) 所示. BPA 初始浓度由 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增长至 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, BPA 的降解率由接近 90% 降低至 47%, 随着 BPA 浓度增至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降解率继续降至 26%. 这是由于体系中染料浓度一定, 即染料分子数量恒定的情况下, 其受可见光激发后, 能产生的光生电子数一定, 进而可以激活的 PS 分子数与随之产生的活性氧化物质的数量也一定, 伴随着污染物 BPA 浓度的升高, 其降解率自然降低.

2.3 活性物种分析

为了探究可见光条件下, 罗丹明 B 活化过硫酸盐实现染料自脱色的反应机制, 分别采用了自由基淬灭实验、电子顺磁共振谱仪测定等手段, 考察体系内的反应活性物质. 甲醇 (MeOH) 是常用的硫酸根自由基 ($\text{SO}_4^{\cdot -}$) 和羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 捕获剂 [$k(\text{SO}_4^{\cdot -})$ 为 $1.6 \sim 7.7 \times 10^7 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$, $k(\cdot\text{OH})$ 为 $1.2 \sim 2.8 \times 10^7 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$]^[6,25], 叔丁醇 (TBA) 是常用的羟基自由基淬灭剂^[26~28], 糠醇 (FFA) 是常用的单线态氧 ($^1\text{O}_2$) 淬灭剂 [$k(^1\text{O}_2)$ 为 $1.0 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$]^[29,30]. 淬灭实验以甲醇和叔丁醇作为自由基捕获剂, 实验设置 1:200、1:500 和 1:1000 这 3 种 PS 与淬灭剂浓度比.

甲醇淬灭结果如图 6(a) 所示, 在 3 个浓度下, 降解率均由 80% 下降至 63%, 说明在 MeOH 与 PS 浓度比为 1:200 时, 即可几乎完全淬灭体系中的 $\text{SO}_4^{\cdot -}$ 与 $\cdot\text{OH}$, 故随其浓度比的增加, 抑制效果相似.

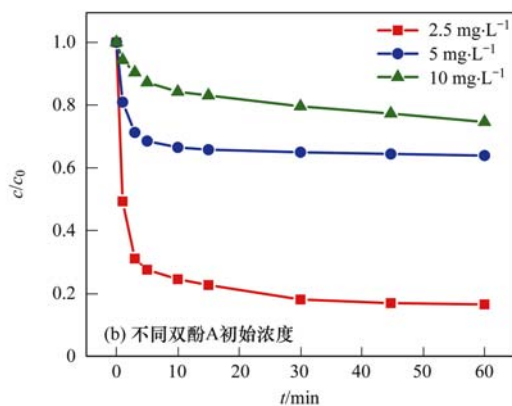


图 5 可见光-过二硫酸盐-罗丹明 B-双酚 A 体系中罗丹明 B 与双酚 A 初始浓度对双酚 A 降解效果的影响

Fig. 5 Effects of the initial concentrations of rhodamine B and bisphenol A on the degradation of bisphenol A in the visible light-persulfate-rhodamine B-bisphenol A system

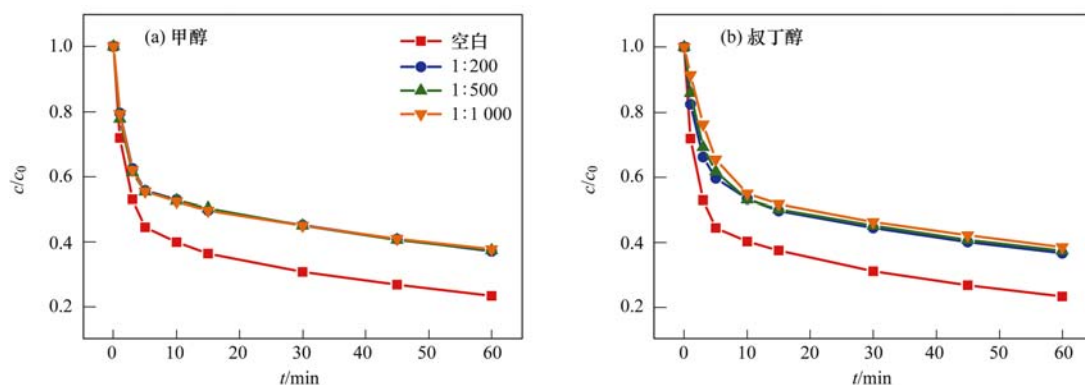


图6 甲醇与叔丁醇作为自由基抑制剂对罗丹明 B 降解效果的影响

Fig. 6 Effects of methanol and tert-butyl alcohol as radical scavengers on the degradation rate of rhodamine B

而叔丁醇则均降低至 61% 左右[图 6(b)], 所得结果与甲醇类似, 说明在该体系中, 含有大量 $\cdot\text{OH}$ 和极少量 $\text{SO}_4^{\cdot-}$.

为了进一步确认体系中的反应活性物质, 采用电子顺磁共振光谱仪(EPR)对产生的自由基进行检测^[30]. 如图 7 所示, 反应至 3 min 时便可以明显观察到强度比为 1:2:2:1 的四峰特征信号, 代表加合物 $\text{DMPO}\cdot\cdot\text{OH}$ ^[18,31], 这印证了 $\cdot\text{OH}$ 的存在; 在 $\cdot\text{OH}$ 的信号之间可观察到微弱的代表加合物 $\text{DMPO}\cdot\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的六峰信号^[28], 这表明在该氧化反应过程中 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 都有参与. 这一检测结果与上述淬灭实验的结果一致.

糠醇对罗丹明 B 自脱色的抑制效果如图 8(a) 所示, 发现其结果与甲醇和叔丁醇完全不同, 当体系中糠醇与 PS 浓度比例为 1:200、1:500 和 1:1000 时, 罗丹明 B 的自脱色率由 80% 分别降低至 76%、50% 和 41%, 随着糠醇浓度的增大, 罗丹明 B 的自脱色率逐步降低, 说明体系中含有大量的 $^1\text{O}_2$, 可见体系中既有自由基反应, 也有非自由基反应.

超氧化物歧化酶(SOD)可淬灭超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$) [k 为 $0.9 \sim 1.0 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1}$]^[26,32], 体系中加入 5 mmol SOD 后, 罗丹明 B 的自脱色率由

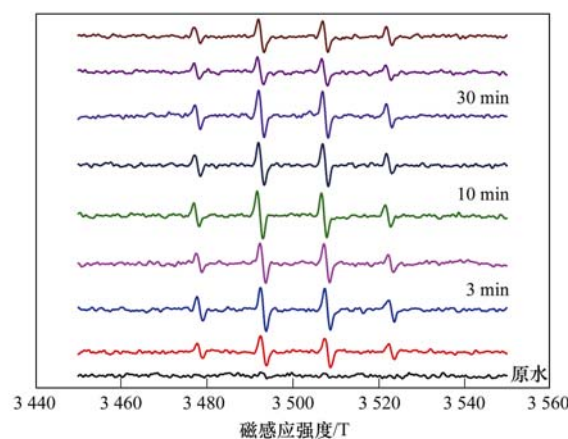


图7 DMPO 的 EPR 特征峰谱图

Fig. 7 EPR characteristic peak spectrum of DMPO

80% 降低至 35% [图 8(b)], 抑制效果极为明显, 而体系中可能存在大量 $\cdot\text{O}_2^-$.

基于上述实验结果与分析, 罗丹明 B 染料在实现自降解的同时也可降解其他污染物, 其中包括自由基与非自由基反应途径(图 9). 可能的机制为: 染料受可见光激发后, 其外层电子从最高占据分子轨道(HOMO)跃迁至最低空位分子轨道(LUMO) [式(2)]^[32], 随后光生电子从染料的 LUMO 能级转移至过硫酸盐, PS 被活化产生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ [式(3)]^[16],

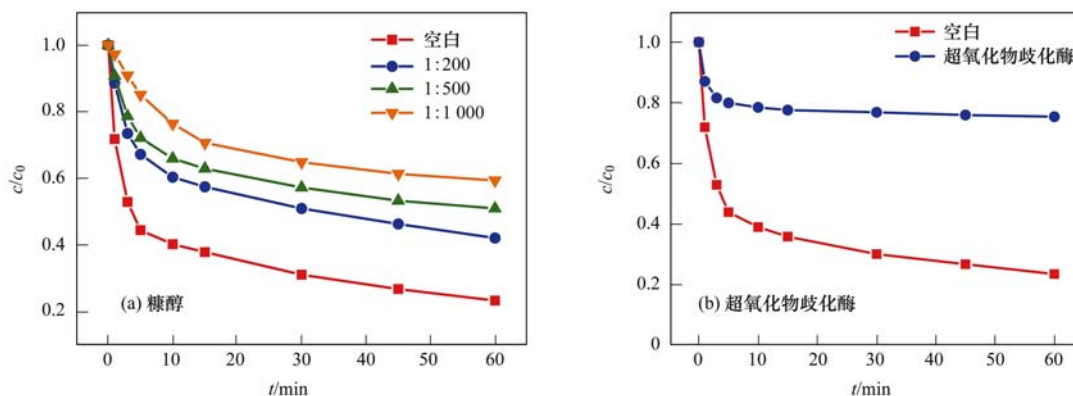


图8 糠醇与超氧化物歧化酶作为自由基抑制剂对罗丹明 B 降解效果的影响

Fig. 8 Effects of furfuryl alcohol and superoxide dismutase as radical scavengers on the degradation rate of rhodamine B

$\text{SO}_4^{\cdot-}$ 进一步与 H_2O 或 OH^- 反应生成 $\cdot\text{OH}$ [式(4)]^[33], 且光生电子可与 O_2 结合生成超氧自由基 [式(5)]^[31]. 同时, 染料分子可促进氧从三重态向单重态过渡而产生 $^1\text{O}_2$ ^[34]. 因此, 染料与其他污染物在 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 $^1\text{O}_2$ 的共同作用下迅速降解.

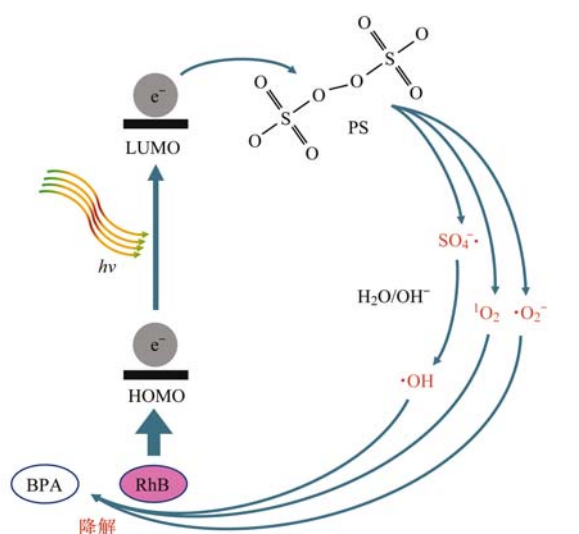
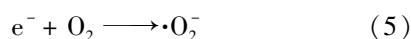
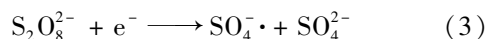
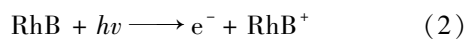


图9 罗丹明 B 染料自降解并降解其他污染物机制

Fig. 9 Mechanisms of rhodamine B self-degradation and degradation of other pollutants

3 结论

(1) 在可见光照射下, 罗丹明 B 染料可以实现自脱色. 自脱色效果与染料初始浓度、PS 初始浓度、溶液初始 pH 有关. 染料初始浓度越高、PS 初始浓度越高、酸性 pH 条件下染料自降解效果越好. 染料在实现自脱色的同时, 也可降解其他污染物, 且染料初始浓度越高, 双酚 A 降解效率越高.

(2) 分析了染料降解污染物的机制: 电子从染料的 HOMO 能级受激发跃迁到 LUMO 能级, 随后光生电子又转移至 PS 分子, 从而活化 PS 产生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 、 $^1\text{O}_2$ 与 $\cdot\text{O}_2^-$. RhB 自活化 PS 光化学体系在自由基与非自由基路径的共同作用下使得污染物有效降解.

(3) 染料分子在光照条件下活化 PS 实现自降解的方法, 可在无外加催化剂和外部能量的条件下活化 PS, 有效避免了依靠外部能量带来的高能耗以及外加催化剂带来的二次污染等问题, 同时为印染废水的处理提供了一种“以废治废”新思路, 在未来

废水处理中具有一定的应用前景.

参考文献:

- [1] Chanikya P, Nidheesh P V, Syam Babu D, *et al.* Treatment of dyeing wastewater by combined sulfate radical based electrochemical advanced oxidation and electrocoagulation processes[J]. Separation and Purification Technology, 2021, **254**, doi: 10.1016/j.seppur.2020.117570.
- [2] 岳秀, 唐嘉丽, 于广平, 等. 双氧水协同生化法强化处理印染废水[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3769-3780.
Yue X, Tang J L, Yu G P, *et al.* Enhanced treatment of printing and dyeing wastewater using H_2O_2 -biochemical method [J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3769-3780.
- [3] 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.
- [4] Samsami S, Mohamadi M, Sarrafzadeh M H, *et al.* Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: overview and perspectives[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, **138**: 138-163.
- [5] Yu M L, Wang J J, Tang L, *et al.* Intimate coupling of photocatalysis and biodegradation for wastewater treatment: Mechanisms, recent advances and environmental applications [J]. Water Research, 2020, **175**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115673.
- [6] 翟俊, 柳沛松, 赵聚姣. 过一硫酸盐碱催化处理染料废水[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(2): 647-652.
Zhai J, Liu P S, Zhao J J, *et al.* Treatment of dye wastewater by base catalysis of peroxymonosulfate (PMS) [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(2): 647-652.
- [7] Chowdhury M F, Khandaker S, Sarker F, *et al.* Current treatment technologies and mechanisms for removal of indigo carmine dyes from wastewater: a review[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, **318**, doi: 10.1016/j.molliq.2020.114061.
- [8] Wang W L, Cai Y Z, Hu H Y, *et al.* Advanced treatment of bio-treated dyeing and finishing wastewater using ozone-biological activated carbon: a study on the synergistic effects[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **359**: 168-175.
- [9] Ding X X, Gutierrez L, Croue J P, *et al.* Hydroxyl and sulfate radical-based oxidation of RhB dye in UV/ H_2O_2 and UV/persulfate systems: Kinetics, mechanisms, and comparison[J]. Chemosphere, 2020, **253**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126655.
- [10] Hou K J, Pi Z J, Yao F B, *et al.* A critical review on the mechanisms of persulfate activation by iron-based materials: clarifying some ambiguity and controversies [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **28**, doi: 10.1016/j.cej.2020.127078.
- [11] Miao D, Zhao S, Zhu K C, *et al.* Activation of persulfate and removal of ethyl-parathion from soil: effect of microwave irradiation [J]. Chemosphere, 2020, **253**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126679.
- [12] Furman O S, Teel A L, Watts R J. Mechanism of base activation of persulfate[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(16): 6423-6428.
- [13] Ahmad M, Teel A L, Watts R J. Mechanism of persulfate activation by phenols[J]. Environmental Science & Technology,

- 2013, **47**(11): 5864-5871.
- [14] Guo P C, Qiu H B, Yang C W, *et al.* Highly efficient removal and detoxification of phenolic compounds using persulfate activated by MnOx@ OMC: synergistic mechanism and kinetic analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **402**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123846.
- [15] Waclawek S, Lutze H V, Grübel K, *et al.* Chemistry of persulfates in water and wastewater treatment: a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **330**: 44-62.
- [16] Matzek L W, Carter K E. Activated persulfate for organic chemical degradation: a review[J]. *Chemosphere*, 2016, **151**: 178-188.
- [17] 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 等. 碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5116-5123.
Ge Y J, Cai X W, Lin H, *et al.* Base activation of peroxymonosulfate for the degradation of ciprofloxacin in water [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5116-5123.
- [18] Jia Q Y, Cheng X Y, Wu Y J, *et al.* Visible light absorption by perylene diimide for synergistic persulfate activation towards efficient photodegradation of bisphenol A [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, **282**, doi: 10.1016/j.apcatb.2020.119579.
- [19] Zhou Y, Jiang J, Gao Y, *et al.* Activation of peroxymonosulfate by phenols: important role of quinone intermediates and involvement of singlet oxygen[J]. *Water Research*, 2017, **125**: 209-218.
- [20] Cai T, Liu Y T, Wang L L, *et al.* Activation of persulfate by photoexcited dye for antibiotic degradation: radical and nonradical reactions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **375**, doi: 10.1016/j.cej.2019.122070.
- [21] 刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 等. 天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4752-4758.
Liu Q Z, Liao X Y, Li Y, *et al.* Persulfate oxidation effect of soil organic pollutants by natural organic matters[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4752-4758.
- [22] 王春英, 朱清江, 谷传涛, 等. 稀土 Ce³⁺ 掺杂 Bi₂WO₆ 光催化降解罗丹明 B 的研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(9): 2682-2689.
Wang C Y, Zhu Q J, Gu C T, *et al.* Investigation of rhodamine B photocatalytic degradation by Ce³⁺ doped Bi₂WO₆[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(9): 2682-2689.
- [23] Rao W X, Piliouras P, Wang X S, *et al.* Zwitterionic dye rhodamine B (RhB) uptake on different types of clay minerals [J]. *Applied Clay Science*, 2020, **197**, doi: 10.1016/j.clay.2020.105790.
- [24] Zhou Y Y, Xiang Y J, He Y Z, *et al.* Applications and factors influencing of the persulfate-based advanced oxidation processes for the remediation of groundwater and soil contaminated with organic compounds[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **359**: 396-407.
- [25] Wang X N, Dong W B, Brigante M, *et al.* Hydroxyl and sulfate radicals activated by Fe(III)-EDDS/UV: comparison of their degradation efficiencies and influence of critical parameters[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, **245**: 271-278.
- [26] Nie M H, Deng Y W, Nie S H, *et al.* Simultaneous removal of bisphenol A and phosphate from water by peroxymonosulfate combined with calcium hydroxide [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **369**: 35-45.
- [27] Dong S Y, Cui L F, Zhang W, *et al.* Double-shelled ZnSnO₃ hollow cubes for efficient photocatalytic degradation of antibiotic wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.cej.2019.123279.
- [28] Guan C T, Jiang J, Pang S Y, *et al.* Formation and control of bromate in sulfate radical-based oxidation processes for the treatment of waters containing bromide: a critical review[J]. *Water Research*, 2020, **176**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115725.
- [29] Li H C, Shan C, Pan B C. Fe(III)-Doped g-C₃N₄ mediated peroxymonosulfate activation for selective degradation of phenolic compounds via high-valent iron-oxo species[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **53**(4): 2197-2205.
- [30] Fang G D, Gao J, Dionysiou D D, *et al.* Activation of persulfate by quinones: free radical reactions and implication for the degradation of PCBs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(9): 4605-4611.
- [31] Li H P, Wang Z, Lu Y X, *et al.* Microplasma electrochemistry (MIPEC) methods for improving the photocatalytic performance of g-C₃N₄ in degradation of RhB[J]. *Applied Surface Science*, 2020, **531**, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147307.
- [32] Sannasimuthu A, Kumaresan V, Pasupuleti M, *et al.* Radical scavenging property of a novel peptide derived from C-terminal SOD domain of superoxide dismutase enzyme in *Arthrospira platensis*[J]. *Algal Research*, 2018, **35**: 519-529.
- [33] Ge D D, Dong Y T, Zhang W R, *et al.* A novel Fe²⁺/persulfate/tannic acid process with strengthened efficacy on enhancing waste activated sludge dewaterability and mechanism insight[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **733**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139146.
- [34] Hynek J, Chahal M K, Payne D T, *et al.* Porous framework materials for singlet oxygen generation [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2020, **425**, doi: 10.1016/j.ccr.2020.213541.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)