

光助 - 过碳酸钠辅助体系降解萘

裘哲欣^{1*}, 饶桂维^{1#}, 王莉¹, 王磊^{2#}

¹浙江树人大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州

²杭州师范大学钱江学院理工分院, 浙江 杭州

Email: 2967362651@qq.com, #xiankelaifeng@163.com, #151079507@qq.com

收稿日期: 2021年4月30日; 录用日期: 2021年6月1日; 发布日期: 2021年6月9日

摘要

多环芳烃化合物因广泛使用, 在环境水体中经常检出, 故急需研究其去除技术。本实验以过碳酸钠(SPC)构建光助均相氧化体系, 以萘为模型化合物, 以高效液相色谱法(HPLC)为实验方法, 对ZnO + UV、ZnO + 过碳酸钠、UV + 过碳酸钠、UV + ZnO + 过碳酸钠四个降解系统进行了筛选。实验得到过碳酸钠 + UV体系为四者中最佳。采用单因素和正交实验对该体系的降解能力进行优化。通过对过碳酸钠投加量、萘母液浓度、UV照射时间以及pH对萘降解效率影响的研究, 得出过碳酸钠 + UV体系中最佳反应条件为: 过碳酸钠投加量0.267 g, 萘母液浓度0.5 mg/mL, UV照射时间30 min, pH = 6.0。经验证, 在此条件下, 萘的降解率达到最高。实验表明, UV强化过碳酸钠催化萘降解体系可以有效降解水中的萘, 并且降解率较高。此外, 该方法较好地克服了当下化学降解法对环境的污染困境, 有广阔的发展前景。

关键词

光降解, UV催化, 过碳酸钠, 萘

Photo-Assisted Degradation of Naphthalene by Sodium Percarbonate System

Zhexin Qiu^{1*}, Guiwei Rao^{1#}, Li Wang¹, Lei Wang^{2#}

¹College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

²Polytechnic Institute, Hangzhou Normal University Qianjiang College, Hangzhou Zhejiang

Email: 2967362651@qq.com, #xiankelaifeng@163.com, #151079507@qq.com

Received: Apr. 30th, 2021; accepted: Jun. 1st, 2021; published: Jun. 9th, 2021

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

Because PAHs are widely used and often detected in the aquatic environment, it is urgent to study the removal high-efficiency methods of it. In this study, four degradation systems were screened by using sodium percarbonate (SPC) to construct a photo-assisted homogeneous oxidation system, naphthalene as a model compound, and HPLC as an experimental method. The optimal sodium percarbonate with UV system was obtained. The system was optimized by complete randomized design and orthogonal experimental design. The effects of sodium percarbonate dosage, concentration of naphthalene mother liquor, UV irradiation time and pH on the degradation efficiency of naphthalene were investigated. The optimal reaction conditions were as follows: sodium percarbonate dosage of 0.267 g, concentration of naphthalene mother liquor of 0.5 mg/mL, UV irradiation time of 30 min, pH = 6.0. Under these conditions, the degradation rate of naphthalene was highest, which showed that the UV enhanced sodium percarbonate catalyzed naphthalene degradation system could effectively degrade naphthalene in water, and the degradation rate was higher. In addition, this method has better overcome the current environmental pollution dilemma of chemical degradation methods, and has broad development prospects.

Keywords

Photodegradation, UV Catalysis, Sodium Percarbonate, Naphthalene

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多环芳烃化合物(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是指含有两个及以上的苯环的碳氢化合物,广泛存在于自然界中,包括煤和石油的燃烧、香烟和熏物产生的烟雾[1]。Sanders 等[2]对美国乔治亚州的 Savannah 河进行了沉积物种的 PAHs 的分析,发现在距离 Savannah 的城市的上游、中游和下游 PAHs 的质量分数变化范围为 29~5375 ng/g,而其最高峰值出现在离城市较近的工业区内,由此判断多环芳烃的来源主要是石油等的热解。根据张俊叶等[3]在 2000~2016 年之间的统计,我国各地区的 PAHs 含量不平均,其中含量最高的是我国西北和西南地区。此外,吴迪等[4]对河北邯郸钢铁冶炼区周边的表土样品,利用同分异构体特征比值进行了初步源分析,显示煤与生物质燃烧和交通燃油(尾气)是当地 PAHs 的主要混合排放源。同样地,吴志远等[5]在污染场地的表层土壤的 130 个采样点中,研究得出场地的表层土壤 PAHs 普遍超标,污染呈片状,其中含量最大的采样点位于焦化厂。1979 年,美国环保局[6] (USEPA)公布了优先监测污染物,其中包括 16 种多环芳烃。而萘(C₁₀H₈)作为典型的多环芳烃污染物,是 USEPA 公布的十六种优先监测污染物之一,其同时也被列进我国《重点环境管理危险化学品名录》[7]。虽然萘的毒性低于其他 PAHs,但其在石油污染场地中有较高的检测浓度,故成为典型的 SVOCs,甚至具有更大危害[8]。环境中的萘可能被植物富集,通过食物链进入到人体中,也可能通过呼吸等途径进入人体系统,造成生殖发育损坏,引发肺癌、皮肤癌等危重症[9]。与其他多环芳烃污染物一样,萘具有强烈的“三致性”,即致癌性、致畸性和致突变性[10]。因此,研究萘的降解对于环境的保护有重要的积极意义。

现阶段萘的修复方法主要分为物理修复、化学修复和生物修复。其中物理修复包括空气扰动技术、吸附技术等;化学修复法主要包括化学氧化修复、化学淋洗修复[11]。另外,还有近年来被广泛应用的植

物修复和微生物修复等方法。然而,传统的物理修复虽然长久以来被广泛使用,但是对污染物的去除并不完全,造成的遗留易产生二次污染;化学修复虽然成本低效率高,但化学淋洗液容易给环境带来二次污染[12]。因此,同时满足高效和环保的化学修复方法亟待研究。

过碳酸钠(SPC)又称固体过氧化氢,作为固体类 Fenton 试剂,其自身具有较高的氧化性,与 Fe (II) 反应会生成羟基自由基,由此可以氧化大部分的有机化合物,因此在水污染修复领域中受到广泛的关注[13]。目前,过碳酸钠在降解菊酯类农药[14]、DDTs 和罗丹明 B [15]等方面都展现出良好的降解能力。

ZnO 薄膜是一种宽禁带的半导体材料,具有优异的电学性能,其成本低廉、环保并且有原材料丰富等巨大优势[16],在降解领域有较好的表现。

光助降解体系近年来有较好发展。早在 2009 年,Wang [17]等人已经率先发现石墨相氮化碳(g-C₃N₄)在可见光下有较好的产氢性能,使其降解,刘芑岩[18]等调查到光降解是自然环境中多溴联苯醚(PBDEs)降解的主要途径之一,然而在其过程中容易产生毒性更高的溴代二噁英,有机物光降解产生的产物,如营养盐和痕量金属等物质,也被证实还会进一步影响水体中的生物地球化学过程[19]。本研究针对归类于化学修复法的光催化反应,进行体系筛选和单因素的优化。该种反应类型是利用光能进行物质转化,能在较为温和的条件下将有机物进行较为彻底的分解,其理论的降解产物为 CO₂ 和 H₂O,不会对环境造成二次污染,是当前有望解决日益严重的废水问题的新型方法之一。

2. 材料与方法

2.1. 试剂与仪器

2.1.1. 实验试剂

过碳酸钠(Na₂CO₃·1.5H₂O₂)购买于阿拉丁工业公司;萘(Naphthalene)购买于上海裕明实业有限公司远航试剂厂;乙酸锌(C₄H₆O₄Zn·2H₂O)购买于天津市博迪化工有限公司;磷酸二氢钠(NaH₂PO₄·2H₂O)购买于湖州湖试化学试剂有限公司;磷酸氢二钠(Na₂HPO₄·12H₂O)购买于天津市永大化学试剂有限公司;氢氧化钠(NaOH)购买于杭州萧山化学试剂厂;冰乙酸(CH₃COOH)购买于杭州化学试剂有限公司;无水乙酸钠(CH₃COONa)购买于温州润华化工实业公司;液相用甲醇(CH₃OH)购买于美国 J.T.Baker 公司。

2.1.2. 实验仪器与设备

电子天平(ME204E, 瑞士苏黎世梅特勒-托利多公司);实验室 pH 计(JCPH, 厦门精川自动化科技有限公司);电热恒温鼓风干燥箱(DGG-9140A, 上海森信实验仪器有限公司);数显恒温磁力搅拌器(78HW-1, 杭州仪表电机有限公司);超声清洗器(KQ5200, 昆山市超声仪器有限公司);一次性使用无菌注射器带针(2 mL)(上海米沙瓦医科工业有限公司);手动移液器(Pipet-Lite XLS+, 瑞士苏黎世梅特勒-托利多公司);紫外可见漫反射光谱仪(L-2130, 天美(中国)科学仪器有限公司);高压液相色谱仪(日本 Hitachi 公司);NY 针头式过滤器(0.22 μm)(岛津技迹上海商贸有限公司);15mL 锥形离心管(KIRGEN-KG2611, 上海科进生物技术有限公司)。

2.2. 实验方法

在室温下(20°C ± 5°C),称取 0.100 g 萘,加入到 100 mL 容量瓶中,用甲醇定容至 100 mL,得到 1 mg/mL 的萘母液。用移液器移取 5 mL 萘母液至 10 mL 离心管,首先,在黑暗中磁力搅拌 30 min,使其吸附饱和,达到吸附-解吸平衡。所需光源为定功率紫外线照射灯,在暗吸附完成后的试管中加入所需量的过碳酸钠和萘母液,调节 pH 至所需值,光照每隔 10 min 用一次性使用无菌注射器提取 1 mL 样品,并通过一次性滤膜(0.22 μm 尼龙膜)滤过杂质,然后用高效液相色谱法测定该样品的出峰面积,并进而分析萘溶液的降解率。

2.2.1. 高效液相分析方法

LC2000 液相色谱, Hypersil ODS 色谱柱(4.6 mm × 250 mm, 5 μm), 流动相为 70% 甲醇与 30% 水, 流速 10.0 mL·min⁻¹, 进样量 10 μL, 二极管阵列检测器的检测波长为 260 nm。该分析条件下, 萘的出峰时间为 6.4 min。萘溶液的降解率根据式(1)进行计算。

$$\mu = (C_0 - C_n) / C_0 * 100\% \quad [20] \quad (1)$$

μ ——降解率(%); C_0 ——萘的初始浓度(mg/L); C_n —— n 分钟后萘的浓度(mg/L)。

2.2.2. 单因素筛选实验的正交实验

- 分别考察不同投加量的过碳酸钠对萘的降解效果的影响, 确定萘溶液的浓度为 0.5 mg/mL [21], pH 值为 7, 暗吸附 30 min, 分别改变过碳酸钠投加量为原来的 1 倍(0.0267 g)、3 倍(0.0801 g)、5 倍(0.1335 g) 和 10 倍(0.2670 g), 对萘的降解效果进行检测。
- 分别考察不同浓度的萘母液对萘的降解效果的影响, 确定过碳酸钠的投加量为 0.1335 g, 暗吸附 30 min, pH = 7, 分别萘母液的浓度为 0.1 mg/mL, 0.25 mg/mL, 0.4 mg/mL, 0.5 mg/mL, 对萘的降解效果进行检测。
- 分别考察不同的 pH 值对萘的降解效果的影响, 过碳酸钠的投加量为 0.1335 g, 萘母液浓度为 0.25 mg/mL, 配置乙酸 - 乙酸钠缓冲溶液(0.2 mol/L)和磷酸氢二钠 - 磷酸氢二钠缓冲溶液(0.2 mol/L), 以此调节溶液的 pH [22]。参考文献[23]后, 发现过碳酸钠在酸性条件下的降解效果更好, 所以分别在 pH 为 5.5、6.0、6.5、7.0 和 7.5 (误差±0.1)时, 对萘的降解效果进行检测。

2.2.3. 基于单因素筛选的正交实验

使用正交实验[24]主要是为了找出各影响因素对实验结果的重要性排序和这些因素的最佳水平条件。根据本实验探究的单因素, 即过碳酸钠投加量、萘母液浓度、pH 及光照时长, 进行 L₉(3⁴)正交实验, 分离各个影响因素在去除萘的实验中的影响顺序和最佳反应条件。

3.1. 标准曲线绘制

用甲醇溶液配置了标准溶液的不同浓度, 分别为 0.1 mg/mL、0.2 mg/mL、0.5 mg/L、0.6 mg/L、0.8 mg/L、1.0 mg/L。其色谱图效果如图 1 所示。

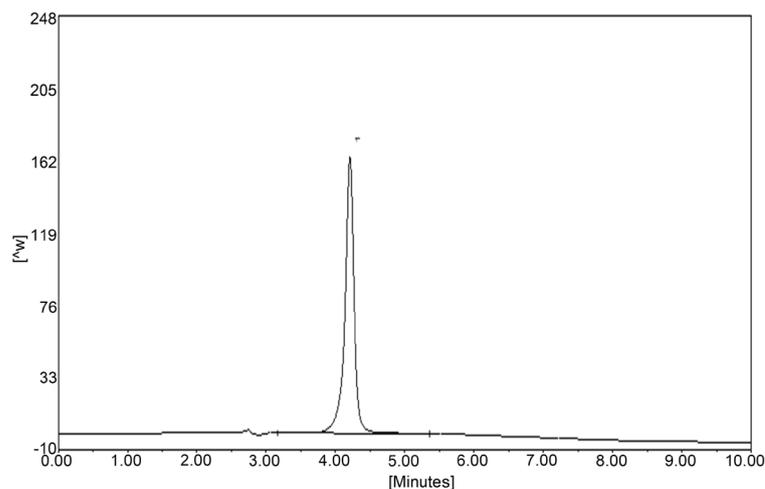


Figure 1. Methanol standard liquid chromatography

图 1. 甲醇标液色谱图

将标样从低到高浓度依次进样，以萘浓度为横坐标，峰面积为纵坐标作图，得出萘的标准曲线为 $y = 10615x + 11213$, $R = 0.9977$ 。

3.2. 萘在不同体系中的降解

图 2 为在 pH = 7 的条件下萘在 ZnO + 过碳酸钠 + UV、ZnO + UV、ZnO + 过碳酸钠、过碳酸钠 + UV 这 4 种体系中的降解率。为了更好地对比不同降解体系与萘的降解速率之间的关系，引入伪一级动力学模型对萘降解动力学数据进行拟合。动力学模型如式(2)所示。

$$-\ln(C_n/C_0) = kt \quad (2)$$

K ——一级动力学常数(min^{-1}); t ——降解时间(min)。

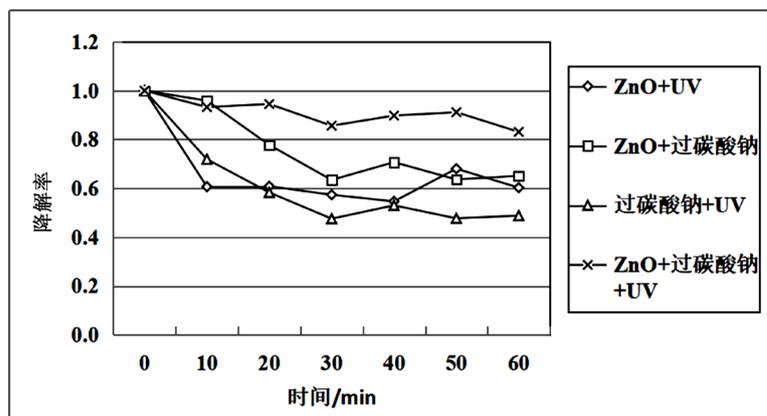


Figure 2. The degradation rate of naphthalene by system
图 2. 各体系下萘的降解率

线性拟合结果更直观地表述降解体系的优势，见图 2。图中列出了不同体系得到的萘的降解率的变化，可见 UV 强化过碳酸钠体系的降解性能在四个体系中最佳， C_n/C_0 在 60 min 时达到 0.48。每 10 min 的降解率在 30 min 前后达到最高，且各体系平均在 50 min 左右停止降低降解率，即不再降解或很少降解。

3.3. 单因素优化 UV 强化过碳酸钠催化降解体系

3.3.1. 过碳酸钠投加量对萘降解效果的影响

如图 3 所示，从图中可以知道过碳酸钠对萘的降解有很强的活化效果。当改变过碳酸钠的投加量，测定不同过碳酸钠投加量的萘的降解率时，实验发现，将过碳酸钠的投加量增加至 5 倍(0.1350 g)时，体系中的萘的降解率明显增大。因为增加了过碳酸钠的量，生成的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)增多，这是一种具有高反应活性的氧化剂，能够使得大多数有机物快速氧化分解[25] [26] [27]。但是当催化剂浓度过高时，会生成具有还原活性的 $\text{HO}_2 \cdot (\text{O}_2^-)$ 等自由基，或者直接发生氧化作用[28]。故在过碳酸钠浓度过高时，降解率反而下降。

3.3.2. 萘母液浓度对萘降解效果的影响

实验探究了 4 个不同浓度的萘母液对萘降解效果的影响，由图 4 可知，萘母液浓度在小于 0.5 mg/mL 浓度时，萘的降解率会随着萘母液浓度的升高而降低。萘母液浓度为 0.05 mg/mL 的实验组因为萘的浓度过低，降解过快，导致没有出峰；萘母液浓度为 0.10 mg/mL 的组因为萘的浓度过低，萘分子和过碳酸钠

生成的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)无法进行较好接触, 导致降解不完全。当萘母液浓度为 0.25 mg/mL 时, 萘的降解率达到最高。

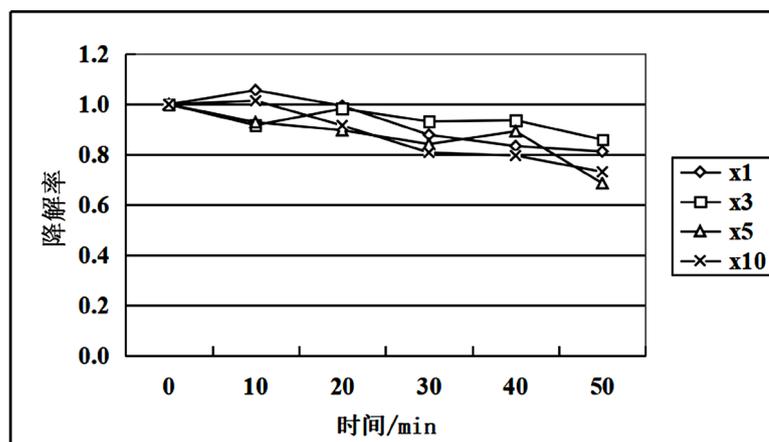


Figure 3. The degradation rate of naphthalene at the concentration of sodium percarbonate solution
图 3. 各过碳酸钠浓度下萘的降解率

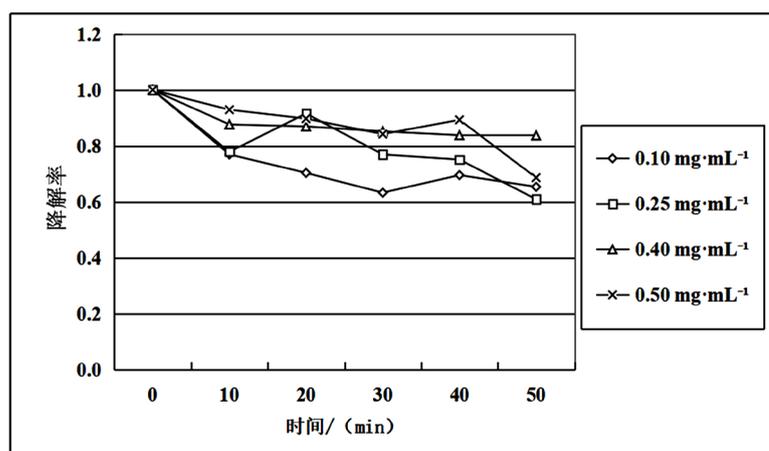


Figure 4. The degradation rate of naphthalene at the concentration of naphthalene mother liquor
图 4. 各萘母液浓度下萘的降解率

3.3.3. pH 对萘降解效果的影响

萘的降解效果趋势如图 5 所示。萘的降解效果随 pH 的降低而升高, 表面萘在弱酸性条件下更容易被降解。因为在 pH 值小于 7 的情况下, 反应中的氢离子与氢氧根离子会优先结合, 但是当 pH 过低时, 会对目标物的降解产生抑制作用[29]。无独有偶, Miao [30]等用 Fe (II)催化 SPC 降解水中的 PCE 时, 发现其初始 pH 值为 6.5 的偏中性环境下目标物的降解率最高, 当调整初始 pH 至 3.0~4.5 时都会对 PCE 的降解起到相反的抑制作用。当萘的模拟水样 pH 为 6.0 ± 0.1 时, 萘的降解效果达到最佳, 为 0.49, 因此将最优 pH 值定为 6.0。

3.4. 正交实验结果及分析

根据单因素实验结果, 设计过碳酸钠投加量(A)为 0.0267 g (1 倍)、 0.1335 g (5 倍)、 0.2670 g (10 倍), 萘母液浓度(B)为 0.1 mg/mL , 0.25 mg/mL , 0.5 mg/mL , UV 反应时间(C)分别为 20 min、30 min、40 min,

pH 值(D) 5.5、6.0、6.5 四个影响因素三个水平的正交试验表, 表 1 为正交试验因素水平表。将此表代入表 2 中, 可以得到 9 个实验结果。

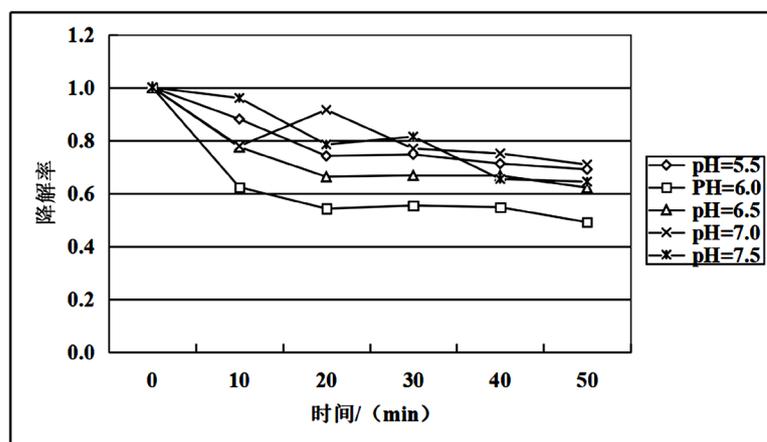


Figure 5. The degradation rate of naphthalene at pH levels

图 5. 各 pH 下萘的降解率

Table 1. Naphthalene solution orthogonal test factor level

表 1. 萘溶液正交实验因素水平表

因素/水平	A (g)	B (mg/mL)	C (min)	D
1	0.0267	0.10	20	5.5
2	0.1335	0.25	30	6.0
3	0.2670	0.50	40	6.5

Table 2. Results of orthogonal experimental factors for naphthalene solution

表 2. 萘溶液正交实验因素结果表

实验组数	因素				萘降解率
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	0.37
2	1	2	2	2	0.97
3	1	3	3	3	0.85
4	2	1	2	3	0.42
5	2	2	3	1	0.61
6	2	3	1	2	0.96
7	3	1	3	2	0.81
8	3	2	1	3	0.51
9	3	3	2	1	0.89
k1	0.73	0.54	0.61	0.62	
k2	0.67	0.70	0.76	0.91	
k3	0.74	0.90	0.76	0.59	
R (极差)	0.07	0.36	0.15	0.32	

从正交实验直观分析表中的 R (极差)的大小可判断 $L_9(3^4)$ 实验中各影响因素对于实验结果影响的主次顺序。极差值越大,说明对应的影响因素的水平变化越大,也表示萘溶液的处理效果受到此因素的影响越显著。从实验结果的数据分析,影响萘降解率的主次顺序为萘母液浓度 > pH > UV 照射时间 > 过碳酸钠投加量,其中过碳酸钠投加量影响效果不明显。通过分析正交试验中不同因素的平均值,得出吡萘的理论最优提取条件应当是 $A_3B_3C_2D_2$ 。故降解的最佳工艺为:过碳酸钠投加量 0.267 g,萘母液浓度 0.5 mg/mL,UV 照射时间 30 min, pH = 6.0。

3.5. 正交优化条件的验证结果

采用试验得出的最佳工艺条件对萘进行降解,平行对照三组,得出其降解率分别为:0.31, 0.35, 0.29, 平均值为 0.32。

4. 结论

1) 本实验通过体系筛选确定了萘的最佳降解体系为 UV 强化过碳酸钠催化降解体系,说明过碳酸钠的光降解性能优良,对于萘的适用性佳。

2) 萘的降解与体系中的过碳酸钠投加量、萘母液浓度、UV 照射时间、pH 对于降解效果具有一定的影响,在过碳酸钠投加量 0.267 g,萘母液浓度 0.5 mg/mL,UV 照射时间 30 min, pH = 6.0 的条件下对萘有良好的降解效果。

3) UV 强化过碳酸钠体系可以有效地去除水中的萘,萘的降解率较高。且在溶液初始 pH 偏酸性时有较高的去除率。

4) 超声强化过碳酸钠催化萘降解的体系中,起氧化效果的是过碳酸钠和 UV 的联合作用。

参考文献

- [1] Chen, S.-C. and Liao, C.-M. (2006) Health Risk Assessment on Human Exposed to Environmental Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution Sources. *Science of the Total Environment*, **366**, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.08.047>
- [2] Sanders, M., Sivertsan, S. and Scott, G. (2002) Origin and Distribution of PAHs in Surficial Sediments from the Savannah River. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **43**, 438-448. <https://doi.org/10.1007/s00244-002-1232-1>
- [3] 张俊叶, 俞菲, 俞元春. 中国主要地区表层土壤多环芳烃含量及来源解析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1059-1067.
- [4] 吴迪, 汪宜龙, 刘伟健, 等. 河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 740-749.
- [5] 吴志远, 张丽娜, 夏天翔, 等. 基于土壤重金属及 PAHs 来源的人体健康风险定量评价: 以北京某工业污染场地为例[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4180-4196.
- [6] 贺仕昌. 南极航线大气有机氯农药化学特征[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2013.
- [7] 环境保护部办公厅发布《重点环境管理危险化学品目录》[J]. 中国农药, 2014, 10(4): 21.
- [8] 郭斌, 龙飞, 王欣, 等. 响应面法优化微波修复萘污染土壤工艺参数的研究[J]. 河北科技大学学报, 2020, 41(6): 557-564.
- [9] Rogula-Kozłowska, W., Kozielska, B. and Klejnowski, K. (2013) Concentration, Origin and Health Hazard from Fine Particle-Bound PAH at Three Characteristic Sites in Southern Poland. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **91**, 349-355. <https://doi.org/10.1007/s00128-013-1060-1>
- [10] Chen, B.W., Huang, J.Y., Yuan, K., et al. (2016) Direct Evidences on Bacterial Growth Pattern Regulating Pyrene Degradation Pathway and Genotypic Dioxygenase Expression. *Marine Pollution Bulletin*, **105**, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.02.054>
- [11] 吴大付, 朱统泉, 郝仰坤. 植物修复研究的新方向: 环保育种[J]. 河南科技学院学报, 2012, 40(6): 28-31.

- [12] 钱翌, 谢晓梅. 污染环境中萘的修复技术研究进展[J]. 化学生物与工程, 2015, 32(2): 1-7.
- [13] 李宏. Fenton 高级氧化技术氧化降解多环芳烃类染料废水的研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [14] 钱卉. 过碳酸钠降解菊酯类农药的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- [15] Wang, Y., Lin, X., Shao, Z., *et al.* (2017) Comparison of Fenton, UV-Fenton and Nano-Fe₃O₄, Catalyzed UV-Fenton in Degradation of pH Loroglucinol under Neutral and Alkaline Conditions: Role of Complexation of Fe³⁺, with Hydroxyl Group in pH Loroglucinol. *Chemical Engineering Journal*, **313**, 938-945.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.133>
- [16] 朱鹏福. 柔性基底石墨烯基复合透明导电薄膜的制备及 CIAS 刮刀涂布法试制[D]: [硕士学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2015.
- [17] Wang, X., Maeda, K., Thomas, A., Takanabe, K., Xin, G., Carlson, J.M., Domen, K. and Antonietti, M. (2009) A Metal-Free Polymeric Photocatalyst for Hydrogen Production from Water under Visible Light. *Nature Materials*, **8**, 76-80.
<https://doi.org/10.1038/nmat2317>
- [18] 刘芃岩, 路佳良, 孙佳惠, 等. 多溴联苯醚(PBDEs) 光降解研究现状[J]. 环境化学, 2015, 34(2): 270-278.
- [19] Guo, M., Li, X., Song, C., *et al.* (2020) Photo-Induced Phosphate Release during Sediment Resuspension in Shallow Lakes: A Potential Positive Feedback Mechanism of Eutrophication. *Environmental Pollution*, **258**, 113679.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113679>
- [20] 丁丽丹, 周家斌, 刘文博, 等. CuO/Bi₂O₃ 光催化耦合过一硫酸盐氧化降解盐酸四环素[J/OL]. 环境工程学报, 2020. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5591.X.20201010.1440.013.html>, 2020-10-10.
- [21] 王平. 芬顿法应用于染料工业园区废水深度处理的技术研究与评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2015
- [22] Pignatello, J.J., Oliveros, E. and MacKay, A. (2006) Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **36**, 1-84. <https://doi.org/10.1080/10643380500326564>
- [23] Wang, J.L. and Xu, L.J. (2012) Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **42**, 251-325.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2010.507698>
- [24] Bogan, B.W. and Trbovic, V. (2003) Effect of Sequestration on PAH Degradability with Fenton's Reagent: Roles of Total Organic Carbon, Humic, and Soil Porosity. *Journal of Hazardous Materials*, **100**, 285-300.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00134-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00134-1)
- [25] Bautista, P., Mohedano, A.F., Casas, J.A., *et al.* (2008) An Overview of the Application of Fenton Oxidation to Industrial Wastewaters Treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **83**, 1323-1338.
<https://doi.org/10.1002/jctb.1988>
- [26] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019: 452-460.
- [27] 金建忠, 许惠英, 申屠超, 等. 基础化学实验[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2017: 295-296.
- [28] 宋雨姮. 过碳酸钠对土壤中除草剂和微生物的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2017.
- [29] 张赛. 过碳酸钠催化体系降解苯胺效能与机制研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [30] Miao, Z.W., Gu, X.G., Lu, S.G., *et al.* (2015) Perchloroethylene (PCE) Oxidation by Percarbonate in Fe²⁺-Catalyzed Aqueous Solution: PCE Performance and Its Removal Mechanism. *Chemosphere*, **119**, 1120-1125.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.065>