

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.09.015

微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 协同处理有机磷生化尾水

翁 宝^{1,2}

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210000; 2. 安道麦<南京>农业科技有限公司,
江苏 南京 210000)

摘 要: 有机磷农药废水生物降解性差,生化尾水难以达到《农药工业水污染物排放标准》(GB 21523—2024)中的直接排放标准。基于此,构建了微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 协同氧化工艺,对有机磷生化尾水进行深度处理,探讨不同处理方式、初始pH、微纳米气泡 O_3 投加量、UV剂量、 H_2O_2 投加量和反应时间等因素对有机磷生化尾水处理效果的影响,并采用Box-Behnken响应曲面法进行参数优化和验证。结果表明,相较于传统大气泡法,微纳米气泡法对有机磷生化尾水表现出了更好的处理效果;微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 协同氧化工艺优于其他处理工艺。响应曲面法优化分析表明,各因素对试验结果影响程度的顺序为:UV剂量>微纳米气泡 O_3 投加量> H_2O_2 投加量,最佳工况参数如下:初始pH为8、反应时间为10 min、微纳米气泡 O_3 投加量为4.5 mg/L、UV剂量为9 mJ/cm²、 H_2O_2 投加量为2.25 mg/L,通过三元多项式模型推算发现,在最优条件下有机磷无机化率为82.5%,而实际试验测定值为82.4%,结果高度吻合,充分验证了该模型在预测微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 工艺对有机磷降解效果方面的准确性。

关键词: 微纳米气泡 O_3 ; UV; H_2O_2 ; 有机磷生化尾水; 响应曲面法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)09-0101-07

Micro-nano Bubble O_3 /UV/ H_2O_2 for Synergistic Treatment of Organophosphorus Biochemical Tailwater

WENG Bao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210000, China; 2. ADAMA <Nanjing> Agricultural Technology Co. Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: In view of the poor biodegradability of organophosphorus pesticide wastewater and the difficulty for its biochemical tailwater to meet the direct discharge standards stipulated in the *Discharge Standard of Water Pollutants for Pesticide Industry* (GB 21523-2024). A micro-nano bubble O_3 /UV/ H_2O_2 synergistic oxidation process was constructed for the advanced treatment of organophosphorus biochemical tailwater. The effects of various factors, including different treatment methods, initial pH, micro-nano bubble O_3 dosage, UV dose, H_2O_2 dosage, and reaction time, on the degradation efficiency of organophosphorus biochemical tailwater were investigated. Parameter optimization and validation were conducted using the Box-Behnken response surface methodology. The results showed that, compared to the traditional macro-bubble method, the micro-nano bubble method exhibited better performance in the degradation of organophosphorus biochemical tailwater. The micro-nano bubble O_3 /UV/ H_2O_2 synergistic oxidation process outperforms other treatment processes. The optimization results from the response surface methodology revealed that the order of influence of various factors on the experimental results

was: UV dose > micro-nano bubble O_3 dosage > H_2O_2 dosage. The optimal operating parameters were as follows: initial pH of 8, reaction time of 10 minutes, micro-nano bubble O_3 dosage of 4.5 mg/L, UV dose of 9 mJ/cm², and H_2O_2 dosage of 2.25 mg/L. Based on the ternary polynomial model, the inorganic conversion rate of organophosphorus under the optimal conditions was calculated to be 82.5%, while the actual experimental result was 82.4%. The high degree of concordance between these results fully verified the accuracy of the model in predicting the degradation efficiency of the micro-nano bubble O_3 /UV/ H_2O_2 process for organophosphorus.

Keywords: micro-nano bubble O_3 ; UV; H_2O_2 ; organophosphorus biochemical tailwater; response surface methodology

有机磷农药废水具有成分复杂、排放量大、毒性大和可生化性差等特点^[1-2]。目前主要采用大稀释倍数生化处理工艺,但处理后的生化尾水仍难以达到《农药工业水污染物排放标准》(GB 21523—2024)直接排放标准(COD≤100 mg/L, TP≤1 mg/L)。因此,必须对有机磷生化尾水进行深度处理以满足排放或回用要求。

近年来,高级氧化技术被认为是处理生化尾水的有效方法之一^[3]。由于臭氧(O_3)、紫外(UV)和双氧水(H_2O_2)具有强氧化性,无二次污染^[4],同时微纳米气泡具有比表面积大、在水中存留时间长、传质效率高和界面电位高等特点^[5],于是将微纳米气泡、 O_3 、UV和 H_2O_2 组成微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 工艺,其机理包括四个方面:微纳米气泡 O_3 分子的降解;UV照射的降解; H_2O_2 在UV照射下产生羟基自由基($\cdot OH$)的降解; H_2O_2 在 O_3 分子作用下产生 $\cdot OH$ 的降解。其中, $\cdot OH$ 对降解起主要作用^[6]。

本研究构建了微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 工艺,以有机磷生化尾水为处理对象,对比了传统大气泡法和微纳米气泡法对有机磷和COD的去除率,以及微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 工艺和其他处理工艺对有机磷的降解效果。此外,采用Box-Behnken响应曲面法对微纳米气泡 O_3 投加量、UV剂量和 H_2O_2 投加量这三个关键参数进行了优化分析和研究,并通过实际应用验证了所建立模型的准确性。

1 材料与方法

1.1 试验用水

以湖北荆州某有机磷农药厂生化尾水为处理对象,其pH为7.8(弱碱性),TOC为24.4 mg/L, COD为125.5 mg/L,总氮为6.8 mg/L;总磷浓度达到241.1 mg/L,其中有机磷为4.2 mg/L,其余以正磷酸

盐为主;氯离子为1 560 mg/L,硫酸根为3 200 mg/L,具有典型的高盐特征。

1.2 试验装置

微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 工艺主要由微纳米气泡(MNB)发生器、 O_3 氧化系统、 O_2 发生器、UV高级氧化发生器和氧化反应系统组成,如图1所示。

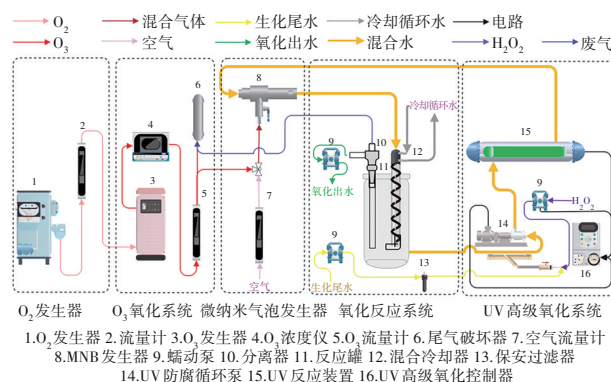


图1 微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 协同氧化工艺示意

Fig.1 Schematic diagram of synergistic oxidation process using micro-nano bubble O_3 /UV/ H_2O_2

臭氧发生器为壁挂式,使用双石英电晕池产生臭氧,分为10档,产量为1~10 g/h,出口浓度为10~100 mg/L;微纳米气泡发生器设备基于文丘里效应设计,其设备尺寸为 $\varnothing 150$ mm \times 750 mm,空气竖管管径为12 mm,收缩管管径 $d_1=2.2$ mm、管长为43.5 mm,扩散管管径 $d_2=4.2$ mm,其以6.5°渐扩角度将出口扩展至20 mm,扩散管管长为98 mm,压力水系统采用0.8 MPa驱动进水,控制水流量为1.5 m³/h,气液体积比维持在1:10,采用钛合金材质,如图2所示。UV高级氧化装置为一个水平放置的石英玻璃圆柱形容容器,长度为50 cm,直径为10 cm。在反应容器的中心位置有功率为75 W、波长为254 nm的UV灯,反应罐的尺寸为 $\varnothing 250$ mm \times 1 000 mm。

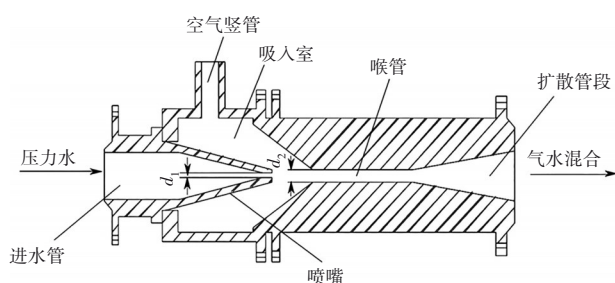


图2 微纳米气泡发生器结构示意图

Fig.2 Structural diagram of micro-nano bubble generator

1.3 试验方法

在反应罐中加入50 L生化尾水。打开O₂发生器,预热30 min以上,O₂纯度稳定在96%以上,随后打开O₃发生器预热15 min,O₃浓度稳定在100 mg/L,最后打开UV灯预热10 min。待所有系统预热完毕后,打开微纳米气泡空气竖管阀门和H₂O₂蠕动泵,O₃气体从微纳米气泡发生器的空气竖管被吸入微纳米气泡发生器中,与从微纳米气泡发生器进水管进入氧化反应系统的出水在UV防腐循环泵作用下充分混合,同时喷嘴处压强达到0.8 MPa,而后从微纳米气泡扩散管进入反应罐中,由于压力骤减,水中溶解的气体析出,便产生了大量微纳米气泡,此时开始计时。

1.4 检测项目及方法

采用气体臭氧在线检测仪测定臭氧浓度;采用钼酸铵分光光度法测定TP;采用离子色谱测定正磷酸根离子、氯离子、硫酸根离子;采用差减法测定有机磷;采用紫外分光光度计测定UV₂₅₄;采用重铬酸钾法测定COD;采用总有机碳分析仪测定TOC;采用pH精密计测定pH。

1.5 响应曲面设计

在单因素试验结果基础上,通过Box-Behnken方法设计响应曲面,将有机磷无机化率(Y)作为响应值,选取微纳米气泡O₃投加量(A)、UV剂量(B)和H₂O₂投加量(C)作为自变量,进行响应曲面分析(3因素3水平),具体见表1。

表1 响应曲面分析因素与编码水平

Tab.1 Factors and coded levels for response surface analysis

水平	A/(mg/L)	B/(mJ/cm ²)	C/(mg/L)
-1	1	2	1
0	5	9	2
1	8	16	4

2 结果与讨论

2.1 传统大气泡法与微纳米气泡法的处理效果

O₃/UV/H₂O₂协同氧化工艺的初始pH为8,微纳米气泡O₃投加量为4 mg/L,UV剂量为8 mJ/cm²,H₂O₂投加量为2 mg/L,传统大气泡法和微纳米气泡法的处理效果见图3。可知,传统大气泡法对COD的去除率为50.5%,有机磷无机化率为45.3%。而微纳米气泡法则展现出了更好的处理效果,对COD的去除率达到84.2%,有机磷无机化率为80.1%。微纳米气泡O₃/UV/H₂O₂工艺之所以在COD去除率和有机磷无机化率方面表现优异,主要是由于其有效提升了·OH的产生效率和臭氧的传质效率^[7]。

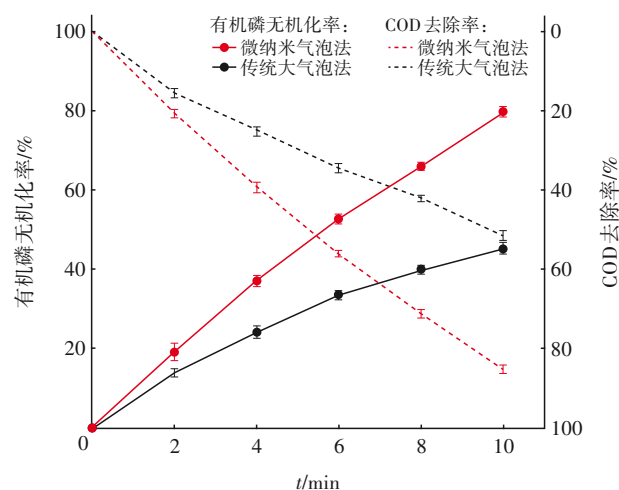


图3 传统大气泡法和微纳米气泡法的处理效果

Fig.3 Treatment efficiency of traditional macro-bubble method and micro-nano bubble method

2.2 不同工艺处理有机磷生化尾水的效果

在初始pH为8、微纳米气泡O₃投加量为4 mg/L、UV剂量为8 mJ/cm²、H₂O₂投加量为2 mg/L的条件下,微纳米气泡O₃/UV/H₂O₂工艺和其他工艺(微纳米气泡O₃/UV、微纳米气泡O₃/H₂O₂和UV/H₂O₂)对有机磷生化尾水的处理效果如图4所示。可知,在相同反应时间内,微纳米气泡O₃/UV/H₂O₂协同氧化工艺对有机磷的无机化率(80.5%)和COD去除率(93.3%)均显著优于其他工艺组合(微纳米气泡O₃/UV:52.5%/66.9%,微纳米气泡O₃/H₂O₂:35.3%/56.9%,UV/H₂O₂:31.6%/40.1%)。这主要归因于微纳米气泡对O₃传质的强化作用,结合UV光解与H₂O₂的链式反应,能够持续产生·OH^[7],其氧化还原电位显著高于单一氧化剂,从而实现对有机磷分子中C—P键的高效断键。

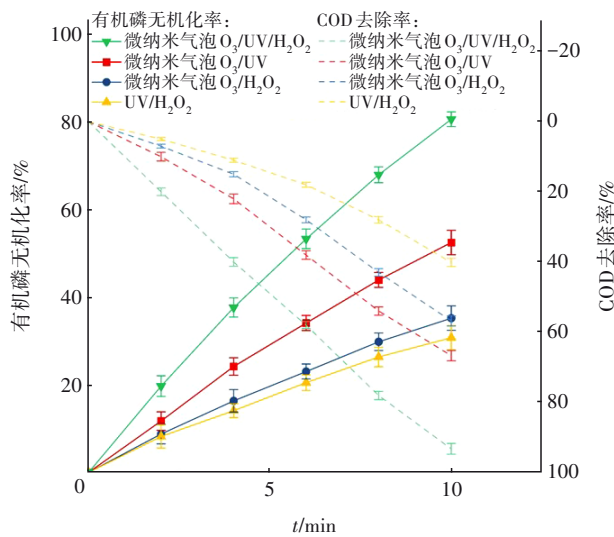


图 4 微纳米气泡 O₃/UV/H₂O₂ 工艺和其他工艺对有机磷生化尾水的处理效果

Fig.4 Treatment efficiency of micro-nano bubble O₃/UV/H₂O₂ process and other processes on organophosphorus biochemical tailwater

2.3 微纳米气泡 O₃/UV/H₂O₂ 工艺影响因素分析

2.3.1 初始 pH 的影响

在微纳米气泡 O₃ 投加量为 4 mg/L、UV 剂量为 8 mJ/cm²、H₂O₂ 投加量为 2 mg/L、反应时间为 10 min 的条件下,分析初始 pH 对有机磷无机化率的影响。结果表明,当 pH 由酸性升至中性时,COD 去除率和有机磷无机化率显著升高;pH 继续升至碱性时,有机磷无机化率明显下降。中性至弱碱性条件下的处理效果接近,考虑到有机磷生化尾水的 pH 一般为 7~8,故后续试验用水初始 pH 均设为 8。

2.3.2 反应时间的影响

在初始 pH 为 8、微纳米气泡 O₃ 投加量为 4 mg/L、UV 剂量为 8 mJ/cm²、H₂O₂ 投加量为 2 mg/L 的条件下,分析反应时间对有机磷无机化率的影响,结果如图 5 所示。可知,有机磷无机化率随反应时间的延长而逐渐升高。0~10 min,有机磷的降解速率较快,10 min 时有机磷无机化率即可达到 80.5%。然而,当反应时间超过 10 min 后,有机磷的降解速率开始变慢。这是因为反应初期 COD 和有机磷浓度较高,能与·OH 迅速反应,从而加快了降解速率;而随着有机磷的不断降解,氧化剂逐渐过量,导致降解速率逐渐降低。因此,反应时间控制在 10 min 左右较为适宜。

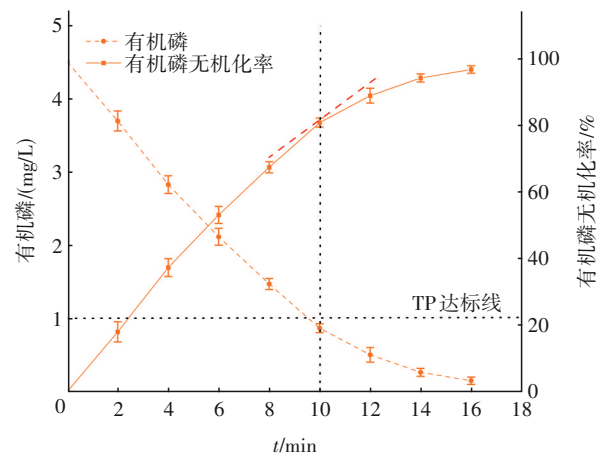


图 5 反应时间对有机磷生化尾水处理效果的影响

Fig.5 Effect of reaction time on treatment efficiency of organophosphorus biochemical tailwater

2.3.3 微纳米气泡 O₃ 投加量的影响

在初始 pH 为 8、UV 剂量为 8 mJ/cm²、H₂O₂ 投加量为 2 mg/L、反应时间为 10 min 的条件下,随着微纳米气泡 O₃ 投加量的增加,COD 去除率和有机磷无机化率均呈上升趋势。当微纳米气泡 O₃ 投加量从 2 mg/L 提高至 8 mg/L 时,有机磷无机化率的增长速度先快后慢,最终趋近 95% (见图 6)。这一变化归因于微纳米气泡 O₃ 投加量的增多,促进系统生成了更多的·OH,进而加速了有机磷生化尾水中有机物的降解。但 Jani 等^[8]认为,O₃ 投加量并不是越高越好,因为当 O₃ 超过阈值后,O₃ 产生的 H₂O₂ 会清除·OH,降低·OH 浓度,从而抑制反应物质的降解效率。

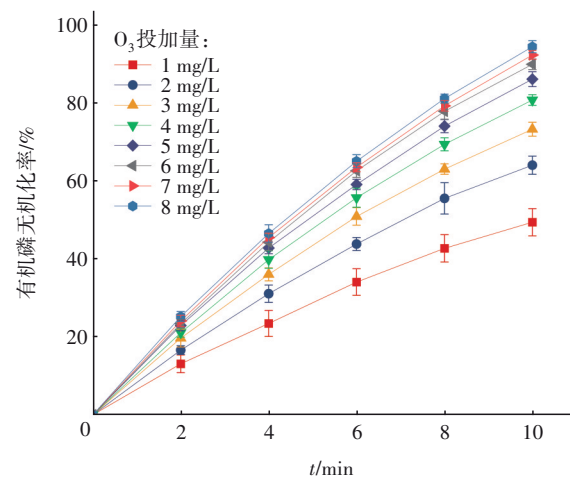


图 6 微纳米气泡 O₃ 投加量对有机磷生化尾水处理效果的影响

Fig.6 Effect of micro-nano bubble O₃ dosage on treatment efficiency of organophosphorus biochemical tailwater

2.3.4 UV剂量的影响

在初始pH为8、微纳米气泡O₃投加量为4 mg/L、H₂O₂投加量为2 mg/L、反应时间为10 min的条件下,分析UV剂量对有机磷生化尾水COD去除率和有机磷无机化率的影响。结果表明,与微纳米气泡O₃投加量对有机磷生化尾水处理效果的影响趋势相同,随着UV剂量的增加,有机磷生化尾水COD去除率和有机磷无机化率也不断增大,这是因为H₂O₂在UV的照射下,能够产生大量的·OH。但当UV剂量从6 mJ/cm²增加到16 mJ/cm²时,有机磷无机化率变化趋势变缓,同时单位有机磷所消耗的UV剂量增加。分析原因,随着UV剂量的增加,溶液中的有机磷无机化率升高,有机磷浓度降低,导致UV能量直接转化为热能进入环境中,没有参与到有机磷氧化的反应中^[9]。

2.3.5 H₂O₂投加量的影响

在初始pH为8、微纳米气泡O₃投加量为4 mg/L、UV剂量为8 mJ/cm²、反应时间为10 min的条件下,分析H₂O₂投加量对有机磷生化尾水COD去除率和有机磷无机化率的影响,结果如图7所示。可知,随着H₂O₂投加量的增加,COD浓度先降后升。分析原因,在测定COD过程中,H₂O₂作为还原剂被重铬酸钾氧化,H₂O₂浓度超过阈值(15 mmol/L)时,引发链式副反应,导致COD假性升高。同时,对有机磷的降解速率变慢,这是因为随着H₂O₂投加量的增加,溶液中的H₂O₂过量,过量的H₂O₂会与产生的·OH发生反应,从而消耗强氧化性的·OH,致使有机磷降解速率变慢^[10]。

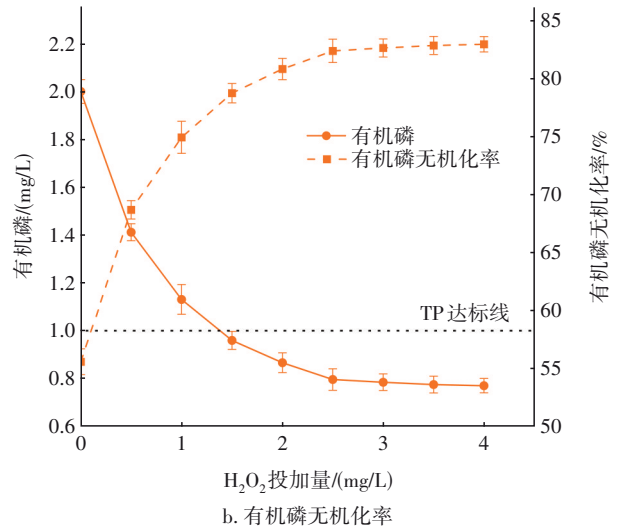
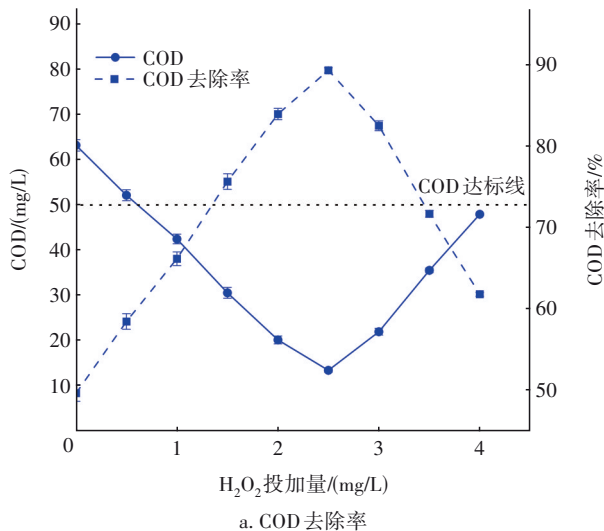


图7 H₂O₂投加量对有机磷生化尾水处理效果的影响

Fig.7 Effect of H₂O₂ dosage on treatment efficiency of organophosphorus biochemical tailwater

2.4 微纳米气泡O₃/UV/H₂O₂协同氧化工艺优化

在初始pH和反应时间不变的条件下,采用Box-Behnken响应曲面法优化微纳米气泡O₃/UV/H₂O₂协同氧化工艺,得到有机磷无机化率与影响因素之间的二次多项回归方程见式(1)。

$$Y = 82.48 + 15.54A + 21.51B + 5.72C - 5.98AB - 2.30AC - 2.90BC - 4.78A^2 - 8.53B^2 - 3.85C^2 \quad (1)$$

对回归方程进行显著性检验和方差分析,结果见表2。

表2 模型方差分析结果

Tab.2 Results of model variance analysis

项目	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	6 604.22	9	733.80	149.91	<0.000 1
A	1 931.31	1	1 931.31	394.54	<0.000 1
B	3 702.30	1	3 702.30	756.33	<0.000 1
C	262.20	1	262.20	53.57	0.000 2
AB	142.80	1	142.80	29.17	0.001 0
AC	21.16	1	21.16	4.32	0.076 2
BC	33.64	1	33.64	6.87	0.034 3
A ²	96.10	1	96.10	19.63	0.003 0
B ²	306.18	1	306.18	62.55	<0.000 1
C ²	62.49	1	62.49	12.77	0.009 1
残差	34.27	7	4.90		
失拟项	34.24	3	11.41	1 630.36	<0.000 1
纯误差	0.028 0	4	0.007 0		
总变异	6 638.49	16			

由表 2 可知, P 值作为显著性指标, $P < 0.0001$ 表示影响极为显著, $P > 0.05$ 则表示影响不显著。在本研究中, 因素 A、B、C 的 P 值均远低于 0.05, 说明它们对响应值有显著影响。模型整体的 P 值也小于 0.0001, 显著性极高, 说明回归方程能够准确描述各因子与响应值之间的非线性关系, 验证了该方法的可靠性。

修正拟合系数 R^2 达到 0.9948, 彰显了模型最佳的拟合效果。变异系数 CV 作为衡量数据离散程度的指标, 在本模型中仅为 2.97%, 远低于 10% 的常规标准, 表明试验结果具有高精度。此外, 预测值范围与平均误差的比值 (AP 值) 为 43.66, 远高于临界值 4, 进一步证明了模型预测的准确性和可靠性^[11]。可见, 此模型能够充分指导 Box-Behnken 响应曲面法所定义的设计空间^[12]。

微纳米气泡 O_3 投加量、UV 剂量和 H_2O_2 投加量影响有机磷无机化率的响应曲面如图 8 所示。可以看出, 有机磷无机化率随着微纳米气泡 O_3 投加量、UV 剂量及 H_2O_2 投加量的增加均呈现逐步上升趋势。当固定任一因素水平时, 另外两种因素的提升均能够有效促进有机磷无机化率升高。其中, 当固定微纳米气泡 O_3 投加量或 H_2O_2 投加量时, 有机磷无机化率随着 UV 剂量的增加显著增大; 而当固定 UV 剂量时, 有机磷无机化率随着微纳米气泡 O_3 或 H_2O_2 投加量增加的上升幅度逐渐减小, 同时, 微纳米气泡 O_3 投加量增加带来的提升幅度明显大于 H_2O_2 投加量增加的效果。综合对比可以发现, 各因素对有机磷无机化率的影响强度排序为 UV 剂量 > 微纳米气泡 O_3 投加量 > H_2O_2 投加量。

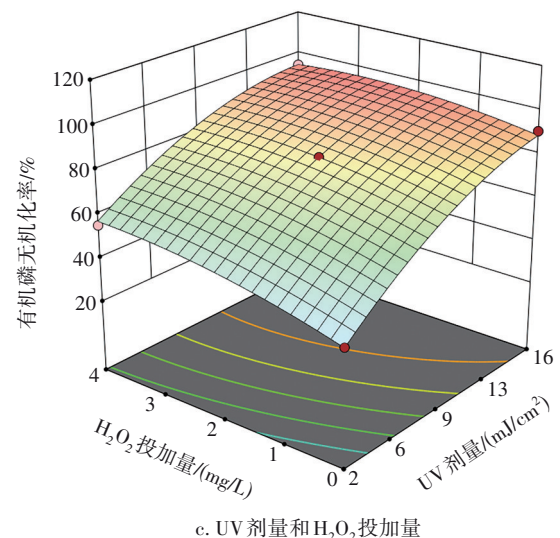
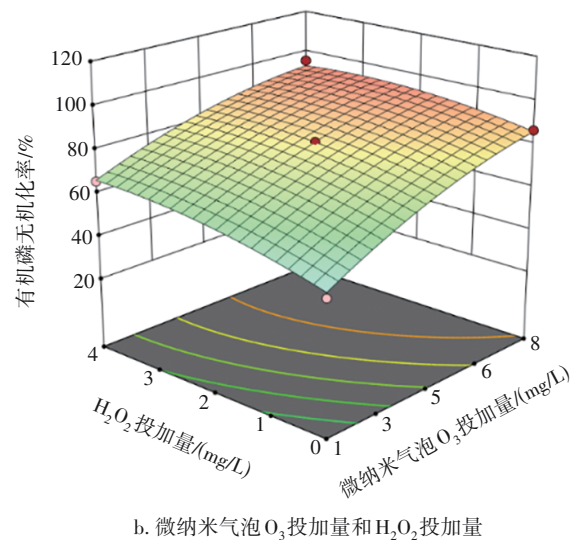
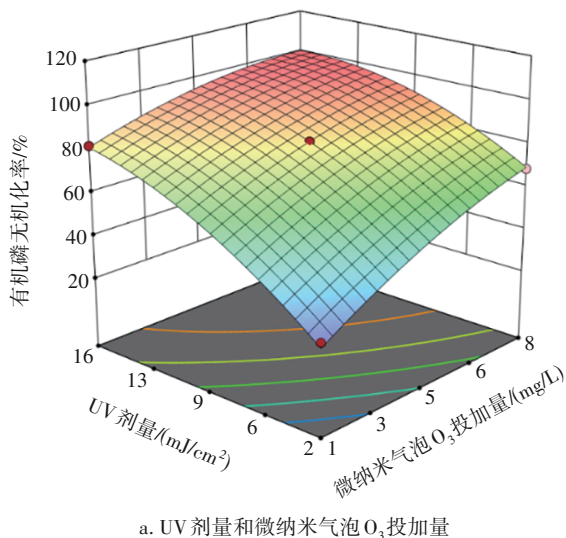


图 8 微纳米气泡 O_3 投加量、UV 剂量和 H_2O_2 投加量影响有机磷无机化率的响应曲面

Fig.8 Response surface for influence of micro-nano bubble O_3 dosage, UV dose and H_2O_2 dosage on inorganic conversion rate of organophosphorus

基于三元多项式回归模型, 利用 Design Expert 13.0 软件求得的最佳工艺条件如下: 微纳米气泡 O_3 投加量为 4.5 mg/L, UV 剂量为 9 mJ/cm², H_2O_2 投加量为 2.25 mg/L, 反应时间为 10 min, 初始 pH 为 8。此时有机磷无机化率预测值为 82.5%, 试验值为 82.4%, 两者接近, 说明模型预测准确, 能够有效预测微纳米气泡 O_3 /UV/ H_2O_2 工艺对有机磷废水的处理效果。

3 结论

① 相比传统大气泡法, 微纳米气泡法在 O_3 /UV/ H_2O_2 工艺中对有机磷生化尾水有机物的处理效

果更好。通过对比不同氧化方式处理有机磷生化尾水中COD和有机磷的效果发现,微纳米气泡O₃/UV/H₂O₂工艺明显优于其他处理工艺。

② 响应曲面法优化分析表明,影响因素的排序为UV剂量>微纳米气泡O₃投加量>H₂O₂投加量,最佳工况参数如下:初始pH为8,反应时间为10 min,微纳米气泡O₃投加量为4.5 mg/L,UV剂量为9 mJ/cm²,H₂O₂投加量为2.25 mg/L。采用三元多项式模型预测的最优有机磷无机化率为82.5%,试验值为82.4%,两者基本吻合,验证了模型对微纳米气泡O₃/UV/H₂O₂工艺降解有机磷效果的准确预测能力。

参考文献:

- [1] 邱丽佳. 类石墨烯生物炭强化高铁酸盐去除水中乐果及其机理研究[D]. 北京:北京科技大学, 2024.
QIU L J. Research on Dimethoate in Water by Graphene-like Biochar Enhanced Ferrate Oxidation and Its Mechanism [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2024 (in Chinese).
- [2] 朱华溢. PDI修饰金属有机骨架MIL-101(Fe)去除典型有机磷农药乐果的机理研究[D]. 长春:东北师范大学, 2024.
ZHU H Y. Study on Mechanism of PDI Modified Metal-Organic Framework MIL-101 (Fe) for Degradation of Typical Organophosphorus Dimethoate [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2024 (in Chinese).
- [3] 孟飞琴. 有机磷废水处理技术研究进展[J]. 广东化工, 2022, 49(11): 138-140.
MENG F Q. Research progress on the treatment of organophosphorus wastewater [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(11): 138-140 (in Chinese).
- [4] MOAYEDE T, ABDOLMAJID F, MEHRABAN S, et al. Comparison of the efficiency of ultraviolet/zinc oxide (UV/ZnO) and ozone/zinc oxide (O₃/ZnO) techniques as advanced oxidation processes in the removal of trimethoprim from aqueous solutions [J]. International Journal of Chemical Engineering, 2021. DOI: 10.1155/2021/9640918.
- [5] 张志强, 卢金锁, 张瑞君, 等. 新工科理念驱动的课程创新与实践:以“水工艺设备基础”为例[J]. 中国给水排水, 2024, 40(18): 1-7.
ZHANG Z Q, LU J S, ZHANG R J, et al. Curriculum

innovation design and practice driven by the concept of the new engineering education: taking “basis of water process equipment” as an example [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(18): 1-7 (in Chinese).

- [6] REN Y H, WANG Y L, XUE J, et al. Degradation performance and conversion mechanisms of MNZ by advanced oxidation systems with O₃: comparison of O₃, O₃/UV, O₃/H₂O₂ and UV-H₂O₂/O₃ systems [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 68: 106536.
- [7] WANG T Z, YANG C, SUN P Z, et al. Generation mechanism of hydroxyl free radicals in micro-nanobubbles water and its prospect in drinking water [J]. Processes, 2024. DOI: 10.3390/pr12040683.
- [8] JANI H, DONAHUE N M. Carbonyl oxide stabilization from trans alkene and terpene ozonolysis [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2023, 127(41): 8530-8543.
- [9] ZHOU F, MA Y Q, ZHAO W T, et al. Integrating AgNPs-decorated phase change microcapsules into UV-cured PUA with enhanced thermal conductivity for solar thermal energy conversion and storage [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 279: 113253.
- [10] LI J, ZHANG Q, CHEN B Y, et al. Hydrogen peroxide formation in water during the VUV/UV irradiation process: impacts and mechanisms of selected anions [J]. Environmental Research, 2021, 195: 110751.
- [11] ZHANG S Y, HU X L, WANG J J, et al. Optimal design of adaptive EWMA monitoring schemes for the coefficient of variation and performance evaluation with measurement errors [J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 191: 110107.
- [12] 潘章斌. 城市水源卤代苯醌消毒副产物生成及控制技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
PAN Z B. Study on Generation and Control Technology of Halogenated Bezoquinone Disinfection By-products in Urban Water Source [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2022 (in Chinese).

作者简介:翁宝(1990—),男,江苏南京人,硕士,高级工程师,注册环保工程师,主要研究方向为农药废水处理工艺。

E-mail: 79552464@qq.com

收稿日期:2025-09-17

修回日期:2025-11-03

(编辑:任莹莹)