

Fe-SBA-15强化H₂O₂/O₃耦合氧化高浓度苯酚的矿化性能研究

周杨群*, 狄学梦, 王 勇, 姜乾坤

阜阳师范大学化学与材料工程学院, 安徽 阜阳

收稿日期: 2026年9月12日; 录用日期: 2026年10月5日; 发布日期: 2026年10月10日

摘 要

为提高高浓度有机污染物在臭氧氧化过程中的深度矿化效率, 采用水热共缩合法制备Fe-SBA-15介孔催化材料, 并通过X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、N₂吸附-脱附和紫外-可见漫反射光谱(UV-vis DRS)对其结构和Fe物种状态进行表征。结果表明, Fe的引入未破坏SBA-15的典型介孔结构, Fe-SBA-15的比表面积、平均孔径和孔容分别达到716 m²/g、6.3 nm和1.12 cm³/g; 约250 nm处的特征吸收带支持Fe以高分散骨架型物种存在。以250 mg/L苯酚为模型污染物, 考察不同氧化体系的矿化性能。在60 min内, Fe-SBA-15/O₃和Fe-SBA-15/H₂O₂体系的TOC去除率分别仅约10%和16%, H₂O₂/O₃体系约为35%; 当Fe-SBA-15与H₂O₂/O₃耦合后, TOC去除率提高至约60%, 为无催化剂H₂O₂/O₃体系的约1.7倍。结果表明, Fe-SBA-15对单一O₃或H₂O₂的促进作用有限, 但能够显著强化H₂O₂/O₃耦合氧化过程。该增强效应可能与骨架Fe位点促进H₂O₂/O₃界面反应以及提高活性氧物种利用效率有关。本研究为介孔Fe基材料强化peroxone过程处理高有机负荷废水提供了实验依据。

关键词

Fe-SBA-15, H₂O₂/O₃, 催化氧化, 苯酚, 矿化

Enhanced Mineralization of High-Concentration Phenol by an Fe-SBA-15-Assisted H₂O₂/O₃ Oxidation Process

Yangqun Zhou*, Xuemeng Di, Yong Wang, Qiankun Jiang

School of Chemistry and Materials Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang Anhui

Received: September 12, 2026; accepted: October 5, 2026; published: October 10, 2026

*通讯作者。

文章引用: 周杨群, 狄学梦, 王勇, 姜乾坤. Fe-SBA-15 强化 H₂O₂/O₃ 耦合氧化高浓度苯酚的矿化性能研究[J]. 水污染及处理, 2026, 14(4): 209-217. DOI: 10.12677/wpt.2026.144022

Abstract

Fe-SBA-15 mesoporous material was synthesized by a hydrothermal co-condensation route and characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), N₂ adsorption-desorption, and UV-vis diffuse reflectance spectroscopy (UV-vis DRS). The incorporation of Fe preserved the mesoporous structure of SBA-15, while the Fe-SBA-15 sample exhibited a specific surface area of 716 m²/g, an average pore size of 6.3 nm, and a pore volume of 1.12 cm³/g. A characteristic absorption band around 250 nm supported the presence of highly dispersed framework-like Fe species. Using phenol (250 mg/L) as a model pollutant, the mineralization performances of different oxidation systems were compared. After 60 min, TOC removal was only approximately 10% for Fe-SBA-15/O₃ and 16% for Fe-SBA-15/H₂O₂, whereas the conventional H₂O₂/O₃ process achieved approximately 35%. In contrast, the coupled Fe-SBA-15/H₂O₂/O₃ system increased TOC removal to approximately 60%, corresponding to about 1.7 times that of H₂O₂/O₃ without the catalyst. These results indicate that Fe-SBA-15 shows limited promotion toward either O₃ or H₂O₂ alone but markedly enhances the coupled H₂O₂/O₃ oxidation process. The enhanced performance may be associated with the ability of framework Fe sites to facilitate interfacial H₂O₂/O₃ reactions and improve the utilization efficiency of reactive oxygen species. This work provides a simple strategy for strengthening peroxone treatment under high organic loading.

Keywords

Fe-SBA-15, H₂O₂/O₃, Catalytic Oxidation, Phenol, Mineralization

Copyright © 2026 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

臭氧具有较高的氧化还原电位, 已被广泛用于难降解有机污染物的深度处理。然而, 单独臭氧氧化通常存在选择性强、臭氧利用率有限以及有机物“降解快而矿化慢”等问题。非均相催化臭氧通过在固体表面促进臭氧分解并生成更具反应活性的氧化物种, 被认为是提高臭氧矿化效率的重要途径[1]-[3]。

SBA-15 是一类具有二维六方有序介孔结构的硅基材料, 具有较高比表面积、均一孔径以及较好的水热稳定性[4]-[6]。由于纯 SBA-15 缺乏有效的氧化还原活性位点, 研究者常通过同晶取代或后负载等方式引入 Fe、Mn、Co 等金属物种。其中, Fe 进入硅氧骨架后可形成高分散的 Fe-O-Si 结构, 在保持介孔结构的同时提高 Fe 物种稳定性并降低金属浸出[7] [8]。Fe-SBA-15 等 Fe 基介孔材料已被用于催化臭氧处理多种难降解有机物[3]。

另一方面, H₂O₂/O₃ (peroxone)体系能够通过 H₂O₂/HO₂⁻与 O₃ 之间的链式反应加速 O₃ 分解并形成羟基自由基等高活性氧化物种, 是典型的高级氧化过程[9]-[13]。Fe-SBA-15 及相关 Fe/介孔硅材料也被用于 H₂O₂ 驱动的非均相氧化或 Fenton-like 反应[3] [14]。相比单独使用 O₃ 或 H₂O₂, 利用稳定骨架 Fe 位点进一步强化 H₂O₂/O₃ 耦合反应, 有望兼顾介孔材料的稳定性与 peroxone 过程的高矿化能力, 但相关性能关系仍需要通过严格的对照体系加以分析。

基于此, 本文采用水热法制备 Fe-SBA-15 介孔材料, 系统比较 Fe-SBA-15/O₃、Fe-SBA-15/H₂O₂、H₂O₂/O₃ 以及 Fe-SBA-15/H₂O₂/O₃ 体系对高浓度苯酚的矿化效果。研究重点不在于提出未经验证的自由基

机理,而在于明确 Fe-SBA-15 在不同氧化剂组合中的“氧化剂依赖型”催化行为,并讨论其对 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 耦合过程的强化作用。

2. 实验部分

2.1. 试剂与材料

四乙氧基硅烷(TEOS, 阿拉丁, 纯度 $\geq 99.0\%$)作为硅源, Pluronic P123(麦克林, 平均分子量 ~ 5800.0)作为模板剂, 九水合硝酸铁($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 阿拉丁, 纯度 $\geq 99.0\%$)作为铁源, 盐酸(国药, 分析纯, 质量分数 36.0%~38.0%)用于调节合成体系酸度。商业二氧化硅(SiO_2 , 麦克林, 纯度 $\geq 99.9\%$)作为对照样品, 氟化铵(NH_4F , 国药, 纯度 $\geq 96.0\%$)作为结构导向剂, 苯酚(国药, 纯度 $\geq 99.0\%$)作为模型污染物, 过氧化氢(国药, 分析纯, 30.0%水溶液)作为辅助氧化剂, 高纯氧用于制备臭氧。除特别说明外, 所用试剂均为分析纯, 实验用水为去离子水。

2.2. SBA-15 和 Fe-SBA-15 的制备

SBA-15 合成: 首先, 将 9.37 g TEOS 溶于 30.0 mL 去离子水中, 预水解 30.0 min, 记为溶液 A。同时, 将 4.00 g Pluronic P123 溶于 70.0 mL 2.00 M 盐酸溶液中, 持续搅拌至 P123 完全溶解, 记为溶液 B。随后, 在 400 r/min 磁力搅拌下, 将溶液 A 逐滴加入溶液 B 中, 混合均匀后于 40.0℃ 下静置 24.0 h。将所得前驱体溶液转移至 250 mL 水热反应釜中, 于 100℃ 晶化 72.0 h。待反应釜自然冷却至室温后, 将产物抽滤分离, 并用去离子水反复洗涤, 随后于 60.0℃ 下真空干燥 15.0 h。最后, 将干燥后的样品置于马弗炉中, 以 2.0℃/min 的升温速率升至 550℃, 焙烧 10.0 h 以去除模板剂, 即得 SBA-15 白色粉末。

Fe-SBA-15 合成: 首先, 将 1.82 g $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、9.37 g TEOS 与 10.0 mL 去离子水混合, 预水解 30.0 min, 记为溶液 A。同时, 将 4.00 g Pluronic P123 和 0.05 g NH_4F 溶于 90.0 mL 去离子水中, 持续搅拌至 P123 完全溶解, 然后用 2.00 M 盐酸溶液调节体系 pH 至 1.5, 记为溶液 B。随后, 在 400 r/min 磁力搅拌下, 将溶液 A 逐滴加入溶液 B 中, 混合均匀后于 40.0℃ 下静置 24.0 h。将所得前驱体溶液转移至 250 mL 水热反应釜中, 于 100℃ 下晶化 72.0 h。待反应釜自然冷却至室温后, 将产物抽滤分离, 并用去离子水反复洗涤, 随后于 60.0℃ 下干燥 15.0 h。最后, 将干燥后的样品置于马弗炉中, 以 2.0℃/min 的升温速率升至 500℃, 焙烧 10.0 h 以去除模板剂, 即得 Fe-SBA-15 粉末。

2.3. 材料表征

采用小角/广角 X 射线衍射(XRD)分析材料的介孔有序性及无机相结构, 测试在 Rigaku Smartlab SE 型衍射仪上进行, 以 $\text{Cu K}\alpha$ 射线($\lambda = 0.1542 \text{ nm}$)为辐射源, 工作电压和电流分别为 40 kV 和 10 mA。样品的微观形貌通过 Sigma 500 型扫描电子显微镜(SEM, 德国)进行观察。 N_2 吸附-脱附等温线在 Autosorb-iQ 型物理吸附仪(美国)上于 77 K 下测定, 依据吸附分支数据采用 BET 法计算比表面积, BJH 法计算孔径分布及孔容。Fe 物种的配位环境和分散状态由紫外-可见漫反射光谱(UV-Vis DRS)表征, 光谱数据由配备 60 mm 积分球附件的 Lambda 750S 型紫外/可见/近红外分光光度计(PerkinElmer, 美国)采集。

2.4. 氧化实验

臭氧氧化实验在实验室小试反应装置中进行。以高纯氧为气源, 经臭氧发生器产生 O_3 , 并通过曝气头连续通入反应器。反应温度为 25℃, 苯酚初始浓度为 250 mg/L, 反应液体积为 112 mL, 气相 O_3 浓度为 50 ppm, 气体流速为 18 mL/min, Fe-SBA-15 投加量为 0.28 g。反应过程中按设定时间取样, 测定苯酚和总有机碳(TOC)变化。为比较不同氧化体系的矿化能力, 设置 Fe-SBA-15/ O_3 、Fe-SBA-15/ H_2O_2 、 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 和 Fe-SBA-15/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 等对照组。 H_2O_2 在反应开始前加入反应液, 随后通入臭氧启动反应。

2.5. 分析方法

反应液的总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)含量采用 TOC-L CPHCN200 型总有机碳分析仪(Shimadzu, 日本)进行测定, 样品经适当稀释并过滤后进样, 每个样品平行测定三次取平均值。

3. 结果与讨论

3.1. Fe-SBA-15 的结构与形貌特征

如图 1(a)所示, 相较于商业 SiO_2 材料, SBA-15 和 Fe-SBA-15 在小角区域均表现出典型介孔材料衍射峰, 说明 Fe 引入后 SBA-15 的有序介孔骨架仍得到保留。与 SBA-15 相比, Fe-SBA-15 主衍射峰向低角度发生一定移动, 表明晶胞参数和孔道尺度发生变化。结合 Fe 原子半径大于 Si 原子以及共缩合体系的结构变化, 该现象可作为 Fe 进入硅氧骨架环境的一个佐证, 但仅凭 XRD 不能单独证明 Fe 的具体配位状态。广角 XRD 未观察到明显的晶态铁氧化物特征峰(图 1(b)), 说明样品中不存在大量可检测的 Fe_2O_3 晶粒, Fe 物种更可能处于高度分散状态。N₂ 吸附-脱附结果进一步表明, 各样品保持典型介孔材料的吸附行为(图 1(c))。Fe-SBA-15 的比表面积由 SBA-15 的 598 m²/g 提高至 716 m²/g, 平均孔径由 5.2 nm 增至 6.3 nm, 孔容由 0.77 cm³/g 增至 1.12 cm³/g。上述变化说明 Fe 引入并未造成明显孔道堵塞, 反而伴随介孔结构参数的调整, 各样品孔结构参数汇总如表 1 所示。

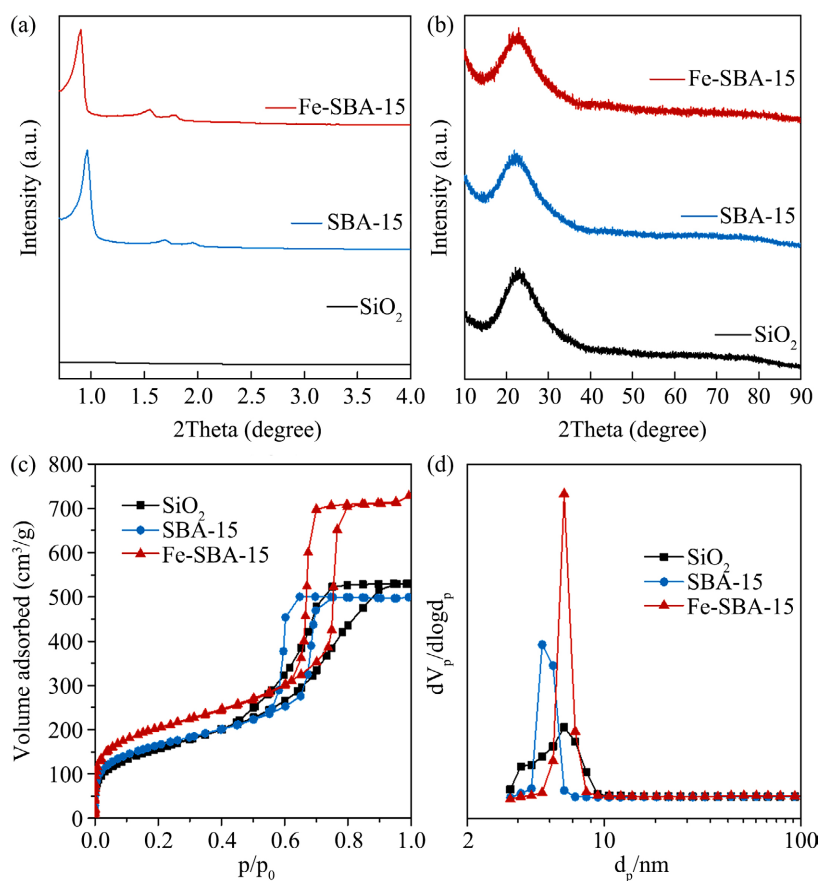


Figure 1. Low- (a) and wide-angle (b) XRD patterns, N₂ adsorption-desorption isotherms (c) and pore-size distributions (d) of SiO₂, SBA-15 and Fe-SBA-15

图 1. SiO₂、SBA-15 和 Fe-SBA-15 的小角(a)及广角(b) XRD 图谱, N₂ 吸附-脱附(c)及孔径分布(d)

Table 1. Textural properties of SiO₂, SBA-15 and Fe-SBA-15
表 1. SiO₂、SBA-15 和 Fe-SBA-15 的孔结构参数

Sample	S (m ² /g)	Pore size (nm)	Pore volume (cm ³ /g)
SiO ₂	562	5.8	0.82
SBA-15	598	5.2	0.77
Fe-SBA-15	716	6.3	1.12

SEM 结果(图 2)显示, 商业 SiO₂ 主要是块状的颗粒形貌, 而 SBA-15 则显示二维六方结构。此外, Fe 的引入改变了 SBA-15 原有形貌, 呈现典型的麦穗状。

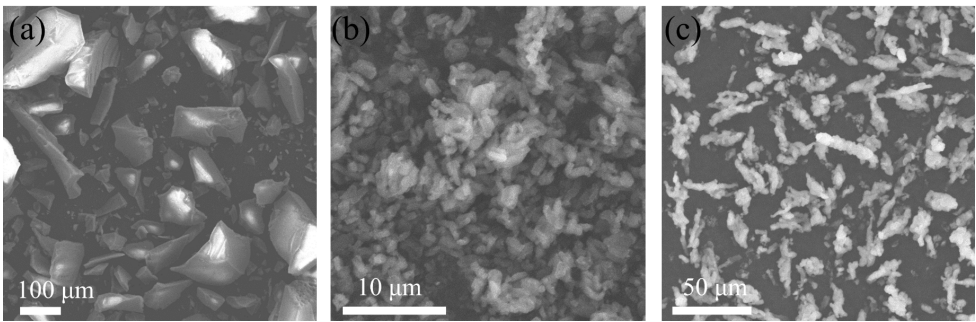


Figure 2. SEM images of SiO₂ (a), SBA-15 (b) and Fe-SBA-15 (c)
图 2. SiO₂ (a)、SBA-15 (b)和 Fe-SBA-15 (c)的 SEM 图

3.2. Fe 物种的骨架化与高分散特征

Fe-SBA-15 在约 250 nm 处出现明显紫外吸收带(图 3)。对于 Fe 掺杂硅材料, 该波段通常与骨架氧向高分散 Fe 中心的电荷迁移有关, 可用于表征孤立或低聚 Fe³⁺物种[7]。结合小角 XRD 峰位变化、广角 XRD 未见明显晶态铁氧化物以及介孔结构参数变化, 可认为本研究样品中的 Fe 主要以高分散的骨架型或近骨架型物种存在。需要指出的是, 现有表征不足以进一步区分不同 Fe 配位结构或反应过程中的价态变化, 因此本文仅将其作为结构 - 性能关系的支持证据, 而不作过度机理归属。

3.3. 不同氧化体系中 Fe-SBA-15 对苯酚矿化性能的影响

如图 4 所示, 在 250 mg/L 苯酚条件下, 单独 O₃ 在 60 min 内降解苯酚的 TOC 去除率仅约 10%。而 SiO₂/O₃、SBA-15/O₃ 以及 Fe-SBA-15/O₃ 的 TOC 去除同样处于较低水平, Fe-SBA-15/O₃ 并未显示出显著高于单独 O₃ 的矿化优势。这一结果也说明, 仅依靠稳定的骨架 Fe 位点促进 O₃ 分解并不足以在本实验条件下实现高效矿化。骨架 Fe 的高稳定性有助于抑制 Fe 浸出, 但其可接近性、表面羟基环境以及与 O₃ 的界面反应能力可能限制了单独催化臭氧过程。Fe-SBA-15/H₂O₂ 体系 TOC 去除率约为 16%, 说明 Fe-SBA-15 对单一 O₃ 或 H₂O₂ 的促进作用均较弱。H₂O₂/O₃ 体系的 TOC 去除率提高至约 35%, 反映出经典 peroxone 过程相较单独氧化剂具有一定矿化优势。

当 Fe-SBA-15 加入 H₂O₂/O₃ 体系后, 60 min TOC 去除率进一步提高至约 60%。相较无催化剂 H₂O₂/O₃ 体系, 最终 TOC 去除水平约为其 1.7 倍。由于 Fe-SBA-15/O₃ 和 Fe-SBA-15/H₂O₂ 均未表现出类似水平的矿化效果, 这一结果表明 Fe-SBA-15 的催化作用具有明显的氧化剂组合依赖性, 其活性在 H₂O₂ 与 O₃ 共存时得到显著放大。

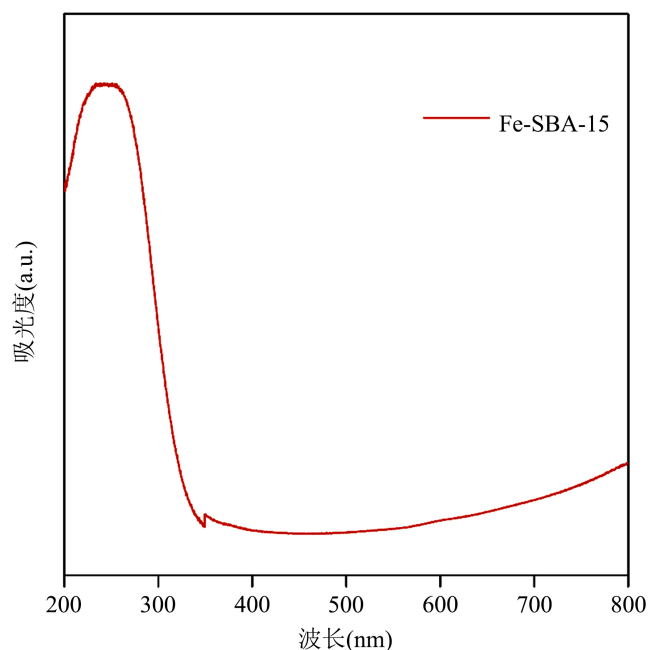


Figure 3. UV-vis DRS characterization of Fe-SBA-15

图 3. Fe-SBA-15 的 UV-vis 漫反射光谱图

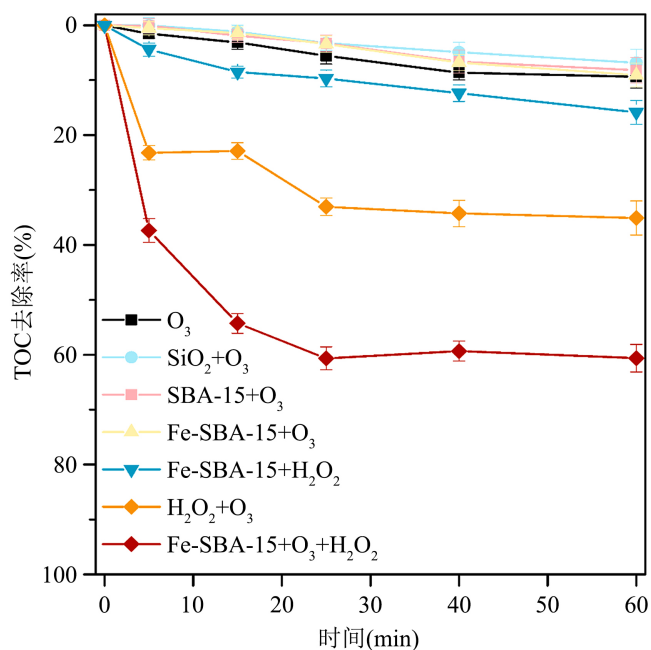


Figure 4. TOC removal of different oxidation systems after 60 min

图 4. 不同氧化体系 60 min 的 TOC 去除率比较

3.4. Fe-SBA-15 强化 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 耦合氧化的作用机制分析

$\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 体系的核心特征是 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HO}_2^-$ 能够促进 O_3 分解并进入自由基链式反应, 从而提高 $\cdot\text{OH}$ 等活性物种的生成效率[15] [16]。在本体系中, Fe-SBA-15 的加入使 TOC 去除由约 35%提高至约 60%, 说明高分散 Fe 位点可能进一步促进 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 在固-液界面的转化过程。可能的作用包括: Fe 位点与 H_2O_2

形成表面过氧中间体、促进 H₂O₂ 分解；Fe 位点改变界面 O₃ 吸附与分解路径；以及介孔结构提高 O₃、H₂O₂ 与污染物在活性位点附近的局部接触概率。值得注意的是，Fe-SBA-15/H₂O₂ 单独体系仅表现出约 16% 的 TOC 去除，说明本材料并不是简单依赖传统 Fenton-like 途径获得高矿化；同样，Fe-SBA-15/O₃ 体系也只有约 10% 的 TOC 去除。因此，更合理的解释是 Fe-SBA-15 对 H₂O₂/O₃ 耦合反应网络具有促进作用，而非单独高效活化某一种氧化剂。

3.5. 基于催化剂质量归一化的 TOC 矿化速率比较

为了进一步评价 Fe-SBA-15/H₂O₂/O₃ 体系在高负荷有机污染物矿化过程中的性能，并与已有催化氧化体系进行比较，采用单位质量催化剂归一化的 TOC 矿化速率(MR)作为评价指标：

$$MR = \frac{TOC_0 \times \eta}{C_{cat} \times t}$$

其中，TOC₀ 为总有机碳初始浓度(mg/L)，η 为 TOC 去除率(%)，C_{cat} 为催化剂浓度(g/L)，t 为反应时间(h)。

表 2 总结了不同催化氧化体系的 MR 值。需要指出的是，由于不同研究采用的污染物种类、初始浓度、氧化剂体系以及反应条件存在差异，该参数主要用于提供不同催化体系矿化能力的半定量比较，而非严格评价催化剂本征活性。本研究 Fe-SBA-15/H₂O₂/O₃ 体系的 MR 值达到 45.90 mg·TOC·gcat⁻¹·h⁻¹，在所列 Fe 基和氧化物催化体系中表现出较高的单位催化剂矿化能力。值得注意的是，本研究采用的苯酚初始 TOC 浓度(191.25 mg/L)明显高于多数文献体系，表明 Fe-SBA-15 在高有机负荷条件下仍能够有效促进 H₂O₂/O₃ 过程中的有机碳去除。然而，由于不同污染物结构和氧化难度存在差异，MR 值不能完全代表催化剂本征活性。因此，该结果主要用于说明 Fe-SBA-15 对 H₂O₂/O₃ 耦合氧化过程具有明显促进作用，而非证明其性能优于所有已报道催化体系。

Table 2. Comparison of catalyst-normalized TOC mineralization performance of reported catalytic oxidation systems
表 2. 不同催化氧化体系中单位催化剂质量归一化 TOC 矿化性能比较

Catalyst	Pollutant	Initial TOC (mg/L)	TOC removal (%)	Catalyst dosage (g/L)	Time (h)	MR	Ref.
Co10Ce10@MCM-48	Sulfamethazine	5.2	64.1	0.20	2.0	8.29	[10]
CeO _x @SiO ₂	Nitrobenzene	11.7	92.5	0.20	1.5	36.08	[17]
Commercial ZnO	Atrazine	2.2	73.2	0.06	2.0	13.44	[18]
Fe-SBA-15 (Si/Fe = 20)	Oxalic acid	5.3	86.6	0.20	1.0	23.08	[19]
CeO _x (111)	Oxalic acid	86.0	86.0	1.00	1.0	22.92	[20]
Fe-SBA-15	Phenol	191.3	60	2.50	1.0	45.90	This work

4. 结论

本文采用水热法制备 Fe-SBA-15 介孔材料，并研究其在 H₂O₂/O₃ 耦合氧化高浓度苯酚过程中的作用。主要结论如下：

- (1) Fe 引入后 SBA-15 的有序介孔结构得到保留。Fe-SBA-15 的比表面积为 716 m²/g、平均孔径约 6.3 nm、孔容为 1.12 cm³/g；XRD 与 UV-vis DRS 共同支持 Fe 以高分散骨架型物种存在。
- (2) 在 250 mg/L 苯酚条件下，Fe-SBA-15/O₃ 和 Fe-SBA-15/H₂O₂ 的 60 min TOC 去除率分别仅约 10%

和 16%，表明材料对单一氧化剂的矿化促进作用有限。

(3) $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 体系的 TOC 去除率约为 35%，而 Fe-SBA-15/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 体系提高至约 60%，约为无催化剂 peroxone 体系的 1.7 倍，表明 Fe-SBA-15 能够有效促进 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 耦合氧化过程，提高高浓度苯酚体系的矿化程度。该体系为介孔 Fe 基材料强化 peroxone 过程处理高有机负荷废水提供实验参考。

基金项目

2025 年度阜阳师范大学国家级大学生创新创业训练计划项目(202510371014)。

参考文献

- [1] Mahmood, Z., Yuan, Y., Garg, S. and Waite, T.D. (2026) Catalytic versus Pure Ozonation: Insights from Real Wastewater Treatment Performance. *Environmental Science & Technology*, **60**, 4440-4448. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c15666>
- [2] Guo, Y., Zhao, E.Z., Wang, J., Zhang, X.Y., Huang, H.O., Yu, G., *et al.* (2020) Comparison of Emerging Contaminant Abatement by Conventional Ozonation, Catalytic Ozonation, $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ and Electro-Peroxone Processes. *Journal of Hazardous Materials*, **389**, Article ID: 121829. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121829>
- [3] Wang, J. and Bai, Z. (2017) Fe-Based Catalysts for Heterogeneous Catalytic Ozonation of Emerging Contaminants in Water and Wastewater. *Chemical Engineering Journal*, **312**, 79-98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.118>
- [4] Zhao, D.Y., Feng, J.L., Huo, Q.S., Melosh, N., Fredrickson, G.H., Chmelka, B.F., *et al.* (1998) Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores. *Science*, **279**, 548-552. <https://doi.org/10.1126/science.279.5350.548>
- [5] Verma, P., Kuwahara, Y., Mori, K., Raja, R. and Yamashita, H. (2020) Functionalized Mesoporous SBA-15 Silica: Recent Trends and Catalytic Applications. *Nanoscale*, **12**, 11333-11363. <https://doi.org/10.1039/d0nr00732c>
- [6] Taguchi, A. and Schüth, F. (2005) Ordered Mesoporous Materials in Catalysis. *Microporous and Mesoporous Materials*, **77**, 1-45. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.06.030>
- [7] Cornu, C., Bonardet, J.L., Casale, S., Davidson, A., Abramson, S., André, G., *et al.* (2012) Identification and Location of Iron Species in Fe/SBA-15 Catalysts: Interest for Catalytic Fenton Reactions. *The Journal of Physical Chemistry C*, **116**, 3437-3448. <https://doi.org/10.1021/jp2038625>
- [8] Li, Y., Feng, Z.C., Lian, Y.X., Sun, K.Q., Zhang, L., Jia, G.Q., *et al.* (2005) Direct Synthesis of Highly Ordered Fe-SBA-15 Mesoporous Materials under Weak Acidic Conditions. *Microporous and Mesoporous Materials*, **84**, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.05.021>
- [9] Xu, Z.H., Yin, K.X., Zhang, L., Tian, Q.B., Wang, J., Wang, Y.F., *et al.* (2026) Interfacial Electron Modulation and Molecular Passivation: Suppression Mechanisms of Microplastics on Dual Oxidation Pathways in Peroxone Reaction. *Water Research*, **301**, Article ID: 126022. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.126022>
- [10] Li, S.Y., Huang, J., Ye, Z.X., Wang, Y.Z., Li, X.K., Wang, J., *et al.* (2021) The Mechanism of Metal- H_2O_2 Complex Immobilized on MCM-48 and Enhanced Electron Transfer for Effective Peroxone Ozonation of Sulfamethazine. *Applied Catalysis B: Environmental*, **280**, Article ID: 119453. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119453>
- [11] Staehelin, J. and Hoigne, J. (1982) Decomposition of Ozone in Water: Rate of Initiation by Hydroxide Ions and Hydrogen Peroxide. *Environmental Science & Technology*, **16**, 676-681. <https://doi.org/10.1021/es00104a009>
- [12] Chen, F., Zhang, Y.S., Bai, C.W., Huang, X.T., Sun, Y.J. and Chen, X.J. (2024) Ozone Meets Peroxides: A Symphony of Hybrid Techniques in Wastewater Treatment. *Chemical Engineering Journal*, **483**, Article ID: 149129. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149129>
- [13] Merényi, G., Lind, J., Naumov, S. and Sonntag, C.V. (2010) Reaction of Ozone with Hydrogen Peroxide (Peroxone Process): A Revision of Current Mechanistic Concepts Based on Thermokinetic and Quantum-Chemical Considerations. *Environmental Science & Technology*, **44**, 3505-3507. <https://doi.org/10.1021/es100277d>
- [14] Shukla, P., Wang, S., Sun, H., Ang, H. and Tadé, M. (2010) Adsorption and Heterogeneous Advanced Oxidation of Phenolic Contaminants Using Fe Loaded Mesoporous SBA-15 and H_2O_2 . *Chemical Engineering Journal*, **164**, 255-260. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.061>
- [15] Singh, A. and Majumder, S.K. (2026) Integrated Peroxone Advanced Oxidation for Efficient Treatment of Refractory Organic Pollutants in Petroleum Refinery Wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **14**, Article ID: 123907. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.123907>
- [16] Wang, Y.S., Qiu, W., Yu, Y.B. and Ma, J. (2026) Electron Transfer Drives Hydroxyl Radical Formation in Peroxone

-
- Reactions. *Environmental Science and Ecotechnology*, **31**, Article ID: 100704. <https://doi.org/10.1016/j.esse.2026.100704>
- [17] Chen, W.R., Xie, J.X., Li, X.K. and Li, L.S. (2021) Oxygen Vacancies and Lewis Sites Activating O_3/H_2O_2 at Wide Ph Range via Surface Electron Transfer over $CeO_x@SiO_2$ for Nitrobenzene Mineralization. *Journal of Hazardous Materials*, **406**, Article ID: 124766. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124766>
- [18] Zhang, Y.S., Chen, X.J., Huang, X.T., Bai, C.W., Duan, P.J., Zhang, Z.Q., *et al.* (2025) Enhanced Peroxone Reaction with Amphoteric Oxide Modulation for Efficient Decontamination of Challenging Wastewaters: Comparative Performance, Economic Evaluation, and Pilot-Scale Implementation. *Water Research*, **274**, Article ID: 123058. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.123058>
- [19] Yan, H.H., Chen, W.R., Liao, G.Z., Li, X.K., Ma, S.S. and Li, L.S. (2016) Activity Assessment of Direct Synthesized Fe-SBA-15 for Catalytic Ozonation of Oxalic Acid. *Separation and Purification Technology*, **159**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.12.055>
- [20] Chen, W.R., He, H.X., Zou, R.N., Chen, Y.D., Li, X.K., Wang, J., *et al.* (2021) Unravelling the Facets-Dependent Behavior among H_2O_2 , O_3 and Oxygen Vacancies on CeO_x and the Promotion of Peroxone Reaction at under Acidic Conditions. *Environmental Science: Nano*, **8**, 3138-3152. <https://doi.org/10.1039/d1en00716e>