

改性纳米零价铁金属活化过硫酸盐降解水中 抗生素

苏雅妮*, 谢雨谍, 潘妍冰, 罗 俊

重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年7月1日; 录用日期: 2025年8月4日; 发布日期: 2025年8月15日

摘 要

抗生素污染因其环境持久性和生态风险已成为水环境治理的重要挑战。传统水处理方法存在效率低、成本高或操作复杂等局限性。为此, 基于改性纳米零价铁(nZVI)活化过硫酸盐的高级氧化技术(AOPs)因其高效降解能力和环境友好特性受到广泛关注。本综述系统总结了硫化改性纳米零价铁(S-nZVI)、生物炭负载纳米零价铁(BC-nZVI)及其复合体系(S-nZVI/BC)在抗生素降解中的性能与机制。研究表明, S-nZVI通过表面FeS层增强电子传递效率并抑制钝化, 而BC-nZVI利用生物炭的多孔结构和官能团分散nZVI颗粒并促进Fe³⁺/Fe²⁺循环。其中, S-nZVI/BC展现出最优异的协同效应, 其对环丙沙星(CIP)的降解率可达97.45%, 归因于生物炭的吸附作用与硫化层的催化活性共同优化了自由基的生成与利用。此外, 反应条件也显著影响降解效率, 而共存阴离子和腐殖酸可能通过淬灭自由基或竞争吸附抑制反应。未来研究需聚焦材料合成优化、复杂水质适应性及工程化应用, 以推动该技术在处理实际废水中的规模化应用。这些发现为开发高效、低耗的抗生素污染控制技术提供了重要理论依据。

关键词

水污染, 过硫酸盐活化, 改性纳米零价铁, 抗生素

Modified Nanoscale Zero-Valent Iron Metal Activates Persulfate for Antibiotic Degradation in Water

Yani Su*, Yudie Xie, Yanbing Pan, Jun Luo

College of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jul. 1st, 2025; accepted: Aug. 4th, 2025; published: Aug. 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 苏雅妮, 谢雨谍, 潘妍冰, 罗俊. 改性纳米零价铁金属活化过硫酸盐降解水中抗生素[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(8): 1128-1135. DOI: 10.12677/aep.2025.158125

Abstract

Antibiotic pollution has become a major challenge in water environment management due to its environmental persistence and ecological risks. Conventional water treatment methods suffer from limitations such as low efficiency, high costs, or operational complexity. To address this, advanced oxidation processes (AOPs) based on modified nanoscale zero-valent iron (nZVI)-activated persulfate have garnered significant attention for their high degradation efficiency and environmentally friendly characteristics. This review systematically summarizes the performance and mechanisms of sulfidized nZVI (S-nZVI), biochar-supported nZVI (BC-nZVI), and their composite system (S-nZVI/BC) in antibiotic degradation. Research indicates that S-nZVI enhances electron transfer efficiency and suppresses passivation through its surface FeS layer, while BC-nZVI utilizes the porous structure and functional groups of biochar to disperse nZVI particles and promote $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ cycling. Notably, the S-nZVI/BC system demonstrates the most outstanding synergistic effect, achieving a degradation rate of 97.45% for ciprofloxacin (CIP), attributed to the combined optimization of radical generation and utilization through biochar adsorption and the catalytic activity of the sulfidized layer. Additionally, reaction conditions significantly influence degradation efficiency, whereas coexisting anions and humic acid may inhibit the process by quenching radicals or competing for adsorption. Future research should focus on material synthesis optimization, adaptability to complex water matrices, and engineering applications to facilitate the large-scale implementation of this technology in practical wastewater treatment. These findings provide a crucial theoretical foundation for developing efficient and low-cost antibiotic pollution control technologies.

Keywords

Water Pollution, Persulfate Activation, Modified Nanoscale Zero-Valent Iron, Antibiotics

Copyright © 2025 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

工业化进程的快速推进在促进经济发展的同时，也带来了严峻的环境问题，尤其是水污染问题日益突出[1]。其中抗生素污染因其持久性和潜在的生态风险备受关。抗生素是当前治疗人类和牲畜感染性疾病的最有效药物之一，其广泛使用导致其大量进入水环境，不仅对水生生物产生直接毒性，还可能通过食物链的传播威胁生态系统和人类健康[2]。并且因我国人口众多、农业和畜牧业发达，抗生素污染问题日益严重，仅地表水中就有 61 种抗生素被检出，最高检出浓度可达 $24809 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ，因此解决水中抗生素问题已刻不容缓。然而传统水处理方法如吸附法[3]、膜处理法[4]以及微生物法[5]等对抗生素的去除效率有限，但均具有一定局限性：吸附法虽操作简便，但吸附剂易饱和且再生成本高；膜处理法虽能高效截留污染物，但面临膜污染、通量下降及高能耗问题，且对溶解性小分子有机物去除效果有限以及微生物法虽环境友好，但处理周期长、对难降解有机物效率低，且易受水质波动影响导致微生物失活。在这种情况下，亟需寻找更为合适并且对环境几乎不产生危害的新型水处理方法。

为此，高级氧化技术(AOPs)可以通过热、紫外光、过渡金属或其他催化剂活化过硫酸盐(PDS)或过氧单硫酸盐(PMS)，产生高反应活性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)以及过硫酸根自由基($\text{SO}_4^{\cdot-}$)等强氧化剂，可降解绝大多数有机物(包括难降解污染物)，反应速度快，并且矿化效率高，产生对生态环境不具有危害的产物[6]

成为研究热点。其中过硫酸盐氧化技术凭借其高氧化电位和较长的半衰期以及能高效降解难降解有机物,且 pH 适用范围更广展现出显著优势[7]。在过硫酸盐活化技术中,过渡金属活化因其常温高效活化特性而广泛应用[8],但存在金属溶出、催化剂失活及二次污染等问题。为突破这些限制,纳米零价铁(nZVI)因其高还原性和丰富活性位点成为理想替代,其 Fe^0 可同时活化过硫酸盐并促进 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 循环[9],然而 nZVI 具有易团聚、表面钝化且反应 pH 范围窄的问题。为此,研究者通过硫化 nZVI 或负载生物炭的方式来对其进行优化,通过二者的协同作用,不仅可以通过电子传递效率提升从而增加其反应速率,还可以使得 nZVI 团聚问题得到改善。这些策略不仅解决了传统过渡金属活化的环境风险问题,还通过协同效应实现了高效、低耗的复杂废水处理,为工业化应用提供了技术支撑。

2. 改性 nZVI 活化过硫酸盐去除抗生素

2.1. S-nZVI 活化过硫酸盐去除抗生素

硫化改性纳米零价铁(S-nZVI)作为一种高效的过硫酸盐活化剂,近年来在去除水中有机污染物方面受到广泛关注[10][11]。通过硫化改性,纳米零价铁表面形成的硫化铁层不仅可以提高材料的电子传导能力,还能有效防止铁颗粒的钝化,从而显著增强对过硫酸盐的活化效率。Li 等[12]根据其表征发现,其降解率的高效不仅是因为 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 的作用,也归因于 FeS 的形成,导致硫化改性微米级零价铁(S-m Fe^0)比未改性 m Fe^0 具有更强的电子传递能力以及 S-m Fe^0 的吸附作用和 PMS 水解组成,三者共同协作,使得 S-m Fe^0 活化过硫酸盐在 15 分钟内去除 89.8%的磺胺甲恶唑(SMX)。Yu 等[13]研究了硫化改性纳米零价铁(S-nZVI)活化过硫酸盐(PDS)降解 SMX 的转化机制,发现其在最佳反应条件下,SMX 的降解遵循伪一级动力学,速率常数 k_{obs} 为 0.1176 min^{-1} 。同时根据表征实验发现 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 共同参与 SMX 降解,并且还还原态硫物种可以促进 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的转化,从而提高了 SMX 的转化速率。此外,Wu 等[14]也研究了 S-nZVI/PDS 系统对氯霉素(CAP)的去除,发现其在最佳反应条件下根据 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的作用,可以在 30 分钟内使得 CAP 去除率达 98.8%。Zeng 等[15]使用 S-nZVI 活化 PDS 降解甲硝唑(MNZ),发现可在最佳反应条件下实现完全去除,此时 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 $^1\text{O}_2$ 四种活性物种共存,其中 $\cdot\text{OH}$ 起主要作用。

2.2. BC-nZVI 活化过硫酸盐去除抗生素

生物炭负载纳米零价铁(BC-nZVI)复合材料作为过硫酸盐的高效活化剂,通过协同吸附和催化作用可以显著提升有机污染物的降解效率[16]。这类材料不仅解决了纳米零价铁易团聚的问题,还可以通过生物炭的丰富孔隙结构和表面官能团提供了更多活性位点,同时铁物种的氧化还原循环($\text{Fe}^0 \rightarrow \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$)持续活化过硫酸盐,可以形成多种活性物种的氧化体系,在广谱 pH 范围内对各类有机污染物展现出优异的降解性能。Xue 等[17]开发了核桃壳生物炭负载纳米零价铁(WSBC-nZVI)系统对卡马西平(CBZ)的降解,可以达到 91%的降解率,其机理研究表明,WSBC-nZVI 通过 Fe^0 的腐蚀释放 Fe^{2+} 活化过硫酸盐,生成的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 进一步可与 H_2O 反应产生 $\cdot\text{OH}$,还发现了 $^1\text{O}_2$,其在 CBZ 降解中起到关键作用。此外发现,WSBC 载体不仅抑制了 nZVI 的氧化,其表面羧基和羰基还直接参与电子转移,促进 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的转化,维持催化循环。Yang 等[18]研究了热解温度对大豆秸秆生物炭负载 nZVI 表明, 1000°C 热解制备的 nZVI-BC 对土霉素(OTC)的降解率高达 98.34%,其优异性能源于高温下 Fe_2O_3 被生物炭完全还原为 Fe^0 和 Fe-C 合金,此时 Fe^0 含量达 62.98%。其通过 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 循环持续产生,同时 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 通过自结合形成 $^1\text{O}_2$ 。与常规 nZVI 制备不同,该研究采用直接热还原法,避免了化学还原剂的使用,且高温促使生物炭石墨化,提升了电子传导能力。相比之下,Shao 等[19]报道的 n Fe^0 /BC-PDS 系统对四环素(TC)的降解率为 97.68%,并发现在 pH = 5 时 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 起到主导作用。

2.3. S-nZVI/BC 活化过硫酸盐去除抗生素

生物炭负载硫化纳米零价铁(S-nZVI/BC)作为一种新型过硫酸盐活化剂,通过结合生物炭的高比表面积、丰富官能团与硫化纳米零价铁的高反应活性,可以实现对有机污染物的高效降解[20]-[22]。该材料不仅解决了传统纳米零价铁易氧化团聚的问题,还通过硫化处理增强了电子选择性,同时生物炭载体提供了稳定的分散环境和额外的催化位点,形成了吸附-催化协同作用机制。Xue 等[23]开发了 S-nZVI/BC 复合材料在反应条件下对环丙沙星(CIP)的降解率高达 97.45%。根据材料表征显示,硫化处理形成了 FeS/FeS₂ 保护层,可以显著抑制 nZVI 的氧化钝化,同时产生了 O₂⁻·、SO₄⁻·、·OH 以及 ¹O₂ 四种活性物种,以及高温热解(600℃)也可以使生物炭产生丰富的介孔结构和 C=O、-OH 等表面官能,从而为污染物吸附和催化反应提供了充足活性位点。特别值得注意的是,硫化处理不仅显著提升了 Fe²⁺的再生效率,还可以通过 FeS 层促进电子转移,从而解决了传统 nZVI/PS 系统中铁离子循环受阻的瓶颈问题。

2.4. 改性 nZVI 降解机理总结

根据上述的表达发现 S-nZVI、BC-nZVI 和 S-nZVI/BC 在污染物降解方面均表现出优异的催化性能,主要通过激活过硫酸盐产生 SO₄⁻·和·OH 等活性氧物种来实现高效降解(如表 1 所示)。三者的共同点在于均可以利用 Fe⁰的还原性和电子传递能力,通过 Fe³⁺/Fe²⁺循环激活氧化剂。然而,它们在结构和性能上存在显著差异: S-nZVI 通过表面硫化形成 FeS 层,提高了电子传递效率和抗钝化能力,但纳米颗粒仍易团聚; BC-nZVI 利用生物炭的多孔结构和表面官能团分散 nZVI,增强稳定性,但电子传递效率提升有限; S-nZVI/BC 则结合了硫化改性和生物炭负载的双重优势,既通过 FeS 层优化电子转移,又利用生物炭的高比表面积和丰富官能团提供更多活性位点,同时抑制颗粒团聚。综合比较而言, S-nZVI/BC 展现出更优异的性能,其通过协同效应实现性能优化,也将成为处理抗生素等难降解污染物更理想的选择。

Table 1. Degradation of antibiotics by persulfate activated with modified nanoscale zero-valent iron

表 1. 改性纳米零价铁活化过硫酸盐降解抗生素

催化剂	过硫酸盐	污染物	反应条件	降解率	活性物种	参考文献
S-mFe ⁰	PMS	SMX	S-mFe ⁰ = 0.15 g/L, PMS = 0.3 mM, SMX = 5 mg/L, pH = 3	89.8% (15 min)	SO ₄ ⁻ ·, ·OH	[12]
S-nZVI	PDS	SMX	S-nZVI = 2.5 mM, PDS = 0.5 mM, SMX = 10 mg/L, pH = 5	97.5% (15 min)	SO ₄ ⁻ ·, ·OH	[13]
S-nZVI	PDS	CAP	S-nZVI = 0.1 g/L, PDS = 3 mM, CAP = 20 mg/L pH = 6.86	98.8% (15 min)	SO ₄ ⁻ ·, ·OH	[14]
S-nZVI	PDS	MNZ	SnZVI = 1.5 g/L, PDS = 1.5 mM, MNZ = 20 mg/L	99.7% (30 min)	·OH, SO ₄ ⁻ ·, ¹ O ₂ , O ₂ ⁻ ·	[15]
WSBC-nZVI	PDS	CBZ	pH = 6.4, PDS = 1 mM, WSBC-nZVI = 0.5 g/L, CBZ = 10 mg/L	91% (30 min)	¹ O ₂ , ·OH, SO ₄ ⁻ ·, O ₂ ⁻ ·	[17]
nZVI-BC	PDS	OTC	PDS = 1 mM, nZVI-BC = 0.1 g/L, OTC = 600 mg/L	98.34% (5 h)	SO ₄ ⁻ ·, ·OH, ¹ O ₂	[18]
nFe ⁰ /BC	PDS	TC	pH = 5.0, PDS = 1 mM, nFe ⁰ /BC = 0.4 g/L, TC = 100 mg/L	97.68% (45 min)	SO ₄ ⁻ ·, ·OH	[19]
S-nZVI/BC	PDS	CIP	S-nZVI/BC = 0.6 g/L, PDS = 2 mM, CIP = 10 mg/L	97.45% (90 min)	O ₂ ⁻ ·, SO ₄ ⁻ ·, ·OH, ¹ O ₂	[23]

3. 影响因素

3.1. 反应条件

研究表明,催化剂投加量对污染物降解效率存在显著的非线性影响。Shao 等[19]发现当 nFe⁰/BC 从

0.05 g/L 增至 0.4 g/L 时, TC 降解效率提升 44.27%, 这得益于活性位点数量增加促进 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 生成; 但超过 0.5 g/L 后效率下降, 源于高浓度 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 发生自淬灭反应。类似现象在其他体系中也得到验证: Xue 等[17]发现 WSBC-nZVI 体系在 0.6 g/L 时达到最佳效果, 过量投加将会导致 Fe^{2+} 淬灭自由基; Yang 等[18]报道高温热解 nZVI-BC 也存在活性位点饱和效应。值得注意的是, Zeng 等[15]关于 S-nZVI 的研究呈现不同规律, 在 0.5~2.0 g/L 范围内降解率持续提升, 这归因于硫化层的独特电子传递机制可延缓自由基复合, 但超过 2.0 g/L 仍会因颗粒团聚导致效率下降。相比之下, Wu 等[14]发现 CAP 降解在 0.1 g/L S-nZVI 时即达峰值, 更高剂量(0.2 g/L)使反应速率常数降低 30%, 说明不同污染物分子结构对催化剂投加量的敏感性存在差异。

而过硫酸盐浓度对污染物降解效率的影响呈现典型的先升后降趋势, 其核心机制在于自由基生成与淬灭的动态平衡。Shao 等[19]在 nFe⁰/BC 活化 PDS 降解 TC 的研究中系统揭示了这一规律: 当 PDS/TC 摩尔比从 1:1 增至 5:1 时, $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 生成量增加使降解效率提升 16.96%, 但继续提高至 20:1 时, 过量 PDS 会通过链终止反应消耗活性自由基, 导致效率下降。类似地, Li 等[12]发现 PMS 浓度超过 1.0 mM 时, SMX 降解体系中 S^{2-} 的积累会使去除率降低, 这与 Wu 等[14]观察到的 CAP 降解在 10 mM PDS 时副反应加剧的现象一致。

污染物初始浓度对降解效率的影响呈现显著的负相关性, 其核心机制在于活性物种与污染物分子的比例失衡。Shao 等[19]在 nFe⁰/BC 活化 PDS 降解 TC 的研究中发现, 当 TC 浓度从 25 mg/L 增至 150 mg/L 时, 尽管 PDS 投加量固定为 1 mM, 但单位污染物分子可获得的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 数量减少, 导致去除效率从 95.52% 骤降至 70.59%, 这符合准一级动力学模型中底物浓度与反应速率的负相关关系。类似现象在其他体系中普遍存在, 如 Xue 等[17]发现 CBZ 浓度增加 10 倍时降解效率下降 76%。

初始 pH 值对污染物降解效率的影响呈现显著的 pH 窗口效应, 其核心机制在于 pH 对活性物种生成与稳定性的双重调控。Shao 等[19]在 nFe⁰/BC 活化 PDS 降解 TC 的研究中发现在 pH 值 = 5.0 时降解效率达到峰值 97.68%, 此时 Fe^{2+} 溶出速率与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 生成达到动态平衡; 当 pH 值降至 2.0 时, 过量 H^+ 直接淬灭 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 导致效率骤降 39.65%, 而碱性条件(pH 值 > 9)则因 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀使活性位点减少。类似现象在其他文献中也发现, 如 Yang 等[18]发现 nZVI-BC/PDS 系统在中性 pH 效果最佳, 而 Li 等[12]报道 S-mFe⁰/PMS 在 pH 值 = 3~10.5 保持较高活性, 但强碱(pH 值 = 10.5)仍使 SMX 去除率衰减 79.5%。

3.2. 外在因素

共存离子对降解效率的影响呈现显著的竞争 - 淬灭双重机制, 其中碳酸氢根离子(HCO_3^-)的抑制作用最为突出。Shao 等[19]在 nFe⁰/BC-PDS 体系中的研究发现, HCO_3^- 与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的反应速率常数高达 $1.6 \times 10^6 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$, 从而会优先消耗自由基生成低活性的 $\text{CO}_3^{\cdot-}$ 和 $\text{HCO}_3^{\cdot}$, 导致 TC 降解效率降低 37%, 这种抑制作用源于 $\text{CO}_3^{\cdot-}$ 的氧化电位显著低于 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 。此外, Yu 等[18]观察到 HPO_4^{2-} 通过类似机制抑制 SMX 降解, 但其影响弱于 HCO_3^- 。而 Li 等[12]则发现 SO_4^{2-} 通过与 Fe^{2+} 形成 FeSO_4^+ 络合物间接降低催化活性。值得注意的是, Wu 等[14]报道的 CO_3^{2-} 表现出独特行为, 当浓度达到 50 mM 时, 其 pH 缓冲作用使系统氧化还原电位降低 0.35 V, 这种通过改变反应环境而非直接淬灭自由基的抑制方式与其他阴离子形成鲜明对比。这些差异说明, 共存离子的影响程度不仅取决于其与自由基的反应活性, 还与离子特性(络合能力、pH 调节作用)及体系特征密切相关。

腐殖酸(HA)对污染物降解效率的影响呈现显著的浓度 - 功能双重效应, 其作用机制取决于 HA 的化学组分与环境条件的协同作用。Shao 等[19]在 nFe⁰/BC 活化 PDS 降解 TC 的研究中发现, 低浓度 HA (1~10 mg/L)会通过两种途径抑制降解: 一方面 HA 表面的羰基($\text{C}=\text{O}$)作为电子受体, 与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 发生淬灭反应; 另一方面 HA 分子会覆盖 nFe⁰ 颗粒表面 70% 以上的活性位点, 导致 TC 降解效率降低 40%。与之形成鲜明

对比的是, Xue 等[17]在 WSBC-nZVI 膜/PDS 体系中观察到高浓度 HA (50 mg/L)的促进作用, HA 分子中的醌基通过氧化还原循环持续活化 PDS, 使 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 产率提升 2.3 倍, CBZ 降解速率提高 57%。这些差异说明, HA 对降解效率的影响本质上是其官能团化学特性与环境基质相互作用的动态平衡结果。

4. 结论与展望

4.1. 结论

本综述系统探讨了 nZVI 活化过硫酸盐降解水中抗生素的性能与机制, 揭示了 S-nZVI、BC-nZVI 及其 S-nZVI/BC 在污染物降解中的协同作用规律。实验结果表明, 三种改性 nZVI 均能高效活化过硫酸盐产生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 等活性氧物种, 其中 S-nZVI/BC 展现出最优异的催化性能, 其对 CIP 的降解率可达 97.45%, 这归因于生物炭载体与硫化层的双重协同效应: 生物炭的多孔结构不仅有效抑制了 nZVI 颗粒的团聚, 并且生物炭对污染物具有较好的吸附效果, 有助于环境中抗生素的有效降解; 而硫化不仅可以提高材料的电子选择性和反应活性, 还可以显著减缓 nZVI 与水的反应, 延长其使用寿命。反应条件优化研究表明, 催化剂投加量、过硫酸盐浓度和 pH 值等各类反应条件对降解效率具有显著影响, 其核心机制在于活性物种生成与淬灭的动态平衡, 当 pH 值 = 5.0 时, nFe⁰/BC-PDS 体系对 TC 的降解率高达 97.68%, 此时 Fe^{2+} 溶出速率与 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 生成达到最佳匹配。此外, 环境影响因素分析表明, 共存阴离子会通过自由基淬灭作用抑制降解, 而 HA 则呈现浓度依赖性, 低浓度时因竞争吸附降低效率, 高浓度时却可能通过醌基介导的氧化还原循环提升反应活性。这些发现为改性 nZVI 材料的设计与实际水处理应用提供了重要的理论依据和技术支撑。

4.2. 展望

尽管改性 nZVI 活化过硫酸盐技术展现出良好的抗生素降解潜力, 未来研究仍需在以下方向深入探索: 首先, 需开发更精准的材料合成方法以调控 FeS 结晶度与生物炭石墨化程度的匹配关系, 例如通过微波辅助硫化或等离子体改性等手段, 进一步提升电子传递效率并降低铁溶出风险; 其次, 应加强复杂水质条件下的长效稳定性研究, 特别是针对实际废水中普遍存在的悬浮物、有机质和重金属等干扰物质, 可通过构建载体-硫化层-金属合金的多级结构增强抗中毒能力。在机制研究层面, 需结合原位表征技术揭示界面电子转移路径与自由基生成的时空动态规律, 并发展基于机器学习的环境参数-降解效率预测模型。工程化应用方面, 建议开发固定床或膜反应器耦合工艺, 解决纳米材料回收难题。这些研究将推动该技术从实验室走向规模化应用, 为水环境中抗生素污染控制提供更高效、绿色的解决方案。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2420622); 重庆科技大学大学生创新训练计划项目(2025089)。

参考文献

- [1] Ural-Janssen, A., Meers, E., Ros, G.H., Vingerhoets, R. and Stokal, M. (2025) Mitigating Nutrient Losses in Europe: Synergistic Solutions for Air and Water Pollution by 2050. *Resources, Conservation and Recycling*, **222**, Article ID: 108472. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108472>
- [2] 李雅, 殷丽萍, 刘丹, 等. 中国抗生素污染现状及对浮游生物的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(3): 853-864.
- [3] dos Santos Silva, M.N., da Silva Santana, I.L., Jorge Correia Guedes, G.A., Ribeiro, B.G., Lima Silva, C.d.O., Napoleão, D.C., et al. (2025) Conversion of Agro-Industrial Wastes as Highly Efficient Adsorbents in the Removal of Pollutants: Characterization and Study of Dye Adsorption in Water. *Chemical Engineering Science*, **309**, Article ID: 121442. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121442>

- [4] Blach, T. and Engelhart, M. (2025) Limitations of Treating Hydrothermal Carbonization Process Water in a Membrane Bioreactor and a Sequencing Batch Reactor on Pilot Scale. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 115304. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115304>
- [5] Chen, M., Tian, S., He, T., Qin, L., Liu, H., *et al.* (2025) Microbial Consortium Composed of Efficient Denitrifying Strains and Bacterial Groups from Toilet Water for Enhancing Blackwater Treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 117676. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117676>
- [6] Okpara, E.C., Wojuola, O.B., Quadri, T.W. and Banks, C.E. (2024) An Overview of Advanced Oxidation Processes Using Copper-Based Catalytic Degradation of Organic Pollutants in Water. *Applied Materials Today*, **36**, Article 102053. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.102053>
- [7] Están García, A., Crespi Sánchez, N., Turnes Palomino, G. and Palomino Cabello, C. (2025) MOF Derived Porous Fe-Cu@Carbon Catalyst for the Degradation of Bisphenol a through a Persulfate-Based Advanced Oxidation Process. *Microporous and Mesoporous Materials*, **381**, Article ID: 113366. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113366>
- [8] Luo, H., Zeng, Y., He, D. and Pan, X. (2021) Application of Iron-Based Materials in Heterogeneous Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: A Review. *Chemical Engineering Journal*, **407**, Article ID: 127191. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127191>
- [9] Wang, X., Feng, L., Deng, Y., Lynch, I., Ma, J. and Ning, P. (2025) Nanoscale Zero-Valent Iron Loaded on Boron-Doped Coffee Grounds Highly Efficiently Activates Peroxymonosulfate to Degrade Tetracycline. *Journal of Water Process Engineering*, **76**, Article ID: 108196. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108196>
- [10] Zhang, R., Zhu, Y., Dong, J., Yao, Z., Zeng, G., Sheng, X., *et al.* (2024) Fluoranthene Degradation in a Persulfate System Activated by Sulfidated Nano Zero-Valent Iron (S-nZVI): Performance and Mechanisms. *Water Science & Technology*, **89**, 225-240. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.007>
- [11] Zuo, Q., Ma, Y., Ma, G., Zhang, M., Li, M., Wei, B., *et al.* (2025) Sulfide Nanoscale Zero-Valent Iron Activated Persulfate Improves the Degradation Efficiency of OBS (Sodium P-Perfluorous Nonenoxybenzenesulfonate). *Chemical Engineering Science*, **315**, Article ID: 121875. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121875>
- [12] Li, Y., Zhao, X., Yan, Y., Yan, J., Pan, Y., Zhang, Y., *et al.* (2019) Enhanced Sulfamethoxazole Degradation by Peroxymonosulfate Activation with Sulfide-Modified Microscale Zero-Valent Iron (S-mFe0): Performance, Mechanisms, and the Role of Sulfur Species. *Chemical Engineering Journal*, **376**, Article ID: 121302. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.178>
- [13] Yu, X., Jin, X., Wang, N., Yu, Y., Zhu, X., Chen, M., *et al.* (2022) Transformation of Sulfamethoxazole by Sulfidated Nanoscale Zerovalent Iron Activated Persulfate: Mechanism and Risk Assessment Using Environmental Metabolomics. *Journal of Hazardous Materials*, **428**, Article ID: 128244. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128244>
- [14] Wu, G., Kong, W., Gao, Y., Kong, Y., Dai, Z., Dan, H., *et al.* (2022) Removal of Chloramphenicol by Sulfide-Modified Nanoscale Zero-Valent Iron Activated Persulfate: Performance, Salt Resistance, and Reaction Mechanisms. *Chemosphere*, **286**, Article ID: 131876. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131876>
- [15] Zeng, J., Liu, J., Su, W., Tang, J., Luo, Z., Tang, F., *et al.* (2023) Persulfate Activation by Sulfide-Modified Nanoscale Zero-Valent Iron for Metronidazole Degradation: Mechanism, Major Radicals and Toxicity Assessment. *Journal of Water Process Engineering*, **53**, Article ID: 103733. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103733>
- [16] Shu, Z., Yang, H., Ye, S., Li, H., Yang, Z., Li, C., *et al.* (2025) Iron Scrap Derived Nano Zero-Valent Iron/Biochar Activated Persulfate for P-Arsanilic Acid Decontamination with Coexisting Microplastics. *Journal of Environmental Sciences*, **151**, 733-746. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.04.031>
- [17] Xue, Y., Kamali, M., Liyakat, A., Bruggeman, M., Muhammad, Z., Rossi, B., *et al.* (2023) A Walnut Shell Biochar-Nano Zero-Valent Iron Composite Membrane for the Degradation of Carbamazepine via Persulfate Activation. *Science of the Total Environment*, **899**, Article ID: 165535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165535>
- [18] Yang, Y., Zhu, J., Zeng, Q., Zeng, X., Zhang, G. and Niu, Y. (2023) Enhanced Activation of Peroxydisulfate by Regulating Pyrolysis Temperature of Biochar Supported nZVI for the Degradation of Oxytetracycline. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **145**, Article ID: 104775. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104775>
- [19] Shao, F., Wang, Y., Mao, Y., Shao, T. and Shang, J. (2020) Degradation of Tetracycline in Water by Biochar Supported Nanosized Iron Activated Persulfate. *Chemosphere*, **261**, Article ID: 127844. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127844>
- [20] Ding, Y., Li, M., Zhang, Q., Zhang, Y., Xia, Z., Liu, X., *et al.* (2023) Sulfidized State and Formation: Enhancement of Nanoscale Zero-Valent Iron on Biochar (S-nZVI/BC) in Activating Peroxymonosulfate for Acid Red 73 Degradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **11**, Article ID: 110114. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110114>
- [21] Yan, J., Guo, Z., Sun, Y., Yan, Z., Liu, R., Chen, Y., *et al.* (2025) Mechanism Insight into Sulfidated Nano Zero-Valent Iron/biochar Activated Persulfate for Highly Efficient Degradation of p-chloroaniline. *Chemosphere*, **375**, Article ID: 144229. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144229>

-
- [22] Xie, R., Wang, M., Li, W. and Song, J. (2023) Degradation of 2-Chlorophenol in Aqueous Solutions Using Persulfate Activated by Biochar Supported Sulfide-Modified Nanoscale Zero-Valent Iron: Performance and Mechanisms. *Water*, **15**, Article No. 2805. <https://doi.org/10.3390/w15152805>
- [23] Xue, W., Chen, X., Liu, H., Li, J., Wen, S., Guo, J., *et al.* (2024) Activation of Persulfate by Biochar-Supported Sulfidized Nanoscale Zero-Valent Iron for Degradation of Ciprofloxacin in Aqueous Solution: Process Optimization and Degradation Pathway. *Environmental Science and Pollution Research*, **31**, 10950-10966. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31931-z>