

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 11. 001

含氧阴离子对 MnO_2 催化氧化氨氮活化效果的影响

王松波^{1,2,3}, 唐欢^{1,2,3}, 何香雨^{1,2,3}, 高艺佩^{1,2,3}, 黄廷林^{1,2,3}

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 在锰氧化物催化氧化去除氨氮工艺中, 水源水条件下锰氧化物的活化及催化氧化活性的建立是实现该技术效能的关键。以 MnO_2 为例, 研究了水中碳酸氢根、硅酸根和磷酸氢根等常见的含氧阴离子对锰氧化物活性建立的影响。当单独加入一种含氧阴离子时, MnO_2 无法产生催化氧化活性, 且碳酸氢根的加入会导致 MnO_2 向 MnOOH 转化。含氧阴离子之间具有协同作用, 碳酸氢根和磷酸氢根的同时存在是 MnO_2 建立催化氧化氨氮能力的关键, 当两者的浓度分别为 2 和 0.002 mmol/L 时, MnO_2 的催化氧化氨氮活性建立得最快, 在此基础上加入硅酸根或提高碳酸氢根和磷酸氢根的浓度均会抑制 MnO_2 催化氧化氨氮活性的产生。这些研究结果为优化水处理应用中基于锰氧化物的催化氧化系统提供了重要科学依据。

关键词: 地下水; 二氧化锰; 氨氮; 催化氧化活性; 活化时间; 含氧阴离子

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0001-07

Effect of Oxyanions on Activation of MnO_2 for Catalytic Oxidation of Ammonia Nitrogen

WANG Songbo^{1,2,3}, TANG Huan^{1,2,3}, HE Xiangyu^{1,2,3}, GAO Yipei^{1,2,3},
HUANG Tinglin^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China; 3. Northwest China Key Laboratory of Water Resources and Environmental Ecology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In catalytic oxidation processes for ammonium removal using manganese oxides, the activation of Mn oxides under source-water conditions and the subsequent establishment of their catalytic activity are critical for determining treatment performance. Using MnO_2 as a representative catalyst, this study systematically examined the roles of common aqueous oxyanions—including bicarbonate, silicate, and phosphate—in regulating MnO_2 activation. The results demonstrated that the presence of a single oxyanion was insufficient to induce catalytic activity in MnO_2 , and bicarbonate alone even promoted its transformation into MnOOH . Notably, a synergistic interaction between oxyanions was identified: the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42577265); 陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2023-005); 陕西省教育厅科学研究计划重点项目——协同创新中心项目(23JY049)

通信作者: 唐欢 E-mail: tanghuan@xauat.edu.cn

coexistence of bicarbonate and phosphate was indispensable for establishing the catalytic activity of MnO_2 toward ammonium oxidation. The most rapid development of catalytic activity was achieved at bicarbonate and phosphate concentrations of 2 mmol/L and 0.002 mmol/L, respectively. In contrast, the addition of silicate or elevated concentrations of bicarbonate and phosphate suppressed the activity. These findings provide fundamental mechanistic insights and practical guidance for optimizing Mn oxide-based catalytic oxidation systems in water treatment applications.

Keywords: groundwater; MnO_2 ; ammonia nitrogen; catalytic oxidation activity; activation time; oxyanion

地下水中的氨氮污染是威胁饮用水安全的突出问题,而经济高效的除氨氮技术一直是国内外研究的重要课题。锰氧化物催化氧化是去除氨氮污染物高效且经济的手段,具有广阔的应用前景^[1]。锰氧化物活性的形成机制及锰氧化物催化氧化效能关键控制因素的不明确制约了该技术的推广应用和氨氮污染问题的解决。该工艺原理是在水源水条件下将锰氧化物负载在滤料表面,活化一段时间后形成具有催化氧化氨氮活性的锰氧化膜。锰氧化膜的催化氧化活性建立后,无需额外添加物质便可实现氨氮的持续去除^[2-3]。锰氧化物的活化过程及对氨氮的氧化效果受原水水质的影响,例如汪洋等^[4]、刘杰^[5]指出离子的存在会影响催化氧化氨氮的效果,李普壮等^[6-7]研究了水循环等外界条件对氨氮氧化的影响。但已有研究忽视了含氧阴离子的影响,而含氧阴离子对锰氧化物的结构具有重要的调控作用,其可能也是决定锰氧化膜活性形成的关键因素之一。本文通过调整碳酸氢根、硅酸根、磷酸氢根这三种含氧阴离子浓度,探究了含氧阴离子种类及浓度对锰氧化物催化氧化氨氮活性产生速率的影响,并通过结构表征揭示作用机制。

1 材料与方法

1.1 材料制备

前期研究表明活性锰氧化膜的主要成分为 $\delta\text{-MnO}_2$ ^[8],因此本文主要研究活化过程中含氧阴离子对 $\delta\text{-MnO}_2$ 催化氧化活性建立的影响。 $\delta\text{-MnO}_2$ 通过在碱性条件下 KMnO_4 与 MnCl_2 之间的氧化还原反应合成^[9]:将160 mL、0.5 mol/L的 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 加入到180 mL、5.55 mol/L的NaOH溶液中,持续搅拌,冷却2 h后,滴加160 mL、0.2 mol/L的 KMnO_4 ,使生成的氧化锰沉淀,用去离子水洗涤上清液直至洗涤水中不再检出锰离子。将所得 $\delta\text{-MnO}_2$ 样品冷冻干

燥、研磨后待用。

1.2 实验用水

配水的制备基于对取自西安的真实地下水水样的分析,阳离子种类及浓度参照地下水样的检测结果添加,已知碳酸氢根、磷酸氢根和硅酸根对 MnO_2 的结构有显著影响^[10],因此选取它们作为代表性的含氧阴离子。地下水中三种含氧阴离子的检测浓度分别为4、0.002、0.2 mmol/L,实验中设定浓度范围分别为0~4、0~0.02、0~0.2 mmol/L,并采取一系列不同浓度含氧阴离子的组合。为在讨论中更简洁地提及含氧阴离子的组成,使用了缩写形式,例如“0C0Si0P”表示对照组,即在配水中不添加三种阴离子;“2C0.2Si0.002P”表示配水中碳酸氢根、硅酸根、磷酸氢根的添加量分别为2、0.2和0.002 mmol/L。配水的pH控制在8.2左右,在该pH下三种阴离子的主要存在形式分别为 HCO_3^- 、 HPO_4^{2-} 、 H_4SiO_4 ^[11]。

1.3 实验方法

将 $\delta\text{-MnO}_2$ 与配水混合,在298 K的水浴摇床中以120~130 r/min的转速振荡培养36 d。为了更好地观察和分析与 $\delta\text{-MnO}_2$ 结构变化相关的过程,将 $\delta\text{-MnO}_2$ 浓度设定为1 g/L。在培养过程中,每两天更换一次配水,以维持离子浓度。更换配水时加入2 mg/L的氨氮并定期测定氨氮、硝态氮及亚硝态氮的浓度,以明确不同活化条件下 $\delta\text{-MnO}_2$ 催化氧化氨氮活性形成的时间。培养36 d后,对 $\delta\text{-MnO}_2$ 结构进行表征。为排除生物作用对氨氮去除的影响,实验在紫外灯照射下进行。

1.4 分析方法

所取水样先经0.45 μm 滤膜过滤后再进行水质分析。其中,氨氮、亚硝态氮和硝态氮采用紫外-可见分光光度计测定,pH采用雷磁pH计测定。

2 结果与讨论

2.1 添加含氧阴离子对活化效果的影响

2.1.1 单一含氧阴离子的作用

为了比较活化过程中含氧阴离子对 $\delta\text{-MnO}_2$ 催化氧化活性产生时间的影响,在氨氮浓度为2 mg/L的模拟地下水中单独添加一种含氧阴离子(投加浓度参考地下水中的浓度),结果如图1所示。在活化的初始阶段(0~48 h),系统已呈现出显著的氨氮浓度降低现象。进一步分析显示,亚硝态氮和硝态氮均未检出,因此,氨氮的去除主要是依靠带负电的 $\delta\text{-MnO}_2$ 的静电吸附作用^[12],氨氮并没有被氧化成硝态氮或亚硝态氮。随着活化天数的增加, $\delta\text{-MnO}_2$ 对氨氮的吸附逐渐饱和。含氧阴离子影响了氨氮吸附饱和的时间及吸附含量:加入碳酸氢根的组别对氨氮的吸附量最小,且饱和速度最快;相对于硅酸根,磷酸氢根的添加促进了 $\delta\text{-MnO}_2$ 对氨氮的吸附,为氨氮的进一步氧化提供了条件。

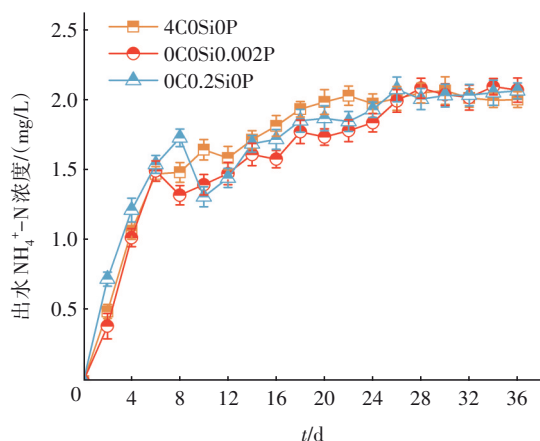


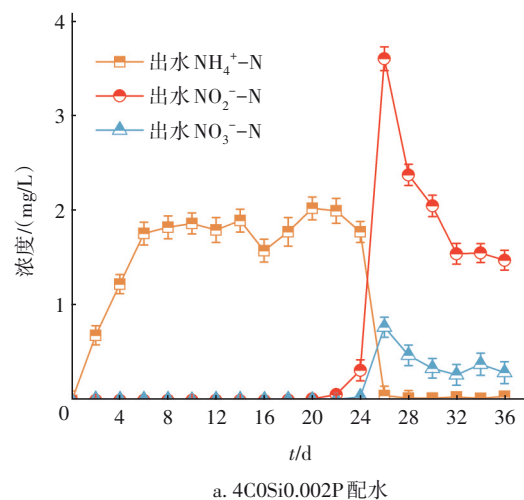
图1 单一含氧阴离子对氨氮氧化效果的影响

Fig.1 Oxidation effect of ammonia nitrogen under condition of a single oxyanion

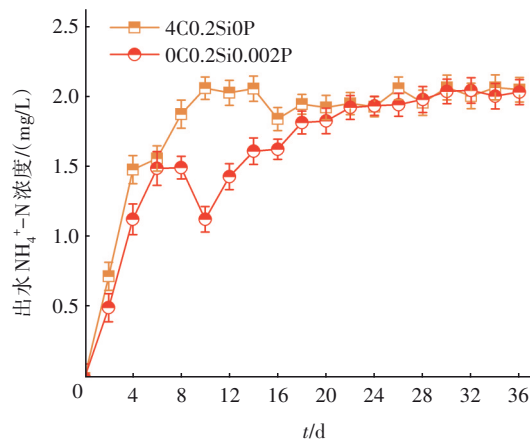
2.1.2 两种含氧阴离子的协同作用

考虑到单一含氧阴离子的添加无法使 $\delta\text{-MnO}_2$ 产生催化氧化氨氮的能力,进一步考察了两种含氧阴离子共同添加的效果,结果见图2。由图2(a)可知,当同时添加碳酸氢根和磷酸氢根时,在第26天出现了氨氮氧化能力,且能持续对氨氮进行催化氧化。在初始活性产生时, $\delta\text{-MnO}_2$ 表面积累的吸附氨氮也被氧化从而导致亚硝态氮产量激增,而随着反应的进行,氧化反应达到平衡,亚硝态氮产量下降。在其他的含氧阴离子添加方式中, $\delta\text{-MnO}_2$ 并没有产生催化氧化氨氮能力。这证明硅酸根无法参与到

$\delta\text{-MnO}_2$ 氧化氨氮能力提高的过程中,碳酸氢根和磷酸氢根需要共同存在, $\delta\text{-MnO}_2$ 才能够产生催化氧化氨氮活性^[13-14]。值得注意的是,在该配水条件下,氨氮主要被氧化为亚硝态氮,这可能是由于 $\delta\text{-MnO}_2$ 的表面带负电,其主要吸附带正电的离子,而亚硝态氮带负电,与 $\delta\text{-MnO}_2$ 表面电性相斥,从而抑制了 $\delta\text{-MnO}_2$ 进一步将亚硝态氮氧化为硝态氮^[10]。此外,配水中未添加天然有机物,未来研究需考虑天然有机物等水化学组分的影响,明确决定氨氮被氧化成硝态氮的关键因素^[15]。



a. 4C0Si0.002P 配水



b. 4C0.2Si0P及0C0.2Si0.002P 配水

图2 两种含氧阴离子协同对氨氮氧化效果的影响

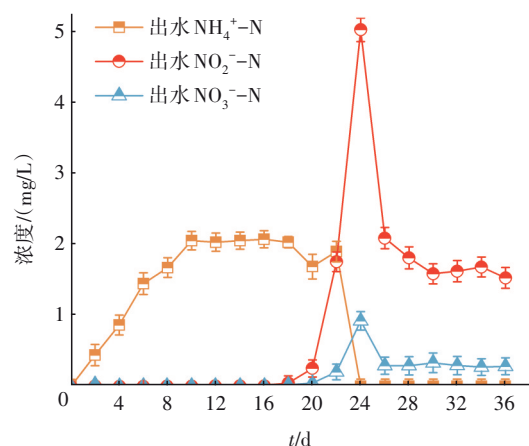
Fig.2 Oxidation effect of ammonia nitrogen under condition of two oxyanions

2.2 含氧阴离子浓度对活化效果的影响

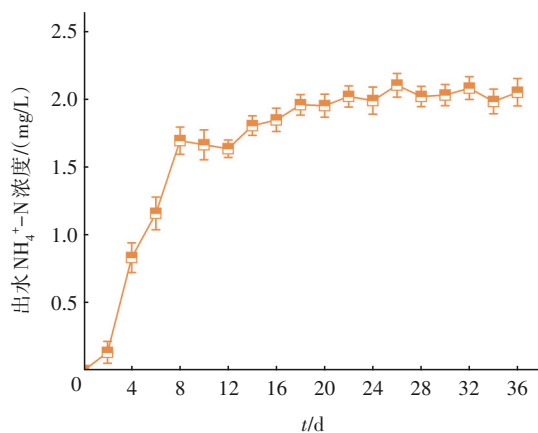
2.2.1 碳酸氢根和磷酸氢根浓度的影响

由2.1节的讨论可知碳酸氢根和磷酸氢根是 $\delta\text{-MnO}_2$ 产生催化氧化效果的关键含氧阴离子。为了探究含氧阴离子浓度是否会影响催化氧化活性

的产生,将碳酸氢根浓度降至2 mmol/L或将磷酸氢根浓度升至0.02 mmol/L,结果见图3。可见,降低碳酸氢根浓度后,催化氧化能力产生速率更快,活化24 d就可彻底降解氨氮,催化氧化反应更剧烈。这归功于碳酸氢根的减少释放了更多的 δ - MnO_2 边缘活性位点,使反应更容易进行。然而,提高磷酸氢根浓度反而会导致催化氧化能力在36 d之内无法产生,证明磷酸氢根浓度在催化氧化中很关键,磷酸氢根本身的吸附能力强于碳酸氢根及硅酸根,当水中的磷酸氢根浓度过高时,其会与 δ - MnO_2 表面形成稳定的络合物, δ - MnO_2 边缘活性位点缺失,电子传递受到阻碍,导致 δ - MnO_2 催化氧化能力形成缓慢^[16]。



a. 2C0Si0.002P 配水



b. 4C0Si0.02P 配水

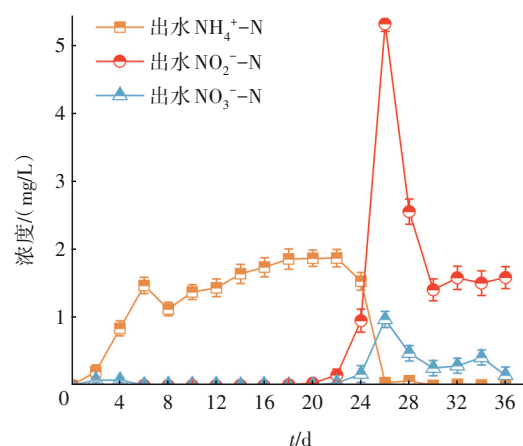
图3 含氧阴离子浓度对氨氮氧化效果的影响

Fig.3 Effect of oxyanion concentration on ammonia nitrogen oxidation

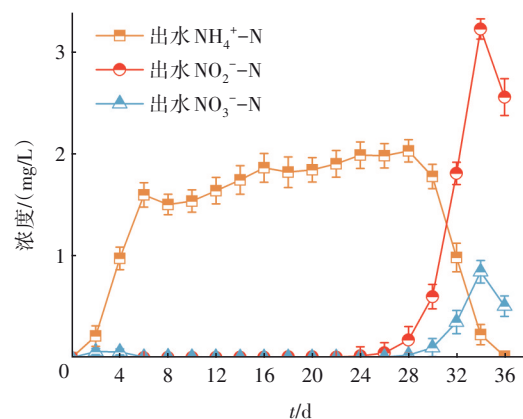
2.2.2 硅酸根对 δ - MnO_2 活化效果的影响

由于自然水体中的硅酸根浓度较高,在实际水处理工艺应用中,硅酸根的存在不容忽视^[17]。为探

究自然水体中更贴近真实的复杂环境下,多种含氧阴离子共存对催化氧化氨氮性能的影响,在碳酸氢根和磷酸氢根基础上添加硅酸根,控制硅酸根浓度接近自然水体浓度(0.2 mmol/L)。在2.2.1节研究中发现碳酸氢根浓度降低可以促进催化氧化反应,而磷酸氢根浓度增加会阻碍活性产生,故控制碳酸氢根浓度为2和4 mmol/L,磷酸氢根浓度为0.002 mmol/L。如图4所示,硅酸根阻碍了氨氮的降解,在碳酸氢根为2 mmol/L时阻碍轻微,随着碳酸氢根浓度提高到4 mmol/L,阻碍程度更加明显。硅酸根的加入导致水体环境更加复杂,碳酸氢根和硅酸根在 δ - MnO_2 表面吸附能力相近,两者竞争吸附位点导致催化氧化能力显著降低^[18]。



a. 2C0.2Si0.002P 配水



b. 4C0.2Si0.002P 配水

图4 添加硅酸根对氨氮氧化效果的影响

Fig.4 Effect of addition of silicate anion on ammonia nitrogen oxidation

2.3 含氧阴离子对 δ - MnO_2 结构特性的影响

对活化36 d后的 δ - MnO_2 进行扫描电镜(SEM)表征,结果如图5所示。碳酸氢根的加入对 δ - MnO_2

表面形貌影响明显,其形貌呈现从纳米颗粒状到纳米板状的变化,说明碳酸氢根的存在影响了 $\delta\text{-MnO}_2$ 在水体中的生长方向。分析 $\delta\text{-MnO}_2$ 结构发生变化的原因可能是碳酸氢根的存在改变了溶液中的离子活性,从而影响离子与矿物表面的相互作用。同时,碳酸氢根可以吸附在 $\delta\text{-MnO}_2$ 表面,导致矿物晶体的生长方向发生改变^[19]。例如,碳酸氢根可以吸附在 $\delta\text{-MnO}_2$ 表面并与二价锰离子结合形成 MnCO_3 , MnCO_3 具备较强的溶解再结晶能力,可通过自身的溶解,使 $\delta\text{-MnO}_2$ 上的二价锰剥离出来并与水和氧气结合形成其他形貌的 MnO_2 ,而磷酸氢根、硅酸根对表面形貌影响不大。此外,在同时添加碳酸氢根和磷酸氢根时其形貌并未发现改变,证明磷酸氢根可以阻止碳酸氢根对 $\delta\text{-MnO}_2$ 形貌的改变。而硅酸根由于自身吸附能力低于磷酸氢根^[17],不能阻止碳酸氢根对 $\delta\text{-MnO}_2$ 形貌的改变。

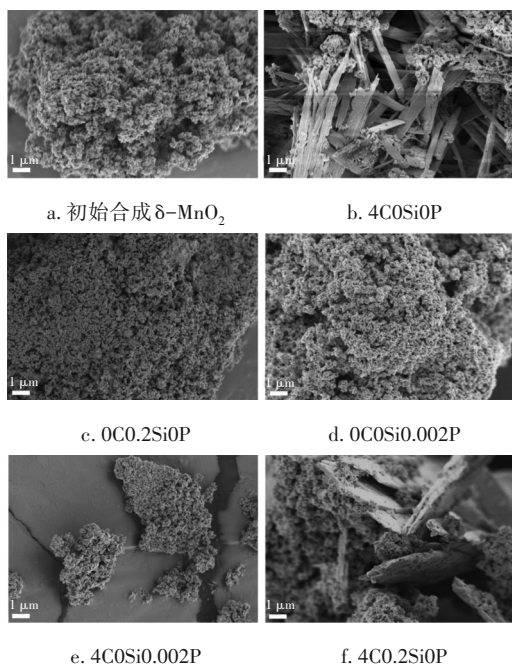


图5 不同含氧阴离子条件下培养后 $\delta\text{-MnO}_2$ 的SEM图像
Fig.5 SEM images of $\delta\text{-MnO}_2$ after cultivation under different oxyanion conditions

为了探究活化过程中 $\delta\text{-MnO}_2$ 的结构变化规律,进一步进行了能谱仪(EDS)和X射线衍射光谱(XRD)分析。如图6所示,初始合成的 $\delta\text{-MnO}_2$ 表面氧含量较高,活化36 d后, $\delta\text{-MnO}_2$ 表面有Ca附着,证明Ca的插层与附着。如图7所示,添加磷酸氢根培养36 d后,合成的 $\delta\text{-MnO}_2$ 为水钠锰矿, 2θ 为 12° 处对应 $\delta\text{-MnO}_2$ (001)晶面, 25° 对应 $\delta\text{-MnO}_2$ (002)晶面

面;添加碳酸氢根培养36 d后, 26.1° 处出现对应 MnOOH (210)的晶面,证明SEM中观察到的板状结构为 MnOOH ,碳酸氢根会导致 $\delta\text{-MnO}_2$ 向 MnOOH 转化。磷酸氢根的存在则阻止碳酸氢根对 $\delta\text{-MnO}_2$ 的转化,稳定 $\delta\text{-MnO}_2$ 层间结构,并提升 $\delta\text{-MnO}_2$ 的催化氧化能力。

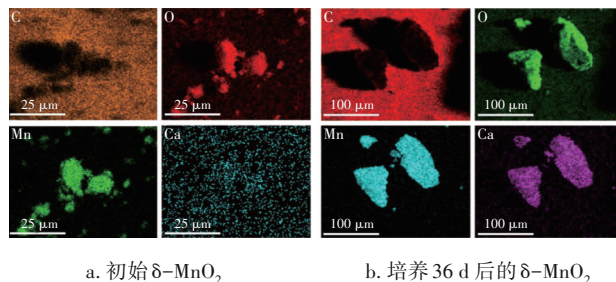
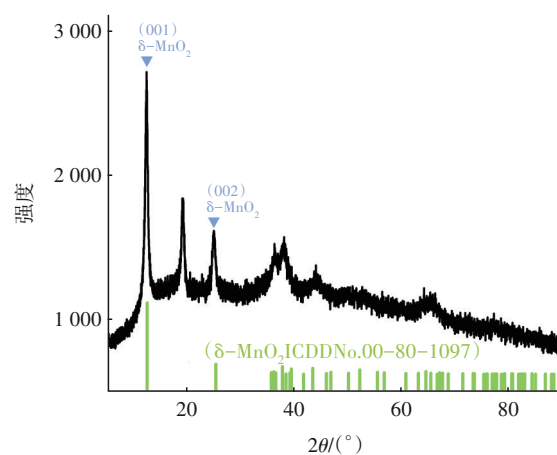
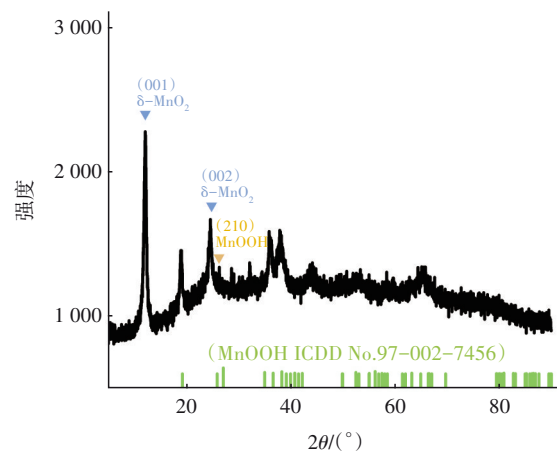


图6 初始及在配水中培养36 d后 $\delta\text{-MnO}_2$ 表面元素的EDS分析
Fig.6 EDS analysis of elements on $\delta\text{-MnO}_2$ surface at initial and after 36 days cultivation



a. 配水中加磷酸氢根培养36 d后



b. 配水中加碳酸氢根培养36 d后

图7 不同条件下 $\delta\text{-MnO}_2$ 的XRD图谱
Fig.7 XRD pattern of $\delta\text{-MnO}_2$ under different conditions

δ - MnO_2 催化氧化氨氮机理见图8。 δ - MnO_2 在含氧阴离子的影响下产生了结构和特性变化。具体而言,在模拟自然水体中,碳酸氢根导致 δ - MnO_2 层状结构向隧道型锰矿转变,且随着时间的延续形态会由片状向针状过渡。而在磷酸氢根的影响下, MnO_2 保持了原有的 δ - MnO_2 层状结构,且由于水中较大的金属离子存在,会使层间较小的 Na^+ 离子被 Ca^{2+} 等金属离子置换出去,从而使层间距增加。随着时间的推进,磷酸氢根使矿物颗粒减小,氧化能力提升,具备了催化氧化氨氮的能力。在锰的自催化氧化过程中,氨氮被 δ - MnO_2 表面的高价锰等活性物质氧化为亚硝态氮及硝态氮。

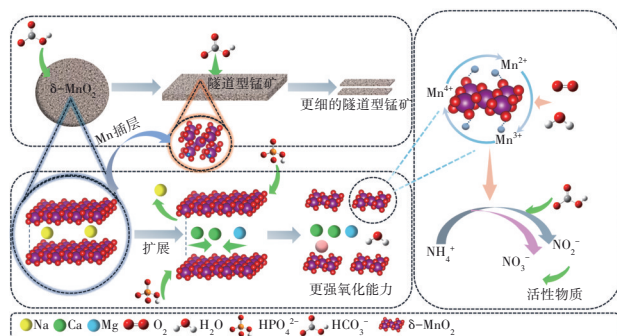


图8 δ - MnO_2 催化氧化氨氮机理

Fig.8 Mechanism diagram of δ - MnO_2 -catalyzed ammonia nitrogen oxidation

3 结论

① 含氧阴离子在 δ - MnO_2 催化氧化氨氮过程中发挥重要作用,碳酸氢根与磷酸氢根同时存在是 δ - MnO_2 产生活性的必要条件。

② δ - MnO_2 催化氧化氨氮的效果与碳酸氢根及磷酸氢根浓度有关,碳酸氢根浓度为2 mmol/L、磷酸氢根浓度为0.002 mmol/L时效果相对最好。

③ 在配水条件下活化的 δ - MnO_2 氧化氨氮的产物主要为亚硝态氮,可能是因为配水中只含有金属离子和阴离子。天然地下水中的有机物、矿物、活性物质等可能在 δ - MnO_2 的活化过程中起到更重要的作用,未来需开展相关研究以阐明其他水质因素的影响及作用。

参考文献:

[1] 白筱莉,黄廷林,张瑞峰,等. 铁锰复合氧化膜同步去除地表水中氨氮和锰[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4534-4540.

BAI X L, HUANG T L, ZHANG R F, et al. The simultaneous removal of ammonium and manganese from surface water by iron-manganese co-oxides film [J]. China Environmental Science, 2017, 37(12): 4534-4540 (in Chinese).

[2] 张杰,文刚,李凯,等. 双向流过滤系统催化氧化同步去除地下水中氨氮和锰[J]. 中国给水排水, 2022, 38(21): 1-11.

ZHANG J, WEN G, LI K, et al. Simultaneous removal of ammonia nitrogen and manganese from groundwater by catalytic oxidation in a bidirectional flow filtration system [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(21): 1-11 (in Chinese).

[3] 江凌欣,程亚,黄廷林. 地下水厂泥饼的活化及其负载滤料去除水中氨[J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4024-4031.

JIANG L X, CHENG Y, HUANG T L. Activation of sludge cake from groundwater treatment plant and ammonia removal from water by its loaded filter media [J]. China Environmental Science, 2023, 43(8): 4024-4031 (in Chinese).

[4] 汪洋,黄廷林,文刚. 地下水中氨氮、铁、锰的同步去除及其相互作用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(19): 32-35, 39.

WANG Y, HUANG T L, WEN G. Simultaneous removal of ammonia nitrogen, iron and manganese from groundwater and their interactions [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(19): 32-35, 39 (in Chinese).

[5] 刘杰. 不同离子对铁锰氧化物催化氧化去除地下水中氨氮的影响[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.

LIU J. The Effect of Different Ions on Catalytic Oxidation of Ammonium by Iron-Manganese Co-oxide [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017 (in Chinese).

[6] 李普壮,黄廷林,程亚. 水循环对复合锰氧化物催化氧化氨氮和锰的影响[J]. 中国给水排水, 2025, 41(1): 52-58.

LI P Z, HUANG T L, CHENG Y. Influence of water cycle on catalytic oxidation of ammonia nitrogen and manganese by composite manganese oxides [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(1): 52-58 (in Chinese).

[7] 阮昭意,谢益佳,黄廷林,等. 低温下逆流充氧强化去除地表原水中的氨氮和锰[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 40-46.

RUAN Z Y, XIE Y J, HUANG T L, et al. Enhanced

- removal of ammonia nitrogen and manganese from surface raw water by counter-current aeration at low temperature[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (1): 40–46 (in Chinese).
- [8] CHENG Y, HUANG T L, SUN Y K, et al. Catalytic oxidation removal of ammonium from groundwater by manganese oxides filter: performance and mechanisms [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 322: 82–89.
- [9] LUO J, SUIB S L. Preparative parameters, magnesium effects, and anion effects in the crystallization of birnessites [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 1997, 101(49): 10403–10413.
- [10] YANG P, WEN K, BEYER K A, et al. Inhibition of oxyanions on redox-driven transformation of layered manganese oxides [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(5): 3419–3429.
- [11] LUO M, ZHANG H, REN Y, et al. In situ regulation of MnO_2 structural characteristics by oxyanions to boost permanganate autocatalysis for phenol removal [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(34): 12847–12857.
- [12] CHENG Y, HUANG T, SHI X, et al. Removal of ammonium ion from water by Na-rich birnessite: performance and mechanisms [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 57: 402–410.
- [13] CHENG Y, MIAO A, WEN G, et al. Key factors maintaining catalytic ammonium oxidation activity of manganese oxide active filter media: the role of bicarbonate [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(2): 111949.
- [14] ZHANG R, HUANG T, WEN G, et al. Phosphate dosing to sustain the ammonium removal activity of an iron-manganese co-oxide filter film at pilot scale: effects on chemical catalytic oxidation [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334: 1186–1194.
- [15] RITSCHER T, TOTSCHKE K U. Reductive transformation of birnessite by low-molecular-weight organic acids [J]. Chemosphere, 2023, 325: 138414.
- [16] WANG Q, LIAO X, XU W, et al. Synthesis of birnessite in the presence of phosphate, silicate, or sulfate [J]. Inorganic Chemistry, 2016, 55 (20) : 10248–10258.
- [17] YU M, HE X, XI B, et al. Dissolved silicate enhances the oxidation of chlorophenols by permanganate: important role of silicate-stabilized MnO_2 colloids [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(16): 10279–10288.
- [18] FUKUSHI K, SVERJENSKY D A. A surface complexation model for sulfate and selenate on iron oxides consistent with spectroscopic and theoretical molecular evidence [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(1): 1–24.
- [19] JUN Y S, KENDALL T A, MARTIN S T, et al. Heteroepitaxial nucleation and oriented growth of manganese oxide islands on carbonate minerals under aqueous conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(5): 1239–1249.

作者简介:王松波(2000—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事给水处理理论与技术方面的研究。

E-mail:648724583@qq.com

收稿日期:2025-05-20

修回日期:2025-09-29

(编辑:李德强)

珍惜地下水,珍视隐藏的资源