

Na⁺掺杂g-C₃N₄通过NaHCO₃辅助策略用于高效光催化产H₂O₂

黄龙, 苏玉*

中国药科大学理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年6月24日; 发布日期: 2026年7月6日

摘要

光催化制备过氧化氢(H₂O₂)因其绿色、可持续的特点, 被认为是替代传统蒽醌法的重要途径之一。针对石墨相氮化碳(g-C₃N₄)存在比表面积有限、光生载流子复合严重及氧还原活性不足等问题, 本研究采用碳酸氢钠(NaHCO₃)作为改性剂, 通过一步高温热缩聚法制备Na⁺掺杂改性g-C₃N₄(CN-Na)光催化材料。结果表明, NaHCO₃的引入在材料形成过程中起到结构调控作用, 使块体g-C₃N₄发生部分剥离与破碎, 比表面积显著提升, 同时晶体结构发生轻微膨胀, 证明Na⁺成功掺入骨架结构。紫外-可见漫反射光谱显示, CN-Na的吸收边发生红移, 禁带宽度减小, 可见光响应能力增强。光电化学测试表明, CN-Na具有更高的瞬态光电流响应和更低的电荷转移阻抗, 说明其光生电子-空穴分离与迁移效率得到显著改善。在可见光照射下, CN-Na表现出优异的H₂O₂生成性能, 其产率达到未改性样品的10倍以上, 并随反应时间稳定增长。电子顺磁共振(EPR)结果进一步表明, Na⁺改性促进了超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)的生成, 从而增强了两电子氧还原路径的反应效率。综上, NaHCO₃辅助的Na⁺掺杂策略能够实现g-C₃N₄结构与电子性质的协同优化, 显著提升其光催化H₂O₂生成性能, 为高效太阳能驱动绿色过氧化氢合成提供了有效思路。

关键词

光催化, H₂O₂, 掺杂

Na⁺ Doped g-C₃N₄ Prepared via a NaHCO₃ Assisted Strategy for Efficient Photocatalytic H₂O₂ Production

Long Huang, Yu Su*

School of Science, China Pharmaceutical University, Nanjing Jiangsu

Received: June 3, 2026; accepted: June 24, 2026; published: July 6, 2026

*通讯作者。

Abstract

Photocatalytic production of hydrogen peroxide (H_2O_2) is considered a green and sustainable alternative to the conventional anthraquinone process. However, graphitic carbon nitride ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) suffers from limited specific surface area, severe photogenerated charge carrier recombination, and insufficient oxygen reduction activity, which restrict its practical photocatalytic performance. In this work, sodium bicarbonate (NaHCO_3) was employed as a modifying agent to construct Na^+ -doped $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (CN-Na) via a one-step high-temperature thermal polycondensation method. The results indicate that the introduction of NaHCO_3 plays a crucial role in regulating the material structure, leading to partial exfoliation and fragmentation of bulk $\text{g-C}_3\text{N}_4$, thereby significantly increasing the specific surface area. Meanwhile, a slight lattice expansion confirms the successful incorporation of Na^+ into the $\text{g-C}_3\text{N}_4$ framework. UV-vis diffuse reflectance spectroscopy reveals a red shift of the absorption edge and a narrowed band gap, indicating enhanced visible-light harvesting ability. Photoelectrochemical measurements show that CN-Na exhibits a higher transient photocurrent response and lower charge transfer resistance, demonstrating improved separation and migration efficiency of photogenerated electron-hole pairs. Under visible-light irradiation, CN-Na displays excellent H_2O_2 production performance, with a yield more than 10 times higher than that of pristine $\text{g-C}_3\text{N}_4$ and maintaining stable growth over time. Electron paramagnetic resonance (EPR) analysis further confirms that Na modification promotes the generation of superoxide radicals ($\cdot\text{O}_2^-$), thereby enhancing the two-electron oxygen reduction pathway. In summary, the NaHCO_3 -assisted Na^+ doping strategy enables synergistic optimization of both the structure and electronic properties of $\text{g-C}_3\text{N}_4$, significantly improving its photocatalytic H_2O_2 production performance and providing an effective approach for efficient solar-driven green hydrogen peroxide synthesis.

Keywords

Photocatalysis, Hydrogen Peroxide, Dopin

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

光催化制备过氧化氢(H_2O_2)因其绿色、温和且可持续的特点,被认为是替代传统蒽醌法的重要新型合成路线[1][2]。传统蒽醌法虽然在工业上已实现规模化生产,但其过程依赖贵金属催化剂与大量有机溶剂,能耗较高且存在环境污染与工艺复杂等问题,难以满足当前“双碳”目标与绿色化学发展的需求[3]。因此,开发基于太阳能驱动的清洁 H_2O_2 制备体系具有重要的科学意义与应用价值。在众多光催化材料中,石墨相氮化碳($\text{g-C}_3\text{N}_4$)作为一种由三嗪或三聚氰胺单元聚合而成的二维非金属半导体材料[4]-[7],因其合成条件温和、成本低廉、化学稳定性良好且具有可见光响应,近年来被广泛用于光催化反应研究,尤其是在过氧化氢(H_2O)光催化生成中展现出潜力[8]-[12]。

然而,尽管 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 具备诸多优势,其固有结构和电子性质仍限制了其在实际应用中的表现[13]。首先,块体 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 具有层状堆叠结构,比表面积有限,这导致其与反应物的接触界面不足,活性位点数量受限,从而限制了反应效率[14][15]。其次, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的电子结构决定了其在光照激发后电子-空穴极易复合,光子载流子的利用效率较低。这不仅降低了 O_2 还原为 H_2O_2 的驱动力,也导致部分电子走向四电子

还原路径, 生成水而非 H_2O_2 , 造成产物选择性偏低[16]。此外, $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的导带位置对 O_2 两电子还原过程并不理想, 进一步制约了 H_2O_2 的生成速率[17]。

综上所述, 单一的块体 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 难以满足高效、稳定产 H_2O_2 的需求。针对上述问题, 研究者们已提出多种调控策略, 包括异质结构构建、表面官能化和元素掺杂等。其中, 元素掺杂被认为是一种简便而有效的方法, 可以通过调节电子结构和表面化学环境来提升光催化性能。尤其是碱金属离子的引入, 凭借其适中的离子半径和稳定的价态, 能够在不破坏骨架稳定性的前提下, 实现能带调控与缺陷诱导。本研究选择 NaHCO_3 作为掺杂剂引入 $\text{g-C}_3\text{N}_4$, 旨在通过 Na^+ 掺杂作用来克服上述不足基于这一思路, 在 550°C 下煅烧三聚氰胺并引入 NaHCO_3 , 制备改性 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 样品。结果显示, NaHCO_3 掺杂显著改善了材料的光电性能和催化活性。在这项工作中, 我们不仅促进了光生载流子的有效分离, 而且提高了稳定性和反应选择性。

2. 实验部分

2.1. 试剂与仪器

主要试剂: 三聚氰胺(阿拉丁, 分析纯), 碳酸氢钠(国药集团化学试剂有限公司, 分析纯), 邻苯二甲酸氢钾(麦克林, 分析纯), 碘化钾(阿拉丁, 分析纯), 高锰酸钾(国药集团化学试剂有限公司, 分析纯), 氧气(高纯气体钢瓶, 纯度 $\geq 99.9\%$), 无水乙醇(麦克林, 分析纯), 30%双氧水(阿拉丁, 分析纯 AR)。

主要仪器: 瓷坩埚(上海实验仪器厂), 石英比色皿(上海光谱仪器有限公司, 1 cm 光程), 马弗炉(上海一恒科学仪器有限公司 SF-1100), 磁力搅拌器(上海司乐 SC-361), 三口烧瓶(蜀牛玻璃仪器有限公司), 300 W 氙灯光源(北京中教金源科技有限公司), 紫外-可见分光光度计(岛津 UV-2600), X 光射线衍射仪(布鲁克 D8 Advance)。

2.2. 原始 CN 的合成

准确称取 5.0 g 三聚氰胺固体粉末, 置于带盖的氧化铝陶瓷坩埚中, 轻轻压实后加盖密封。将坩埚放入箱式马弗炉中, 设置升温程序: 以 $9^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率从室温升至 550°C , 在 550°C 下恒温煅烧 2 h; 煅烧结束后, 程序停止, 待马弗炉自然冷却至室温后取出坩埚。得到的淡黄色块状固体经玛瑙研钵充分研磨, 直至无肉眼可见颗粒, 得到原始 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 粉末, 标记为 CN, 密封保存于干燥器中备用。

2.3. CN-Na 的合成

准确称取 5.0 g 三聚氰胺固体粉末, 加入 1.0 g 质量的碳酸氢钠(NaHCO_3), 将混合粉末置于玛瑙研钵中, 充分研磨 15 min, 确保两种固体粉末混合均匀, 随后转移至带盖的氧化铝陶瓷坩埚中, 轻轻压实后加盖密封。将坩埚放入箱式马弗炉中, 采用与 CN 完全一致的煅烧程序: 以 $9^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率从室温升至 550°C , 恒温煅烧 2 h, 随后自然冷却至室温。取出得到的深黄色块状固体, 经玛瑙研钵充分研磨后, 用超纯水与无水乙醇交替离心洗涤 3 次, 离心转速为 8000 rpm, 每次离心时间为 5 min, 彻底去除样品表面残留的未反应原料与可溶性杂质。洗涤完成后, 将样品置于 60°C 真空干燥箱中干燥 12 h, 待样品完全干燥后取出研磨, 得到 NaHCO_3 改性 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 粉末, 标记为 CN-Na, 密封保存于干燥器中备用。

2.4. 光催化活性评价

将 5.0 mg 光催化剂粉末超声分散于 50 mL 去离子水中, 形成均匀的悬浮液。为建立吸附-脱附平衡, 将该悬浮液在黑暗条件下持续搅拌 30 分钟, 并在此期间及后续反应过程中连续通入氧气。反应开始前, 取样作为初始浓度($t=0$)。随后, 使用氙灯作为模拟光源进行照射, 启动光催化反应。每隔 20 分钟,

从反应体系中取 1.0 mL 溶液, 并立即通过 0.22 μm 滤膜过滤以去除催化剂颗粒。滤液中 H_2O_2 的浓度采用碘量法进行定量分析。具体操作为: 向 1.0 mL 滤液中依次加入 0.5 mL 浓度为 $0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的碘化钾(KI)溶液和 0.5 mL 浓度为 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的邻苯二甲酸氢钾(KHP)缓冲溶液。混合均匀并反应一段时间后, 使用紫外-可见分光光度计在 350 nm 波长处测定三碘化物离子(I_3^-)的特征吸收峰强度, 从而计算出 H_2O_2 的浓度。

2.5. 电化学测量

光电化学测试均在电化学工作站上进行, 采用标准三电极体系, 以涂覆催化剂的 FTO 导电玻璃为工作电极, 铂片电极为对电极, 饱和 Ag/AgCl 电极为参比电极, 电解液为 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2SO_4 水溶液, 测试前向电解液中通入高纯氮气 30 min, 去除溶解氧。工作电极的制备: 准确称取 10 mg 催化剂粉末, 加入 1.8 mL 无水乙醇与 0.2 mL 5 wt% Nafion 溶液, 超声分散 30 min, 形成均匀的催化剂浆料。用移液枪准确吸取 20 μL 浆料, 均匀滴涂于 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的 FTO 导电玻璃导电面上, 涂覆面积为 1 cm^2 , 室温下自然晾干后, 置于 60°C 真空干燥箱中干燥过夜备用。

3. 结果与讨论

3.1. 形貌结构分析

本研究采用 NaHCO_3 作为模板制备了 CN-Na, 并采用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察了 CN 与 Na-CN 样品的微观形貌, 结果如图 1 所示。原始 CN 呈现出典型热缩聚产物特征, 为堆叠紧密的块状层状结构, 片层团聚明显。经 NaHCO_3 改性后, Na-CN 样品的形貌发生显著改变, 发生了紧密堆叠的块体产生一定剥离与破碎。

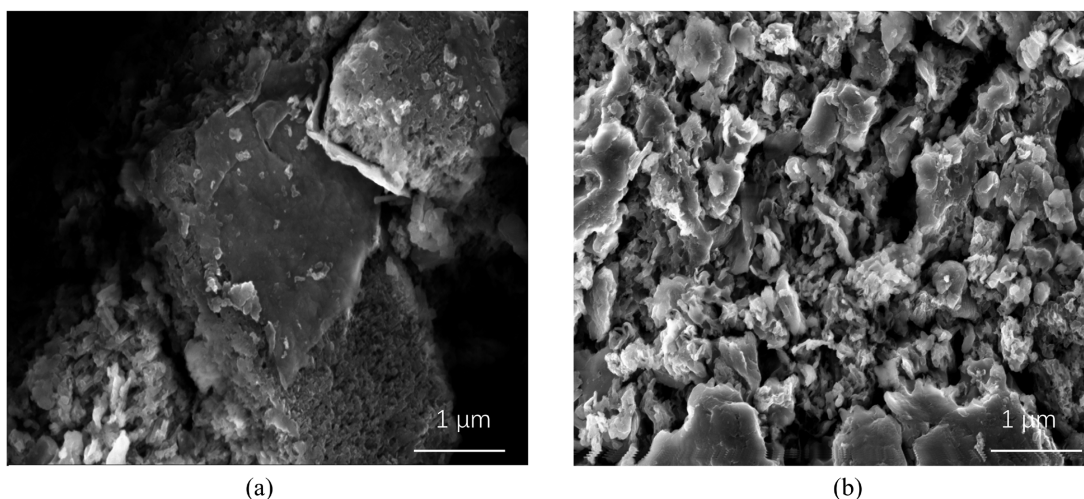


Figure 1. (a) SEM image of CN, (b) SEM image of Na-CN

图 1. (a) CN 的 SEM 图, (b) Na-CN SEM 图

为进一步分析样品形貌, 采用 XRD 对样品晶体结构进行分析, 图 2 是 CN 与 CN-Na 的 XRD 图分析, 图 $2\theta = 13.0^\circ$ 、 27.6° 分别归属为(100)和(002)晶面[18], 与原始 CN 相比, 主要(002)衍射峰明显减弱, 这可能归因于比表面积增大导致的结晶度降低。此外, 与原始样品相比, NaHCO_3 修饰样品的(002)面衍射峰向较低的 2θ 值轻微移动, 根据布拉格定律, 这归因于晶格间距的增加, 表明由于 Na^+ 的离子半径大于 C 和 N 的离子半径, 金属元素成功掺杂到 CN-Na 中, 这与 SEM 观察的现象一致。

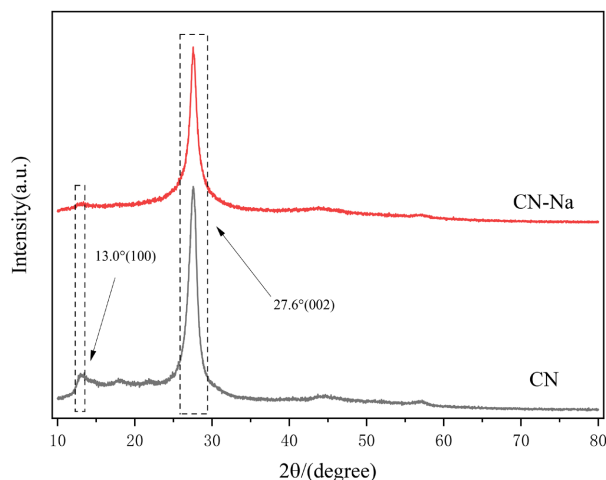


Figure 2. XRD patterns of the CN and CN-Na
图 2. CN 和 CN-Na 的 XRD 图

为探讨微观结构对样品电子能带配置的影响,由图 3 可知,通过紫外 - 可见漫反射光谱图 3(a)与 Tauc 带隙拟合图 3(b),可分析 Na 改性对材料光学性能的影响。较原始 CN, CN-Na 的吸收边发生明显红移,可见光吸收能力显著增强;经 Kubelka-Munk 公式拟合, CN 的禁带宽度为 2.71 eV,而 CN-Na 窄化至 2.50 eV,表明 Na 改性有效调控了电子结构,拓宽了光响应范围,更利于光生载流子激发。结合 XPS 价带谱图 3(c)与能带结构示意图 3(d),可进一步明确材料的能级位置。CN 与 CN-Na 的价带位置分别为 0.95 eV 与 1.12 eV (vs RHE),结合带隙计算,导带位置分别为 -1.76 eV 与 -1.38 eV。两者导带位置均远负 $O_2^-/-O_2^-$ (-0.33 V)与 O_2/H_2O_2 (+0.68 V)的还原电位,热力学上均可驱动 O_2 还原生成 H_2O_2 ;而 CN-Na 价带位置更正,氧化能力增强,同时带隙窄化提升了光利用率,优化后的能带结构更适配光催化产 H_2O_2 的反应需求。

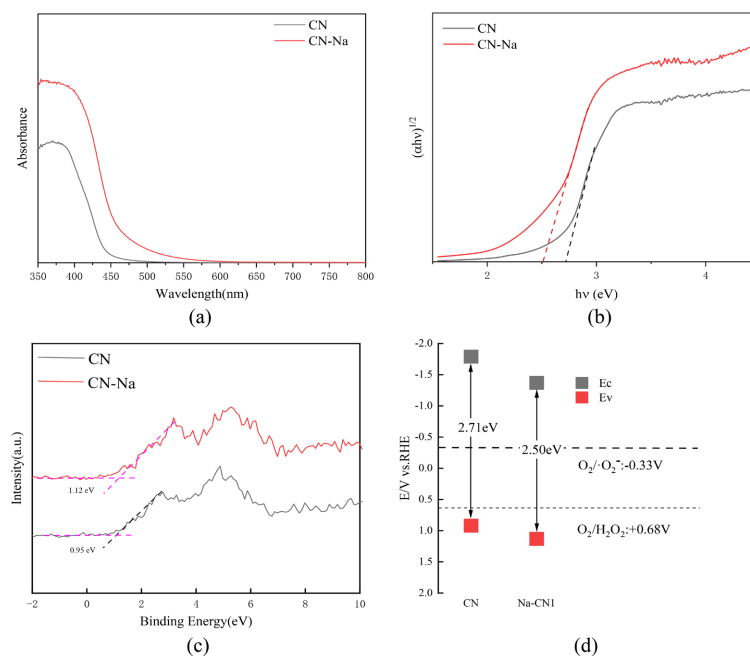


Figure 3. (a) UV-Vis diffuse reflectance spectra, (b) Tauc plots, (c) XPS valence band spectra, and (d) band structure diagrams of CN and CN-Na

图 3. CN 与 CN-Na 的(a) 紫外 - 可见漫反射光谱, (b) Tauc 带隙拟合曲线, (c) XPS 价带谱及, (d) 能带结构示意图

3.2. 光催化性能分析

图 4 展示了原始 CN 与 CN-Na 在 120 min 光催化反应过程中, H_2O_2 生成量随时间的变化规律。实验结果表明, Na 改性显著增强了材料的光催化活性: 在反应时间内, CN-Na 产生的 H_2O_2 浓度随时间呈近似线性增长, 最终累积浓度达到 $403 \mu\text{mol}$, 产率超过原始 CN 的 10 倍。这种性能差异可归因于比面积的优化与 Na 掺杂效应。原始 CN 因严重的团聚现象导致比面积较低, 有效活性位点不足, 且生成的 H_2O_2 易在表面发生副反应分解, 限制了产物的积累。相比之下, Na 改性有效调控了材料的微观形貌, 增大的比面积不仅为氧化还原反应提供了更丰富的暴露位点, 还有效降低了 H_2O_2 在材料表面的局部浓度, 从而抑制了其分解副反应。

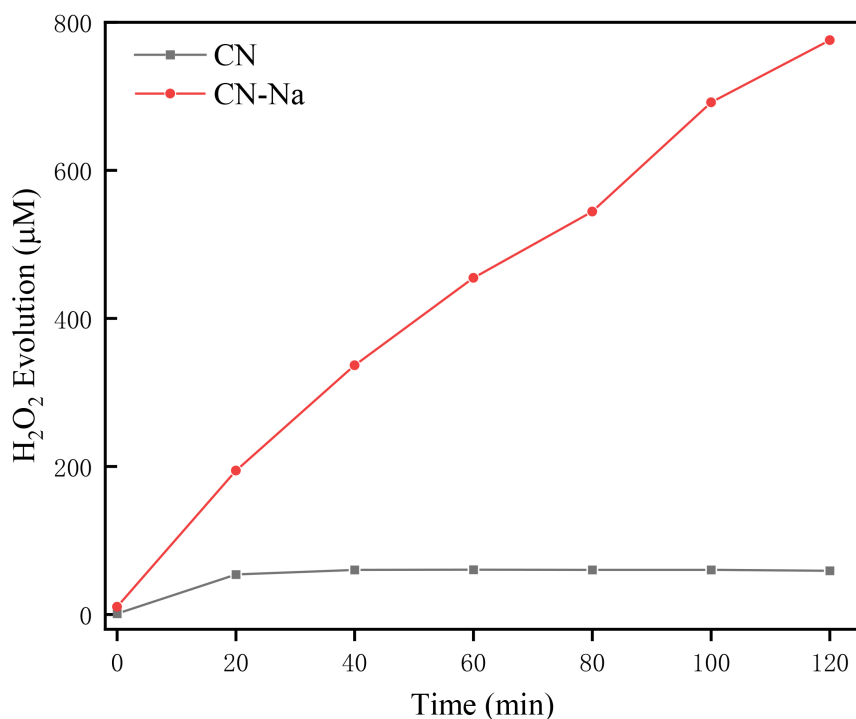


Figure 4. Comparison of photocatalytic H_2O_2 production performance between CN and CN-Na

图 4. CN 与 CN-Na 的光催化产 H_2O_2 性能对比

此外, 通过瞬态光电流(I-t)响应和电化学阻抗谱(EIS)进一步分析了材料的电荷动力学行为。图 5(a)显示, CN-Na 的光电流密度远高于原始 CN, 表明 Na 掺杂有效促进了光生电子-空穴对的分离并抑制了载流子复合。图 5(b)中, CN-Na 的阻抗谱半圆半径明显减小, 反映出其具有更低的界面电荷转移电阻。上述光电化学测试结果相互印证, 证明 Na 改性优化了 CN 的电荷传输路径, 为高效光催化产 H_2O_2 提供了动力学支持。

通过电子顺磁共振(EPR)测试, 我们进一步对比了不同样品在光照激发下产生活性氧物种(ROS)的能力差异(图 6)。实验结果显示, 在黑暗条件下, CN 与 CN-Na 均未表现出明显的特征信号, 表明材料在无光激发状态下不具备自发产生活性氧的活性。而在光照条件下, 两种样品均呈现典型的 $\text{DMPO} \cdot \text{O}_2^-$ 特征四重峰信号, 说明光激发过程中均可生成超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)。对比可见, CN-Na 的信号强度显著高于原始 CN, 证明 Na 改性大幅提升了材料光照下 $\cdot\text{O}_2^-$ 的生成量。该结果不仅确证了 $\cdot\text{O}_2^-$ 是光催化过程中的关键中间体, 也从微观动力学角度解释了 CN-Na 催化活性跃升的原因。

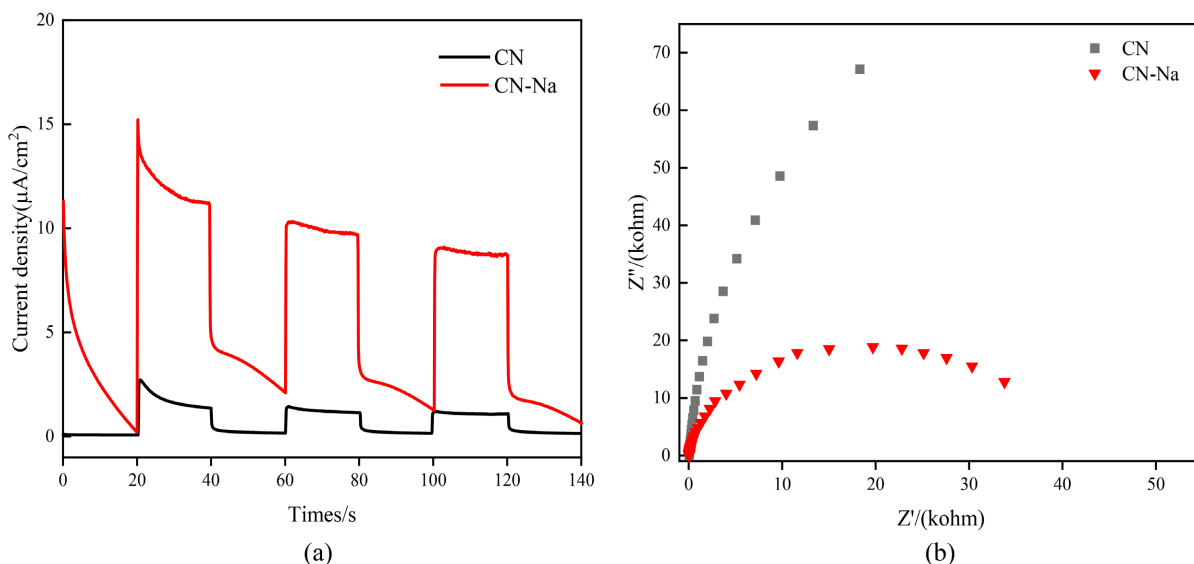


Figure 5. (a) Transient photocurrent responses and (b) electrochemical impedance spectroscopy (EIS) Nyquist plots of CN and CN-Na

图 5. CN 与 CN-Na 样品的(a)瞬态光电流响应及(b)电化学阻抗谱 Nyquist 图

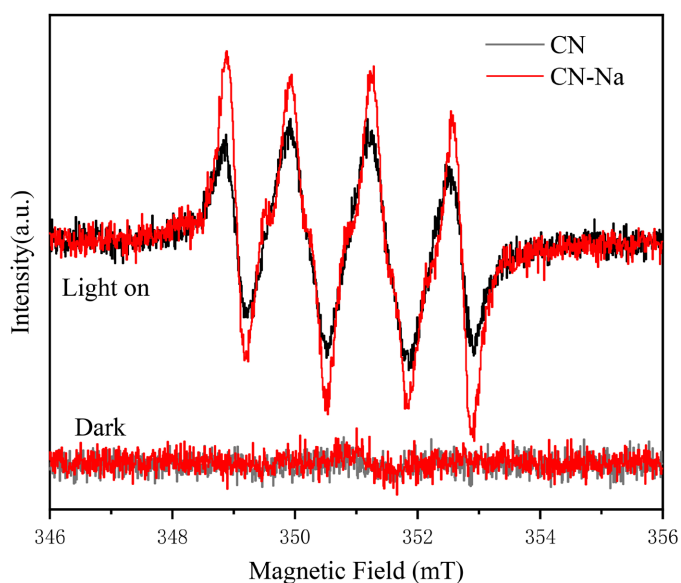


Figure 6. EPR characterization of superoxide radicals ($\cdot\text{O}_2^-$) over CN and CN-Na under dark/light

图 6. 黑暗/光照下 CN 与 CN-Na 的 DMPO- $\cdot\text{O}_2^-$ EPR 谱图

通过循环稳定性测试与结构表征(图 7(a)和图 7(b)), 进一步评估了催化剂的重复使用性与结构稳定性, 经过 5 次循环测试如图 7(a), H_2O_2 生成速率虽略有下降, 但仍保持在初始活性的 85%以上, 整体性能维持在较高水平, 表明催化剂具有良好的循环使用潜力。图 7(b)的 FTIR 光谱对比显示, 反应前后催化剂的特征吸收峰(包括 800 cm^{-1} 附近的三嗪环呼吸振动峰、 $1200\sim 1700\text{ cm}^{-1}$ 区域的 C-N/C=N 杂环伸缩振动峰, 以及 $3000\sim 3500\text{ cm}^{-1}$ 处的 N-H/O-H 伸缩振动峰)位置与强度均无显著变化, 证明光催化反应过程中催化剂的骨架结构未发生破坏, 无明显组分流失。性能稳定性与结构稳定性的相互印证, 表明该催化剂在光催化产 H_2O_2 体系中具有优异的循环可靠性与结构耐久性, 具备实际应用的潜力。

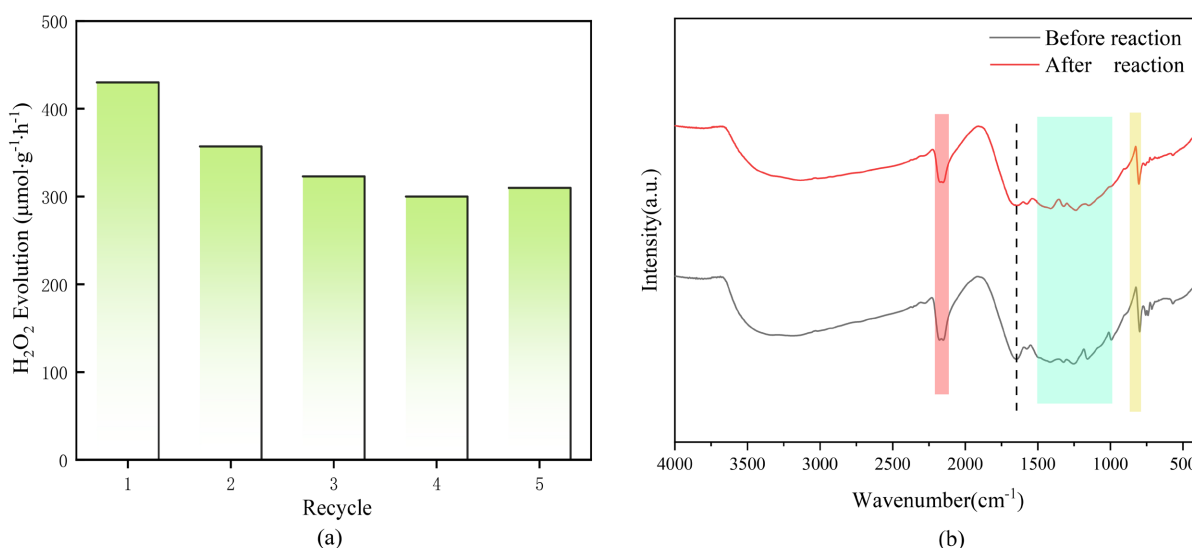


Figure 7. (a) Recycling stability of photocatalytic H₂O₂ production and (b) FTIR spectra of the catalyst before and after reaction

图 7. 催化剂的(a)光催化产 H₂O₂ 循环稳定性测试与(b)反应前后 FTIR 光谱对比

4. 结论

本研究以石墨相氮化碳为基础, 通过引入碳酸氢钠实现 Na⁺掺杂, 成功构建了 CN-Na 光催化材料。结果表明, Na 改性有效调控了材料的微观结构与能带性质, 使其比表面积增大、光吸收范围拓宽并促进光生载流子分离与迁移。在可见光照射下, CN-Na 在过氧化氢生成反应中表现出显著优于原始样品的催化活性与稳定性, 产率提升超过一个数量级。机理分析表明, 性能提升主要归因于·O₂⁻生成能力增强及两电子氧还原路径的促进。该工作为碱金属掺杂调控 g-C₃N₄ 光催化性能提供了新的思路。

基金项目

中国药科大学高层次人才引进项目(3150050052)。

参考文献

- [1] Sayed, M., Li, H. and Bie, C. (2025) Challenges and Prospects of Photocatalytic H₂O₂ Production. *Acta Physico-Chimica Sinica*, **41**, Article 100117. <https://doi.org/10.1016/j.actphy.2025.100117>
- [2] Sun, Y., Han, L. and Strasser, P. (2020) A Comparative Perspective of Electrochemical and Photochemical Approaches for Catalytic H₂O₂ Production. *Chemical Society Reviews*, **49**, 6605-6631. <https://doi.org/10.1039/d0cs00458h>
- [3] Wang, L., Zhang, J., Zhang, Y., Yu, H., Qu, Y. and Yu, J. (2022) Inorganic Metal-Oxide Photocatalyst for H₂O₂ Production. *Small*, **18**, Article 2104561. <https://doi.org/10.1002/sml.202104561>
- [4] Wang, X., Blechert, S. and Antonietti, M. (2012) Polymeric Graphitic Carbon Nitride for Heterogeneous Photocatalysis. *ACS Catalysis*, **2**, 1596-1606. <https://doi.org/10.1021/cs300240x>
- [5] Wang, P., Fan, S., Li, X., Duan, J. and Zhang, D. (2023) Modulating the Molecular Structure of Graphitic Carbon Nitride for Identifying the Impact of the Piezoelectric Effect on Photocatalytic H₂O₂ Production. *ACS Catalysis*, **13**, 9515-9523. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c02565>
- [6] Shiraishi, Y., Kanazawa, S., Sugano, Y., Tsukamoto, D., Sakamoto, H., Ichikawa, S., *et al.* (2014) Highly Selective Production of Hydrogen Peroxide on Graphitic Carbon Nitride (g-C₃N₄) Photocatalyst Activated by Visible Light. *ACS Catalysis*, **4**, 774-780. <https://doi.org/10.1021/cs401208c>
- [7] Wang, Z., Wu, J., Fan, X., Zhang, Y., Xu, Q., Qiu, B., *et al.* (2024) Green and Alcohol-Free H₂O₂ Generation Paired with Simultaneous Contaminant Treatment Enabled by Sulfur/Cyano-Modified g-C₃N₄ with Efficient Oxygen Activation and Proton Adsorption. *Green Chemistry*, **26**, 2730-2739. <https://doi.org/10.1039/d3gc04123a>

-
- [8] Shiraishi, Y., Kofuji, Y., Sakamoto, H., Tanaka, S., Ichikawa, S. and Hirai, T. (2015) Effects of Surface Defects on Photocatalytic H₂O₂ Production by Mesoporous Graphitic Carbon Nitride under Visible Light Irradiation. *ACS Catalysis*, **5**, 3058-3066. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5b00408>
- [9] Gao, T., Zhao, D., Yuan, S., Zheng, M., Pu, X., Tang, L., *et al.* (2024) Energy Band Engineering of Graphitic Carbon Nitride for Photocatalytic Hydrogen Peroxide Production. *Carbon Energy*, **6**, e596. <https://doi.org/10.1002/cey2.596>
- [10] Liu, L.L., Chen, F., Wu, J.H., *et al.* (2023) Synergy of Crystallinity Modulation and Intercalation Engineering in Carbon Nitride for Boosted H₂O₂ Photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **120**, e2215305120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2215305120>
- [11] Song, J., Li, C., Zhang, X., Ma, P. and Zheng, K. (2025) Hydrogen Peroxide Production with Photocatalysts Based on Carbon Nitride: Evaluation Criteria, Reaction Mechanism, Improvement Scheme, and Development Opportunity. *ACS Catalysis*, **15**, 9058-9088. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5c01609>
- [12] Zhao, H., Jin, Q., Khan, M.A., Larter, S., Siahrostami, S., Kibria, M.G., *et al.* (2022) Rational Design of Carbon Nitride for Remarkable Photocatalytic H₂O₂ Production. *Chem Catalysis*, **2**, 1720-1733. <https://doi.org/10.1016/j.checat.2022.04.015>
- [13] Zhang, P., Tong, Y., Liu, Y., Vequizo, J.J.M., Sun, H., Yang, C., *et al.* (2020) Heteroatom Dopants Promote Two-Electron O₂ Reduction for Photocatalytic Production of H₂O₂ on Polymeric Carbon Nitride. *Angewandte Chemie*, **132**, 16343-16351. <https://doi.org/10.1002/ange.202006747>
- [14] Lv, H., Li, Z., Yin, P., Wan, P. and Zhu, M. (2025) Recent Progress on Non-Metallic Carbon Nitride for the Photosynthesis of H₂O₂: Mechanism, Modification and *In-Situ* Applications. *Chinese Chemical Letters*, **36**, Article 110457. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2024.110457>
- [15] Ma, L., Gao, Y., Wei, B., Huang, L., Zhang, N., Weng, Q., *et al.* (2024) Visible-Light Photocatalytic H₂O₂ Production Boosted by Frustrated Lewis Pairs in Defected Polymeric Carbon Nitride Nanosheets. *ACS Catalysis*, **14**, 2775-2786. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c05360>
- [16] Cui, Y., Ding, Z., Liu, P., Antonietti, M., Fu, X. and Wang, X. (2012) Metal-Free Activation of H₂O₂ by g-C₃N₄ under Visible Light Irradiation for the Degradation of Organic Pollutants. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **14**, 1455-1462. <https://doi.org/10.1039/c1cp22820j>
- [17] Li, J., Huang, J., Zeng, G., Zhang, C., Yu, H., Wan, Q., *et al.* (2023) Efficient Photosynthesis of H₂O₂ via Two-Electron Oxygen Reduction Reaction by Defective g-C₃N₄ with Terminal Cyano Groups and Nitrogen Vacancies. *Chemical Engineering Journal*, **463**, Article 142512. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142512>
- [18] Tong, S., Zhang, X. and Yang, P. (2023) g-C₃N₄ Sheet Nanoarchitectonics with Island-Like Crystalline/Amorphous Homojunctions towards Efficient H₂ and H₂O₂ Evolution. *Environmental Research*, **236**, Article 116805. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116805>