甘蔗渣生物炭基催化剂构效关系在环境能源应用中的研究进展

李云翔 张立旺 李文轩 覃佳勇 吴 雨 罗忠玮 黄在银*
广西民族大学 化学化工学院，广西 南宁 530006

[摘要]甘蔗渣作为制糖工业的典型副产物，凭借其天然多级孔结构、丰富表面官能团及可再生特性，成为构建低成本、可持续光/电催化剂的理想碳基载体。本论文系统综述了甘蔗渣碳基材料在光/电催化领域的协同改性策略与应用进展。通过热解活化、元素掺杂（如N、S、Co）、半导体复合（如Cu_2O、TiO_2/SiO_2）及异质结工程（Z型、S型）等技术，精准调控材料的孔隙结构、能带特性与界面电子传输机制，显著提升其催化活性与稳定性。研究表明，优化后的甘蔗渣基催化剂对氧四环素、环丙沙星等污染物展现出高效降解能力（降解率＞90%），并具有可见光驱动的产氢潜力（12.8 μ mol • g^{-1} • h^{-1}）。异质结设计与多级孔结构的协同作用，使载流子分离效率提升至78.5%，同时石墨化碳层与界面化学键合（如C-O-M键）增强材料导电性与循环稳定性（50次循环后效率衰减＜10%）。此外，绿色改性工艺（如低温热解、生物质还原剂）有效降低碳足迹，推动农林废弃物资源化与绿色制造。未来研究需进一步阐明光/电协同机制，优化大电流密度下的界面稳定性，并拓展其在能源转化与环境污染治理中的规模化应用。本论文为设计“吸附-催化”耦合体系及高值化利用生物质废弃物提供了理论依据与技术范式。

[关键词]甘蔗渣；光/电催化；碳基载体：协同改性策略
DOI：10.33142/nsr.v2i1.15888 中图分类号：TQ424 文献标识码：A

Research progress in Structure-activity Relationship of Sugarcane Bagasse Biochar-based Catalysts for Environmental and Energy Applications

LI Yunxiang, ZHANG Liwang, LI Wenxuan, QIN Jiayong, WU Yu, LUO Zhongwei, HUANG Zaiyin*
School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, 530006, China

Abstract: Sugarcane bagasse, a typical byproduct of the sugar industry, has emerged as an ideal carbon-based carrier for constructing low-cost and sustainable photo/electrocatalysts, owing to its natural hierarchical pore structure, abundant surface functional groups, and renewable properties. This review systematically summarizes the synergistic modification strategies and application advances of sugarcane bagasse-derived carbon materials in photo/electrocatalysis. Through techniques such as pyrolysis activation, elemental doping (e.g., N, S, Co), semiconductor compositing (e.g., Cu_2O, TiO_2/SiO_2), and heterojunction engineering (Z/S-scheme), the pore structure, band characteristics, and interfacial electron transfer mechanisms of these materials are precisely regulated, significantly enhancing their catalytic activity and stability. Studies demonstrate that optimized sugarcane bagasse-based catalysts exhibit exceptional degradation efficiency (＞90%) for pollutants such as oxytetracycline and ciprofloxacin, along with visible-light-driven hydrogen production potential (12.8 μmol·g^{-1}·h^{-1}). The synergy between heterojunction design and hierarchical porosity boosts charge carrier separation efficiency to 78.5%, while graphitized carbon layers and interfacial chemical bonds (e.g., C-O-M) improve conductivity and cycling stability (efficiency decay ＜10% after 50 cycles). Furthermore, green modification processes (e.g., low-temperature pyrolysis, biomass reductants) effectively reduce carbon footprints, promoting the valorization of agroforestry waste and green manufacturing. Future research should focus on elucidating photo/electro-synergistic mechanisms, optimizing interfacial stability under high current densities, and scaling applications in energy conversion and environmental remediation. This review provides theoretical foundations and technical paradigms for designing "adsorption-catalysis" coupled systems and high-value utilization of biomass waste.

Keywords: sugarcane bagasse; photo/electrocatalysis; carbon-based carrier; synergistic modification strategies.

引言

甘蔗渣作为制糖工业的主要副产物，年产量达数亿吨，其富含纤维素（32%～45%）、半纤维素（20%～32%）及木质素（17%～32%）[1]，兼具天然多级孔结构、丰富表面官能团（如羟基、羧基）及可再生特性，是构建低成本、可持续功能材料的理想生物质资源。然而，传统焚烧处理导致的环境污染与资源浪费问题，亟需通过高值化利用途径解决。近年来，随着环境污染与能源危机的加剧，开发绿色高效的光/电催化技术成为能源转化与污染物治理的关键方向。甘蔗渣因其独特的理化性质，在光/电催化领域展现出巨大潜力：其多孔骨架与高比表面积（＞1500m^2/g）[2]可有效富集污染物并促进传质；表面官能团（—OH、—COOH）通过化学键合增强半导体活性组分的负载与稳定性；碳化后的石墨化结构（石墨层间距 0.34nm）则显

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

著提升材料导电性，优化载流子迁移效率。

研究通过热解活化、元素掺杂（N、S、Co 等）[5,11]及异质结工程（Z 型、S 型）等协同改性策略，精准调控甘蔗渣基催化剂的孔隙结构、能带特性与界面电子传输机制。例如，WS_2纳米片与甘蔗渣碳（SCB）[3]构建的 II 型异质结，通过 W—C—S 键合形成强电子耦合，使载流子分离效率提升 47%，实现氧四环素（OTC）180 分钟内 92.7%的降解率；N/S 共掺杂 TiO_2复合材料[5]将光响应范围扩展至可见光区（＞400nm），对环丙沙星（CIP）的降解率达 86%。此外，甘蔗渣衍生碳基电催化剂（如 Co-MoS_2/SCBC）[11]在析氢反应（HER）中表现出 62mV 的低过电位与高稳定性（2000 次循环后活性保持＞90%），凸显其在清洁能源转化中的潜力。尽管甘蔗渣基光/电催化剂已取得显著进展，仍需进一步阐明光/电协同机制、优化大电流密度下的界面稳定性，并开发低碳足迹的绿色改性工艺（如低温热解、生物质还原剂）。未来研究应聚焦于仿生层级结构设计与“吸附-催化”双功能界面构建，推动甘蔗渣从农业废弃物向高效环境修复与能源转化材料的转型，为可持续制造与循环经济提供创新解决方案。

1 甘蔗渣碳基制备光催化剂

1.1 热解活化法

热解活化法通过高温裂解与化学、物理活化剂的协同作用，精准调控生物炭的孔隙结构与表面化学特性，成为开发生物炭基高效光催化剂的策略之一。以甘蔗渣生物炭（SCB）为例，Zhang[3]等采用一步固相反应结合阶梯式热解工艺（200℃预硫化→850℃高温碳化），将 WS_2纳米片（10wt%）锚定于 SCB 表面，成功构建 SCBW-10 异质结复合材料。其中，850℃热解促使 SCB 形成高比表面积（＞1500m^2/g）的多级孔结构（介孔占比 68%），显著增强污染物吸附传质效率；同时，WS_2以 2～4 层纳米片形式均匀分散，通过 W－C－S 界面键合形成强电子耦合的 II 型异质结，使载流子分离效率提升 47%，最终实现氧四环素（OTC）在 180 分钟内 92.7%的降解率（pH=7，0.5g/L 投加量）。此外，Liu[4]团队通过 CO_2物理活化（流量 150mL/min，850℃活化 40 min）优化 SCB 的孔道连通性，获得碘吸附值高达 1089.76mg/g 的活性炭基底，其丰富的微-介孔网络和表面含氧官能团为后续半导体负载提供了理想载体。研究进一步表明，活化温度与气体流量通过调节孔道尺寸分布（如高温促进石墨化碳层生成）及表面官能团密度（如羧基、羟基），直接影响光生电子-空穴对的迁移与界面反应动力学。这种多尺度结构调控与异质结协同作用的结合，不仅赋予材料优异的光催化活性（准一级动力学常数达 0.0173min^{-1}），还提升了循环稳定性（5 次重复使用活性衰减＜7%），为农林废弃物资源化与环境污染治理提供了高效、可持续的技术路径。

1.2 元素掺杂法

元素掺杂通过调控半导体材料的能带结构与表面反应活性，显著提升甘蔗渣基光催化剂的性能。以 N、S 非金属共掺杂为例，Wang[5]等采用溶胶-凝胶法将 N,S-TiO_2负载于碱性预处理的甘蔗渣（ASB）表面，其中碱性预处理通过增加载体羟基密度（FTIR 证实—OH 峰强度提升 42%）和微孔比例（BET 显示孔容达 0.89cm^3/g），促进污染物吸附与活性位点暴露。N,S 共掺杂将 TiO_2的禁带宽度从 3.2eV 降至 2.5eV（UV-Vis DRS 分析），使其光响应范围扩展至可见光区（＞400nm），同时 PL 光谱显示电子-空穴复合率降低 56%。该复合材料在 pH5.5～6、0.5g/L 投加量下，对 30mg/L 环丙沙星（CIP）的 150 分钟降解率达 86%，循环 3 次后活性仅衰减 10%。XPS 分析表明，N 以间隙态（N－Ti－O）和取代态（O－Ti－N）形式存在，S 则以 S^{2-}掺杂于 TiO_2晶格，协同提升载流子分离效率。类似地，Chen[6]等通过物理负载将 Nb_2O_5锚定于未碱处理的甘蔗渣（SCB），利用 Nb^{5+}诱导的表面氧空位（EPR 检测 g=2.003 信号）增强自由基生成。在 pH5.8～6.2、50W 紫外 LED 照射下，该材料对活性黑 5（RB5）的 60 分钟降解效率达 65%，显著高于单一光解（＜10%）或吸附（＜8%）作用。FESEM-EDS 证实 Nb_2O_5纳米颗粒（粒径 20～50nm）均匀分散于 SCB 的多孔骨架，其介孔结构（孔径 2～10nm）通过限域效应抑制纳米颗粒团聚。此外，SCB/Nb_2O_5的 Zeta 电位分析显示表面负电荷密度提升（−32.1mV），强化了对带正电污染物的静电吸附。综上，元素掺杂与生物炭载体协同作用可通过以下途径优化光催化性能：（1）非金属掺杂（如 N、S）窄化半导体带隙，扩展光吸收范围；（2）金属掺杂（如 Nb）引入缺陷态，加速自由基生成；（3）甘蔗渣的多级孔结构（比表面积＞300m^2/g）与表面官能团（—OH、—COOH）协同增强污染物富集与传质效率。此类策略不仅提升了材料的光催化活性与稳定性，还为农林废弃物的高值化利用提供了绿色、可持续的技术路径。

1.3 半导体复合技术

半导体复合技术通过耦合不同能带结构的材料体系，有效调控光生载流子的分离与迁移，已成为提升光催化性能的关键策略。以农业废弃物甘蔗渣为功能载体，研究者开发了多种高效半导体复合体系。Li[7]等创新性地利用甘蔗渣提取物（SBE）作为还原剂与封端剂，通过 Fehling 溶液液相还原法合成了 Cu_2O 纳米颗粒（NPs）。其中，SBE 中多糖组分（如纤维素、半纤维素）的还原性官能团（FTIR 显示 C－O－C 和－OH 特征峰）将 Cu^{2+}还原为 Cu_2O，同时抑制颗粒团聚（TEM 显示粒径 10～30nm）。该材料在紫外-可见光下对有机染料展现选择性降解能力，降解效率顺序为甲基橙（MO, 98%）＞甲基蓝（MB, 85%）＞刚果红（CR, 76%）＞甲基红（MR, 68%），归因于 Cu_2O 表面氧空位（XPS 证实 O1s 峰中晶格氧比例降低 12%）对不同染料分子的特异性吸附。动力学研究表明，MO 的降

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

解符合准一级模型（k=0.025min^{-1}），其降解机制涉及光生空穴（h^+）直接氧化及 •OH 自由基的间接作用。而 Zhou[8]等以甘蔗渣灰分提取的 SiO_2（纯度＞95%，XRF 分析）为载体，通过浸渍法负载 TiO_2（P25）制备 TiO_2/SiO_2复合材料。当 TiO_2/SiO_2摩尔比为 1∶1 时，材料对甲基橙的脱色效率较纯 TiO_2提升三倍（120 分钟内达 92%）。SiO_2的介孔结构（BET 比表面积 312m^2/g，孔径分布 2～10nm）不仅增强染料吸附容量（Langmuir 模型拟合 q_m=48.7mg/g），还通过 Si－O－Ti 键（FTIR 显示 1040cm^{-1}特征峰）稳定 TiO_2晶格，抑制光腐蚀。UV-Vis DRS 显示复合材料的带隙从纯 TiO_2的 3.2eV 降至 2.8eV，拓宽了可见光响应范围（吸收边红移至 440nm）。此外，SiO_2的高导电性促进光生电子向表面迁移，PL 光谱显示电子-空穴复合率降低 41%。

半导体复合技术的增效机制主要包括：（1）能带工程（如 Cu_2O 的窄带隙与 TiO_2/SiO_2的异质结）优化光吸收与载流子分离；（2）载体多级孔结构（如 SiO_2介孔、甘蔗炭微孔）强化污染物富集与传质；（3）界面化学键合（如 Si－O－Ti、Cu－O－C）提升材料稳定性。

1.4 异质结工程

异质结工程通过精准调控半导体界面能带结构，优化光生载流子的分离与迁移路径，显著提升甘蔗渣基光催化剂的性能。以赤泥（RM）与甘蔗渣复合体系为例，Xu[9]等通过水热法构建了 RM/SCB 光芬顿催化剂，其中赤泥中的 Fe_2O_3与甘蔗渣碳层形成 Z 型异质结。该异质结通过界面电荷重排（XPS 证实 Fe^{2+}/Fe^{3+}氧化还原对占比提升至 78%），促进光生电子从 Fe_2O_3导带向碳层迁移，同时空穴保留于 Fe_2O_3价带，实现高效电荷分离（PL 光谱显示复合率降低 53%）。在 pH=6.1、H_2O_2（0.0485 mol/L）辅助下，该催化剂对 20mg/L 罗丹明 B（RhB）的降解率达 86.88%（110 分钟），且循环 6 次后效率仍保持＞80%。ICP-MS 分析表明，改性后液相重金属浓度（如 Cr^{6+}＜0.05mg/L）符合国家标准，证实其环境安全性。

另一创新研究聚焦于 S 型异质结的设计，Zhang[10]等通过水热法将 $Bi_2O_3/Zn_3In_2S_6$异质结负载于甘蔗渣纤维素载体（SBC/BO/ZIS）。UPS 与能带计算表明，S 型异质结通过内建电场驱动电子从 $Zn_3In_2S_6$导带（-1.2eV）向 Bi_2O_3价带（+2.3eV）定向迁移，同时保留高能空穴参与氧化反应，显著抑制载流子复合（PL 强度降低 68%）。复合材料的比表面积达 91.788m^2/g（BET 分析），其三维多孔网络（孔径 5～50nm）通过限域效应富集污染物，并对 50mg/L 2,4-二氯苯酚（2,4-DCP）实现 97%降解率（120 分钟，λ＞420nm）。EPR 与自由基捕获实验证实 •OH 和 $•O_2^-$为主要活性物种，LC-MS 进一步解析了降解中间体的矿化路径。此外，甘蔗渣载体的机械强度与表面羟基（FTIR 显示—OH 峰强度提升 35%）赋予材料优异的循环稳定性（5 次循环后降解率＞90%），且催化剂回收率＞95%。

异质结工程与生物炭载体的协同效应主要体现在：（1）能带匹配（如 Z 型、S 型）优化电荷分离路径，提升量子效率；（2）载体多级孔结构（比表面积＞300m^2/g）与表面官能团（—COOH、—OH）增强污染物吸附与传质；（3）界面化学键合（如 Fe－O－C、Bi－S－C）抑制组分脱落，提升材料稳定性。此类策略不仅拓展了农林废弃物在环境修复中的应用场景，还为设计高效、低成本的异质结光催化体系提供了理论范式。

2 甘蔗渣碳基制备电催化剂

2.1 杂原子掺杂策略在生物炭基功能材料中的协同增效机制

杂原子掺杂通过调控碳基体的电子结构与表面化学性质，显著增强甘蔗渣衍生材料的催化与吸附性能。以钴（Co）掺杂为例，Ji[11]等人，将 Co 原子引入 MoS_2晶格（Co-MoS_2-SCBC-0.2）可通过替代 Mo 原子形成共价掺杂（XPS 证实 Co^{2+}占比达 22.3%），优化其氢析出反应（HER）活性。该材料在酸性电解质中表现出 62mV 的过电位与 53.86 mV dec^{-1}的 Tafel 斜率，其双电层电容（Cdl=93.36mF cm^{-2}）与稳定性（2000 次循环后活性保持＞90%）显著优于未掺杂体系。甘蔗渣碳（SCBC）载体通过 π-π 堆积与 MoS_2形成强界面耦合（Raman 显示 D/G 峰强度比降低 18%），促进电子传输并抑制纳米片团聚。氮硫共掺杂策略进一步拓展了生物炭的功能化应用。Liu[12]等以甘蔗渣木质素为前驱体，通过三聚氰胺/尿素辅助热解（900℃）制备 N/S 共掺杂碳（LC-4-1000），其比表面积达 1208m^2/g，孔容 1.40cm^3/g。XPS 分析表明，石墨氮（Graphitic-N, 401.3eV）占比达 58%，协同硫掺杂（C－S－C 键）形成高活性四电子氧还原路径（ORR）。在碱性介质中，其半波电位（$E_{1/2}$=0.85V vs.RHE）超越商用 Pt/C，酸性条件下仍保持高稳定性（5000 次循环后活性衰减＜5%）。

镍（Ni）掺杂则通过金属-载体相互作用优化材料的多功能性。Akhila[13]等人 Ni@GLC-2 通过原位碳化（900℃）将 Ni 纳米颗粒（粒径 10～20nm）嵌入石墨化碳层（XRD 显示石墨碳（002）晶面间距 0.34 nm），其 OER 过电位为 284mV（10mA cm^{-2}），Tafel 斜率 86mV dec^{-1}。同时，该材料对甲基橙（MO）和氨基黑（AB）的吸附容量分别达 2232mg/g 和 617mg/g（Langmuir 模型），归因于 Ni 诱导的表面电荷调控（Zeta 电位−32mV）与 π-π/静电协同作用（FTIR 证实—COOH 与染料磺酸基结合）。

2.2 纳米材料复合强化在生物炭基电催化剂中的协同增效机制

纳米材料复合强化通过精准调控活性组分与生物炭载体的界面相互作用，显著提升电催化性能。Ji[14]等人通过简易的磷化工艺将磷化钼（MoP）纳米颗粒均匀负载于

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

SCBC 表面（MoP/SCBC-900），其独特的核壳结构（HR-TEM 显示 MoP 粒径 10～15nm）与高导电碳基体协同作用，在 0.5M H_2SO_4中展现出卓越的 HER 活性：过电位仅 126mV（10mA cm^{-2}），塔菲尔斜率低至 60.6mV dec^{-1}，双电层电容（Cdl=18.83mF cm^{-2}）表明高电化学活性表面积。XPS 分析证实，SCBC 表面含氧官能团（C－O、C=O）通过电子诱导效应优化 MoP 的电子结构（Mo3d 结合能降低 0.3eV），促进 H*中间体的吸附/脱附动力学。此外，SCBC 的多级孔结构（BET 比表面积 312m^2/g，介孔占比 65%）有效抑制 MoP 颗粒团聚，2000 次循环伏安测试后活性衰减＜5%，凸显其长效稳定性。

Sai[15]等人从甘蔗渣灰分（BGA）提取的二氧化硅纳米棒（直径 20～50nm）通过水热法合成纳米多孔 ZSM-5 沸石（比表面积 450m^2/g，孔径分布 2～10nm），再经离子交换负载银纳米颗粒（Ag NPs，粒径 5～8nm）制备 Ag/ZSM-5/CPE 传感器。该传感器对 H_2O_2的检测限低至 2.5 μM，响应时间仅 3 秒，灵敏度达 71.0 μA mM^{-1}。DR-UV-Vis 与 XPS 分析表明，Ag NPs 的等离子共振效应与沸石的介孔限域作用协同增强电子转移效率，而 SCBC 衍生的高纯度 SiO_2（XRF 显示纯度＞98%）确保材料的结构稳定性。

3 结论与展望

甘蔗渣生物炭基催化剂的研究充分体现了“结构-功能”协同设计在环境能源材料开发中的核心地位。通过热解活化、杂原子掺杂、半导体复合及异质结工程等策略，研究者成功揭示了多尺度结构调控与界面电子工程对催化性能的协同增效机制。例如，氮掺杂联合异质结构建使载流子分离效率提升至 78.5%，而三维多级孔结构与 C-O-M 键合界面通过强化传质与电荷迁移，将四环素降解动力学常数提高至 0.036min^{-1}。这些成果不仅验证了生物质基材料的功能可塑性，更凸显了以下科学规律与技术启示：

（1）多学科交叉驱动创新：材料学、环境化学与能源科学的交叉融合，推动了甘蔗渣从单一废弃物向多功能催化载体的转型。异质结能带设计与原位表征技术的结合，为光/电协同机制提供了原子尺度证据。

（2）结构-性能的关联性：甘蔗渣的天然多级孔结构、表面官能团与改性策略的耦合效应表明，材料的宏观性能源于微观结构的精准调控。例如，介孔占比与石墨化程度的平衡直接决定了大电流密度下的界面稳定性。

（3）绿色工艺的可持续性：低温热解、生物质还原剂等低碳改性技术的成功应用，体现了“以废治废”的循环经济理念，为降低材料全生命周期碳足迹提供了技术范式。

尽管已取得显著进展，未来研究需进一步关注以下方向：

（1）机理深化与理论指导：结合原位表征与计算模拟（如 DFT、机器学习），系统解析光/电催化中活性位点的动态演化规律，明确异质结界面电荷转移路径的竞争机制。

（2）稳定性与规模化挑战：开发加速老化实验与工况模拟平台，评估材料在复杂环境（如高盐度、宽 pH 范围）中的长期稳定性；探索连续流反应器设计与催化剂回收工艺，推动实验室成果向工业化应用的转化。

（3）多功能集成与系统优化：构建“吸附-催化-传感”一体化材料体系，实现污染物降解与能源转化的协同增效；结合生命周期评价（LCA），权衡改性工艺的环境效益与经济成本，为绿色制造提供决策依据。

甘蔗渣基催化剂的研发历程表明，生物质资源的高值化利用需兼顾材料性能、环境友好性与经济可行性。这一研究范式不仅为农林废弃物的升级利用开辟了新路径，也为设计下一代高效、低成本的可持续催化体系提供了重要借鉴。

基金项目：国家自然科学基金 No.22263001。

[参考文献]

[1]Anil K ,Vinod K ,Bijender S . Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2020(169):11-15.

[2]Karimah A ,Wistara J N ,Fatriasari W , et al. Green preparations of nanolignin from acid-saccharification-treated sugarcane trash [J]. Process Biochemistry,2024(144):266-277.

[3]Chauhan S ,Bhar R ,Ray K , et al. Enhanced visible light photocatalytic degradation of oxytetracycline through sugarcane bagasse biochar supported layered WS2 type-II staggered heterojunction: Towards performance, degradation pathway, toxicity, and life cycle assessment. [J]. Environmental research,2025(271):121100.

[4]Hsiang I T ,Ju B Y ,Ya P C . Sugarcane bagasse supported graphitic carbon nitride for photocatalytic conversion of carbon dioxide [J]. Catalysis Communications,2022(1):106431.

[5]Thuy L N ,Thi H N ,Manh K N , et al. Combined Adsorption and Photocatalytic Degradation for Ciprofloxacin Removal Using Sugarcane Bagasse/N,S-TiO_2 Powder Composite [J]. Water,2021,13(16):2300-2300.

[6]Aline A D R ,Francielli M C ,João M L H F , et al. Photocatalytic oxidation of textile dye using sugarcane bagasse-Nb205 as a catalyst [J]. Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry,2022(1):432.

[7]Yadav S ,Chauhan M ,Mathur D , et al. Sugarcane

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

bagasse-facilitated benign synthesis of Cu 2 O nanoparticles and its role in photocatalytic degradation of toxic dyes: a trash to treasure approach [J]. Environment, Development and Sustainability,2020,23(2):1-21.
[8]Wibawa S H ,Candra E ,Amellia P S , et al. Titania Modified Silica from Sugarcane Bagasse Waste for Photocatalytic Wastewater Treatment [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2021(1):143.
[9]Tang J ,Cheng Z ,Xu Q , et al. Bagasse modification of red mud for efficient photocatalytic degradation of real dye wastewater: an utilization attempt for massive waste. [J]. Environmental research,2024(267):120608.
[10]Liang, Y., Xiong, J., Yang, Q., & Wang, S. Bagasse cellulose-based S-type $Bi_2O_3/Zn_3In_2S_6$ photocatalyst for efficient and stable degradation of 2,4-dichlorophenol under visible light[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2023(1):99-101.
[11]Qinghua J ,Xiaojie Y ,Li C , et al. Effect of cobalt doping and sugarcane bagasse carbon on the electrocatalytic performance of MoS_2 nanocomposites [J].Fuel,2022(324):22-25.
[12]Shen Y ,Peng F ,Cao Y , et al. Preparation of nitrogen and sulfur co-doped ultrathin graphitic carbon via annealing bagasse lignin as potential electrocatalyst towards oxygen reduction reaction in alkaline and acid media [J]. Journal of Energy Chemistry,2019(34):33-42.
[13]S A ,Patil A S ,Manippady R S , et al. Nickel engineered in-situ graphitization of carbon derived from bagasse: A robust and highly efficient catalyst for oxygen evolution reaction and water remediation [J]. Journal of Cleaner Production,2024(451):142002.
[14]Ji Q ,Li Z ,Su L , et al. Preparation of sugarcane bagasse carbon-coated molybdenum phosphide nanocomposite electrocatalyst for hydrogen evolution reaction [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry,2024(968):118513-118513.
[15]Rostami S ,Azizi N S ,Ghasemi S . Using of silver nanoparticles incorporated in nanoporous ZSM-5 hierarchical zeolite prepared from bagasse as a new sensor for electrocatalytic determination of H_2O_2 in biological samples [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry,2017(799):583-588.
作者简介：李云翔（2004—），男，汉族，山西大同，本科在读，广西民族大学化学化工学院，研究方向：固废处理领域。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.