引用:赵亦倩,李蕊,刘艳萍,等. C_3N_5基光催化材料的合成、改性及其光催化应用研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2026,39(6):896-909.

Citation: Zhao Yiqian, Li Rui, Liu Yanping, Li Shijie. Progress in the synthesis, modification and photocatalysis applications of C_3N_5-based photocatalytic materials[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(6): 896-909.

文章编号 1672-6634(2026)06-0896-14 **DOI** 10.19728/j.issn1672-6634.2026020003

C_3N_5 基光催化材料的合成、改性及其光催化应用研究进展

赵亦倩,李蕊,刘艳萍,李世杰

(浙江海洋大学 国家海洋设施养殖工程技术研究中心,浙江 舟山 316022)

摘要 光催化是一种在环境治理和清洁能源获取中具有重要意义的技术,尤其在水体污染物去除方面表现出良好的应用潜力。该技术大规模应用的关键在于开发出高效的光催化剂,目前,科研工作者已开发出多种光催化剂用于此类催化反应。在系统梳理 C_3N_5 分子晶体的结构特征与合成方法的基础上,围绕其性能提升策略展开讨论,重点分析通过形貌与孔结构调控、杂原子掺杂、缺陷工程和异质结构构建等方式改善材料光吸收能力、电荷分离效率与反应活性的研究进展,并进一步结合其在环境修复领域中有机污染物降解以及在能源转化领域中光催化产氢、CO_2 还原和 H_2O_2 合成等应用实例,比较不同结构调控手段在各类反应体系中的作用差异与内在联系,最后对 C_3N_5 基光催化材料的发展方向进行总结与展望,同时分析其在实际光催化应用中仍然面临的关键问题与挑战。

关键词 C_3N_5;光催化;改性策略;环境修复

中图分类号 O644.1;O643.36 **文献标志码** A

Progress in the synthesis, modification and photocatalysis applications of C_3N_5-based photocatalytic materials

ZHAO Yiqian, LI Rui, LIU Yanping, LI Shijie

(National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract Photocatalysis is a key technology in environmental remediation and clean energy production, demonstrating significant potential for removing pollutants from aqueous systems. The key to the large-scale application of this technology lies in the development of highly efficient photocatalysts. Currently, researchers have developed a variety of photocatalysts for catalytic reactions. This article systematically summarizes the characteristics of the molecular crystal structure and synthesis methods of C_3N_5, subsequently focusing on the latest advances in performance enhancement strategies. In particular, it clarifies the role of improvements achieved through morphology and porous structure control, heteroatom doping, defect engineering, and heterostructure construction in enhancing light absorption efficiency, charge separation efficiency, and catalytic activity. Furthermore, it analyses the applications of C_3N_5 in environmental

收稿日期:2026-02-23

基金项目:国家自然科学基金项目(U1809214);浙江省自然科学基金项目(LTGN23E080001)资助

通信作者:李世杰,男,汉族,博士,副研究员,浙江省高校领军人才,研究方向:高级氧化技术应用于环境修复,E-mail:lishijie@zjou.edu.cn。

remediation fields, such as the degradation of organic pollutants, and in energy conversion fields, including photocatalytic hydrogen evolution, CO_2 reduction, and H_2O_2 generation. It compares and contrasts the relationships and differences between structural control strategies and the reaction systems involved. Finally, it outlines the future prospects for C_3N_5-based photocatalytic materials and discusses the challenges that remain to be solved for practical photocatalytic applications.

Keywords　C_3N_5; photocatalysis; modification strategy; environmental remediation

0　引言

随着工业化和城市化进程的持续推进，全球能源紧缺与环境污染问题日益加剧，水体和大气中难降解有机污染物的排放不断增加，对生态系统平衡和人类健康已持续构成威胁[1]。传统污染物治理方法如吸附、絮凝和生物降解等在实际应用中常受到处理效率有限、易引发二次污染或难以实现污染物完全矿化等因素制约。因此，能够生成强氧化活性物种并促进污染物深度转化的高级氧化技术逐渐成为研究重点，在此背景下，开发兼具高效与绿色可持续性的光催化材料已成为环境修复与太阳能转化领域的重要研究方向[2-4]。光催化技术依托半导体材料在光照条件下产生的光生电子(e^-)和空穴(h^+)通过活化分子氧或水，生成羟基自由基(·OH)和超氧自由基($\cdot O_2^-$)等活性物种，最终实现有机污染物的降解和矿化[5]。该治理技术具有能耗低、清洁高效以及可利用太阳能等显著优势，但该技术实际应用仍受限于材料本身，主要面临光吸收范围窄、载流子复合率高以及自身稳定性不足等挑战[2,6]。基于此，聚合碳氮化物因其原料来源广泛、化学稳定性好且能带结构可调节而受到广泛关注[1]。其中新兴的富氮碳氮化物 C_3N_5，相较于传统 g-C_3N_4 具有更高的含氮量、更丰富的 π-π 共轭结构以及更窄且可调的带隙，在可见光响应和还原能力方面表现出明显优势[1,5,7]。通过选择合适的前驱体和调控热缩聚条件，可获得具有不同结构构型和形貌特征的 C_3N_5[8-10]，并可进一步结合杂原子掺杂、缺陷工程、异质结构建和界面调控等策略，实现对光吸收、载流子分离与迁移以及表面反应动力学的协同优化[3-4,11]。已有大量研究表明，C_3N_5 及其衍生材料在有机污染物降解[12-13]、抗生素与 NO_x 净化[14-15]、水分解产氢[16-17]、CO_2 还原[18-19]和 H_2O_2 合成[6,20]等反应中均展现出优良性能，已逐渐发展为一个具有独立研究价值的重要光催化材料体系[2-4]。

1　理论背景

1.1　C_3N_5 的组成与结构特性

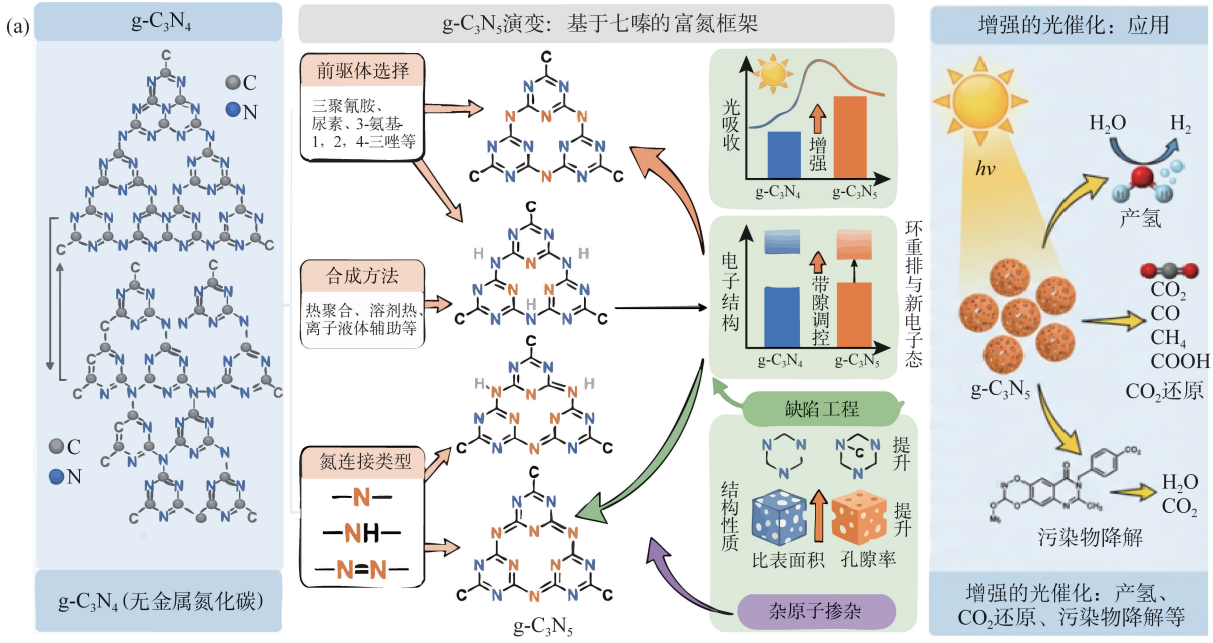
C_3N_5 是一种新近受到关注的富氮碳氮化合物，其基本结构特征通常可视为由两个庚嗪或三嗪的含氮芳香单元通过偶氮键(—N＝N—)和亚氨基(—NH—)等相连，如图 1(a)所示，碳氮比由 g-C_3N_4 的 3∶4 提升至 3∶5[2-3,7]。氮含量的增加不仅引入了更多 Lewis 碱性位点和潜在配位中心，同时也增强了骨架内的 π-π 共轭程度，能带结构发生明显变化，使其带隙普遍缩小到约 2.2 eV，可见光吸收边发生明显红移[1,5]。如图 1(b)所示，在制备过程中，采用不同前驱体(如 3-氨基-1,2,4-三氮唑、三聚氰胺、乙二胺等)及不同的热聚合条件，可形成不同的分子骨架构型和形貌特征[9-10]，且由于连接方式、层间堆积形式和缺陷分布的差异，这些结构变化会进一步影响带隙宽度、能带位置和表面活性位点密度[8,21]。

1.2　C_3N_5 光催化机理与半导体特性

在可见光条件下，C_3N_5 作为一种窄带隙聚合物半导体，能够有效吸收可见光能量并激发价带(VB)中的 e^- 跃迁至导带(CB)，从而产生光生 $e^-—h^+$ 对[2,6]。如图 2 所示，由于其富氮、π-π 共轭程度较高的骨架结构[11]，C_3N_5 在光激发后可在一定程度上实现载流子的空间分离，其中光生 e^- 沿 CB 迁移至材料表面参与还原反应，而 h^+ 则保留在 VB 参与氧化过程[14]。在反应过程中，由光生 e^- 和 h^+ 进一步诱导生成的 $\cdot O_2^-$ 和 ·OH 等活性物种共同作用，可持续攻击有机污染物分子，逐步破坏其共轭体系和官能团结构，使其转化为小分子产物，最终实现向 CO_2 和 H_2O 的完全矿化[13]。总体而言，C_3N_5 的光催化反应以可见光激发为起点，通过载流子迁移及多种活性物种的协同参与，实现了对有机污染物的高效降解与深度矿化[5]。

C_3N_5 属于 n 型半导体，在可见光照射下可以激发产生 VB h^+ 和 CB e^-，其中光生 e^- 能够参与多种还原反应，如将 O_2 还原为 $\cdot O_2^-$ 或 H_2O_2[22]、将 H^+ 还原为 H_2，以及推动 CO_2 的还原反应，而 h^+ 则主要用于氧化有机污染物或活化水分子生成 ·OH 等活性物种。相比传统 g-C_3N_4，C_3N_5 通常具有更负的 CB 位置和略

微更正的 VB 位置,这种能带结构有利于增强还原能力并促进产氢和 CO_2 还原等反应,同时仍能够保持对有机污染物具有足够的氧化驱动力[13-14,16,18]。



注:(a) 展示 g-C_3N_4 向富氮 g-C_3N_5 的结构调控路径及光催化性能优化策略;(b) 为 CO_2 在材料表面的吸附构型与变形电荷密度分布,原子色标:C(灰)、N(蓝)、S(黄)、O(红)、H(白),黄/粉色云代表电子富集,绿/紫色云代表电子耗尽。

图 1 富氮介孔石墨相氮化碳的合成、结构及无金属无溶剂 CO_2 环加成反应机理示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the synthesis, structure, and metal-free solvent-free CO_2 cycloaddition mechanism of nitrogen-rich mesoporous graphitic carbon nitride

然而,C_3N_5 在实际应用中仍不可避免地面临光生载流子复合较快、比表面积有限以及界面反应位点不足等问题[6,23],从而制约其光催化效率。基于此,近年来研究者通过带隙调控、缺陷和原子掺杂以及界面结构设计等手段,精细调控 C_3N_5 电子结构与微观界面以拓展其光吸收范围、同时有效抑制 e^-/h^+ 的复合并进一步加快表面氧化还原反应(ORR)动力学,进而显著提升其在污染物降解、光催化产 H_2 和 CO_2 还原等反应中的整体性能[24-25]。

2 C_3N_5 的合成方法与性能提升策略

2.1 C_3N_5 合成方法

2.1.1 *经典热缩聚法*。热缩聚合成法作为最直接、应用最广泛的合成方法,仍是大多数 C_3N_5 材料制备的首选。如图 3 所示,此法奠定了合成 C_3N_5 材料研究的基石[3]。此法常用的前驱体包括 3-氨基-1,2,4-三氮唑、三聚氰胺或含三嗪单元的有机胺等,在惰性气氛(500~650 ℃)下通过一步或多步煅烧,之后发生分子间脱水、脱氨等缩合反应最终形成以七嗪或三嗪单元为基础的富氮共轭骨架,即聚合物氮碳化物 C_3N_5[5,9]。为了更好地控制缩合反应过程,减少副反应并调节材料的层间堆积方式和结晶度,研究者采用了逐步升温或分

段热缩聚的合成策略，但该方法得到的产物多为介孔棒状结构，容易造成比表面积较低、光生载流子复合严重和活性位点暴露不足等问题[10]，因此在此基础上进一步引入 KCl、KI 等盐类作为反应介质以提供稳定的传热环境并在聚合过程中诱导离子嵌入和结晶。该策略能够显著增强光催化活性，最终表现为拥有强于棒状 C_3N_5 的光生载流子迁移能力[10]。

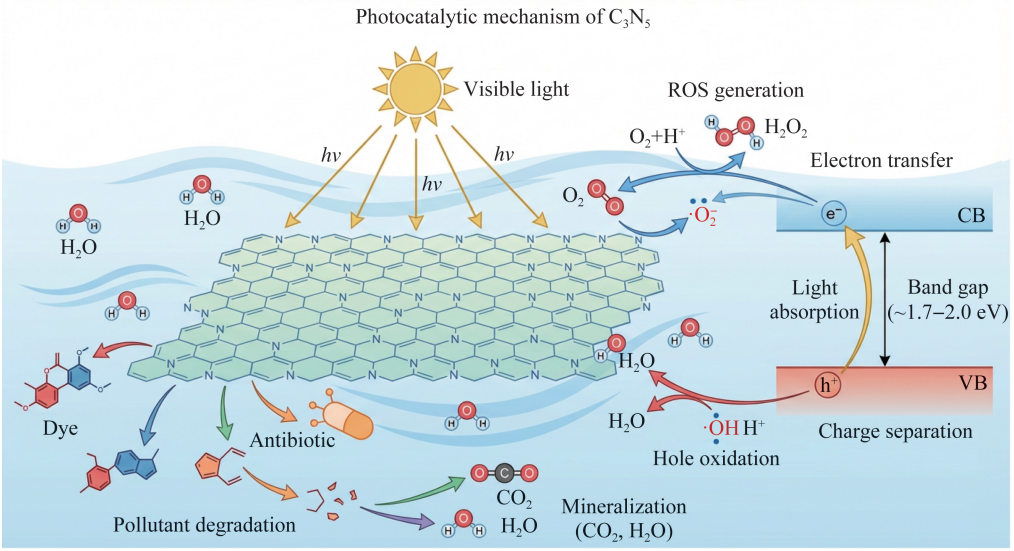


图 2　C_3N_5 在可见光下的光催化机理示意图

Fig. 2　Photocatalytic mechanism of C_3N_5 under visible light irradiation

2.1.2　溶剂热法。如图 3 所示，与基于高温气相反应的方法不同，溶剂热法为在液相和相对温和条件下构筑高精度 C_3N_5 纳米结构提供了一条有效途径[23]。在密闭反应体系中，溶剂在高温高压环境下表现出特殊性质，这种性质可使前驱体发生溶解及重结晶反应，从而实现对材料结构的精细调控。该方法的核心优势在于能够直接获得结晶度较高、形貌分布均一的纳米材料。例如超薄纳米片、纳米带或纳米量子点[8]。这些低维纳米结构在增加比表面积和暴露更多活性位点的同时，其较完整的单晶结构也有利于光生载流子的有效分离和快速传输，从而为光催化性能的提升奠定基础[23]。

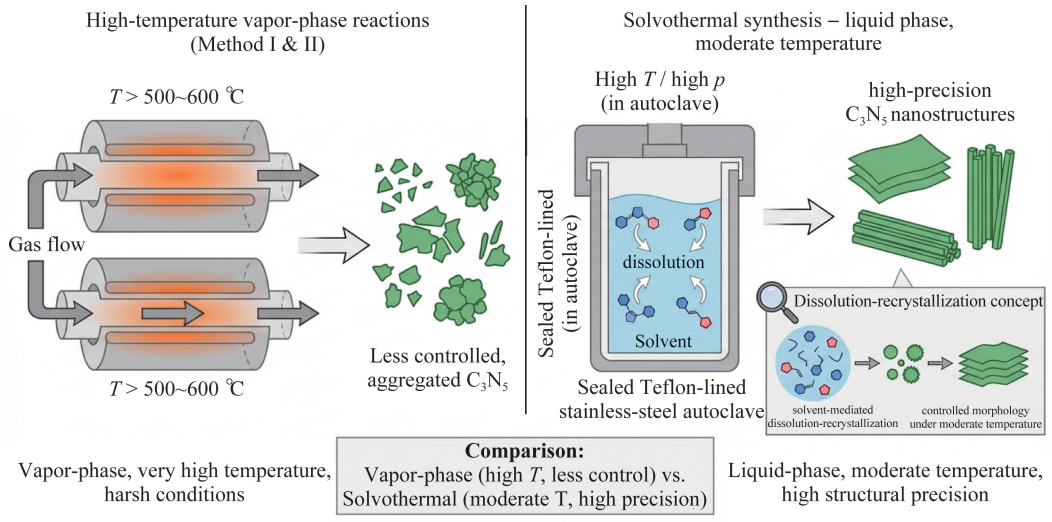


图 3　气相高温反应与溶剂热法制备 C_3N_5 纳米结构的对比示意图

Fig. 3　Comparison of vapor-phase high-temperature reaction and solvothermal synthesis for preparing C_3N_5 nanostructures

2.1.3　模板法。模板法被广泛用于构筑结构可控的介孔 C_3N_5，被认为是实现其孔结构精细调控的有效手段[26]。如图 4 所示，该方法通常选用具有规则纳米孔道或特定形貌的材料（如介孔二氧化硅 SBA-15）为模板，通过前驱体浸渍、热缩聚及后续模板去除等过程，获得具有较高比表面积和有序孔道结构的介孔 C_3N_5[27]，该结构有利于反应物分子的扩散和光的多次散射，从而显著增加可参与反应的表面活性位点，并在

一定程度上提升材料的光吸收与利用效率[2]。

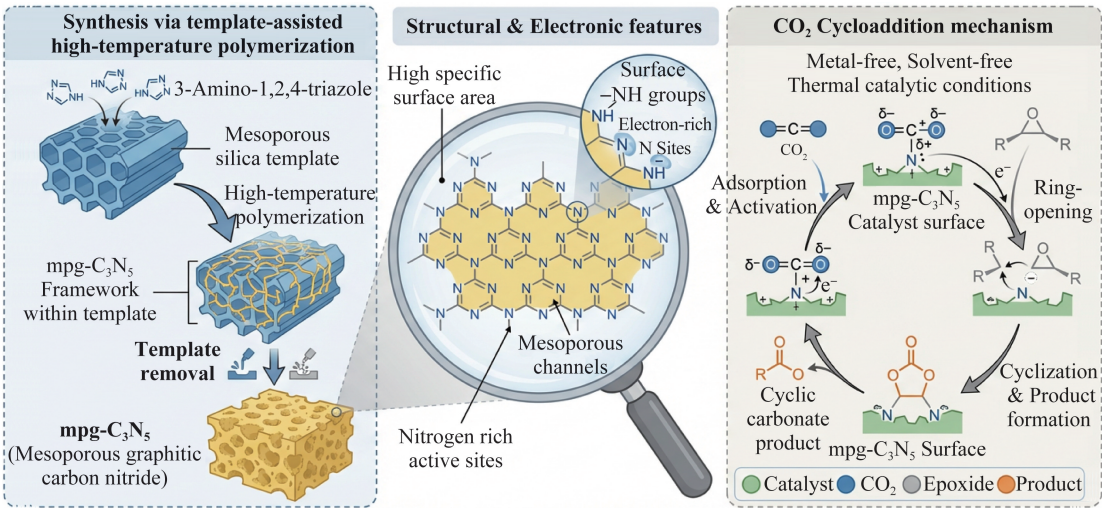


图 4　C_3N_5 的模板辅助高温聚合法合成过程及结构与电子特征示意图

Fig. 4　Schematic illustration of the template-assisted high-temperature polymerization synthesis and structural/electronic features of C_3N_5

2.2　形貌与介孔结构调控

通过调控前驱体、升温速率、反应条件及模板剂类型，可获得不同维度与介孔结构的 C_3N_5[2,4]。

介孔棒状与二维纳米片结构：如图 5 所示，通过一步或两步热缩聚结合造孔的方法，在合成过程中引入气泡孔结构或利用碱性和氧化性气氛进行处理，可以获得具有丰富孔结构的多孔 C_3N_5 纳米片[10,23]。与块体材料相比，这种纳米片具有更大的比表面积和更短的载流子迁移路径，有助于提升光催化反应效率。因此多孔 C_3N_5 纳米片在染料和抗生素等有机污染物的光催化降解反应中通常表现出更快的降解速率和更高的矿化程度[12]。

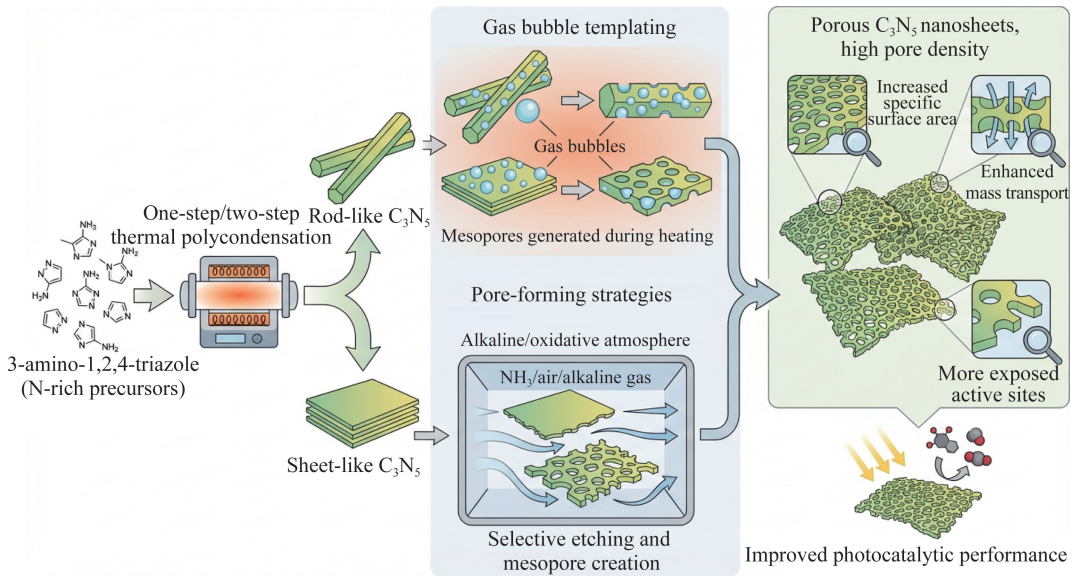


图 5　介孔棒状与纳米片状 C_3N_5 的制备及成孔策略示意图

Fig. 5　Schematic illustration of the preparation and pore-forming strategies for mesoporous rod-like and sheet-like C_3N_5

超薄二维纳米片：通过预处理可获得超薄 C_3N_5 纳米片(图 6)，可以提高比表面积并暴露更多的活性位点，从而在产氢和有机物降解反应中获得更高的量子效率[5,17]。

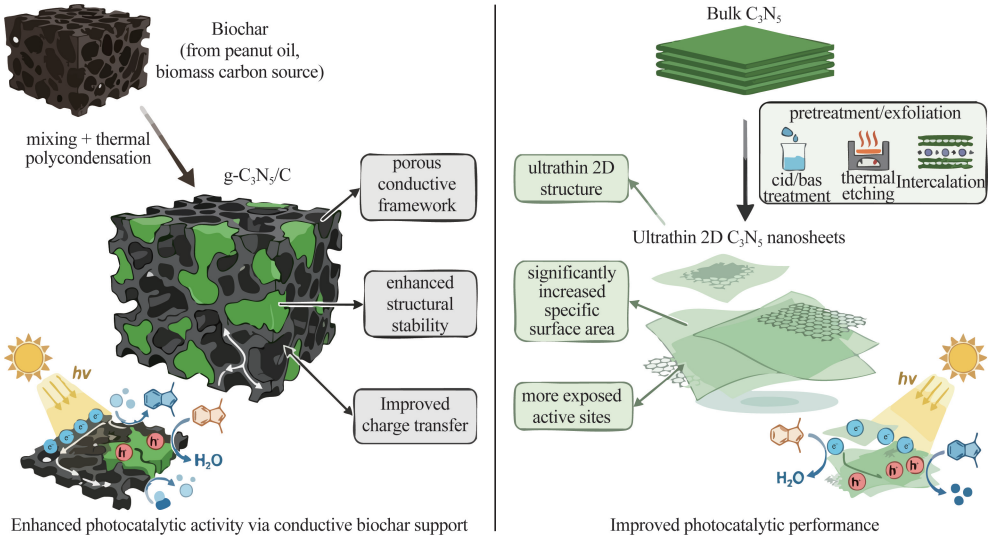


图 6　生物炭负载 C_3N_5 复合材料与超薄二维 C_3N_5 纳米片的制备及光催化性能示意图

Fig. 6　Schematic illustration of biochar-supported C_3N_5 composites and ultrathin 2D C_3N_5 nanosheets for enhanced photocatalytic performance

2.3　元素掺杂与缺陷工程

非金属掺杂是最常见的调控手段之一。S、B 和 P 等掺杂可通过引入新的 p 轨道或调节局部电荷分布来缩窄带隙、增强光吸收并构建中间能级[9]。例如，S 掺杂的 C_3N_5 在 NO 去除与 H_2O_2 光催化体系中表现出更宽的可见光响应范围和更长的光生载流子寿命[15]〔图 7(a)〕；此外，P 掺杂的 C_3N_5 可在碳位形成 P—N/P═N 配位结构，由此引入 P 的 2p 轨道，从而来增大比表面积、增强光吸收并提升 e^-/h^+ 分离效率，实现对盐酸四环素(TC)等抗生素的快速降解[28]〔图 7(b)〕；值得一提的是，B 掺杂则有助于促进 e^- 在特定活性位点的集中分布和提升 N_2 活化能力，为光催化固氮提供可能[24,29]〔图 7(c)〕。

金属和碱金属掺杂是调控 C_3N_5 电子结构与反应性能的常用手段(图 8)。这种方法既能够通过改变费米能级提高材料导电性，促进光生载流子的传输，也能够与缺陷工程协同作用引入氰基基团(—CN)和氮空位，从而改善氧分子的吸附特性及 ORR 动力学[30]。例如，K^+ 掺杂的 C_3N_5 在碱性和高温条件下易形成较高密度的—CN 和氮空位，最终在光催化反应中表现出显著提升的 H_2O_2 产率[20]；而 Co 掺杂的 C_3N_5 则在过硫酸盐(PMS)活化和抗生素降解体系中表现出更高效的 e^- 转移过程和多种活性物种协同参与的反应特征。

缺陷工程的调控中，—CN 基团和 N 空位是两类关键缺陷：单独存在时可改善光吸收与光生载流子分离，而双缺陷的 C_3N_{5-x}-CN 可以显著增强内建电场效应，在超声-光协同体系中表现出优异的光催化性能，实现抗生素降解与 H_2O_2 生成的协同一体化[6]。

总体而言，掺杂与缺陷工程相互交织，共同重构局域电子结构与极化行为，优化带隙与中间能级态，从而提高可见光利用率与界面反应活性[9]。

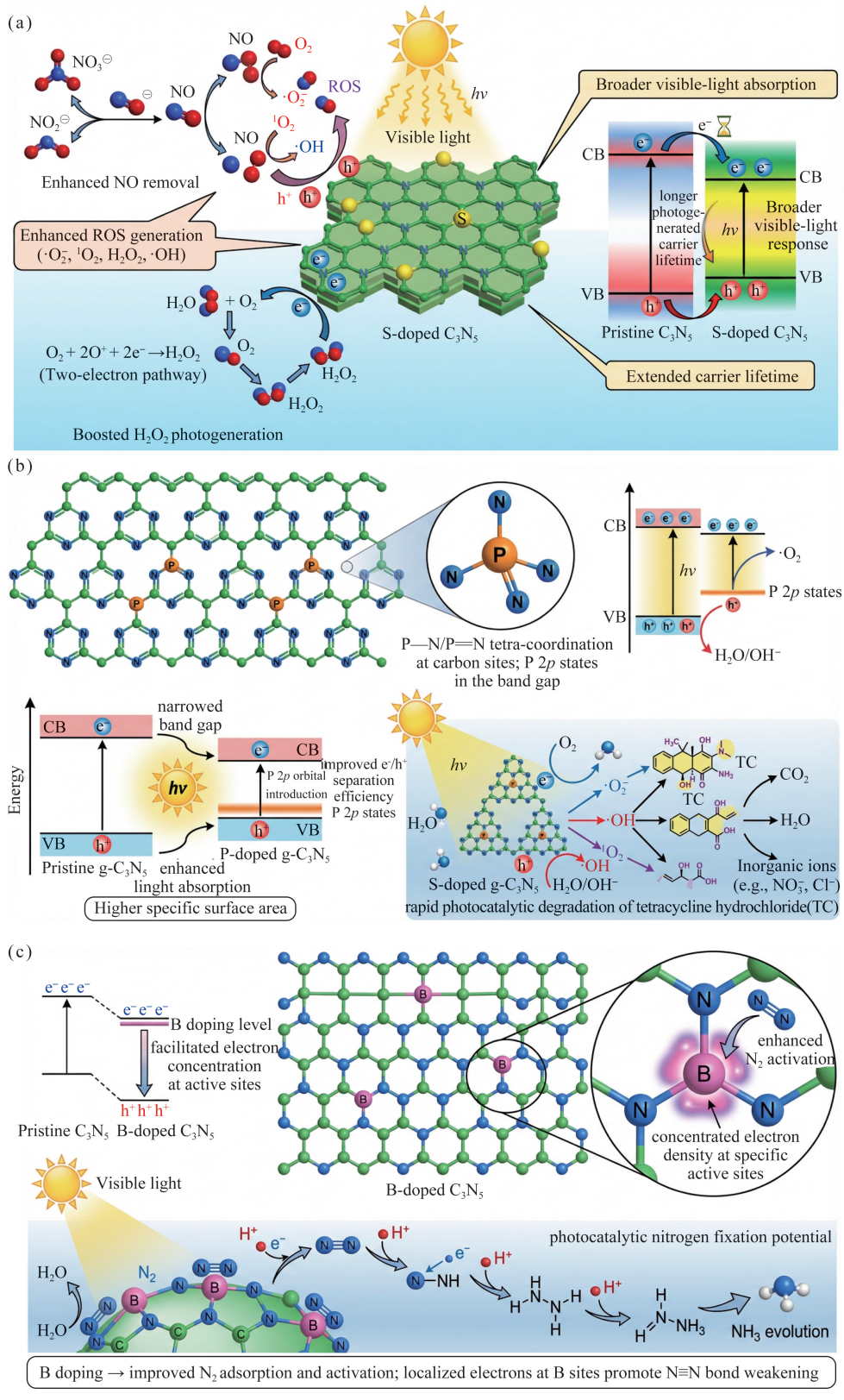
2.4　异质结构筑与界面工程

为从根本上抑制 e^-/h^+ 复合并兼顾强氧化还原能力，大量研究通过构筑 C_3N_5 基异质结来实现[11,25]。

Z-scheme 与双 Z-scheme 异质结：如图 9(a)所示，C_3N_5 与 Bi_2WO_6[18]、$Bi_4O_5Br_2$[31]、Ag_3PO_4[32]、AgI/BiOI[33]等构建的 Z-或双 Z-scheme[34]异质结都能够保留 C_3N_5 与另一种半导体的强氧化/还原端，使其在可见光下对四环素、染料等有机污染物表现出显著提高的降解速率和抗光腐蚀性[18,35]。

S-scheme 异质结：如图 9(b)所示，如 ZnO/Ce-C_3N_5[36]、$Mn_{0.5}Cd_{0.5}S/C_3N_5$[37]、N 掺杂的 C_3N_5/TiO_2[38]等通过特殊的能带错位与内建电场，使 e^- 与 h^+ 分别保留在还原/氧化能力更强的位置，在产氢、抗生素降解和 H_2O_2 生成中保持高活性与高稳定性[36-38]。

Type-II$^+$ 内建电场：如图 9(c)所示，AgI/C_3N_5[21]、BiOCl/C_3N_5[33]、C_3N_5/Ti_3C_2[14]等体系利用功函数差构建界面电场，在增强活性氧(ROS)生成与抑制光腐蚀的同时提高了水消毒、NO 去除与抗生素降解能力[39]。



注:(a) S 掺杂 C_3N_5 用于 NO 去除与 H_2O_2 生成;(b) P 掺杂 C_3N_5 用于抗生素降解;(c) B 掺杂 C_3N_5 用于光催化固氮。

图 7 C_3N_5 的光催化应用示意图

Fig. 7 Schematic illustration of photocatalytic applications of C_3N_5

与金属有机框架(MOF)、石墨烯、二维过渡氮碳化物(MXene)、量子点等复合:如图 9(d)所示,如 C_3N_5@NH_2-MIL-125、C_3N_5/NH_2-UiO-66[22]、CdTe@CdS 量子点/C_3N_5[12]、C_3N_5/MXene[14]、C_3N_5/rGO[40] 等

通过引入高比表面积多孔骨架或强导电体系，有效实现了光吸收增强、e^- 快速移动与界面多步传输，这都有利于产氢、染料降解和 CO_2 还原[2,4]。

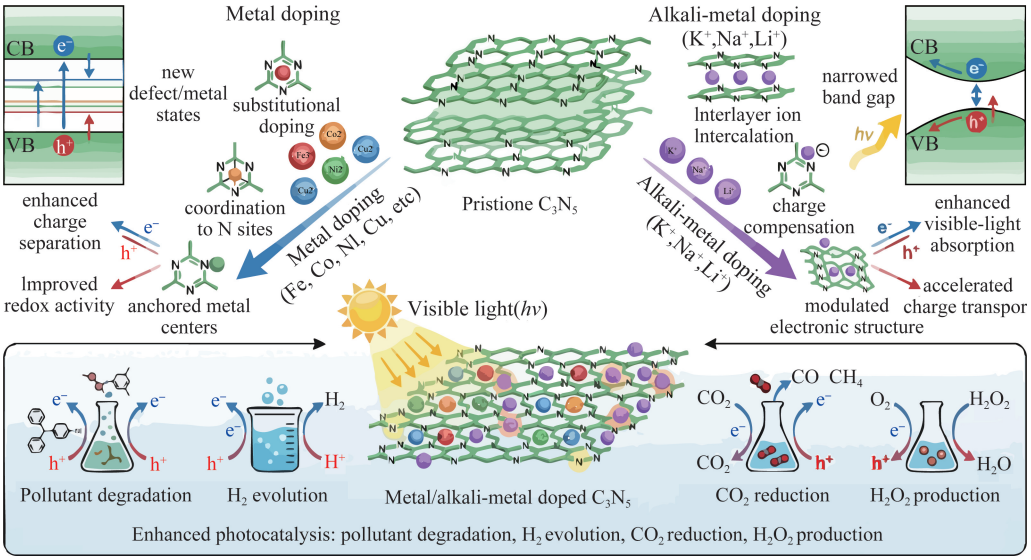
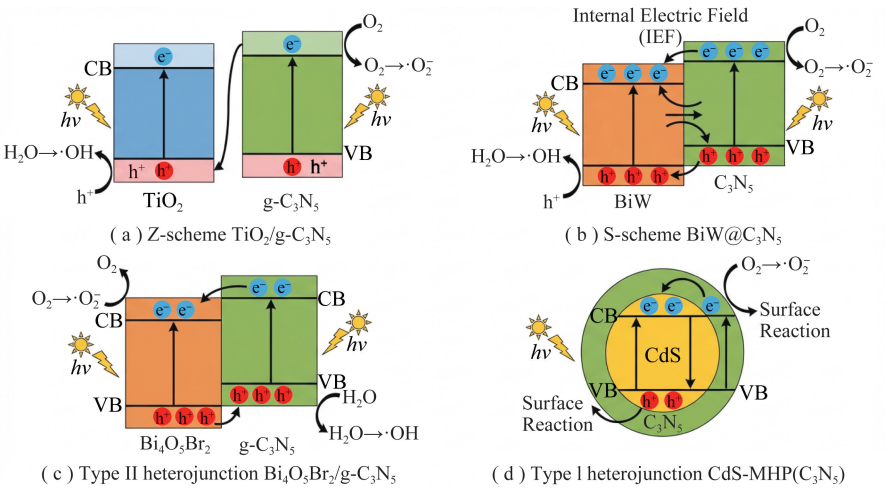


图 8　金属与碱金属掺杂对 C_3N_5 的调控及其增强光催化性能的示意图

Fig. 8　Regulation of C_3N_5 via metal and alkali-metal doping and their enhanced photocatalytic performance

现有研究表明，以 C_3N_5 为核心构筑的异质结体系已从传统 type-II 逐步发展为 Z-scheme、S-scheme 以及与 MOF、量子点等多相组分的复合形式，并在环境修复与能源转化反应中表现出显著的性能提升[2,11,25]。总体来看，Z-scheme 和 S-scheme 异质结在保持高效载流子分离效率的同时能够更好地保留光生 e^- 和 h^+ 的强氧化还原能力[11]。相比之下，type-II 异质结和内建电场结构在提升体系稳定性和活性物种调控方面具有一定优势[21,39]。此外，引入 MOF 或量子点与 C_3N_5 构建复合体系，可进一步拓展光吸收范围并改善界面反应动力学，为性能调控提供了更多可能性[12,22]。这些异质结共同构成了多维度的 C_3N_5 基异质结，为其在环境修复领域的进一步应用奠定了重要的结构设计基础[11]。



注：(a) Z 型 TiO_2/g-C_3N_5；(b) S 型 BiW@C_3N_5；(c) Type Ⅱ 型 $Bi_4O_5Br_2$/g-C_3N_5；(d) Type Ⅰ 型 CdS-MHP。

图 9　基于 C_3N_5 的不同异质结光催化体系电荷转移机制示意图

Fig. 9　Schematic illustration of charge transfer mechanisms in different C_3N_5-based heterojunction photocatalytic systems

3　C_3N_5 光催化研究现状

3.1　污染物降解与环境修复

在水体污染治理方面，C_3N_5 及其复合材料已被广泛应用于多种类型污染物的降解[2,4]。

有机染料与典型小分子污染物:如图 10 所示,$CeTi_2O_6/C_3N_5$[41]、WO_3/C_3N_5[13]、Ag-CeO_2/C_3N_5 等体系在罗丹明 B(RhB)、亚甲基蓝(MB)、甲基绿(Methyl Green)等染料降解中表现出明显的速率提升,主要活性物种多为 $\cdot O_2^-$ 与 ·OH,部分体系兼有 $^1O_2$ 参与[12-13,41]。

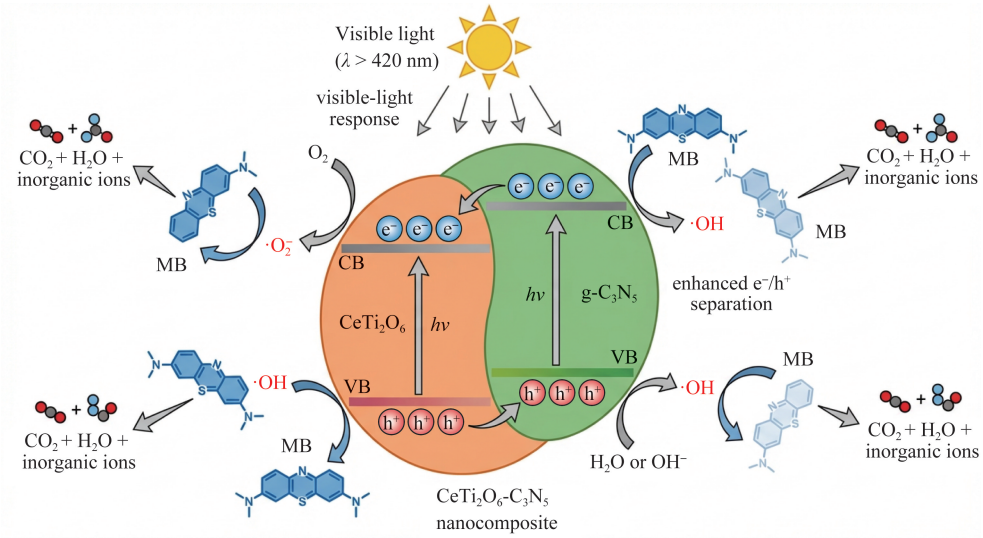


图 10 可见光响应型 $CeTi_2O_6$-C_3N_5 纳米复合材料光催化降解 MB 的机理示意图

Fig. 10 Mechanism of photocatalytic degradation of MB over a visible-light-active $CeTi_2O_6$-C_3N_5 nanocomposite

重金属及放射性污染物修复:C_3N_5 凭借其富氮骨架结构和可调的还原能力,在有毒金属和放射性元素治理中展现出良好的应用潜力[42]。一方面,如图 11 所示,通过引入—CN 基团、N 空位或与氧化石墨烯(GO)构建 2D/2D 异质结构,可显著增强对铀[U(VI)]等金属离子的吸附能力,并在光照条件下促进其还原过程,从而实现含铀核废水中铀的高效去除与富集[43];另一方面,以 C_3N_5 为基底构筑的复合体系在 Cr(VI)等高价重金属光还原反应中也表现出优异性能。吸附-光还原协同机制不仅提升了污染物的去除效率,也为后续回收和资源化利用提供了新思路[43-44]。

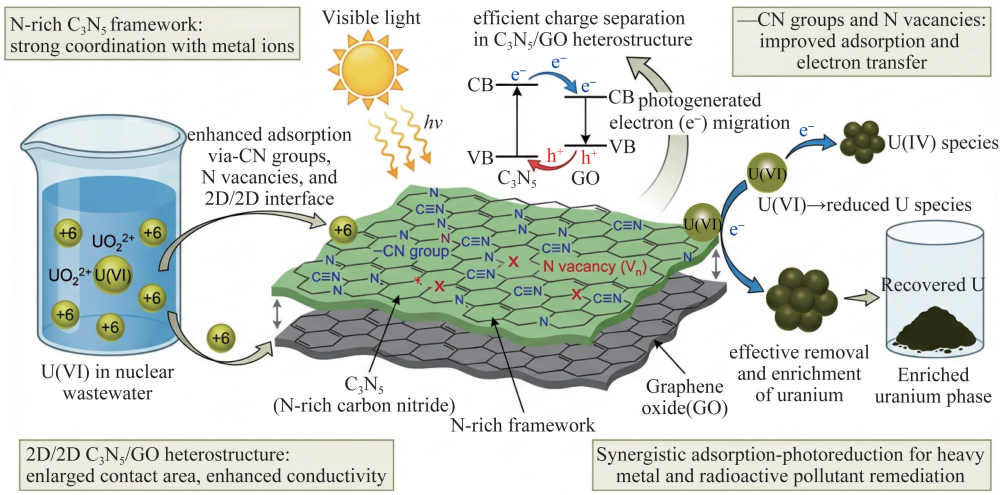


图 11 富氮 C_3N_5/GO 异质结协同吸附-光还原去除核废水中 U(VI)的机理示意图

Fig. 11 Schematic illustration of the synergistic adsorption-photoreduction mechanism for U(VI) removal from nuclear wastewater by nitrogen-rich C_3N_5/GO heterostructure

抗生素与藻毒素:如图 12 所示,Bi_2WO_6/C_3N_5[35]、Ag_3PO_4/C_3N_5[45]、$Mn_{0.5}Cd_{0.5}S/C_3N_5$[37] 及 FeOCl/C_3N_5[46]等 Z-scheme 或 S-scheme 异质结可实现对四环素、磺胺甲噁唑[47]等抗生素的高效降解。双缺陷 C_3N_{5-x}-CN 在超声-光协同体系中,进一步提高了降解速率[6]。

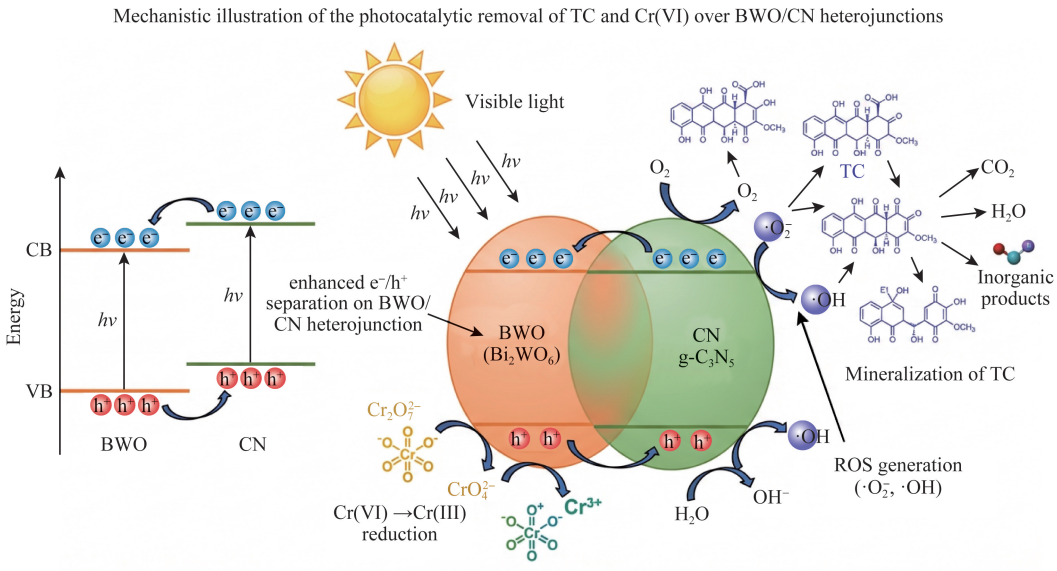


图 12　BWO/C_3N_4 异质结光催化去除四环素与 Cr（VI）的机理示意图

Fig. 12　Mechanistic illustration of the photocatalytic removal of tetracycline and Cr(VI) over BWO/C_3N_4 heterojunctions

气相污染物：在气相污染物净化与空气消毒领域，如图 13 所示，C_3N_5 及其改性材料同样展现出良好的应用前景。现有研究表明，C_3N_5 通过掺杂或与其他半导体构建复合体系，可用于 NO_x 去除和空气中微生物的灭活[48]。例如，S 掺杂的 C_3N_5[15] 以及 $BiOCl/C_3N_5$[39]、AgI/C_3N_5[33] 等异质结体系，通过构建内建电场和高效的 ROS 生成通道，实现了气相 NO 的持续氧化，表现出快速的反应速率和良好的循环稳定性；此外，部分 C_3N_5 基异质结在可见光下能够快速破坏细菌结构，实现对大肠杆菌等微生物的有效灭活。这体现出其在室内空气净化、自清洁等健康防护领域的应用潜力[39]。

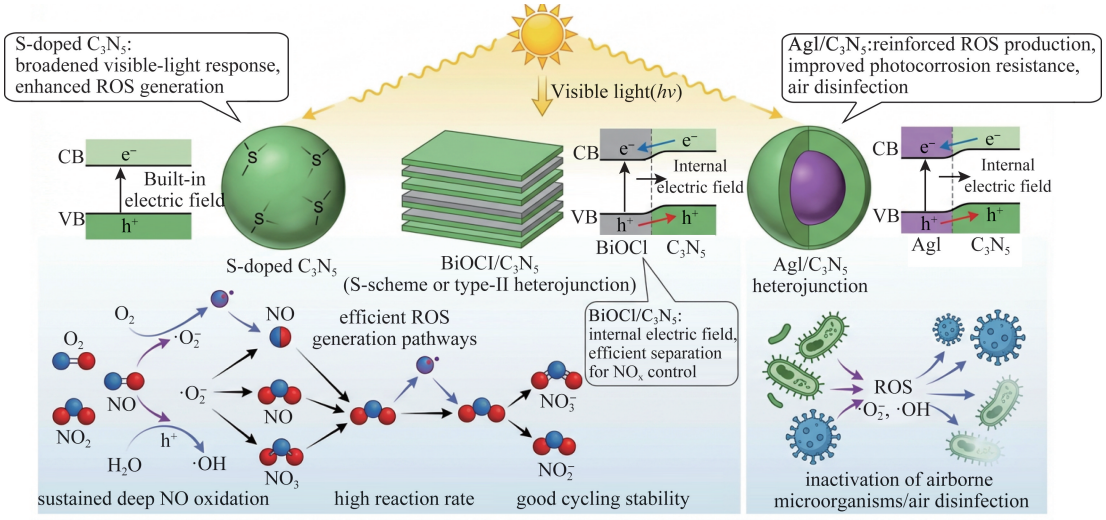


图 13　S 掺杂 C_3N_5、$BiOCl/C_3N_5$ 异质结与 AgI/C_3N_5 异质结光催化机理及应用示意图

Fig. 13　Schematic illustration of photocatalytic mechanisms and applications of S-doped C_3N_5, $BiOCl/C_3N_5$ heterojunction, and AgI/C_3N_5 heterojunction

C_3N_5 在环境修复中的优势不仅体现在对污染物的降解效率上，更体现在其通过结构和界面调控可针对不同污染物类型构建以 $\cdot O_2^-$、·OH 或 $^1O_2$ 为主导的 ROS 体系，并在复杂反应条件下保持较好的结构稳定性和循环性能[2,4,14]。这种性能差异主要源于能带结构和异质结界面设计的不同：Z-scheme 体系在有效分离载流子的同时，能够保留较强的氧化性和还原性，更适用于难降解有机污染物的深度氧化和矿化过程[13]；而 S-scheme 与内建电场异质结体系则在抑制光腐蚀性和提升稳定性方面更具优势[11]，有利于实现长期稳定运行。

3.2 光催化产氢、CO_2 还原、NO 去除与 H_2O_2 光生效应

在能源转化方面，C_3N_5 的窄带隙与较负 CB 位置为光催化产氢、CO_2 还原与 NO 氧化以及 H_2O_2 光催化合成提供了有利条件[2,16]。

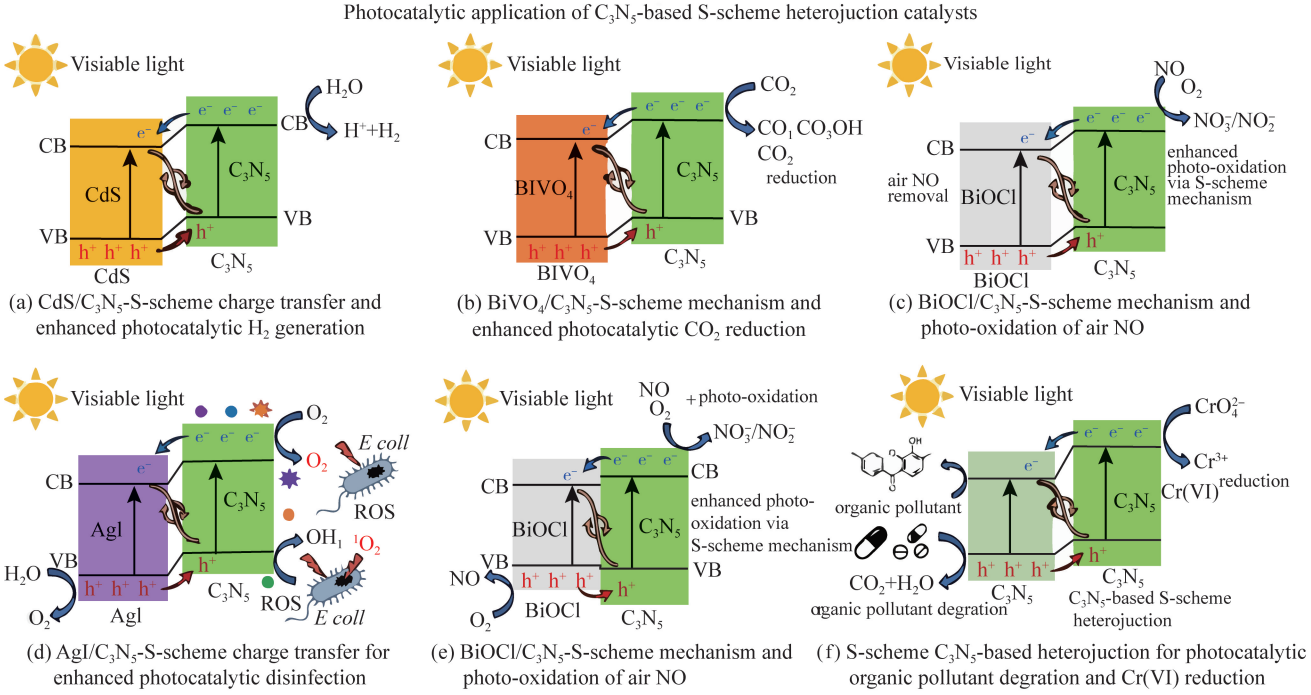


图 14 S 型异质结在光催化产氢、CO_2 还原、NO_x 去除/氧化、灭菌及重金属与有机污染物协同去除中的应用机理示意图

Fig. 14 Schematic illustration of S-scheme heterojunctions for photocatalytic applications: hydrogen production, CO_2 reduction, NO_x removal/oxidation, sterilization, and synergistic removal of heavy metals and organic pollutants

光催化产氢：超薄 C_3N_5 纳米片[5]、质子化 C_3N_5[16]、K^+/I^- 嵌入 C_3N_5 及其与 CdS[17]、rGO[40]、MOF[49] 等构成的异质结体系，在可见光条件下均可实现较高的产 H_2 速率，如图 14(a)所示，部分 CdS/C_3N_5 体系甚至能够驱动全水分解过程[17]。相关理论计算和原位表征结果表明，近界面电场的形成、载流子迁移路径的调控以及表面水分子的吸附和活化，在降低析氢反应(HER)和析氧反应(OER)的能垒和抑制光腐蚀中起关键作用[50]。

CO_2 还原：在 CO_2 还原与碳资源化利用方面，如图 14(b)所示，C_3N_5 及其复合材料被视为具有潜力的非金属光催化剂体系[18]。基于密度泛函理论(DFT)的计算，其适宜的能带位置与表面活性位点有利于 CO_2 向甲烷或多碳产物的转化[19]，为碳减排与资源化利用提供了新的思路[7]。

NO 氧化、异质结灭菌及有机金属污染物的协同去除：如图 14(c)所示，可见光激发后低活性载流子在界面复合，$\cdot O_2^-$ 等活性氧物种的生成驱动气相 NO 的高效氧化并将其转化为 NO_3^-/NO_2^- 等稳定产物[39]；如图 14(d,e)所示，在 C_3N_5 基 S-scheme 异质结体系中，具有高还原能力的光生 e^- 可将 Cr(VI)还原为低毒的 Cr(III)，同时将有机污染物的矿化为 CO_2 和 H_2O[43]。

H_2O_2 光生效应：H_2O_2 作为绿色氧化剂和能源载体，在光催化体系中可通过碱金属或非金属掺杂、缺陷工程以及离子共嵌入等调控方式提升电子转移效率与反应选择性，从而显著提升 H_2O_2 的生成速率和量子效率。上述研究展示了 C_3N_5 在“光催化+高级氧化+能量载体生成”体系中的潜力[6]。

综上所述，C_3N_5 的研究已转向精细能带与界面调控，并尝试将光催化与电催化、压电催化等多场耦合以进一步突破瓶颈[11]。在水体与气相污染物治理、重金属和放射性污染修复[45]、太阳燃料与 CO_2 资源化以及 H_2O_2 绿色合成等多个方向均已展现出重要应用潜力，正逐步发展为兼具环境与能源价值的光催化平台材料[3,6]。

4 C_3N_5 光催化材料研究成果与不足

4.1 现阶段研究成果

总体来看，C_3N_5 已经从最初的富氮碳基光催化材料，逐步发展为一类具有独特结构与性能的光催化体

系[2-3]。现有研究表明，通过在其分子框架中引入—N＝N—键，在保持 C_3N_4 热稳定性和化学稳定性的同时，实现了 π-π 共轭体系的扩展和碳氮比提升。与 g-C_3N_4 相比，C_3N_5 的带隙普遍缩窄到约 2.2 eV，其可见光响应也逐渐增强，CB 位置更负、表面 Lewis 碱性位点也更丰富，为光催化反应（产氢、CO_2 还原、H_2O_2 生成等）提供了更有利的能带基础[1,7,16,21]。C_3N_5 在有机染料、抗生素、持久性有机污染物及气相 NO 等的高效去除与矿化方面表现出优异性能[14-15,41]，部分材料兼具了抗光降解性和优异的循环稳定性[36]。总体而言，这些成果表明，C_3N_5 不仅在传统光催化污染治理中具有应用潜力，也已成为连接环境修复与太阳能转化的重要材料体系之一[4]。

4.2　当前研究的不足与面临的挑战

虽进展显著，但对于 C_3N_5 光催化体系的研究仍存在若干问题有待进一步解决。已有大量研究表明 S、P 和 K 等元素的掺杂及-CN、N 空位的引入可显著提升光催化性能，但具体的掺杂位点、缺陷程度及其在晶格中的空间分布，仍缺乏精准的定量表征方法。在掺杂或缺陷引入过程中，难以精确控制合成工艺的稳定性；不同掺杂策略之间的协同或竞争效应尚未得到系统比较，且材料的规模化合成可扩展性仍有待进一步验证与优化。对于金属、卤素掺杂的 C_3N_5，或 C_3N_5 与金属硫化物、卤化物构建的异质结体系，其在长期运行过程中可能存在金属浸出、光腐蚀等问题。除上述问题外，目前多数性能评估仍集中于单一模型污染物（如 RhB、MB、TC 和 SMX）、理想实验水体（去离子水、简单离子体系）、相对较短的反应时间和有限的循环次数上，与复杂的实际废水、真实气相混合物（多种污染物共存）、低光强或自然光条件等相比，该体系的稳定性、抗毒性能力仍缺乏系统验证。

5　结论

总体来看，C_3N_5 作为新型富氮碳氮化物材料，在光催化环境修复和太阳能转化方面已展现出良好性能，但从实验研究走向实际应用仍面临较多限制，本综述认为，需要在深入认识其合成机理的基础上，通过精细化结构调控，设计更高效、更具实用性的 C_3N_5 基光催化材料。未来研究的重点在于，结合 DFT 等理论计算，针对 CO_2 还原、固氮和 H_2O_2 生成等不同反应体系对 CB、VB、缺陷能级和界面内建电场的不同要求，定向设计能带结构与界面电荷分离路径，并合理构建 S-scheme、Z-scheme 或范德华异质结体系，实现对反应选择性和量子效率的有效调控。其次，C_3N_5 在光-电、光-压以及电-压等多物理场耦合体系中展现出良好性能提升潜力，未来可进一步发展集光催化、电催化和高级氧化于一体的综合反应平台，在实现污染物降解的同时，协同生成 H_2 和 H_2O_2，进而提升整体能源利用率；最后，C_3N_5 体系的发展仍需依赖材料化学、理论计算、环境工程和反应器设计等多学科的协同推进，通过跨尺度的系统设计，将目前分散在机理探究、结构调控以及性能优化层面的研究成果，逐步整合转化为更具可行性的实际应用解决方案。

参　考　文　献

[1] Vuong H T, Nguyen D V, Phuong L P, et al. Nitrogen-rich graphitic carbon nitride (g-C_3N_5): emerging low-bandgap materials for photocatalysis[J]. Carbon Neutralization, 2023,2(4):425-457.

[2] Balakrishnan A, Mathew F P, Sebastian Kunnel E, et al. G-C_3N_5-based photocatalysts for energy and environmental applications: insights into properties, structural modifications, challenges, and future directions[J]. Nanoscale, 2025,17(32):18534-18559.

[3] Liu C Y, Zhang J L, Wang W L, et al. Progress in the synthesis and applications of N-rich carbon nitride (C_3N_5)-based catalysts in environmental and energy catalysis[J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 42: 103491.

[4] Liu J J, Wang S J, Zhao C C, et al. Engineered g-C_3N_5-based nanomaterials for photocatalytic energy conversion and environmental remediation[J]. Nanomaterials, 2023,13(3):499.

[5] Liu T Y, Yang G J, Wang W, et al. Preparation of C_3N_5 nanosheets with enhanced performance in photocatalytic methylene blue (MB) degradation and H_2-evolution from water splitting[J]. Environmental Research, 2020, 188 : 109741.

[6] Fu C, Zhao M Y, Chen X, et al. Unraveling the dual defect effects in C_3N_5 for piezo-photocatalytic degradation and H_2O_2 generation[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2023, 332: 122752.

[7] Xiao X M, Ye X M, Wu Z J, et al. The rise of two-dimensional covalent C_3N_5: a molecular perspective[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025,13(8):5498-5529.

[8] Ma T T, Zhang Y, Tian Y H, et al. Pressure-induced formation of porous g-C_3N_5 for efficient photocatalytic degradation of tetracycline (TC)[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(3): 116403.

[9] Simón-García D, Molina-Muriel M, Ghazzal M N, et al. Assessment of synthesis methods and hetero-element doping as strategies to modulate the photo-catalytic properties of nitrogen rich g-C_3N_5 polymorph[J]. Carbon, 2025, 245: 120732.

[10] Wang H Y, Li M X, Lu Q J, et al. A mesoporous rod-like g-C_3N_5 synthesized by salt-guided strategy: as a superior photocatalyst for degradation of organic pollutant[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(1): 625-631.

[11] Soni V, Tarannum T, Singh P, et al. Advances in photoactive g-C_3N_5 derived Z-and S-scheme heterojunctions for energy and environmental catalysis[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025,13(6):120465.

[12] Amani-Ghadim A R, Bahadori Y, Dabirnia A, et al. Embedding CdTe@CdS QDs into the C_3N_5 nanosheets with enhanced activity for visible-light-driven photocatalytic degradation of methylene blue and tetracycline[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2025, 178: 114553.

[13] Hazarika B, Bhattacharjee B, Ahmaruzzaman M. Enhanced photocatalytic degradation of brilliant green using g-C_3N_5/WO_3 nanocomposite: a Z-scheme charge transfer approach under visible light irradiation[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 168: 112960.

[14] Guan Y N, Cao Y D, Ma S C, et al. Metal-free g-C_3N_5 photocatalyst coupling MXenes Ti_3C_2 for tetracycline degradation: insight for electron transfer mechanism, degradation mechanism and photothermal effect[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 951: 169864.

[15] Zhang K, Wei Y J, Xie L H, et al. Amorphous titanium carbide on N-defective g-C_3N_5 for high-efficiency photocatalytic NO removal[J]. Chinese Chemical Letters, 2025,36(3):110086.

[16] Peng C, Han L X, Huang J M, et al. Comprehensive investigation on robust photocatalytic hydrogen production over C_3N_5[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2022, 43(2): 410-420.

[17] Shan L W, Yuan M Q, Zhang J W, et al. Rationalized carrier confinement significantly enhances overall photocatalytic water splitting in branched CdS/C_3N_5[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 344: 127267.

[18] Zhang H M, Bian H, Wang F, et al. 2D/2D Bi_2WO_6/C_3N_5 S-scheme heterojunction for highly selective production of CH_4 by photocatalytic CO_2 reduction under visible light[J]. Applied Catalysis A: General, 2024,686(18):119914.

[19] Zhang H M, Bian H, Xu B, et al. Enhanced selectivity of photoreduction CO_2 over Ag/C_3N_5 Schottky heterostructure by the SPR effect [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024,12(2):112270.

[20] Li Z, Zhou Y Y, Zhou Y T, et al. Dipole field in nitrogen-enriched carbon nitride with external forces to boost the artificial photosynthesis of hydrogen peroxide[J]. Nature Communications, 2023,14(1):5742.

[21] Rasool Z, Akhtar S, Muneer M, et al. Multifunctional heterocatalyst of AgI-incorporated nitrogen-enriched graphitic carbon nitride nanosheet: photocatalytic degradation performance and optimization via box-behnken design[J]. Langmuir, 2025, 41(42): 28687-28703.

[22] Tian W J, Zeng X X, Liu W C, et al. Synergistic three-in-one photo-synthesis of benzimidazoles and H_2O_2 by porous N-rich g-C_3N_4/g-C_3N_5 isotype heterojunction[J]. Applied Catalysis A: General, 2026,710(1):120713.

[23] Liu Q Z, Ji X D, Deng J Q, et al. Preparation of porous C_3N_5 nanosheets by temperature modulation: visible-light induced degradation characteristics and mechanism of microcystin-LR[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(3): 110153.

[24] Li K, Cai W, Zhang Z C, et al. Boron doped C_3N_5 for photocatalytic nitrogen fixation to ammonia: the key role of boron in nitrogen activation and mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 435: 135017.

[25] Zhang J L, Yu G J, Yang C Y, et al. Recent progress on S-scheme heterojunction strategy enabling polymer carbon nitrides C_3N_4 and C_3N_5 enhanced photocatalysis in energy conversion and environmental remediation[J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2024, 45: 101040.

[26] Ma C, Yu Z G, Wei J J, et al. Metal-free ultrathin C_3N_5 photocatalyst coupling sodium percarbonate for efficient sulfamethoxazole degradation[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2022, 319: 121951.

[27] Zhang X W, Li D, Li M Y, et al. Flower-like Co_3O_4/C_3N_5 composite as solid-phase microextraction coating for high-efficiency adsorption and preconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in water[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 443: 136293.

[28] Sareshkeh A T, Rasoulifard M H, Dorraji M S S. Boosted H_2 production and tetracycline mineralization over 2D/0D/2D nanocomposite of P-doped g-C_3N_5@Co_3O_4 QDs/N-modified $Fe_2(MoO_4)_3$/Ti_3C_2 via Schottky-modified S-scheme charge separation mechanism under visible-light illumination[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1048: 185112.

[29] Lee J, Kok S H W, Ng B J, et al. Hole scavenger-free nitrogen photofixation in pure water with non-metal B-doped carbon nitride: implicative importance of B species for N_2 activation[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(2): 109511.

[30] Jagan G, Saravanakumar K, Cha B, et al. Design and performance of a dual Z-scheme $YFeO_3$/g-C_3N_5/WO_3 heterojunction with enhanced PDS-assisted sonophotocatalytic activity for sulfamethoxazole degradation: mechanistic insights and ecotoxicity analysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 510: 161715.

[31] Cai Z Q, Huang Y N, Ji H D, et al. Type-II surface heterojunction of bismuth-rich $Bi_4O_5Br_2$ on nitrogen-rich g-C_3N_5 nanosheets for efficient photocatalytic degradation of antibiotics[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 280(1): 119772.

[32] Yin H F, Cao Y, Fan T L, et al. In situ synthesis of Ag_3PO_4/C_3N_5 Z-scheme heterojunctions with enhanced visible-light-responsive photocatalytic performance for antibiotics removal[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754(5): 141926.

[33] Yin H F, Yuan C Y, Lv H J, et al. The interface design of (0D/2D/1D) AgI/BiOI/C_3N_5 dual Z-scheme heterostructures with efficient visible-light-driven photocatalytic activity[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 308(5): 122815.

[34] Su N, Cheng S S, Zhang P F, et al. High-efficiency charge separation of Z-scheme 2D/2D C_3N_4/C_3N_5 nonmetal VdW heterojunction photocatalyst with enhanced hydrogen evolution activity and stability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(97): 41010-41020.

[35] Saravanakumar K, Maheskumar V, Yea Y, et al. 2D/2D nitrogen-rich graphitic carbon nitride coupled Bi_2WO_6 S-scheme heterojunction for boosting photodegradation of tetracycline: influencing factors, intermediates, and insights into the mechanism[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 234(6): 109726.

[36] Jia J, Huang L L, Yan Y M, et al. A novel S-scheme ZnO/Ce-g-C_3N_5 heterojunctions with enhanced photocatalytic activity[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2024, 111(3): 819-833.

[37] Ma D Y, Xue Q Q, Liu Y P, et al. Manipulating interfacial charge redistribution in $Mn_{0.5}Cd_{0.5}S$/N-rich C_3N_5 S-scheme heterojunction for high-performance photocatalytic removal of emerging contaminants[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2026, 243: 265-274.

[38] Bai H, Xiong R W, Wang N, et al. Synergistic effects of rare-metal ytterbium doping on TiO_2/g-C_3N_5 heterostructures for enhanced photocatalytic degradation of methylene blue[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2025, 175(5): 114159.

[39] Zhang J L, Yu G J, Yang C Y, et al. Reinforced ROS generation and anti-photocorrosion for boosted photooxidation disinfection by IEF-enhanced type II charge carrier dynamics[J]. SusMat, 2025, 5(2): e70002.

[40] Liu D, Yao J, Chen S T, et al. Construction of rGO-coupled C_3N_4/C_3N_5 2D/2D Z-scheme heterojunction to accelerate charge separation for efficient visible light H2 evolution[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2022, 318(19): 121822.

[41] Vadivel S, Hariganesh S, Paul B, et al. Highly active novel $CeTi_2O_6$/g-C_3N_5 photocatalyst with extended spectral response towards removal of endocrine disruptor 2, 4-dichlorophenol in aqueous medium[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 592(9): 124583.

[42] Meng Q, Yang X Y, Wu L Z, et al. Metal-free 2D/2D C_3N_5/GO nanosheets with customized energy-level structure for radioactive nuclear wastewater treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 422(2): 126912.

[43] Li M J, Meng J Q, Zhang A X, et al. Self-driven electron enrichment of amino-fullerene modified C_3N_5 for enhancing photocatalytic Cr (VI) reduction under visible-light[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1037(38): 182217.

[44] Long J Q, Wei L, Huang H Z, et al. Facile fabrication of biochar-coupled g-C_3N_5/C and its enhanced photocatalytic properties[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2022, 171(11): 111029.

[45] Dong K X, Shen C Q, Yan R Y, et al. Integration of plasmonic effect and S-scheme heterojunction into Ag/Ag_3PO_4/C_3N_5 photocatalyst for boosted photocatalytic levofloxacin degradation[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2024, 40(10): 2310013.

[46] Vadivel S, Fujii M, Rajendran S. Facile synthesis of broom stick like FeOCl/g-C_3N_5 nanocomposite as novel Z-scheme photocatalysts for rapid degradation of pollutants[J]. Chemosphere, 2022, 307(33): 135716.

[47] Zhang J L, Jing B H, Tang Z Y, et al. Experimental and DFT insights into the visible-light driving metal-free C_3N_5 activated persulfate system for efficient water purification[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 289(10): 120023.

[48] Han L X, Huang J M, Zhan J, et al. Construction of highly dispersed Ni sites on N-rich carbon nitride for enhanced photocatalytic NO removal[J]. Advanced Sustainable Systems, 2023, 7(1): 2200009.

[49] Fu J, Yang H. Preparation of g-C_3N_5/MOF(Ti) for photocatalytic degradation sulfamoylmethylpyrimidine from municipal wastewater [J]. Alexandria Engineering Journal, 2025, 125(16): 449-462.

[50] Xiong Z R, Liang Y J, Yang J, et al. Engineering a phase transition induced g-C_3N_5/poly (triazine imide) heterojunction for boosted photocatalytic H_2 evolution[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 306(3): 122522.

（责任编辑：陈梦圆）