文章编号:1008-1542(2025)03-0276-12

石墨相氮化碳光催化抗菌优化策略及应用研究进展

李文慧[1],王若鹏[1],韩雨荷[1],王　赛[1],张玉梅[1,2],卢　琼[1,2],安　静[1,2]

(1.河北科技大学理学院,河北石家庄　050018;
2.河北省表面和界面光电控制重点实验室,河北石家庄　050018)

摘　要:石墨相氮化碳(g-C_3N_4)是一种晶体结构与石墨相似的碳基共轭聚合物材料,在光催化抗菌领域展现出独有的潜力。然而,g-C_3N_4 光催化剂存在光生电子(e^-)和光生空穴(h^+)易复合、太阳光吸收不全、比表面积小、吸附性差等问题,导致光催化效率低,影响了抗菌效果。采用形貌调控、贵金属沉积、元素掺杂、异质结构建等手段对 g-C_3N_4 进行功能化改性,可激发 g-C_3N_4 的抗菌潜力。对 g-C_3N_4 光催化抗菌性能的优化策略进行了详细介绍,重点综述了 g-C_3N_4 光催化抗菌特性在水消毒、抗菌敷料、抗菌纺织物、食品包装方面的应用研究现状,指出目前 g-C_3N_4 光催化抗菌剂开发面临的问题。为应对日益严峻的微生物污染挑战,其未来研究可从以下几个方面展开:1)深化活性氧(ROS)对细菌细胞膜破坏,细胞内蛋白质、DNA 损伤等具体机制的研究;2)探索 g-C_3N_4 对耐药菌、常用真菌等广谱菌的抗菌应用研究;3)提升 g-C_3N_4 在不同环境下的适应性。

关键词:催化化学;石墨相氮化碳;光催化;抗菌;优化策略

中图分类号:O643.36;O644.1　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2025yx03005

Research progress on optimization strategies and applications of photocatalytic antibacterial activity of graphitic carbon nitride

LI Wenhui[1], WANG Ruopeng[1], HAN Yuhe[1], WANG Sai[1], ZHANG Yumei[1,2], LU Qiong[1,2], AN Jing[1,2]

(1. School of Sciences, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;
2. Hebei Provincial Key Laboratory of Photoelectric Control on Surface and Interface, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: Graphitic carbon nitride (g-C_3N_4) is a carbon-based conjugated polymer material with a crystal structure similar to graphite, which exhibits unique potential in the field of photocatalytic antibacterial activity. However, factors such as easy recombination of photogenerated electron (e^-) -hole (h^+) pairs, incomplete sunlight absorption, small specific surface area, and poor adsorption properties of g-C_3N_4 photocatalysts leaded to low photocatalytic efficiency, limiting their antibacterial effectiveness. To overcome these problems, strategies such as morphology control, precious metal deposition, element doping,

收稿日期:2024-10-15;修回日期:2024-12-13;责任编辑:胡姝洋
基金项目:河北省自然科学基金(B2021208007);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021321)
第一作者简介:李文慧(2000—),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事纳米复合材料合成及光催化应用方面的研究。
通信作者:卢琼,博士。E-mail:qiong253@163.com

李文慧,王若鹏,韩雨荷,等.石墨相氮化碳光催化抗菌优化策略及应用研究进展[J].河北科技大学学报,2025,46(3):276-287.
LI Wenhui, WANG Ruopeng, HAN Yuhe, et al. Research progress on optimization strategies and applications of photocatalytic antibacterial activity of graphitic carbon nitride[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2025, 46(3): 276-287.

and heterostructure construction were employed to functionalize g-C_3N_4 and fully activated its antibacterial potential. A detailed introduction was given to the optimization strategies for the photocatalytic antibacterial performance of g-C_3N_4, with a focus on the current state of research on its photocatalytic antibacterial properties in water disinfection, antibacterial dressings, antibacterial textiles, and food packaging. The challenges currently faced in the development of g-C_3N_4 photocatalytic antibacterial agents were highlighted. In order to address the increasingly severe challenge of microbial contamination, future research directions are suggested: 1) deepening the research on the mechanisms of reactive oxygen species (ROS) induced damage to bacterial cell membranes, intracellular proteins, DNA, et al; 2) exploring the antibacterial applications of g-C_3N_4 on broad-spectrum bacteria such as drug-resistant bacteria and commonly used fungi; 3) enhancing the adaptability of g-C_3N_4 in different environments.

Keywords: catalytic chemistry; graphitic carbon nitride; photocatalysis; antibacterial; optimization strategy

受环境变化和人类活动的影响，病原体的传播风险增加，公众在饮用水、使用公共设施以及处理伤口时，很容易感染具有传染性和致病性的微生物。尽管抗生素在治疗细菌感染方面非常有效，但由于其被过度使用，出现了多种对药物具有抗性的“超级细菌”[1-2]。同时，抗生素残留物会对环境造成二次污染，进一步破坏生态系统的平衡，最终对人类健康和生存造成威胁。因此，鉴于细菌感染的普遍性，以及当前日益严峻的抗生素耐药性问题和其对环境的负面影响，迫切需要寻求更为高效且环保的抗菌解决方案。

近年来，随着抗菌技术的持续创新与突破，外源性抗菌技术成为主流技术。外源性抗菌技术是指利用外界的刺激（光、电、磁、微波、超声波等）生成高活性的、具有强大杀菌能力的自由基来破坏细菌结构的完整性，进而彻底杀死细菌[3]。其中，利用太阳光提供能量的光催化抗菌技术，是一种安全、经济的抗菌手段。此外，光催化抗菌材料因具备抗耐药性且无副作用，展现出广阔的应用前景，被认为是极具潜力的抗生素替代方案之一[4]。

为了应对日益加剧的细菌感染问题，开发新型、高效且环保的光催化抗菌材料是一种可行的解决策略。石墨相氮化碳（g-C_3N_4）作为一种非金属聚合物型光催化剂，因其独特的化学结构和电子（e^-）性质，已经成为光催化抗菌领域中热门的研究材料之一。据多项研究[5-11]报道，g-C_3N_4 在水消毒、抗菌敷料、食品包装、防污膜以及自清洁型织物等方面均得到了广泛应用。

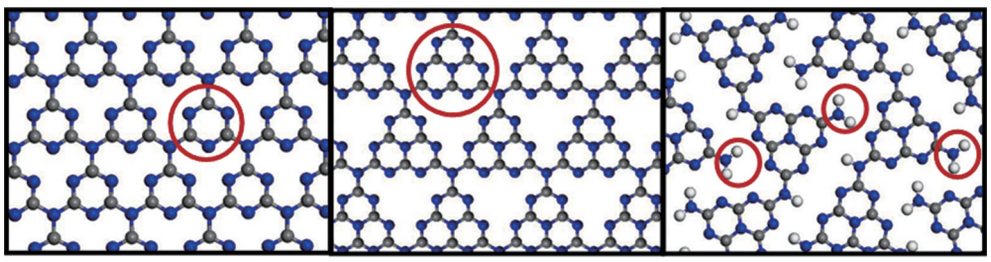
1　g-C_3N_4 概述

1.1　g-C_3N_4 的结构特点

g-C_3N_4 是一种新型的碳基共轭聚合物材料[12]，晶体结构与石墨相似，具有半导体特性。与其他传统光催化材料相比，g-C_3N_4 具有窄带隙结构（禁带宽度为 2.7 eV）、宽光谱吸收范围（≥ 460 nm）、低成本、易合成等优势，在光催化领域展现出独有的应用潜力[13]。

g-C_3N_4 由交替的 C 原子和 N 原子以 sp^2 杂化共轭的六元环构成。在这个六元环中，C 和 N 原子上未参与杂化的孤对电子相互键合形成 π 键，贯穿整个二维网状结构，建立了一个高度离域的 π 电子共轭体系[14]。g-C_3N_4 具有 2 种理想的结构模型：一种结构是如图 1 a）所示的三嗪环（C_3N_4），它是一个由 3 个 C 原子和 4 个 N 原子组成的环状结构。在这个环中，每个 C 原子都与 3 个 N 原子相连，形成 3 个 C—N 键，其中 N 原子作为平面三角形的中心，分别与 3 个独立的三嗪环相连，形成无限延伸的结构；另一种是如图 1 b）所示的 3-s-三嗪环（C_6N_7），它的结构相对复杂一些，由 6 个 C 原子和 7 个 N 原子交替连接构成，形成一个更大的环状结构。这 2 种结构都是 g-C_3N_4 的重要组成部分，但是后者这种交替的 C—N 连接赋予了 3-s-三嗪环更高的稳定性，因此被视为 g-C_3N_4 的主要结构单元[15-16]。

合成 g-C_3N_4 的常用方法是在 500～600 ℃的温度下，于空气或惰性气氛中对前驱体进行煅烧。然而，由于聚合过程中含氮前驱体未能彻底进行脱氨基反应，导致所合成的 g-C_3N_4 具有不完全聚合的七嗪基 melon 结构（被称为体相 g-C_3N_4），如图 1 c）所示。此外，直接热缩聚合的 g-C_3N_4 还有一些不足之处，如 e^- 和光生空穴（h^+）在半导体材料表面易复合、比表面积小、吸附性差、对太阳光的吸收利用不完全等，这些因素都会降低光催化过程的效率，从而限制其在光催化领域的应用[16-17]。



a）三嗪环结构 b）3-s-三嗪环结构 c）melon基结构

图1 $g\text{-}C_3N_4$ 的不同结构(灰、蓝和白色球分别代表碳、氮、氢原子)[16]

Fig. 1 Different structures of $g\text{-}C_3N_4$ (grey, blue and white spheres denote C, N and H atoms, respectively)[16]

1.2 $g\text{-}C_3N_4$ 光催化抗菌机理

光催化反应是 $g\text{-}C_3N_4$ 纳米材料实现高效抗菌性能的关键因素。如图2所示,在外源光照射下,$g\text{-}C_3N_4$ 作为一种半导体光催化剂,当入射光的能量超过其禁带宽度时,价带(VB)中的 e^- 吸收光子能量并跃迁至导带(CB),形成具有还原性的 e^-。当 e^- 离开VB时,会在其原位置留下一个带正电的 h^+。光生载流子通过扩散运动分离并迁移至 $g\text{-}C_3N_4$ 表面,与氧气或水发生不完全氧化还原反应,产生活性氧(ROS),如羟基自由基(·OH)和超氧自由基($\cdot O_2^-$)。·OH和 $\cdot O_2^-$ 具有很强的化学反应活性,能够直接作用于细菌细胞膜,诱导内部物质外渗,进一步导致细菌DNA损伤和蛋白质失活。这种机制能够促使微生物的生化反应紊乱,破坏细菌的分裂和繁殖能力,从而迅速杀灭有害细菌,实现抗菌效果[4,18-20]。此外,ROS还能够有效分解死亡细菌的残留物及其排泄物,进一步控制感染的范围。

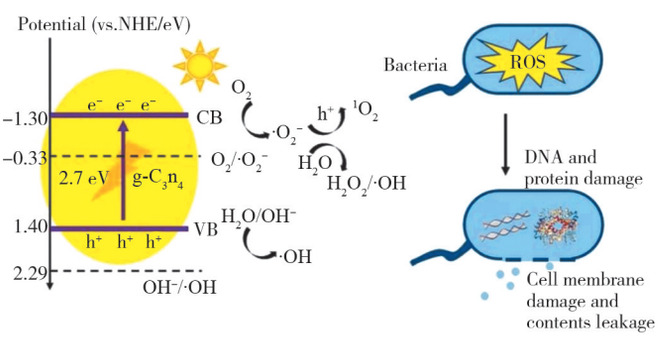


图2 $g\text{-}C_3N_4$ 的ROS生成过程以及ROS处理的细菌失活机制示意图[19]

Fig. 2 Schematic diagram of ROS generation process of $g\text{-}C_3N_4$ and bacterial inactivation mechanism of ROS treatment[19]

2 $g\text{-}C_3N_4$ 光催化抗菌性能的优化策略

$g\text{-}C_3N_4$ 光催化剂具有一定的光催化抗菌性能。然而,由热缩聚合制得的 $g\text{-}C_3N_4$ 光催化剂存在一些不足之处,会降低光催化过程的效率,进而限制其在光催化抗菌领域的应用潜力[16]。为了解决这些问题,研究人员提出了一系列改进策略,如图3所示,包括形貌调控、贵金属沉积、元素掺杂、异质结构建等[16,21-23]。这些改进策略能够有效减少 e^- 和 h^+ 的复合,优化 e^- 迁移效率,从而显著提高量子产率;同时,还能增大光催化材料的比表面积,拓宽对可见光的吸收范围并提升其利用效率。这些协同效应共同增强了 $g\text{-}C_3N_4$ 的氧化还原活性,使其能够产生充足的ROS,从而充分发挥其优异的杀菌潜力。

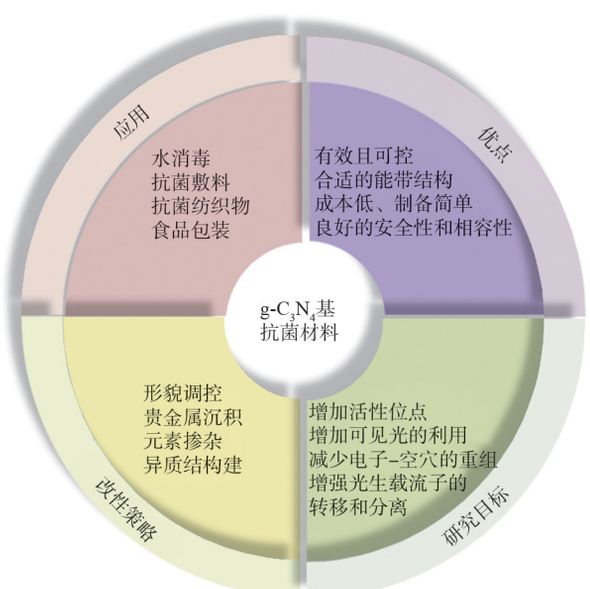


图3 $g\text{-}C_3N_4$ 基抗菌材料的优点、研究目标、改性策略和应用

Fig. 3 Summary of the advantages, research targets, modification strategies and applications of $g\text{-}C_3N_4$-based antibacterial materials

2.1 形貌调控

形貌调控是改善 $g\text{-}C_3N_4$ 光催化性能的一种重要策略。通过合成量子点、纳米管、超薄纳米

片等形貌的 g-C_3N_4，可以提高其比表面积，增加活性位点数量，进而提升其光催化抗菌效果[24]。

0 维(0 D)结构的石墨相氮化碳量子点(g-CNQDs)具有成本低、化学稳定性优、比表面积大、带隙适中等特性，在光催化抗菌领域备受关注。YADAV 等[25]通过热聚合法和选择性透析法合成了 g-CNQDs，其粒径为 2～7 nm，比表面积为 264 m^2/g。由于量子尺寸效应，0 D 结构的 g-C_3N_4 在电荷转移和分离过程中表现出优越的性能。在可见光区，g-CNQDs 的光学吸收特性增强。在可见光照射下，g-CNQDs 产生大量的 ROS 用于抗菌，其对初始浓度为 10^6 cfu/mL 的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率分别达到 99%和 90%。光催化抗菌效果优于无孔 g-C_3N_4、介孔 C_3N_4、载银介孔 C_3N_4，且与银纳米粒子相当。XIAO 等[26]通过热缩合和化学蚀刻法，构建了富含氨基的多孔超薄 g-C_3N_4 纳米片(AHUCN)。在 AM 1.5 G 光照下，仅需 30 min，其对 3×10^7 cfu/mL 的大肠杆菌抑菌率接近 100%。如图 4 所示，AHUCN 的高光催化活性得益于其多孔超薄结构，更关键的是 AHUCN 表面存在的大量氨基，使得光催化路径由原本较慢的 2 步单 e^- 间接还原过程转变为一步双 e^- 直接还原过程，这种反应途径加快了 H_2O_2 的生成，从而提高了 AHUCN 的光催化杀菌效果。XU 等[27]采用自模板法成功制备了具有分层结构和氮缺陷的六方微管状纳米多孔 g-C_3N_4(TPCN)，在可见光照射 4 h 后，对 5×10^6 cfu/mL 的大肠杆菌的抗菌率达到 100%。相比之下，块状的 g-C_3N_4 只灭活了 74.4%的大肠杆菌。该材料的高效光催化抗菌性能，主要归因于 g-C_3N_4 骨架中引入了氮缺陷，这有效减小了带隙，改善了材料在波长大于 450 nm 区域的光捕获能力。此外，层状结构提供了多种光反射和散射路径，可以诱导电荷快速及更长距离的传输，纳米孔隙度的增加也可以促进载流子向表面迁移。与 g-C_3N_4 纳米片相比，管状 g-C_3N_4 具有更大的长宽比，有利于 e^- 沿轴向方向的定向转移。

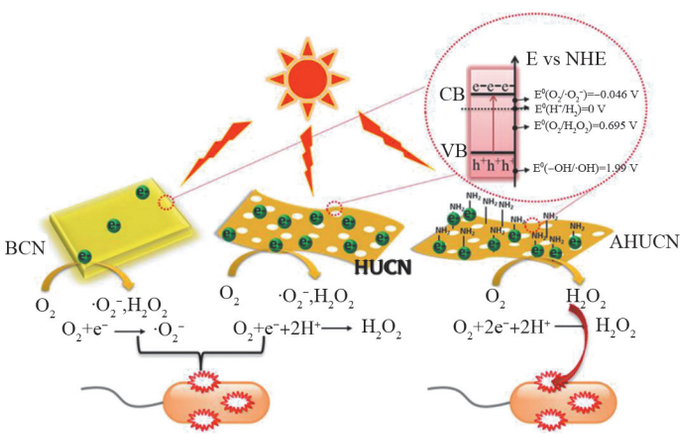


图 4　不同光催化剂在光照射下对大肠杆菌光催化失活过程的示意图[26]

Fig. 4　Schematic illustration of photocatalytic inactivation of *E. coli* process by photocatalysts under light irradiation[26]

通过构建 0 D 量子点、多孔超薄纳米片和多孔纳米管等策略优化 g-C_3N_4 的结构和形态，显著提高了 g-C_3N_4 的比表面积、活性位点数量、光捕获能力、电荷传输效率，还能够改变生成 ROS 的反应路径，展示出优异的光催化抗菌性能。未来可进一步探索引入更多带正电荷的基团(如季铵基、氨基等)，以增强其与细菌表面负电荷的相互作用，并优化光催化反应路径，加速反应速率，从而显著提高材料的抗菌性能。

2.2　贵金属沉积

研究发现，在 g-C_3N_4 表面沉积的贵金属(如 Ag、Pt、Au 等)纳米粒子(NPs)能够产生表面等离子体共振效应(SPR)，诱导生成强烈的局部电场，提高载流子的形成速率；此外，贵金属可作为电子阱捕获 e^-，有效分离 e^- 和 h^+，促进 ROS 的生成，从而有效提高光催化效率[28-31]。

MA 等[29]以三聚氰胺为前驱体，采用热聚合结合光辅助还原法制备了 Ag/g-C_3N_4 复合光催化剂。纯 g-C_3N_4 在可见光下照射 90 min 后几乎没有大肠杆菌失活。当 Ag 的负载量为 3%时，在可见光照射 75 min 后该材料对初始浓度为 10^9 cfu/mL 大肠杆菌的抑菌率高达 99.99%，抗菌率显著提升。这一现象源于 Ag NPs 能有效地从 g-C_3N_4 的 CB 捕获 e^-，加速载流子的分离，促进 ROS 的产生，增强了光催化抗菌活性。XU 等[30]进一步通过水热法和光辅助还原法将 Ag NPs 负载在氧化多孔 g-C_3N_4(PCNO)上。结果表明，可见光照射 2 h 后，该材料对浓度为 10^7 cfu/mL 的金黄色葡萄球菌具有显著的抗菌效果，抗菌率高达 99.4%，而纯 g-C_3N_4 的抗菌率仅为 29.6%。Ag NPs 的 SPR 有助于增强其对可见光区域的吸收，位于 Ag NPs 表面的 e^- 通过 PCNO 的纳米孔隙输出，被水中的 O_2 捕获形成 $\cdot O_2^-$，提高了 ROS 的产率和后续的光催化抗菌效果。在类似的研究中，WEI 等[31]采用原位光沉积法制备了系列 Ag/g-C_3N_4 复合材料。当菌液浓度为 10^7 cfu/mL 时，在暗反应条件下，细菌均能正常生长。对于纯 g-C_3N_4 而言，在可见光照射 120 min 后，仍有

7.2×10^4 cfu/mL 的大肠杆菌存活，表现出微弱的光催化抗菌效果。然而，随着 Ag 含量的增加，所观察到的细菌菌落数明显减少。其中，当 3-Ag/g-C_3N_4（Ag 的质量分数为 0.11%）的加入量为 0.01 mol/L 时，在可见光照射 120 min 内，其能灭活所有细菌，抑菌率达到 100%。同时，经过 4 次循环实验发现，3-Ag/g-C_3N_4 仍能保持良好的抑菌性能。Ag/g-C_3N_4 抗菌性能的提升源于 Ag NPs 的 SPR 效应，其使可见光的吸收范围扩展至 520 nm，显著提高了光的利用率；同时，g-C_3N_4 的 CB 中的 e^- 向 Ag 转移，形成肖特基势垒，阻碍了 e^- 的回流，从而降低了 e^- 与 h^+ 的复合几率。为探究光催化抑菌性能，MIROLIAEI 等[32]构建了生物炭/g-C_3N_4/Pt 异质结结构纳米复合材料，当其用量为 5 mg/L，大肠杆菌浓度为 2×10^3 cfu/mL 时，在可见光和黑暗条件下抑菌 90 min 后的结果表明，在无光照的条件下，大肠杆菌的浓度基本保持不变，而处于可见光环境中时，大肠杆菌的生长受到显著抑制，抑菌率高达 97%。Pt 的 SPR 效应增强了复合材料表面邻接处的局域电场，改变了半导体材料的能带结构，使 e^- 更易从 VB 跃迁到 CB，进而产生更多的 e^--h^+ 对，用于高效抑菌。随后，HAI 等[33]通过水热法制得 Au 修饰 g-C_3N_4 纳米复合材料 AuCN-HT，其对铜绿假单胞菌和金黄色葡萄球菌具有显著的抑菌能力。在可见光光照下，AuCN-HT 对铜绿假单胞菌和金黄色葡萄球菌的抑制圈直径分别为 9.3 mm 和 8.6 mm，而纯 g-C_3N_4 的抑菌圈直径仅为 4.6 mm。研究结果表明，Au NPs 的 SPR 特性在调节禁带宽度时起到了重要作用，使 AuCN-HT 的禁带宽度降低到 2.25 eV，从而显著增强了 AuCN-HT 对光的吸收能力。

综上可知，将 Ag、Pt、Au NPs 沉积在不同结构的 g-C_3N_4 载体上，通过 SPR 能够增强光吸收，扩大光响应范围，还可以捕获 e^-，加速载流子的分离，促进 ROS 的产生，提升光催化抗菌性能。但还需进一步探讨光催化抗菌的具体机制，包括 ROS 的生成途径及种类、贵金属与细菌的相互作用等，深入理解其作用机理，为后续材料的设计提供理论支持。

2.3 元素掺杂

通过在 g-C_3N_4 中掺入非金属元素（如 O、P、S 等）取代其晶体结构中的 C 或 N 原子，可以有效缩小禁带宽度、扩展光吸收范围、减少载流子复合、增加表面活性位点、提升光催化反应效率[34-35]。

LIN 等[36]通过煅烧三聚氰胺和 S 的混合物制备了 xSCN。研究发现，在可见光照射下，xSCN 样品能吸收波长在 465～480 nm 范围的可见光。随着 S 掺杂量的增加，吸收边向长波长方向移动，带隙缩小，xSCN 能更高效地吸收光能。同时，S 取代 g-C_3N_4 中的 N，优化了电荷转移过程，使 xSCN 可以有效杀灭溶液中超过 70%的大肠杆菌，充分展现了其在实际应用中的潜力。此外，研究人员进一步将 N、S 同时掺入石墨烯量子点（GQDs）中，有效调控其能带结构和电荷结构[37-40]。LI 等[40]采用高温煅烧法合成了 N、S 共掺杂的石墨烯量子点（N,S-GQDs）/g-C_3N_4 复合光催化剂（NSG-CN），通过平板计数法测定其光催化抗菌性能。结果表明：在黑暗环境中，纯 g-C_3N_4 和 NSG-CN 对大肠杆菌的浓度并无明显影响；但在可见光照射下，NSG-CN 表现出优异的抗菌活性，大肠杆菌浓度降至 10.4%，而纯 g-C_3N_4 仅降低至 60.9%。NSG-CN 的禁带宽度为 2.69 eV，略低于纯 g-C_3N_4 的 2.74 eV。BAI 等[41]采用热缩聚和化学氧化法制得氧含量为 12%的 O-g-C_3N_4，其富含亲水性羧基和羟基，分散性明显增强，相较于纯 g-C_3N_4，ROS 的生成量增加了 13.8%；通过静电纺丝法制备了聚乙烯醇（PVA）/壳聚糖（CS）/O-g-C_3N_4 复合纳米纤维膜（PCO），与 O-g-C_3N_4 相比，PCO 的抗菌活性显著提高；在对初始浓度为 10^7 cfu/mL 的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌实验中，产生的抗菌圈直径分别可达（26±0.1）mm 和（16±0.2）mm。模拟日光照射 24 h 之后，对大肠杆菌的抑制率高达 97%。

元素掺杂策略主要通过调整能带结构、拓宽光吸收范围和优化电荷转移等途径提升 g-C_3N_4 光催化的抗菌性能。这些研究为开发高效光催化抗菌材料提供了新的思路。未来可结合光谱分析技术（如时间分辨光谱、瞬态吸收光谱）来实时监测反应过程中载流子的转移和复合过程，深入研究复合材料在光催化反应过程中的 e^- 动态行为。

2.4 异质结的构建

异质结通过在不同半导体材料之间形成密切的接触界面，从而产生内建电场，促进光生载流子的定向传输[42-44]。如图 5 所示，基于 g-C_3N_4 的常见异质结类型有 Schottky 结、Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型、Z 型及一种新的 S 型异质结[42]。

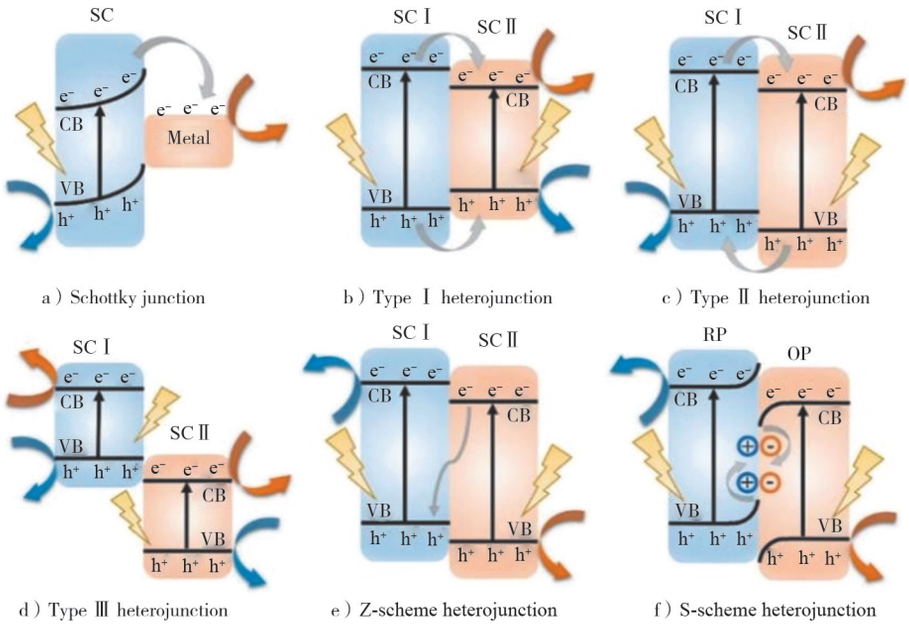


图 5　常见的 g-C_3N_4 基异质结结构示意图[42]

Fig. 5　Diagram of common g-C_3N_4 base heterojunction structure[42]

LI 等[43]结合氧化还原石墨烯(rGO)卓越的电荷迁移率和优异的导电性，同时添加三维层状聚苯胺(PANI)，构建了一种新型非金属 Z 型 g-C_3N_4/rGO/PANI 异质结作为高效抗菌光催化剂。研究发现，经过 1 h 可见光照射后，其能够完全抑制浓度为 10^6 cfu/mL 的金黄色葡萄球菌，抑菌率达到了 100%，杀菌效果明显优于纯 g-C_3N_4 和 g-C_3N_4/rGO。如图 6 所示，这主要是由于 rGO 作为 e^- 介质有效增强了 e^--h^+ 对的分离，将 e^- 转移到 PANI 的 HOMO 轨道上，它们之间高效的 e^- 传输显著提高了抗菌效率。

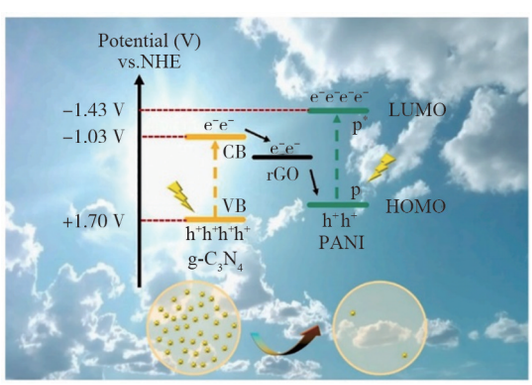
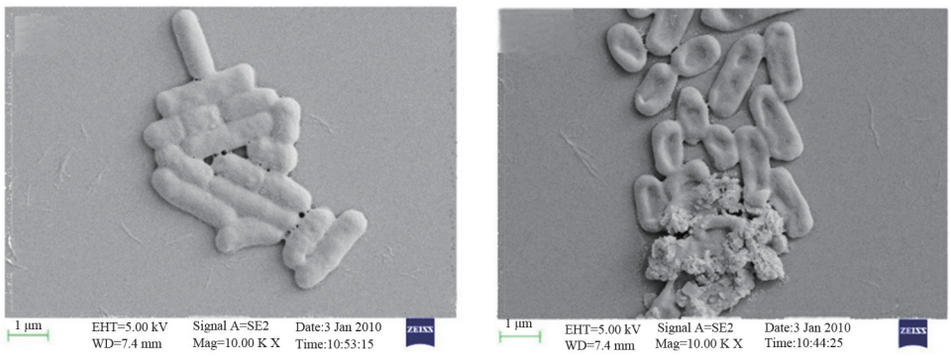


图 6　g-C_3N_4/rGO/PANI 抗菌机理示意图[43]

Fig. 6　Schematic illustration of antibacterial mechanism of g-C_3N_4/rGO/PANI[43]

CHE 等[45]采用水热聚合法合成了 S 型异质结 2D/3D P-g-C_3N_4/BiOBrs。结果表明，材料内部的 S 型异质结促进了光生载流子的快速分离和转移。光照 80 min 后，该材料对浓度为 3×10^8 cfu/mL 的耐多药鲍曼不动杆菌 28 的杀菌率几乎为 100%，对金黄色葡萄球菌的杀菌效率也高达 99.9%。此外，该催化剂具有良好的稳定性，经过连续 5 次循环后，其光催化杀菌性能变化不大，说明该材料在多次使用后仍能保持高效的抑菌能力，确保了长期使用的可靠性和有效性，可以继续扩大应用范围。FENG 等[46]制备了具有高比表面积和超薄层状结构的多孔 g-C_3N_4 纳米片，并在其表面和孔周围均匀沉积 $Bi(OH)_3$ NPs，合成了一种新型的二维 CNB 异质结光催化剂。在可见光照射下，CNB 对初始浓度为 5×10^7 cfu/mL 的大肠杆菌的光催化抗菌效率高达 99.3%，分别是 $Bi(OH)_3$ 的 4.3 倍和 g-C_3N_4 的 3.4 倍。经过 5 次抗菌循环实验，CNB 依然保持稳定的光催化抗菌性能，表明其在多次重复使用后仍具备高效抗菌作用。CNB 异质结的构筑增强了其对可见光的吸收，促进光激发下载流子的分离和迁移，提高光催化抗菌性能。如图 7 a)所示，在光催化处理之前，大肠杆菌细胞表面光滑，呈现典型的杆状形态，细胞膜完整无损，表明大肠杆菌处于健康状态。然而，在光照条件下，光催化剂会产生高活性的 ROS，直接导致细胞膜的破坏、胞内蛋白渗漏和蛋白分解。经过 2 h 可见光照射后，如图 7 b)所示，细胞严重塌陷，导致细菌死亡。

以上研究结果表明，异质结的构建极大提高了载流子的分离效率，显著提升了 g-C_3N_4 的光催化抗菌性



a）光照前　　b）光照后

图7　在CNB存在的条件下，大肠杆菌被可见光照射2 h前后的SEM图像[46]

Fig. 7　SEM images of *E. coli* before and after 2 h of visible light irradiation over CNB[46]

能，但未对载流子如何具体提高抗菌活性机制进行深入研究。此外，现有研究主要集中于大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等常见菌株，少有关于耐药菌如耐多药鲍曼不动杆菌的研究。因此，未来研究可扩展至更多种类的病原菌，特别是耐药菌，以增强其广谱应用性。

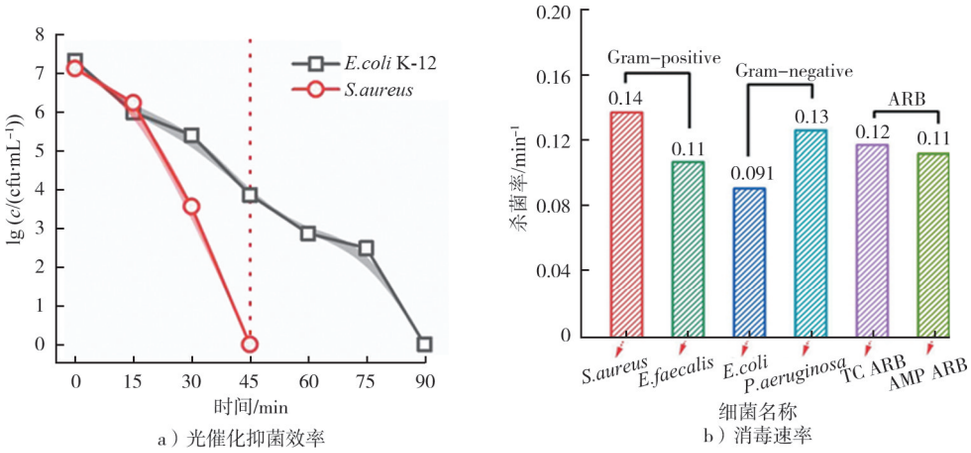
3　$g\text{-}C_3N_4$ 在光催化抗菌领域的应用

3.1　水消毒

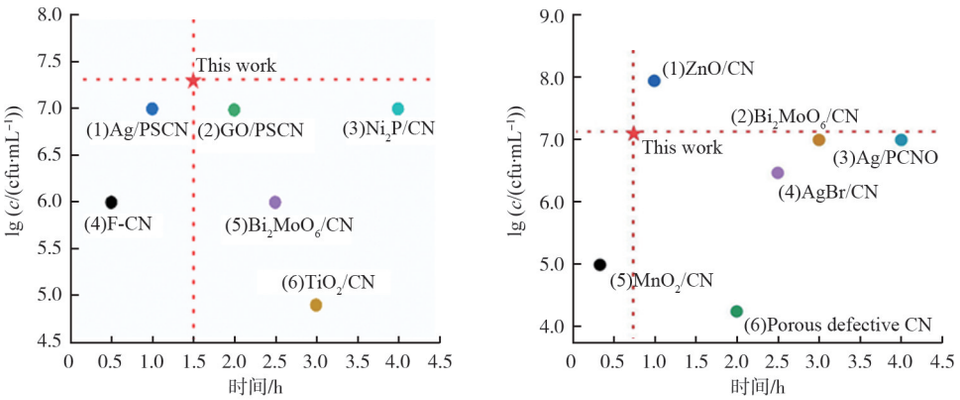
据世界卫生组织统计，在人类罹患的各类疾病中，高达80%的病例与水污染存在直接或间接关联。鉴于此，如何从再利用的水源中高效提取出高品质且清洁的饮用水，已成为当前亟待解决的重要课题，对于保障人类健康与生命安全具有至关重要的意义。

当前，传统水处理方法如氯化、紫外线照射和臭氧处理等，在消毒和病原体去除方面发挥着主要作用[6]。然而，这些方法均存在毒性、环境破坏性和能耗较高等显著弊端。因此需要寻求更为高效且低毒的新技术来灭活致病性微生物，以保障人类饮用水的安全。在众多方法中，光催化消毒技术因其高效性、低毒性及环保性，被广泛视为灭活水中病原体的优选方案[47]。

ZENG等[48]首次将PEI接枝到$g\text{-}C_3N_4$纳米片的表面，使$PEI/g\text{-}C_3N_4$复合物的Zeta电位变为正值，显著增强了其与表面带负电的细菌之间的黏附作用，进而提高了ROS对细菌灭活的有效利用率。在模拟太阳光照射45 min后，对大肠杆菌（初始浓度为2×10^6 cfu/mL）的抑菌效果达到80%。经过连续3次循环灭活实验，该光催化材料对大肠杆菌仍保持较高的灭活效率，表明该催化剂具有良好的稳定性和可重复使用性。YANG等[49]利用可吸收宽波段太阳光的红磷（RP）[50]和强导电性的磁性碳纳米管（MCNT）[51]，成功设计合成了具有优异光催化抗菌性能的MCNT/RP/CN三元异质结。如图8所示，于可见光分别照射45 min和90 min后，对初始浓度（c）为10^7 cfu/mL的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌率可达100%。MCNT/RP/CN对一系列细菌均具有优异的光催化杀菌性能，表明它具有广谱抗菌活性。MCNT/RP/CN对金黄色葡萄球菌的一级杀菌率为0.14 min^{-1}，比纯$g\text{-}C_3N_4$的杀菌率提升了约9.3倍。多次循环使用后，其对金黄色葡萄球菌的杀菌效率保持稳定，充分表明该催化剂具备较好的循环稳定性，在实际应用中能够持续有效地发



a）光催化抑菌效率　　b）消毒速率



c）对大肠杆菌的光催化抑菌性能比较　　d）对金黄色葡萄球菌的光催化抑菌性能比较

图 8　MCNT/RP/CN 的光催化抗菌性能[51]

Fig. 8　Photocatalytic bacteriostatic performance of MCNT/RP/CN[51]

挥杀菌作用。此外，在真实的水体环境中，MCNT/RP/CN 异质结对各类致病微生物均表现出高效消毒能力，并在大规模示范应用中证明了其优良的消毒活性。

研究人员通过调节 g-C_3N_4 基复合材料的表面电荷，使其与细菌相互作用，可提高 ROS 的有效利用率，在光催化水消毒方面表现出高效性、广谱性和高杀菌率等优势，具有良好的实际应用潜力。未来可探究光催化剂在不同水质和环境条件下的应用表现，特别是在复杂真实水体环境中的消毒效果和长期稳定性。

3.2　抗菌敷料

皮肤作为人体的屏障可有效阻止细菌和病毒的侵入。当皮肤屏障受损时，易导致细菌感染并影响伤口愈合[52]，甚至会引发感染性休克和死亡[53]。虽然青霉素等抗生素对细菌感染有显著疗效，但细菌耐药性问题日益严重，因此需要寻求一种治疗手段来对抗这一严峻挑战。抗菌敷料作为一种重要的治疗手段，不仅能够有效杀菌，还有助于促进组织修复和伤口愈合。

LIU 等[53]成功制得氮化碳-聚多巴胺-银复合物（C_3N_4-PDA-Ag），又采用溶液浇铸法将其与壳聚糖（CS）复配，得到了 C_3N_4-PDA-Ag@CS 膜。如图 9 所示，当菌液浓度为 10^5 cfu/mL，C_3N_4-PDA-Ag 和 CS 质量比为 0%（C_0）时，与未加 C_3N_3PDA-Ag@CS 膜的对照组（Control）相比，其对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的抗菌率分别仅为 2.99%和 1.47%；当质量比为 0.5%（C_1）、1.5%（C_2）、2.5%（C_3）时，对 2 种细菌的抗菌率均超过 80%。研究发现，C_3N_4-PDA-Ag@CS 复合敷料在可见光照射下，通过促进胶原沉积和加速表皮修复，改善了感染小鼠的伤口愈合情况。PDA 具有良好的黏附性，其充当了 C_3N_4 和 Ag 之间的“桥梁”，实现了光催化剂与 Ag NPs 之间的协同抗菌作用。此外，由 Ag NPs 产生的 SPR 引发吸收光显著红移，增强了可见光的捕获能力，提高了光催化的抗菌活性。

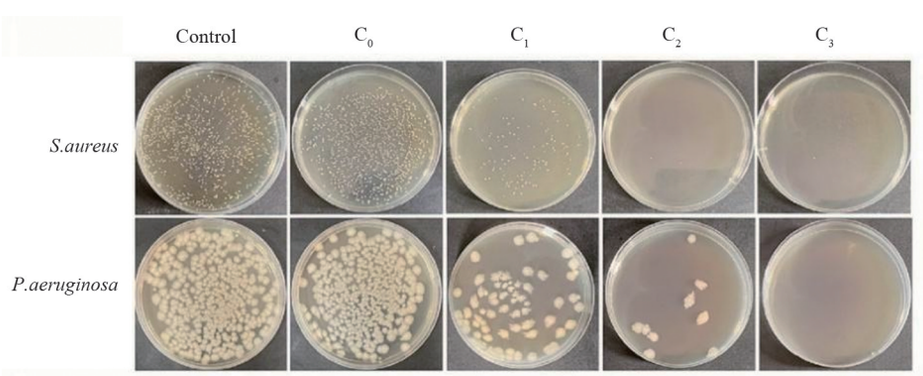


图 9　经 C_3N_4-PDA-Ag@CS 处理后平板上存活的金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌菌落的图像[53]

Fig. 9　Images of surviving *S. aureus* and *P. aeruginosa* colonies on plates after C_3N_4-PDA-Ag@CS treatment[53]

CHENG 等[54]通过水热法用锌中-四（4-羧基苯基）卟啉（ZnTCPP）对 g-C_3N_4 进行了酰胺化修饰，构建了有机-无机复合材料（ZP/CN），禁带宽度减小至 1.79 eV，显著增强了可见光的捕获能力。对 200 μg/mL 的 ZP/CN 进行可见光照射，发现其在 10 min 内显示出优异的体内和体外抗菌活性，对菌液浓度为

10^6 cfu/mL的金黄色葡萄球菌实现了高达99.99%的杀菌率。在可见光照射下，ZP/CN不仅能有效抑制细菌生长，还有助于促进血管生成并抑制炎症，加速伤口愈合。实验结果还表明，ZP/CN在体内具有良好的生物安全性，不会对皮肤结构的重建产生不良影响。

综上所述，g-C_3N_4复合敷料兼具优异的光催化抗菌性能和促进伤口愈合的能力，并且在体内外均具有良好的生物相容性，对细胞无明显毒性作用，不会对皮肤结构的重建产生不良影响，为临床应用提供了安全保障。未来可进一步评估其长期生物相容性，确保其在长期使用中的安全性和稳定性。

3.3 抗菌纺织物

环境污染的加剧对人类健康也有潜在的负面影响。因此，科学界和纺织工业界纷纷加大研究力度，致力于研发一种具备减少或者消除有机化合物和致病微生物能力的功能性织物，减少织物表面微生物的存活和繁殖，预防疾病的传播，为人类提供健康保护[10]。这种抗菌织物通常具有更长的使用寿命和更低的维护成本。除此之外，由于减少了洗涤频率，它们还可以降低对水和能源的依赖，减轻环境压力。氮化碳复合物在抗菌纺织品中的应用备受关注，其独特的物化性质使其在抑制微生物方面展现出巨大潜力。

PEDROSA等[10]采用浸渍法成功制备了g-C_3N_4与氧化石墨烯(GO)复合的功能性棉织物，在17.2 W/m^2的LED光照射下，将质量浓度为0.7 g/L的g-C_3N_4和GO/g-C_3N_4分别作用于细菌60 min后，大肠杆菌的失活率(初始浓度为10^3～10^4 cfu/mL)超过了99.2%。当将GO/g-C_3N_4涂层织物暴露在光下时，GO可作为光激发g-C_3N_4的e^-受体，有效减缓e^--h^+对的重组速率，促进ROS的生成。MEGANATHAN等[55]采用化学氧化聚合法制备了g-C_3N_4和导电聚合物聚吡咯(PPY)的复合材料(CNPPY)，采用垫干固化技术，在棉织物(CT)上涂覆了不同种类的CNPPY涂层，得到CNPPYCT复合材料。相较于单独的g-C_3N_4和PPY涂层，CNPPYCT复合材料对大肠杆菌具有明显的抗菌活性，可见光照射4 h后，在菌液初始浓度为10^8 cfu/mL的情况下，抗菌率达到了85%。光催化清洁测试表明，该复合材料的用水量仅为1 cm^2/mL，展现出持久的光催化去污和自清洁功能。

以上研究表明，将g-C_3N_4与导电聚合物等复合材料结合，在织物表面形成抗菌涂层，能有效抑制细菌的生长。这种技术所制备的抗菌纺织物不仅具备长效抗菌能力，还具有光催化清洁和自清洁功能，可降低维护成本、减轻环境压力，独特的抗菌性能使其成为制备功能性织物的理想材料之一。可见，g-C_3N_4在抗菌织物领域具有广阔的应用前景，有望为人类提供更健康、更安全的生活环境。

3.4 食品包装

食源性病原体污染在全球范围内呈现出愈发严重的态势，这种污染主要由细菌、病毒、寄生虫和霉菌等病原体引起，并且能够通过食物传播，严重威胁人类健康[56]。g-C_3N_4基复合材料光催化剂凭借其卓越的抗菌特性和环境友好性，在开发符合环保标准的抗菌食品包装材料方面具有应用潜力。

NI等[57]用水热法成功合成了g-C_3N_4/二硫化钼纳米点(CNMo)，将其均匀分散于魔芋葡甘露聚糖(KGM)中，得到一种新型纳米复合膜(KCNMo)。该复合膜在光照下表现出显著的抗菌活性，经过1 min光照处理，可观察到大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的形态明显缩小，且部分细菌的细胞膜凹陷。光照5 min时，这2种细菌的细胞膜结构遭到严重破坏，出现孔洞，说明细菌已被完全杀灭。此外，KCNMo薄膜具有优越的食品保鲜能力，用其包装的圣女果在18 d内均保持良好状态，细胞活性高达95%，明显优于无包装及普通聚乙烯包装。LIU等[58]成功制备了具有良好抗菌活性的石墨相氮化碳/壳聚糖/聚乙烯醇的新型食品包装膜(g-C_3N_4/CS/PVA)，通过抗菌圈法对其抗菌效果进行了评价。结果表明：g-C_3N_4的引入显著增强了膜的抗菌活性，且其抗菌效果随g-C_3N_4含量的增加而增强；通过不同膜对草莓保鲜度的影响实验发现，g-C_3N_4/CS/PVA复合膜在96 h内能够有效保持草莓的保鲜效果，而其他对比膜组的草莓在48、72、96 h都有不同程度的变质、腐烂。g-C_3N_4的加入不仅改善了膜的亲水性和水蒸气透过率，还在可见光照射下产生了$\cdot O_2^-$、$\cdot OH$等ROS，进一步增强了膜的抗菌性能。

g-C_3N_4基复合材料具有优异的光催化性能，其在可见光照射下生成ROS，显著增强了复合膜的抗菌性能，改善了膜的物理特性(如亲水性、水蒸气透过率)，可有效延缓食品的腐败变质，保持食品的新鲜度和营养价值，减少食品浪费，在食品保鲜应用中展现出巨大的潜力。然而，在实际应用过程中，光照条件是光催化效果的关键因素之一，还需要考虑光源的稳定性和可控性，以确保光催化效果的稳定性和可靠性。

4　问题与展望

4.1　面临的问题

通过形貌调控、贵金属沉积、元素掺杂和异质结构建等手段对 g-C_3N_4 进行功能化改性，可在一定程度上减少 g-C_3N_4 e^--h^+ 的复合，增强氧化还原性，进而产生充足的 ROS，提高 g-C_3N_4 的抗菌活性，其在水消毒、抗菌敷料、抗菌纺织物和食品包装等领域的应用研究已取得一定进展，弥补了 g-C_3N_4 的不足，为进一步提高 g-C_3N_4 光催化抗菌剂的应用性能提供了重要参考。然而，g-C_3N_4 基光催化抗菌剂在抗菌机理和应用方面仍面临一些问题。

1）抗菌机理　尽管 g-C_3N_4 光催化抗菌剂表现出优异的光催化抗菌性能，但其抗菌机理尚未完全阐明光催化过程中 ROS 与细菌细胞膜及内溶物破坏的关系。

2）抗菌广谱性　现有研究集中于大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等常见菌株，鲜有涉及其他类型微生物，限制了其在不同场景的应用。

3）适应性　在实际应用中，g-C_3N_4 光催化抗菌剂可能会受到环境因素（如 pH 值、温度、光照强度等）的影响，表现出不稳定性。例如，pH 值的变化会影响 g-C_3N_4 复合材料表面电荷的分布，从而影响其光催化反应的进行。

4.2　研究展望

未来，针对 g-C_3N_4 基光催化抗菌剂的研究将聚焦于其在材料设计、抗菌性能优化与实际应用中的潜力，以应对日益严峻的微生物污染挑战。主要研究集中在以下几个方面。

1）深化机理研究　进一步研究 g-C_3N_4 基光催化剂所产生的 ROS 类型和抗菌机制。例如，使用电子顺磁共振技术跟踪 $\cdot O_2^-$、$\cdot$OH 等自由基的生成情况，揭示其在抗菌过程中的贡献。还可结合现代分子生物学技术，研究光催化剂与细菌细胞相互作用的具体路径，利用气相色谱、液相色谱、质谱等技术分析反应过程中中间产物的变化情况，深入了解自由基和其他活性物质破坏细菌细胞膜、蛋白质、DNA 等的具体机制。

2）探索广谱应用　随着耐药性细菌的增多，开发针对这些细菌如对抗药性大肠杆菌、耐甲氧西林金黄色葡萄球菌以及常见的真菌（如白色念珠菌、霉菌等）的光催化抗菌剂显得尤为重要，有利于拓展其在医疗和食品保鲜等领域的应用范围。

3）提升其适应性　合理构建 g-C_3N_4 基光催化剂，提高其在极端 pH 值、不同温度和光照强度下的稳定性，推动其在污水处理、医疗卫生和食品保鲜等领域的广泛应用。

参考文献/References：

[1] XUAN Jiaqi，FENG Weiguo，WANG Jiaye，et al. Antimicrobial peptides for combating drug-resistant bacterial infections[J]. Drug Resistance Updates，2023. DOI：10.1016/j.drup.2023.100954.

[2] 贾艳丽，仇燕. 抗菌肽的抗菌机制及其在医药中的应用前景[J]. 河北科技大学学报，2021，42(1)：67-74.
JIA Yanli，QIU Yan. Antimicrobial mechanism and application prospects in medicine of antimicrobial peptides[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2021，42(1)：67-74.

[3] WANG Kangfu，LYU Meiru，SI Tian，et al. Mechanism analysis of surface structure-regulated Cu_2O in photocatalytic antibacterial process[J]. Journal of Hazardous Materials，2024. DOI：10.1016/j.jhazmat.2023.132479.

[4] ZHOU Ziling，LI Bo，LIU Xiangmei，et al. Recent progress in photocatalytic antibacterial[J]. ACS Applied Bio Materials，2021，4(5)：3909-3936.

[5] HOU Fengming，WEI Wei，LI Yihang，et al. Target-oriented functionalization：Turning carbon nitride into a round-the-clock antimicrobial photocatalyst in water disinfection[J]. Chemical Engineering Journal，2023. DOI：10.1016/j.cej.2023.147039.

[6] GHODSI S，ESRAFILI A，SOBHI H R，et al. Synthesis and application of g-C_3N_4/Fe_3O_4/Ag nanocomposite for the efficient photocatalytic inactivation of Escherichia coli and Bacillus subtilis bacteria in aqueous solutions[J]. AMB Express，2021. DOI：10.1186/s13568-021-01324-3.

[7] FANG Yirong，PEI Shuaili，ZHUO Lin，et al. Phosphorus and sulfur codoped carbon nitride nanosheets with enhanced photocatalytic antibacterial activity and promotion of wound healing[J]. Applied Surface Science，2022. DOI：10.1016/j.apsusc.2022.152761.

[8] ZHANG Mengting，LIU Shujun，GAO Xianqiang，et al. Highly flexible carbon nitride-polyethylene glycol-cellulose acetate film with photocatalytic antibacterial activity for fruit preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024. DOI：10.1016/j.ijbiomac.2024.131161.

[9] GAO Boru，DOU Mengmeng，WANG Jin，et al. Effect of carbon nitride synthesized by different modification strategies on the performance

of carbon nitride/PVDF photocatalytic composite membranes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126877.

[10] PEDROSA M, SAMPAIO M J, HORVAT T, et al. Visible-light-induced self-cleaning functional fabrics using graphene oxide/carbon nitride materials[J]. Applied Surface Science, 2019. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.143757.

[11] FAN Yunde, ZHOU Ji, ZHANG Jin, et al. Photocatalysis and self-cleaning from g-C_3N_4 coated cotton fabrics under sunlight irradiation [J]. Chemical Physics Letters, 2018, 699: 146-154.

[12] 秦礼平. 石墨相氮化碳负载银基纳米颗粒复合材料的制备及其抗菌性能[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
QIN Liping. Synthesis and Antibacterial Properties of Silver-Based Nanoparticles Decorated g-C_3N_4 Composites[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.

[13] WANG Liyan, WANG Kehan, HE Tingting, et al. Graphitic carbon nitride-based photocatalytic materials: Preparation strategy and application[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(43): 16048-16085.

[14] 吴赟炎. 石墨相氮化碳 g-C_3N_4 及其复合材料的制备和光催化抗菌性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.

[15] 王姝雁. 石墨相氮化碳基复合材料的带隙调控及其光催化性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
WANG Shuyan. Bandgap Modification of g-C_3N_4-Based Composites and Their Photocatalytic Performance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

[16] 赵正亮. 石墨相氮化碳的多策略协同改性及其光催化性能研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
ZHAO Zhengliang. Multi-Strategy Synergistie Modification of Graphitic Carbon Nitride and Its Photocatalytic Performance Research[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.

[17] INAGAKI M, TSUMURA T, KINUMOTO T, et al. Graphiticcarbon nitrides (g-C_3N_4) with comparative discussion to carbon materials [J]. Carbon, 2019, 141: 580-607.

[18] 刘姝瑞, 谭艳君, 张明宇, 等. 抗菌材料的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2022, 39(1): 90-98.
LIU Shurui, TAN Yanjun, ZHANG Mingyu, et al. Research progress of antibacterial materials[J]. Journal of Textile Science & Engineering, 2022, 39(1): 90-98.

[19] KONG Xinyue, LIU Xiangmei, ZHENG Yufeng, et al. Graphitic carbon nitride-based materials for photocatalytic antibacterial application [J]. Materials Science and Engineering R: Reports, 2021. DOI: 10.1016/J.MSER.2021.100610.

[20] GROENEWOLT M, ANTONIETTI M. Synthesis of g-C_3N_4 nanoparticles in mesoporous silica host matrices[J]. Advanced Materials, 2005, 17(14): 1789-1792.

[21] THAKUR P, RAIZADA P, SINGH P, et al. Exploring recent advances in silver halides and graphitic carbon nitride-based photocatalyst for energy and environmental applications[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(11): 8271-8300.

[22] FU Junwei, YU Jiaguo, JIANG Chuanjia, et al. g-C_3N_4-based heterostructured photocatalysts[J]. Advanced Energy Materials, 2018. DOI: 10.1002/aenm.201701503.

[23] LIN Lihua, OU Honghui, ZHANG Yongfan, et al. Tri-s-triazine-based crystalline graphitic carbon nitrides for highly efficient hydrogen evolution photocatalysis[J]. ACS Catalysis, 2016, 6(6): 3921-3931.

[24] YAN Kai, MU Chenglong, MENG Lingjie, et al. Recent advances in graphite carbon nitride-based nanocomposites: Structure, antibacterial properties and synergies[J]. Nanoscale Advances, 2021, 3(13): 3708-3729.

[25] YADAV P, NISHANTHI S T, PUROHIT B, et al. Metal-free visible light photocatalyticcarbon nitride quantum dots as efficient antibacterial agents: An insight study[J]. Carbon, 2019, 152: 587-597.

[26] XIAO Jun, LIU Qiang, SONG Mian, et al. Directing photocatalytic pathway to exceedingly high antibacterial activity in water by functionalizing holey ultrathin nanosheets of graphitic carbon nitride[J]. Water Research, 2021. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117125.

[27] XU Jing, WANG Zhouping, ZHU Yongfa. Highly efficient visible photocatalytic disinfection anddegradation performances of microtubular nanoporous g-C_3N_4 via hierarchical construction and defects engineering[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 49: 133-143.

[28] WANG Yanbin, ZHAO Xu, CAO Di, et al. Peroxymonosulfate enhanced visible light photocatalytic degradation bisphenol A by single-atom dispersed Ag mesoporous g-C_3N_4 hybrid[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 211: 79-88.

[29] MA Shuanglong, ZHAN Sihui, JIA Yanan, et al. Enhanced disinfection application of Ag-modified g-C_3N_4 composite under visible light [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 186: 77-87.

[30] XU Jing, GAO Qiuzhu, BAI Xiaojuan, et al. Enhanced visible-light-induced photocatalytic degradation and disinfection activities of oxidized porous g-C_3N_4 by loading Ag nanoparticles[J]. Catalysis Today, 2019, 332: 227-235.

[31] WEI Feng, LI Jiadong, DONG Changchang, et al. Plasmonic Ag decorated graphitic carbon nitride sheets with enhanced visible-light response for photocatalytic water disinfection and organic pollutant removal[J]. Chemosphere, 2020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125201.

[32] MIROLIAEI M R, DADFARMA A, SHAHABI-NEJAD M, et al. Biochar/g-C_3N_4 nano hetero-structure decorated with pt nanoparticles for diazinon photodegradation and E. coli photodeactivation under visible light[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2024, 41(4): 1139-1150.

[33] HAI N D, HUY N, NAM N T H, et al. Comparative investigation of the characterization and photoactivity of gold-decorated graphitic carbon nitride: A study aspect of various synthesis approaches[J]. Surfaces and Interfaces, 2024. DOI: 10.1016/j.surfin.2023.103645.

[34] WEN Jiuqing, XIE Jun, CHEN Xiaobo, et al. A review on g-C_3N_4-based photocatalysts[J]. Applied Surface Science, 2017, 391: 72-123.

[35] OUYANG Liping，ZHAO Yaochao，JIN Guodong，et al. Influence of sulfur content on bone formation and antibacterial ability of sulfonated PEEK [J]. Biomaterials，2016，83：115-126.

[36] LIN Yanru，DIZON G V C，YAMADA K，et al. Sulfur-doped g-C_3N_4 nanosheets for photocatalysis：Z-scheme water splitting and decreased biofouling[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2020，567：202-212.

[37] ZHANG Xiaoxiong，QIN Xiaohong，ZHANG Wenjun. $NaYF_4$：Yb，Er with N-GQDs mixture：One-pot hydrothermal synthesis and its luminescent film[J]. Optical Materials，2021. DOI：10.1016/j.optmat.2021.110910.

[38] SANTIAGO S R M，LIN T，CHANG C，et al. Synthesis of N-doped graphene quantum dots by pulsed laser ablation with diethylenetriamine (DETA) and their photoluminescence[J]. Physical Chemistry Chemical Physics，2017，19(33)：22395-22400.

[39] LIU Yingbo，ZHOU Liang，LI Yanan，et al. Highly fluorescent nitrogen-dopedcarbon dots with excellent thermal and photo stability applied as invisible ink for loading important information and anti-counterfeiting[J]. Nanoscale，2017，9(2)：491-496.

[40] LI Jinlun，LIU Hulin，BAI Xin，et al. N，S-doped graphene quantum dots grafted graphiticcarbon nitride to boost its photocatalytic hydrogen evolution and antibacterial activity[J]. Nano，2022. DOI：10.1142/S1793292022500667.

[41] BAI Xuemei，SONG Tingting，LUAN Jingmin，et al. Polyvinyl alcohol/chitosan nanofiber membranes loaded with oxygenated graphitic carbon nitride nanosheets for enhanced photocatalytic bacteriostasis[J]. Journal of Applied Polymer Science，2023. DOI：10.1002/app.54081.

[42] ZHANG Xinyuan，LI Chenyu，DAI Lin，et al. Graphite carbon nitride photocatalytic materials：A roadmap to modification for current and future water purification[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2023. DOI：10.1016/j.jece.2023.110869.

[43] LI Xuyun，LIU Zhihai，WANG Jing，et al. Antibacterial activity of a nonmetal Z-scheme heterojunction photocatalyst[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A：Chemistry，2022. DOI：10.1016/j.jphotochem.2022.114019.

[44] DU Cuiwei，NIE Shiyu，FENG Weiwei，et al. Hydroxyl regulating effect on surface structure of BiOBr photocatalyst toward high-efficiency degradation performance[J]. Chemosphere，2022. DOI：10.1016/j.chemosphere.2021.132246.

[45] CHE Shuya，ZHOU Xiaoyu，ZHANG Lei，et al. Construction of a 2D layered phosphorus-doped graphitic carbon nitride/BiOBr heterojunction for highly efficient photocatalytic disinfection[J]. Chemistry，an Asian Journal，2022. DOI：10.1002/asia.202200095.

[46] FENG Jian，WANG Li，XIAO Bo，et al. Construction of a g-C_3N_4/$Bi(OH)_3$ heterojunction for the enhancement of visible light photocatalytic antibacterial activity[J]. International Journal of Molecular Sciences，2024，25(3)：1872-1888.

[47] SAMAL S K，DASH M，van VLIERBERGHE S，et al. Cationic polymers and their therapeutic potential[J]. Chemical Society Reviews，2012，41(21)：7147-7194.

[48] ZENG Xiangkang，LIU Yue，XIA Yun，et al. Cooperatively modulating reactive oxygen species generation and bacteria-photocatalyst contact over graphitic carbon nitride by polyethylenimine for rapid water disinfection[J]. Applied Catalysis B-Environmental，2020. DOI：10.1016/j.apcatb.2020.119095.

[49] YANG Hao，HE Dongyang，ZHANG Tingting，et al. Magnetic carbon nanotubes/red phosphorus/graphitic carbon nitride heterojunction for highly efficient visible-light photocatalytic water disinfection[J]. Chemical Engineering Journal，2023. DOI：10.1016/j.cej.2023.143309.

[50] WANG Wanjun，LI Guiying，AN Taicheng，et al. Photocatalytic hydrogen evolution and bacterial inactivation utilizing sonochemical-synthesized g-C_3N_4/red Phosphorus hybrid nanosheets as a wide-spectral-responsive photocatalyst：The role of type I band alignment[J]. Applied Catalysis B：Environmental，2018，238：126-135.

[51] ATEIA M，KOCH C，JELAVIĆ S，et al. Green and facile approach for enhancing the inherent magnetic properties of carbon nanotubes for water treatment applications[J]. PLOS One，2017. DOI：10.1371/journal.pone.0180636.

[52] ZHANG Xu，TAN Bowen，WU Yanting，et al. An injectable，self-healing carboxymethylated chitosan hydrogel with mild photothermal stimulation for wound healing[J]. Carbohydrate Polymers，2022. DOI：10.1016/j.carbpol.2022.119722.

[53] LIU Chennan，LING Junhong，YANG Liye，et al. Chitosan-based carbon nitride-polydopamine-silver composite dressing with antibacterial properties for wound healing[J]. Carbohydrate Polymers，2023. DOI：10.1016/j.carbpol.2022.120436.

[54] CHENG Hao，WANG Niuniu，YANG Yongqiang，et al. The enhanced visible light driven photocatalytic activity ofzinc porphyrin/g-C_3N_4 nanosheet for efficient bacterial infected wound healing[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2023，643：183-195.

[55] MEGANATHAN P，SELVARAJ L M，SUBBAIAH S，et al. A synergistic self-cleaning and antibacterial studies of photocatalytic carbon nitride/polypyrrole coated cotton fabrics for smart textile application[J]. Cellulose，2023，30(17)：11211-11230.

[56] FARID N，WAHEED A，MOTWANI S. Synthetic and natural antimicrobials as a control against food borne pathogens：A review[J]. Heliyon，2023. DOI：10.1016/j.heliyon.2023.e17021.

[57] NI Yongsheng，SUN Jing，WANG Jianlong. Enhanced antimicrobial activity of konjac glucomannan nanocomposite films for food packaging[J]. Carbohydrate Polymers，2021. DOI：10.1016/j.carbpol.2021.118215.

[58] LIU Shujun，GAO Xianqiang，FAN Hai，et al. Green and recyclable graphitic carbon nitride/chitosan/polyvinyl alcohol photocatalytic films with efficient antibacterial activity for fruit packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2023. DOI：10.1016/j.ijbiomac.2023.123974.