新型金属有机框架化合物在抗菌领域的应用研究

秦　渝[1]，张伯进[1]，陈琳琳[2*]

（1. 重庆医药高等专科学校药学院，重庆 401331；2. 泉州医学高等专科学校药学院，福建泉州 362010）

摘要：细菌感染引起的疾病对人类健康构成重大威胁。近年来，抗菌药滥用导致耐药微生物出现，同时新型菌株的产生，进一步加剧了细菌对人类健康和环境安全的威胁。因此，开发新型抗菌材料以应对“超级细菌”已成为当前研究的热点方向。金属有机框架材料（MOFs）凭借优异的结晶性、高孔隙率、大比表面积、易于修饰调控等优势，已成为抗菌领域的明星材料。然而，传统 MOFs 也存在一些缺陷，如亲水性差、抗菌周期长、缺乏靶向性等。为了克服这些不足，对传统 MOFs 的后修饰是一种重要的策略。基于此，文章总结了新型 MOF 抗菌材料的几种设计方法，包括修饰 MOF 金属节点、修饰有机配体、修饰 MOF 表面及孔道结构、与其他材料复合等，旨在为未来新型抗菌 MOFs 的合成提供参考。

关键词：细菌感染；新型抗菌材料；金属有机框架材料；后修饰；应用；研究进展

中图分类号：R944.9；R318.08；R978　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-8255(2025)09-1118-11

引用：秦　渝，张伯进，陈琳琳．新型金属有机框架化合物在抗菌领域的应用研究[J]．中国医药工业杂志，2025, **56**(9)：1118-1128．DOI：10.16522/j.cnki.cjph.2025.09.002

Research on the Application of Novel Metal-organic Frameworks in Antibacterial Field

QIN Yu[1], ZHANG Bojin[1], CHEN Linlin[2*]

(*1. Pharmacy College, Chongqing Medical and Pharmaceutical College, Chongqing 401331; 2. School of Pharmacy, Quanzhou Medical College, Quanzhou 362010*)

ABSTRACT: Diseases caused by bacterial infections pose a significant threat to human health. In recent years, the overuse of antibiotics has led to the emergence of drug-resistant microorganisms and the development of new bacterial strains. These factors have further exacerbated the threat of bacteria to human health and environmental safety. Consequently, the development of novel antibacterial materials to prevent the emergence of “superbugs” has become a key research focus. Metal-organic framework materials (MOFs) have emerged as star materials in the antibacterial field, owing to their exceptional crystallinity, high porosity, large specific surface area, and facile tunability through modification. However, traditional MOFs also exhibit some shortcomings, such as poor hydrophilicity, long antibacterial cycles, and lack of targeting. To overcome these drawbacks, post-synthetic modification of conventional MOFs has emerged as an important strategy. Based on this, this article summarizes several design approaches for novel MOF-based antimicrobial materials, including modification of MOFs metal nodes, functionalization of organic ligands, surface and pore structure modification, and the formation of composites with other materials. The aim is to provide a reference for the future synthesis of advanced antimicrobial MOFs.

Key Words: bacterial infection; novel antibacterial material; metal-organic framework material; post-modification; application; research progress

细菌感染是当前引起人类疾病和死亡的主要威胁之一，而抗菌药正是对抗细菌感染的关键、有效的治疗手段。然而，抗菌药滥用在一定程度上会促进细菌产生耐药性。近年来，耐药细菌以及越来越多新型菌株的出现给人类健康和社会经济造成了巨大负

收稿日期：2024-09-01

基金项目：泉州市医疗卫生领域指导性科技计划项目（2022N011S）、重庆医药高等专科学校人才引进项目（ygz2021109）

作者简介：秦　渝，博士，讲师，从事生物医药材料的研究和开发。

通信作者：陈琳琳，硕士，副教授，从事药物分析及生物医药材料的研究。

担，亟须开发新型抗菌材料以应对这一严峻挑战[1—3]。随着纳米技术、生物技术、高分子材料等领域的快速发展，抗菌材料的研发取得了显著进展，已开发了多种可应对耐药细菌威胁的新型抗菌材料，包括无机纳米粒子（如银纳米粒子、氧化锌和氧化铜纳米颗粒等[4—6]）和有机纳米材料［如脂质体[7]、聚合物纳米材料[8]、天然高分子材料（壳聚糖及海藻酸盐）等[9]］。尽管这些新型材料表现出一定的抗菌活性，但也存在较大缺陷。如金属离子及其氧化物的使用剂量过高，会产生较大的细胞毒性，表现出较差的生物相容性；无机材料的抗菌性能难以通过简单的方法进行调控[10]；单纯有机材料的稳定性、分散性和耐热性差，抗菌时间较短，也难以满足实际的应用要求。上述不足大幅限制这些材料的应用[11]。

金属有机框架（metal-organic frameworks，MOFs）材料是一种由有机配体与金属节点通过配位键自组装形成的多孔材料。它结合了有机抗菌材料和无机抗菌材料的优势，具有孔隙率高、比表面积大、空间结构多样化等优势[12]。与此同时，MOFs 作为重要的载药平台，生物相容性及生物安全性也受到了研究人员的广泛关注。金属离子在体内释放造成的毒性是 MOF 材料生物毒性的主要来源，因此目前主要选择 Zn、Zr、Ag、Cu 等生物安全性较高的金属作为金属节点，搭配间苯二甲酸、对苯二甲酸、天然氨基酸等具有水溶性优异的配体，构筑具有良好生物安全性及抗菌活性的 MOFs 材料。近年来，许多具有良好生物相容性的 MOFs 复合材料已被应用于药物递送、荧光成像、光动力治疗等领域[13—16]。

MOFs 的金属离子和有机配体选择多样，通过合理设计，可构建出呈现不同抗菌活性的 MOFs 材料[17]。目前 MOFs 主要通过以下几种策略（图 1[18]，图片使用已取得授权）实现抗菌活性，包括：①作为载体，通过释放金属离子、有机配体或孔道中负载的药物，实现杀灭细菌的目的[19]；②利

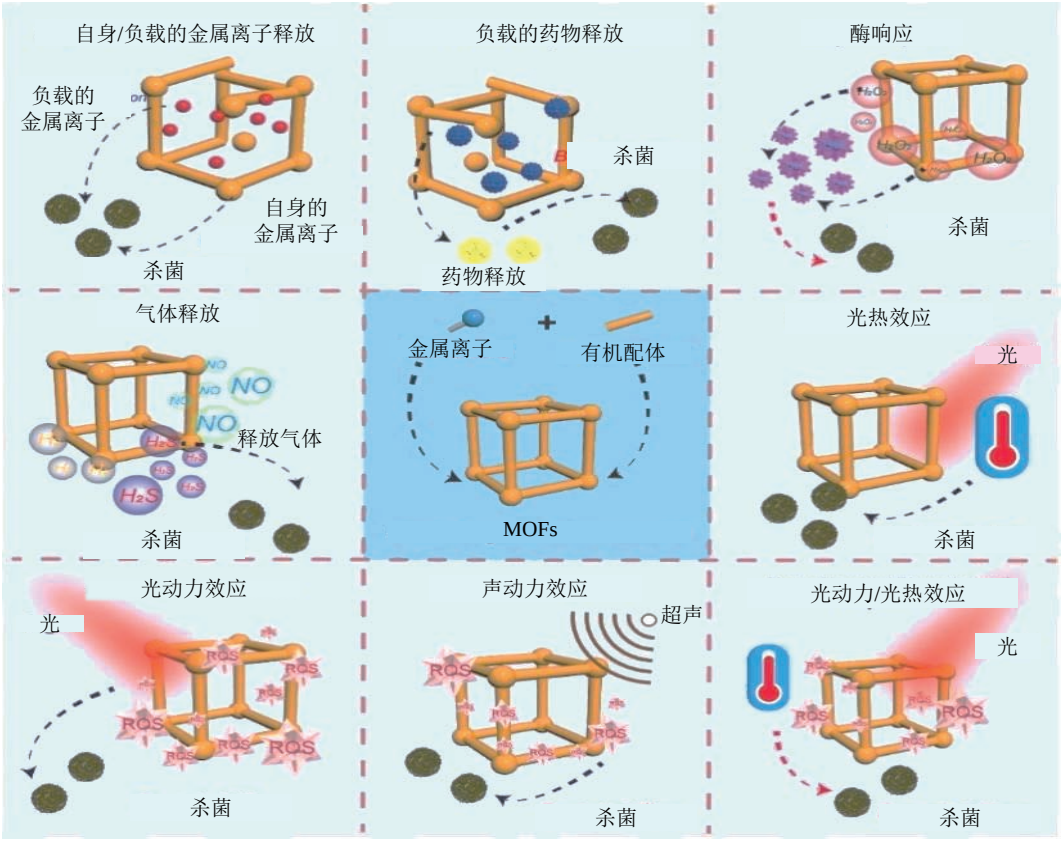


图 1 MOFs 抗菌机制图[18]

Fig.1 Antibacterial Mechanisms of MOFs[18]

用 MOFs 纳米酶的活性，催化释放具有抗菌活性的自由基类物质[20]；③通过光照产生热量或活性氧（reactive oxygen species，ROS）而达到抗菌目的[19]；④基于气体疗法，释放 NO 以杀死细菌[21]；⑤通过在 MOFs 孔道中负载功能材料，协同光动力、声动力等疗法实现抗菌效果[22]。

然而，传统 MOFs 材料存在亲水性差、抗菌周期长、缺乏靶向性、抗菌活性不足等缺陷，显著影响了临床应用。比表面积大、孔道结构丰富、金属节点与有机配体结构多样化等特点，为 MOFs 材料的后修饰提供了丰富的活性位点基础[23]。为了拓展 MOFs 材料在抗菌领域的应用，获得更高的 ROS 产生效率、更高的模拟酶活性、更强的光热性能等，可对传统 MOFs 材料进行后修饰[24]。本综述从 MOFs 材料的抗菌机制出发，从金属节点设计、有机配体修饰、MOFs 表面孔道修饰及 MOFs 复合材料构筑 4 个方面，系统介绍目前抗菌 MOFs 设计的主要研究思路，探究提升 MOFs 材料亲水性、抗菌活性及靶向性的策略，以期为新型抗菌 MOFs 材料的设计提供新的研究思路。

1　MOFs 材料的金属节点修饰

金属节点是 MOFs 材料具备抗菌活性的重要原因之一。Zr（Ⅳ）、Zn（Ⅱ）、Cu（Ⅱ）、Ag（Ⅰ）等具有良好的生物相容性，因此常被用于构筑生物安全的抗菌 MOFs 材料。

银纳米颗粒（Ag nanoparticles，Ag NPs）是常见的抗菌材料。当其与细菌接触，可释放出具有高抗菌活性的 Ag（Ⅰ），穿透细菌的细胞膜并影响生物代谢途径[25]。此外，基于近红外（near-infrared，NIR）的光动力治疗是目前较有效的抗菌策略之一。该策略基于物理作用，有效避免了细菌耐药性的影响，同时还具有无创、生物毒性低的特点[26]。据报道[27]，Ag NPs 与由 Cu（Ⅱ）、Zn（Ⅱ）等金属节点构筑的 MOFs 材料结合后可以产生光热效应，通过金属离子的抗菌活性与光热效应的协同作用增强抗菌效果。

例如，KIM 等[28]以钴为金属节点、对苯二甲酸为有机配体，成功构筑了光敏性 Co-MOFs，再以 $AgNO_3$ 为前驱体与 Co-MOFs 进行电置换，合成了 Ag@CoMOFs，如图 2（图片使用已取得授权）所示。该研究结果表明 Ag（Ⅰ）的掺杂有效提高了 Co-MOFs 的光热转化效率和抗菌效果。其抗菌机制如下：Ag@CoMOFs 在水相中持续释放抗菌金属离子（如银离子和钴离子），并表现出 Ag NPs 的强光热转化效应（即在 NIR 光照射下，温度可快速升高至 25 ～ 80 ℃），二者的协同作用使 Ag@CoMOFs 表现出高抗菌活性。例如，10 μg/mL 的 Ag@CoMOFs 对大肠埃希菌和枯草芽孢杆菌的杀菌率分别为 96.8% 和 97.3%，比相同质量浓度的抗菌药分别提高了 22.5 倍和 22.1 倍。甚至在质量浓度更低的 Ag@CoMOFs 处理条件下，也能表现出协同作用，例如在 NIR 光照射下，5 μg/mL 的抗菌材料对上述 2 种细菌的抗菌效率也能达到 92.1% 和 94.6%，表现出优异的抗菌性质。该研究展现了修饰 MOFs 材料的金属节点，可以赋予 MOFs 更强的抗菌性能，提升其临床应用的可行性。

2　MOFs 有机配体的修饰

有机配体是 MOFs 材料的支架。通过合理的设计，可以有效实现对 MOFs 材料形貌、孔径、比表面积等物理性质的调控。在原有 MOFs 材料骨架上对有机配体进行修饰，可引入阳离子结构、提升 ROS 产生效率、增强光热效率，从而发挥协同抗菌效应。该法是目前基于配体修饰构筑新型抗菌 MOFs 材料的有效策略。

LI 等[29]以 1,2,4,5- 苯四羧酸（1,2,4,5-benzenetetracarboxylic acid，BTEC）为配体，在 440 ℃条件下与硝酸铝反应制备了 MOFs（MIL-121），再利用 MIL-121 中形成的酸酐基团与吖啶黄（acriflavine，ACF）和四（4- 氨基苯基）卟啉［tetrakis（4-amoniophenyl）-porphyrin，Por］发生酰胺反应，得到具有光动力和光热效应的 HMIL-ACF-Por 材料（图 3，图片使用已取得授权）。研究结果表明，HMIL-ACF-Por 材料在 808 nm NIR 光照射下，复合材料会产生丰富的 ROS 和热能，升高氧压及局部温度，破坏细菌结构，对大肠埃希菌（革兰阴性菌）和金黄色葡萄球菌（革兰阳性菌）均表现出较好的抗菌效果。并且，该复

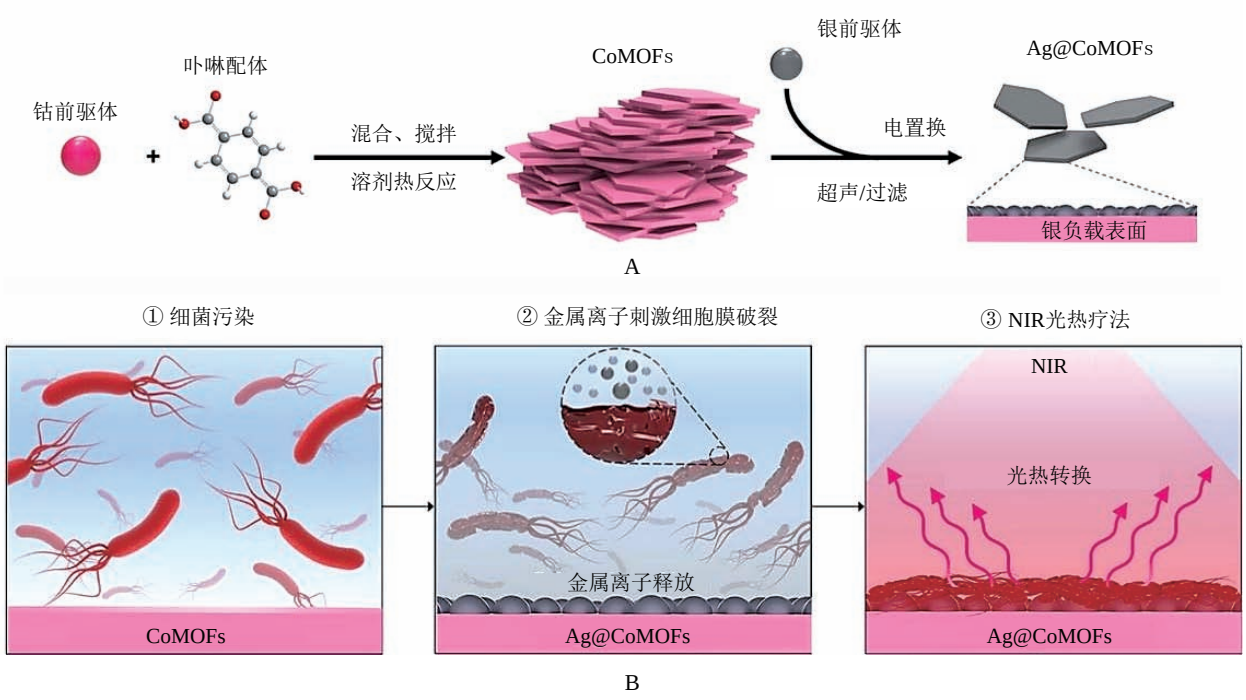


图 2 Ag@CoMOFs 合成（A）及抗菌机制（B）示意图 [28]

Fig.2 Schematic Diagrams of the Synthesis (A) and Antibacterial Mechanism (B) of Ag@CoMOFs[28]

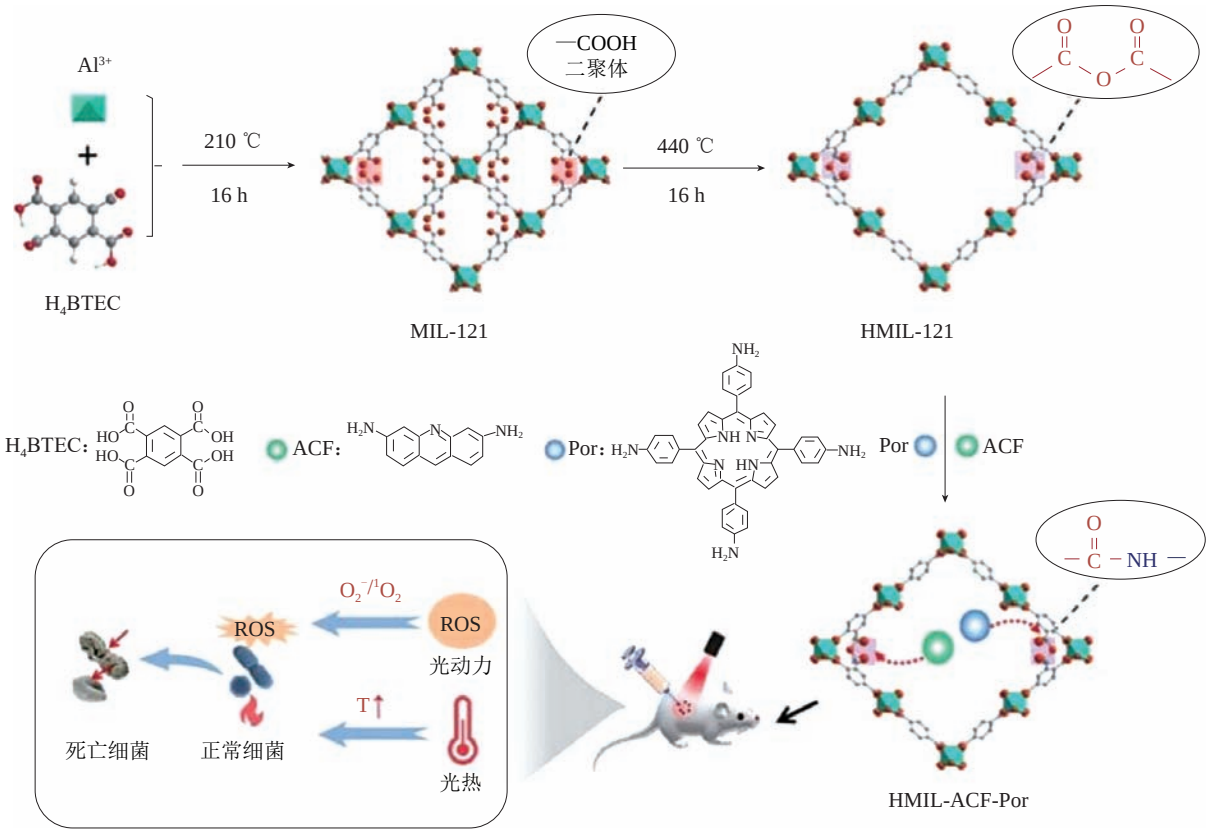


图 3 HMIL-ACF-Por 复合材料的合成及抗菌机制示意图 [29]

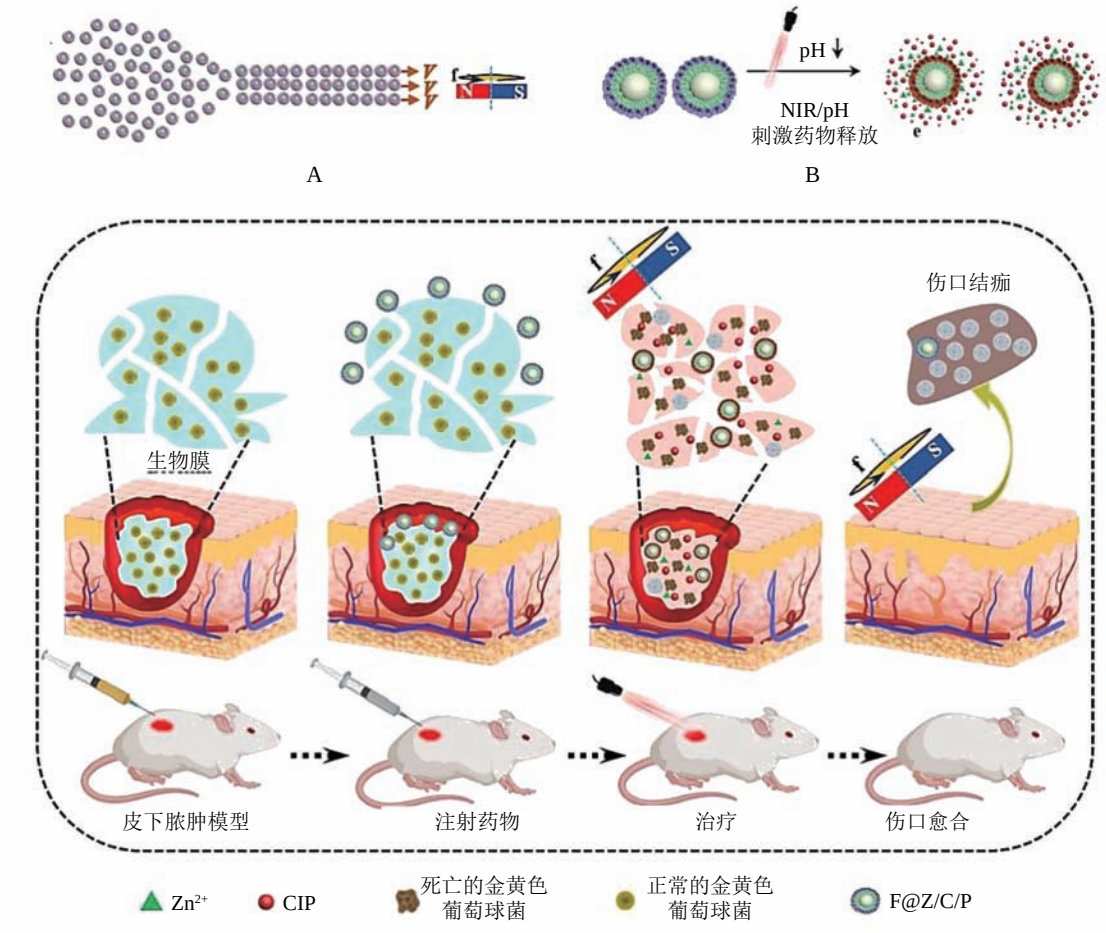
Fig.3 Schematic Diagram of the Synthesis and Antibacterial Mechanism of HMIL-ACF-Por [29]

合材料可有效缓解由细菌引起的炎症反应，加速被金黄色葡萄球菌感染伤口的愈合速度。最后，溶血试验和细胞毒性测试结果表明，该复合材料具有毒性低、生物相容性高等优点，表现出巨大的抗菌应用潜力。

3　MOFs 表面结构及孔道结构的修饰

MOFs 材料丰富的孔道结构为其带来了巨大的比表面积，为客体分子结合提供了丰富的位点。将具有抗菌活性的材料通过静电作用、π-π 相互作用、氢键等弱相互作用结合到 MOFs 材料表面或孔道内部，构筑基于 MOFs 的复合纳米材料，再将该复合材料敷在伤口上，MOFs 表面或孔道内部负载的活性分子就会缓慢释放到伤口处。这是目前新型抗菌 MOFs 设计的另一策略。

ZHU 等[30] 以 MOFs（ZIF-8）为基本载体，将具有磁性的 Fe_3O_4 颗粒自组装到骨架上，并负载抗菌药环丙沙星（ciprofloxacin，CIP），最后覆盖一层聚多巴胺材料得到了 F@Z/C/P。该复合材料在磁场作用下可以穿过皮肤组织，靶向到达感染区域，并在选定的 pH 值（pH 5.0）条件下释放药物，再由 NIR 触发光动力治疗。二者协同作用可有效破坏金黄色葡萄球菌的生物膜，治疗感染小鼠的伤口，且对周围组织和器官伤害较小，表现出低生物毒性。该复合材料在治疗后可从感染部位排出，从而加速伤口愈合，具有良好的生物相容性（图 4，图片使用已取得授权）。



A—MOFs 在磁场作用下的移动；B—在 NIR 和 pH 值作用下释放药物；C—在伤口部位的作用示意图。

图 4　F@Z/C/P 复合材料靶向抗菌示意图[30]

Fig.4　Schematic Diagram of the Targeted Antibacterial Property of F@Z/C/P[30]

TANG 等[31] 以 ZIF-8 为基本载体，负载 CIP 和姜黄素（curcumin，CUR），并通过聚 -L- 赖氨酸（poly-L-lysine，PLL）包裹，得到纳米颗粒 ZIF/PLL-CIP/CUR。该材料外层的 PLL 结构在细菌微环境中会被破坏，释放 CIP 和 CUR；并且该复合材料在蓝光照射下还会产生单线态氧及超氧阴离子自由基，有效抑制耐甲氧西林金黄色葡萄球菌（methicillin-resistance *Staphylococcus aureus*，MRSA）的生长。研究表明，该纳米材料可以通过化学和光动力疗法破坏 MRSA 的生物膜，在小鼠模型中对 MRSA 感染的伤口治愈率达到 98.81%，同时由于外层多肽链的存在，还表现出优异的生物相容性（图 5，图片使用已取得授权）。

将抗菌药封装在 MOFs 材料的孔道当中，制备负载抗菌药的 MOFs 也是常用的策略。使用时，抗菌药可从 MOFs 材料孔道中缓慢释放到创口处，有效延长药物作用时间，提高抗菌效率，避免抗菌药的大剂量使用。DASTNESHAN 等[32] 将头孢唑

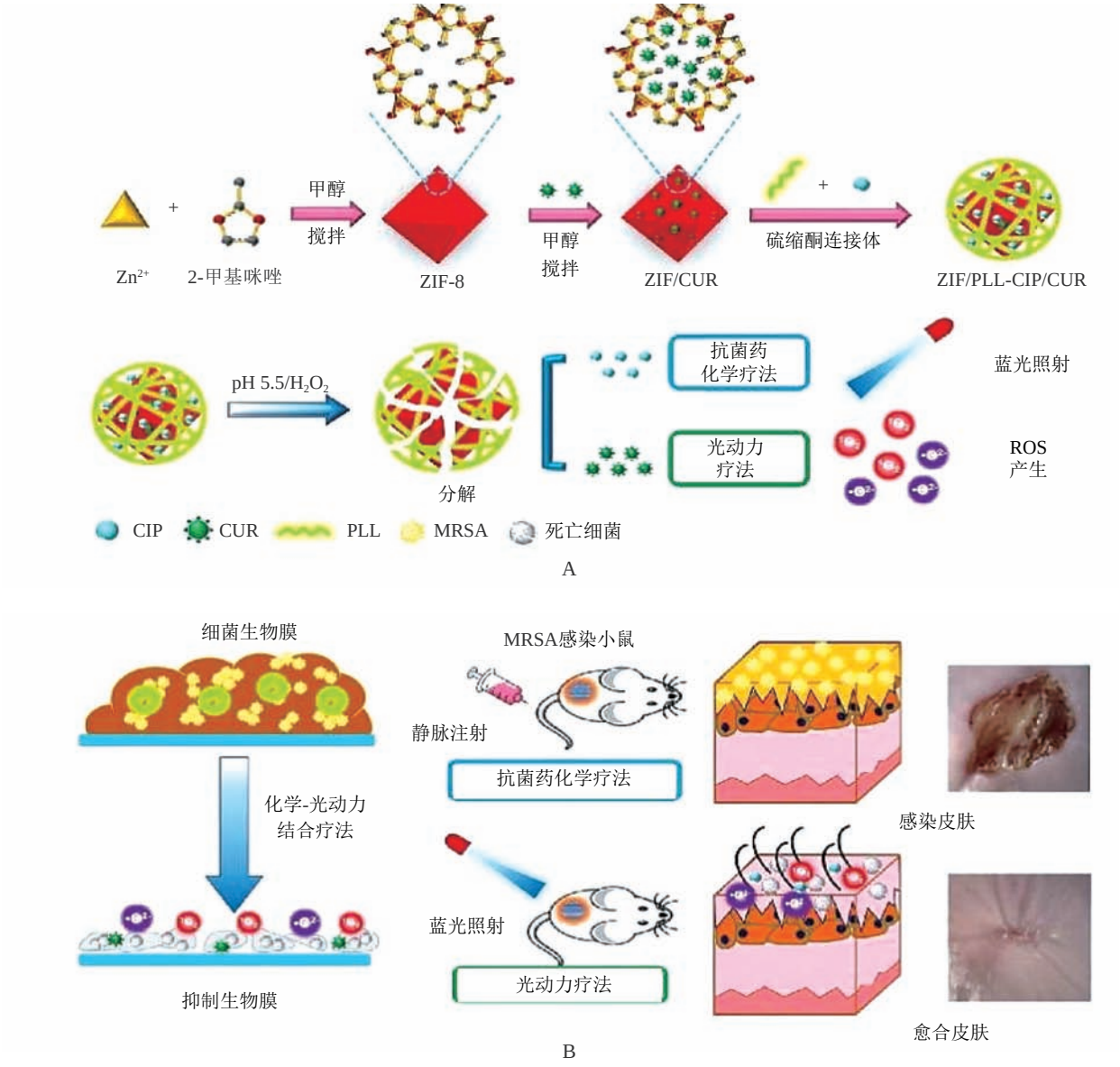


图 5 ZIF/PLL-CIP/CUR 复合材料合成（A）及抗菌机制（B）示意图[31]

Fig.5 Schematic Diagram of the Synthesis (A) and Antibacterial Mechanism (A) of ZIF/PLL-CIP/CUR[31]

林（cefazolin，CEF）负载到 2 种 MOFs（UIO-66 及 UIO-66-NH_2）孔道中，相较于 CEF 单独给药方式，制备的 2 种 CEF-MOFs 复合材料的最小抑菌浓度（minimal inhibit concentration，MIC）和最小杀菌浓度（minimum bactericidal concentration，MBC）均明显降低。同时，MOFs 材料可以有效调节生物膜的膜电位，因此表现出更强的抗生物膜活性（图 6，图片使用已取得授权）。

具有过氧化物酶（peroxidase，POD）活性的纳米酶材料可以催化 H_2O_2 产生羟基自由基（·OH），高毒性的羟基自由基可以通过与细菌的蛋白质、DNA 和脂质发生不可逆反应而杀灭细菌。这种方法被称为化学动力学疗法（chemo dynamic therapy）[33]。然而，细菌感染的伤口部位通常具有高浓度的谷胱甘肽（glutathione，GSH），表现出强还原性，会和羟基自由基反应，清除 POD 催化产生的羟基自由基，从而削弱纳米酶的杀菌能力 [34]。而以 Cu（Ⅱ）为金属节点构筑的 MOFs，可以氧化伤口部位的 GSH，从而抑制它与羟基自由基的反应，同时产生的 Cu（Ⅰ）可以进一步与 H_2O_2 作用，促进更多的羟基自由基释放，以增强抗菌效果 [35]。

MO 等 [36] 以 Cu-ZIF 为基本骨架，合成了用 G-四链体 / 血红素 DNA 酶适应体探针和单宁酸螯合的金纳米粒子修饰的 Cu-MOF 纳米片（G-quadruplex/hemin DNAzyme-aptamer probes and tannic acid-chelated Au nanoparticle-decorated Cu-based MOF nanosheets，GATC），结构如图 7（图片使用已取得授权）所示。研究表明，相较于传统的 Cu-ZIF 材料，GATC 表现出更强的催化性能。同时，负载的金纳米粒子和 DNA 酶提高了 POD 的反应活性，能刺激产生更多的羟基自由基，因此相比于未修饰的 Cu-ZIF，GATC 表现出更优异的抗菌能力。该研究表明，GATC 在 3 μg/mL 剂量下即对 MRSA 表现出优异的杀伤能力。此外，由于 GATC 具有高效的过氧化物模拟酶活性，还可以通过催化显色反应来实现杀伤金黄色葡萄球菌过程的可视化。

除了金属离子本身的抗菌活性、光动力治疗、化学动力学疗法外，还可以借助 NO 气体来实现抗菌。其机制是 NO 与氧气反应时，产生 N_2O_3 和过氧亚硝酸盐，可氧化细菌的脂质，造成细胞膜损伤，从而杀灭细菌 [37]。然而，利用 NO 气体治疗的方法目前还存在一些缺陷，如难以有效运输 NO 并控制

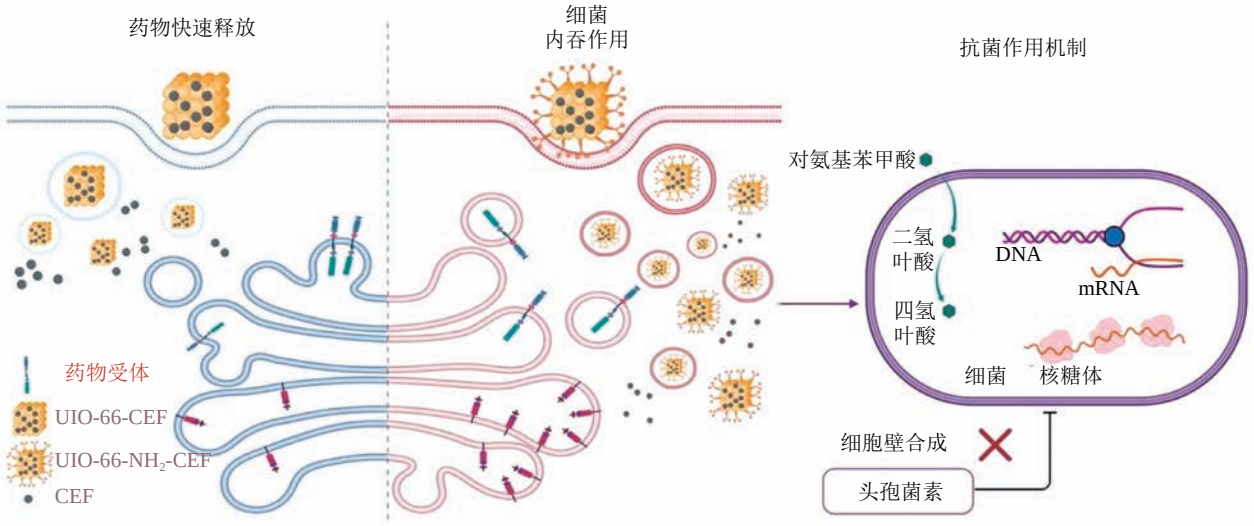


图 6　UIO-66-CEF 及 UIO-66-NH_2-CEF 复合材料的抗菌机制示意图 [32]

Fig.6　Schematic Diagram of the Antibacterial Mechanisms of UIO-66-CEF 及 UIO-66-NH_2-CEF [32]

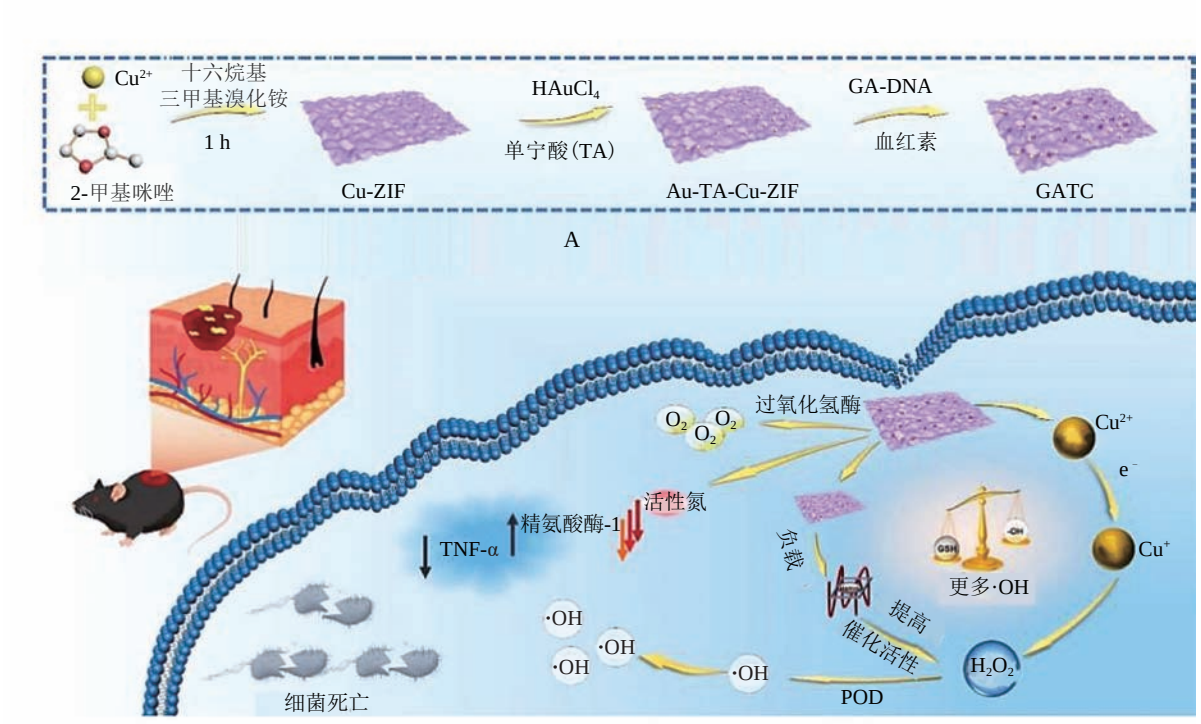


图 7 GATC 的合成（A）与抗菌机制（B）示意图 [36]

Fig.7 Schematic Diagram of the Synthesis (A) and Antibacterial Mechanism (B) of GATC[36]

其释放。利用 MOFs 的大孔隙率，通过适当的配体与金属节点设计，可实现对 NO 的存储、运输和释放。例如，以金属钛为节点的 MOFs（MIP-177）中，钛金属节点可以通过形成亚硝酸盐的方式高效地将 NO 吸附到骨架上，储存量高达 3 μmol/mg[38]。其次，该 MIP-177 材料稳定性较好（在 72 h 内分解率不到 9%），因此具有低毒性、高生物相容性的优点。此外，MIP-177 可控制 NO 释放（释放 90% 的 NO 约需 2 h），表现出高效的抗菌活性，有利于加快伤口愈合。除直接负载 NO 这种方法以外，利用 MOFs 负载 NO 的供体是另一种有效策略。有研究[39]以热塑性硅聚碳酸酯聚氨酯为支架，将 NO 供体如 *S*- 亚硝基 -*N*- 乙酰青霉胺（*S*-nitroso-*N*-acetylpenicillamine，SNAP）封装在 CuBTTri MOFs 中，通过控制 CuBTTri MOFs 的不同含量，实现 SNAP 的可控分解，从而调节材料表面的 NO 含量。研究显示，该复合材料能使附着的 MRSA 减少 99% 以上，也可使游离的 MRSA 减少 95% 以上；处理大肠埃希菌时也观察到类似结果。这充分证明了该材料具有高效的抗菌活性。另有研究[40]将硝普钠（sodium nitroprusside，SNP）封装在具有光热效应的 Au 纳米粒子中，制备了 SNP@MOF@Au-Mal 纳米反应器。通过马来酰亚胺对铜绿假单胞菌的特异性识别作用，可有效将 SNP@MOF@Au-Mal 靶向至感染部位；在光照条件下分解 SNP，产生 NO，也可在 Au 纳米粒子作用下产生 ROS，更有效地杀灭细菌。同时，该材料还可增加生长因子的分泌量、缓解炎症和刺激血管生成，促进细菌感染伤口的愈合。

4 基于 MOFs 的复合材料

尽管通过对金属节点、有机骨架的合理设计可以制备一系列具有优异抗菌活性的 MOFs 材料，然而由于 MOFs 材料有机骨架的疏水性，其作为抗菌材料的应用仍受到严重限制。为了解决这一问题，可将亲水性材料与 MOFs 材料通过各种物理化学手段相结合，构筑 MOFs 复合材料。

由多糖构筑的水凝胶材料具有良好的亲水性和多孔结构，具有与天然细胞外基质相似的结构。其中，硫酸软骨素是一种存在于软骨、皮肤和血管中

的天然糖胺聚糖，具有良好的生物相容性和较强的伤口组织再生能力。XIANG 等[41]首先将精氨酸（Arg）封装到 ZIF-8 材料的孔道中，并通过静电作用吸附了葡萄糖氧化酶（glucose oxidase，GOx），制备了 Arg@Zn-MOFs-GOx。其中，GOx 能够催化葡萄糖产生葡萄糖酸和 H_2O_2，降低创面局部的葡萄糖浓度和 pH 值，而低 pH 值可以促进 Zn-MOFs 材料解离，从而释放 Arg，消耗 H_2O_2，进而产生具有调节炎症作用的相关细胞因子，促进伤口愈合；并且，Zn-MOFs 材料解聚释放的锌离子可有效抑制金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌的增殖和生物膜形成。最后，将 Arg@Zn-MOFs-GOx 通过物理交联的方式与硫酸软骨素和普兰尼克（Pluronic，F127）构筑成 AZG-Gel 纳米材料，能提升复合材料的亲水性（图 8，图片使用已取得授权）。研究结果表明，该纳米反应器通过内源性改善（降低葡萄糖浓度及 pH 值）与外源性抵抗（抗菌和抗炎）相结合的串联策略，促进了糖尿病患者伤口的愈合，为促进糖尿病患者伤口愈合材料的设计提供了新思路。

5　总结与展望

MOFs 材料具有孔隙率大、金属节点多样化、有机配体可设计等优点，被广泛应用于新型抗菌材料的设计和合成。尽管目前已经有多种物理化学手段被用于 MOFs 材料的修饰，然而该研究依然处于起步阶段，还有许多亟待解决的问题。例如，修饰后的抗菌材料抗菌广谱性不好、修饰过程复杂烦琐、对耐药菌等的杀伤作用还有待提升等。为实现新型 MOFs 复合抗菌材料的临床应用，还需要科研人员的继续努力。

参考文献：

[1] TAN S Y, TATSUMURA Y. Alexander fleming (1881—1955): discoverer of penicillin [J]. *Singap Med J*, 2015, **56**(7): 366-367.

[2] WILLYARD C, The drug-resistant bacteria that pose the greatest health threats [J]. *Nature*, 2017, **543**(7643): 15.

[3] MURRAY C J L, IKUTA K S, SHARARA F, *et al*. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis [J]. *Lancet*, 2022, **399**(10325): 629-655.

[4] MOHAMED A A, ABU-ELGHAIT M, AHMED N E, *et al*. Eco-friendly mycogenic synthesis of ZnO and CuO nanoparticles for *in vitro* antibacterial, antibiofilm, and antifungal applications [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2021, **199**(7): 2788-2799.

[5] GEVORGYAN S, SCHUBERT R, FALKE S, *et al*. Structural characterization and antibacterial activity of silver nanoparticles synthesized using a low-molecular-weight royal jelly extract [J]. *Sci Rep*, 2022, **12**(1): 14077.

[6] QIN Y, CHEN L L, PU W, *et al*. Hydrogel directly assembled from copper metal-organic polyhedron for antimicrobial application [J]. *Chem Comm* (Camb), 2019, **55**(15): 2206-2209.

[7] PORNPATTANGKUL D, ZHANG L, OLSON S, *et al*. Bacterial toxin-triggered drug release from gold nanoparticle-stabilized liposomes for the treatment of bacterial infection [J]. *J Am Chem Soc*, 2011, **133**(11): 4132-4139.

[8] KASZA K, GURNANI P, HARDIE K R, *et al*. Challenges and solutions in polymer drug delivery for bacterial biofilm treatment: a tissue-by-tissue account [J]. *Adv Drug Deliv Rev*, 2021, **178**: 113973.

[9] LI W Q, LI W, WAN Y L, *et al*. Preparation, characterization and releasing property of antibacterial nano-capsules composed of ε-PL-EGCG and sodium alginate-chitosan [J]. *Inter J Bio Macromol*, 2022, **204**: 652-660.

[10] 詹小平, 秦金莹, 曹高娟, 等. 金属有机框架基抗菌材料的应用研究与展望 [J]. 武夷科学, 2022, **38**(2): 81-98.

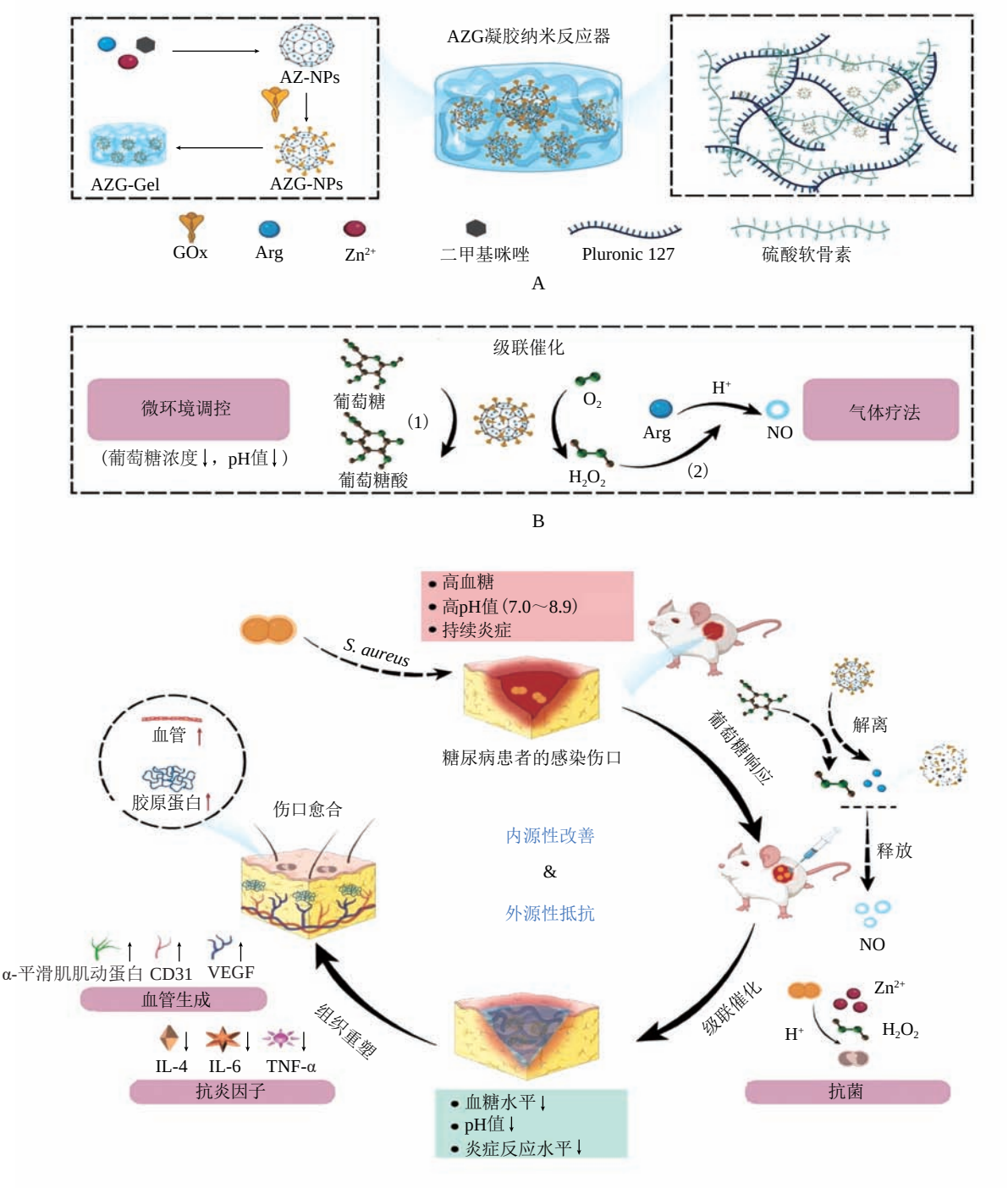
[11] 孔治国, 苏北浩, 宋　爽. 金属有机框架抗菌材料的研究进展 [J]. 吉林师范大学学报（自然科学版）, 2022, **43**(4): 1-7.

[12] ZHU Q L, XU Q. Metal-organic framework composites [J]. *Chem Soc Rev*, 2014, **43**(16): 5468-5512.

[13] WISNIEWSKA P, HAPONIUK J, SAEB M R, *et al*. Mitigating metal-organic framework (MOF) toxicity for biomedical applications [J]. *Chem Eng J*, 2023, **471**: 144400.

[14] WANG A, WALDEN M, ETTLINGER R, *et al*. Biomedical metal-organic framework materials: perspectives and challenges [J]. *Adv Funct Mater*, 2023, **34**(43): 2308589.

[15] MCKINLAY A C, MORRIS R E, HORCAJADA P, *et al*. BioMOFs: metal-organic frameworks for biological and medical applications [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2010, **49**(36): 6260-6266.



A—纳米反应器的组成；B—内源性改善机制；C—Arg@Zn-MOF-GOx 的作用机制。

图 8 用于抗菌、抗炎及微环境重塑的纳米反应器水凝胶 AZG-Gel 的设计与作用机制 [41]

Fig.8 Design and Mechanism of Nanoreactor Hydrogel AZG-Gel for Antibacterial, Anti-inflammatory and Microenvironmental Remodeling[41]

[16] LU K D, AUNG T, GUO N N, *et al*. Nanoscale metal-organic frameworks for therapeutic, imaging, and sensing applications [J]. *Adv Mater*, 2018, **30**(37): 1707634.

[17] 司徒天欣，汪川蕾，严 旭，等. 有机金属框架纳米材料协同抗菌和载药作用的研究进展 [J]. 中国抗菌药杂志，2023, **48**(5): 492-498.

[18] LIU Y, WU J M, LI W H, *et al*. Responsive metal-organic framework nanocarrier delivery system: an effective solution against bacterial infection [J]. *Coord Chem Rev*, 2023, **496**: 215431.

[19] HAN D L, LIU X M, WU S L. Metal organic framework-based antibacterial agents and their underlying mechanisms [J]. *Chem Soc Rev*, 2022, **51**(16): 7138-7169.

[20] WANG M X, ZHOU X, LI Y H, *et al*. Triple-synergistic MOF-nanozyme for efficient antibacterial treatment [J]. *Bioact Mater*, 2022, **17**: 289-299.

[21] WANG T Y, ZHU X Y, WU F G. Antibacterial gas therapy: strategies, advances, and prospects [J]. *Bioact Mater*, 2023, **23**: 129-155.

[22] DENG Q Q, SUN P P, ZHANG L, *et al*. Porphyrin MOF dots-based, function-adaptive nanoplatform for enhanced penetration and photodynamic eradication of bacterial biofilms [J]. *Adv Funct Mater*, 2019, **29**(30): 1903018.

[23] 王隆杰, 范鸿川, 秦　渝, 等. 金属有机框架材料在分离分析领域的研究进展 [J]. 高等学校化学学报, 2021, **42**(4): 1167-1176.

[24] 孔文泉, 魏　凯, 袁钰婕, 等. 金属有机框架材料在防腐涂层中的应用进展 [J]. 中国表面工程, 2023, **36**(4): 51-64.

[25] CHERNOUSOVA S, EPPLE M. Silver as antibacterial agent: ion, nanoparticle, and metal [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2013, **52**(6): 1636-1653.

[26] 包佳伟, 刘鉴峰, 张嘉敏, 等. 金属 - 有机框架材料在细菌感染治疗中的研究进展 [J]. 科学通报, 2023, **68**(13): 1677-1688.

[27] JO J H, KIM H C, HUH S, *et al*. Antibacterial activities of Cu-MOFs containing glutarates and bipyridyl ligands [J]. *Dalton Trans*, 2019, **48**(23): 8084-8093.

[28] KIM D, PARK K W, PARK J T, *et al*. Photoactive MOF-derived bimetallic silver and cobalt nanocomposite with enhanced antibacterial activity [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, **15**(19): 22903-22914.

[29] LI J R, ZHANG Q Y, CHEN Z W, *et al*. Postsynthetic modification of thermo-treated metal-organic framework for combined photothermal/photodynamic antibacterial therapy [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, **16**(7): 8459-8473.

[30] ZHU Z X, HUANG C J, LIU L Y, *et al*. Magnetically actuated pandanus fruit-like nanorobots for enhanced pH-stimulated drug release and targeted biofilm elimination in wound healing [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2024, **661**: 374-388.

[31] TANG Y L, TANG D Y, YAN L L, *et al*. Poly-L-lysine modified MOF nanoparticles with pH/ROS sensitive CIP release and CUR triggered photodynamic therapy against drug-resistant bacterial infection [J]. *Int J Bio Macromol*, 2024, **266**(Pt 2): 131330.

[32] DASTNESHAN A, RAHIMINEZHAD S, MEZAJIN M N, *et al*. Cefazolin encapsulated UIO-66-NH_2 nanoparticles enhance the antibacterial activity and biofilm inhibition against drug-resistant *S. aureus*: *in vitro* and *in vivo* studies [J]. *Chem Eng J*, 2023, **455**: 140544.

[33] ZHANG S N, LU Q J, WANG F Y, *et al*. Gold-platinum nanodots with high-peroxidase-like activity and photothermal conversion efficiency for antibacterial therapy [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(31): 37535-37544.

[34] YIM G, KIM C Y, KANG S, *et al*. Intrinsic peroxidase-mimicking Ir nanoplates for nanozymatic anticancer and antibacterial treatment [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**(37): 41062-41070.

[35] CUN J E, FAN X, PAN Q Q, *et al*. Copper-based metal-organic frameworks for biomedical applications [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2022, **305**: 102686.

[36] MO F Y, ZHONG S, YOU T H, *et al*. Aptamer and DNAzyme-functionalized Cu-MOF hybrid nanozymes for the monitoring and management of bacteria-infected wounds [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, **15**(45): 52114-52127.

[37] XU Y, LIU J W, LIU Z Y, *et al*. Blockade of platelets using tumor-specific NO-releasing nanoparticles prevents tumor metastasis and reverses tumor immunosuppression [J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(8): 9780-9795.

[38] PINTO R V, WANG S J, TAVARES S R, *et al*. Tuning cellular biological functions through the controlled release of NO from a porous Ti-MOF [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2020, **59**(13): 5135-5143.

[39] GARREN M, MAFFE P, MELVIN A, *et al*. Surface-catalyzed nitric oxide release via a metal organic framework enhances antibacterial surface effects [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(48): 56931-56943.

[40] WU Y, DENG G Y, JIANG K, *et al*. Photothermally triggered nitric oxide nanogenerator targeting type Ⅳ pili for precise therapy of bacterial infections [J]. *Biomaterials*, 2021, **268**: 120588.

[41] XIANG G L, WANG B J, ZHANG W S, *et al*. A Zn-MOF-GOx-based cascade nanoreactor promotes diabetic infected wound healing by NO release and microenvironment regulation [J]. *Acta Biomater*, 2024, **182**: 245-259.