环糊精基双配体 MOF 的合成、表征及其大蒜素负载性能和生物活性

王　誉，袁　伟，欧阳凤歧，郁　昊，颜庭轩*
（安徽工业大学化学与化工学院，安徽马鞍山 243032）

摘要：该研究采用溶剂蒸发法，以钾离子为无机金属中心、环糊精和苯三甲酸为复合有机配体，制备了双配体金属有机框架材料（CB-MOF），并用于负载大蒜素（**1**），得到了载药 MOF（**1**@CBM）。随后，采用 SEM、UV、TGA、FT-IR 及比表面积与孔隙度分析等方法，全面表征了 CB-MOF 及 **1**@CBM 的微观结构与理化性质，定量计算了载药量、体外累积药物释放率，并结合体外试验评估其抗氧化能力与抗菌活性。结果表明，CB-MOF 对 **1** 的负载能力优异，载药量可达 13.66%，且在体外展现出良好的药物缓释特性。此外，**1**@CBM 不仅具备显著的抗氧化活性，还对细菌与真菌表现出广谱抗菌效果，可有效降低 **1** 对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌及白念珠菌的 MIC，同时具有良好的生物相容性，为其在生物医药领域的应用奠定了基础。

关键词：金属有机框架；大蒜素；药物载体；生物活性；抗菌活性；生物相容性
中图分类号：O643；R943　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-8255（2026）06-0668-10
引用：王　誉，袁　伟，欧阳凤歧，等．环糊精基双配体 MOF 的合成、表征及其大蒜素负载性能和生物活性［J］．中国医药工业杂志，2026, **57**(6)：668-677．DOI：10.16522/j.cnki.cjph.2026.06.007

Synthesis and Characterization of Cyclodextrin-based Dual-ligand MOF and Its Allicin-loading Property and Biological Activity

WANG Yu, YUAN Wei, OUYANG Fengqi, YU Hao, YAN Tingxuan*
(*School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032*)

ABSTRACT: In this study, a dual-ligand metal-organic framework (CB-MOF) material was prepared via a solvent evaporation method using potassium ions as the inorganic metal center and cyclodextrin together with benzenetricarboxylate as the composite organic ligands. The obtained CB-MOF was then used to encapsulate allicin (**1**), yielding the drug-loaded MOF (**1**@CBM). Subsequently, the microstructure and physicochemical properties of both CB-MOF and **1**@CBM were comprehensively characterized by means of SEM, UV, TGA, FT-IR, and specific surface area and porosity analysis. Meanwhile, the drug loading capacity and cumulative *in vitro* drug release were quantitatively determined, and the antioxidant capacity and antimicrobial activity were evaluated through *in vitro* tests. The results showed that CB-MOF exhibited excellent loading capacity for **1**, with a drug loading of 13.66% , and demonstrated favorable sustained-release characteristics *in vitro*. Furthermore, **1**@CBM not only possessed significant antioxidant activity but also showed broad-spectrum antimicrobial effects against both bacteria and fungi, with significantly lower MIC values against *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Candida albicans* compared with those of free **1**. Combined with good biocompatibility, these properties provide a foundation for its application in the biomedical field.

Key Words: metal-organic framework; allicin; drug carrier; biological activity; antimicrobial activity; biocompatibility

大蒜素（allicin，**1**）是从百合科葱属多年生草本植物大蒜鳞茎中提取出的一种抗菌物质，化学名为二丙烯基硫代磺酸酯，具有良好的抗氧化活性及广谱抗菌作用[1-2]。**1** 不仅对多种杆菌、球菌有杀菌效果，还能抑制部分真菌感染，但稳定性较差[3]，易受温度及 pH 值等因素的影响而分解，导致活性大幅降低；且 **1** 还存在生物利用度不高的问题[4]。一些递药系统被用于提高 **1** 的稳定性和生物利用度，如细胞微颗粒[5]、适配体修饰的纳米花[6]等。然而，这些体系普遍载药量低、稳定性差，如提取自肺转移肿瘤细胞的细胞微颗粒对 **1** 的负载量仅为（0.18±0.02）%[5]，不利于药物的递送及应用。因此，需要构建一种载药量高、生物利用度高、稳定性良好的载体来递送 **1**。

金属有机框架（metal-organic framework，MOF）是一类以金属节点或金属簇为连接点，通过配位键与有机配体相结合而形成的纳米级多孔材料[7]。因其结构多样，且具有多孔结构和高比表面积，在药物递送领域获得了广泛关注[8]。但由于合成 MOF 的过程中会使用不可再生或具有生物毒性的材料，由此引发的生物安全性问题限制了临床应用。研究[9]显示，采用天然成分［如环糊精（cyclodextrin，CD）[10]］作为有机配体可有效规避传统 MOF 可能产生的毒性。CD 与一些碱金属结合形成的 MOF（CD-MOF），不仅具有更高的生物相容性、安全性和载药能力，还具有亲水和疏水孔道，有利于负载多类型药物[11]。1,3,5- 苯三甲酸（1,3,5-benzenetricarboxylate，BTC）也是一种优良的 MOF 配体。BTC 含有多个羧基官能团，可通过单齿、双齿螯合等多种配位模式与金属离子结合形成 MOF；其苯环结构还能赋予 MOF 良好的骨架刚性和结构稳定性[12]。有研究[13]报道，基于 BTC 的 MOF 还具有抗菌等药理活性。

本研究用 CD 及 BTC 合成了双配体 MOF（CB-MOF），并用于负载 **1**，成功制备了负载 **1** 的 CD-BTC 金属有机框架（**1**@CBM）。随后，对该递药系统进行表征，考察 CB-MOF 对 **1** 的负载及释放性能，并进一步探究 **1**@CBM 的体外抗氧化和抗菌活性，为抗菌药物的研发提供新思路与策略。

1 仪器与试药

FA124C 型电子天平（上海力辰科技仪器有限公司）；KQ-600KDE 型超声波清洗器（昆山市超声仪器有限公司）；LGJ-10 型真空冷冻干燥机（北京松源华兴科技发展有限公司）；UV-1600PC 型紫外 - 可见分光（UV-Vis）光度计（上海美谱达仪器有限公司）；H3-18K 型台式高速离心机（湖南可成仪器设备有限公司）；THZ-92A 型气浴恒温振荡器（上海博迅医疗生物仪器股份有限公司）；SN-HWS-30B 型恒温恒湿培养箱（上海尚普仪器设备有限公司）；Sigma 500 型场发射扫描电镜（德国 Carl Zeiss 公司）；Synergy H1M 型全自动酶标仪（美国 BioTek 公司）；Nano ZS90 型纳米粒度仪（英国 Malvern 公司）；Nicolet 6700 型 FT-IR 仪（美国 Thermo Nicolet 公司）；DTG-60H 型 TGA 仪（日本岛津公司）；ASAP 2460 型氮气吸附 - 脱附仪、ASAP 2460 型全自动比表面与孔隙度分析仪（美国 Micromeritics 公司）；DZF-6020 型真空干燥箱（上海博迅实业有限公司）；RE-52AA 型旋转蒸发仪（上海亚荣生化仪器厂）。

1（含量≥ 95%，批号 C16458308）、*β*-CD（纯度 98%，批号 C1347451）、1,1- 二苯基 -2- 三硝基苯肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl，DPPH，批号 C15568523）、2,2'- 联氮双（3- 乙基苯并噻唑啉 -6- 磺酸）二铵盐［diammonium 2,2'-azino-*bis*(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)，ABTS，批号 C13178581］、氢氧化钠、氯化钠、氯化钾、磷酸二氢钾、磷酸氢二钠、甘油均购自上海麦克林生化科技股份有限公司；氢氧化钾（含量≥ 90.0%，批号 P2610618）、BTC（含量≥ 99%，批号 P2476870）均购自上海阿达玛斯试剂有限公司；甲醇、无水乙醇（以下未作说明时，均采用无水乙醇）、十六烷基三甲基溴化铵（hexadecyl trimethyl ammonium bromide，CTAB）均购自上海泰坦科技股份有限公司；生理盐水（四川科伦药业股份有限公司）；细菌活死染色试剂盒（上海碧云天生物技术股份有限公司，批号 A273250624）。

大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌及白念珠菌购自商城北纳创联生物科技有限公司。

收稿日期：2026-03-24

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFE0110100）、安徽省教育厅重点研究项目（2023AH051127）、国家级大学生创新训练项目（202510360026）

作者简介：王　誉，硕士，从事新型材料合成以及新型药物剂型应用的研究。

通信作者：颜庭轩，副教授，从事微纳米新剂型的研究以及应用。

家兔 1 只，雄性，体质量 2.5 kg，购于仪征安立卯生物科技有限公司，生产许可证编号为 SCXK（苏）2021-0006，相关动物实验均获得了安徽工业大学生物医学伦理委员会批准（伦理审批号为 SWYX-2026-01）。

2　方法与结果

2.1　CB-MOF 和 1@CBM 的制备

2.1.1　CB-MOF

采用溶剂蒸发法制备 CB-MOF[14]。将氢氧化钾 1.12 g 溶于去离子水 50 mL 中，得到 400 mmol/L 的氢氧化钾溶液，加入 *β*-CD 1.62 g，溶解，备用；将 BTC 0.7 g 溶于甲醇 50 mL 中，备用。将上述 2 种溶液混合，置 50 ℃水浴中搅拌（400 r/min）5 h，然后置 100 mL 烧杯中，将其移至装有甲醇 10 mL 的大烧杯中，密封，于室温静置 48 h；取出混合液，离心（8 595×*g*）10 min，收集沉淀，用乙醇洗涤（50 mL×3），采用旋转蒸发仪去除乙醇，将湿样品减压冷冻干燥过夜以去除少量水分，得白色 CB-MOF 粉末 1.18 g，密封，于 4 ℃保存备用。

文献[15]报道，表面活性剂 CTAB 可基于传统的气相扩散方法调节 CD-MOF 的尺寸。为制备粒径更小、更均一的 CB-MOF，在 50 ℃水浴搅拌步骤后于混合溶液中加入 CTAB 400 mg，其他条件同上，制得 CB-MOF 粉末约 1.21 g，密封，于 4 ℃保存备用。

2.1.2　1@CBM

采用混合搅拌的方法制备 **1**@CBM[16]。将 **1** 40 mg 分别与“**2.1.1**”项下所得的 2 种 CB-MOF 粉末 177 mg 混合，加至甲醇 40 mL 中，避光（600 r/min）搅拌 1 h，离心（8 595×*g*）10 min，收集沉淀，用乙醇洗涤（50 mL×3），继续减压干燥过夜以去除少量乙醇，得淡黄色 **1**@CBM 粉末 199.36 mg，密封，于 4 ℃保存备用。

2.2　CB-MOF 和 1@CBM 的表征

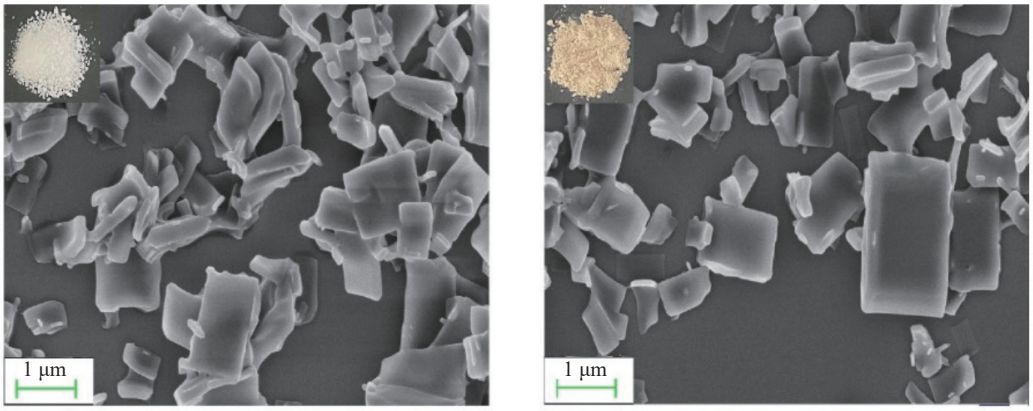
2.2.1　粒度分析

分别取适量不加和加 CTAB 的 CB-MOF 及 **1**@CBM 粉末，用乙醇分散，超声（功率 360 W）20 min 后用粒度仪测定粒径，每个样品重复测定 3 次。结果表明，不加和加 CTAB 的 CB-MOF 粒径分别为（825±42）和（531±28）nm，PDI 分别为 0.532±0.035 和 0.269±0.022，说明添加 CTAB 的 CB-MOF 粒径更小、更均一，故后续试验所用的 CB-MOF 均为加 CTAB 样品。

同法测定加入 CTAB 的 **1**@CBM，所得粒径与 PDI 分别为（615±33）nm 与 0.237±0.024。

2.2.2　SEM 分析

分别取适量 CB-MOF 及 **1**@CBM 粉末，用乙醇分散，超声（功率 360 W）10 min 后滴加到单晶硅片上，干燥后喷金、用 SEM 观察。结果（图 1）显示，CB-MOF 负载 **1** 后的微观形貌未发生明显变化，但外观颜色（图中图）由白色转变为淡黄色，可以初步证明 **1** 被成功负载到 CB-MOF 上。



A　　B

图 1　CB-MOF（A）及 1@CBM（B）的 SEM 照片及外观（×100 000）

Fig.1　SEM Images and Appearances of CB-MOF (A) and **1**@CBM (B) (×100 000)

2.2.3 UV-Vis 分析

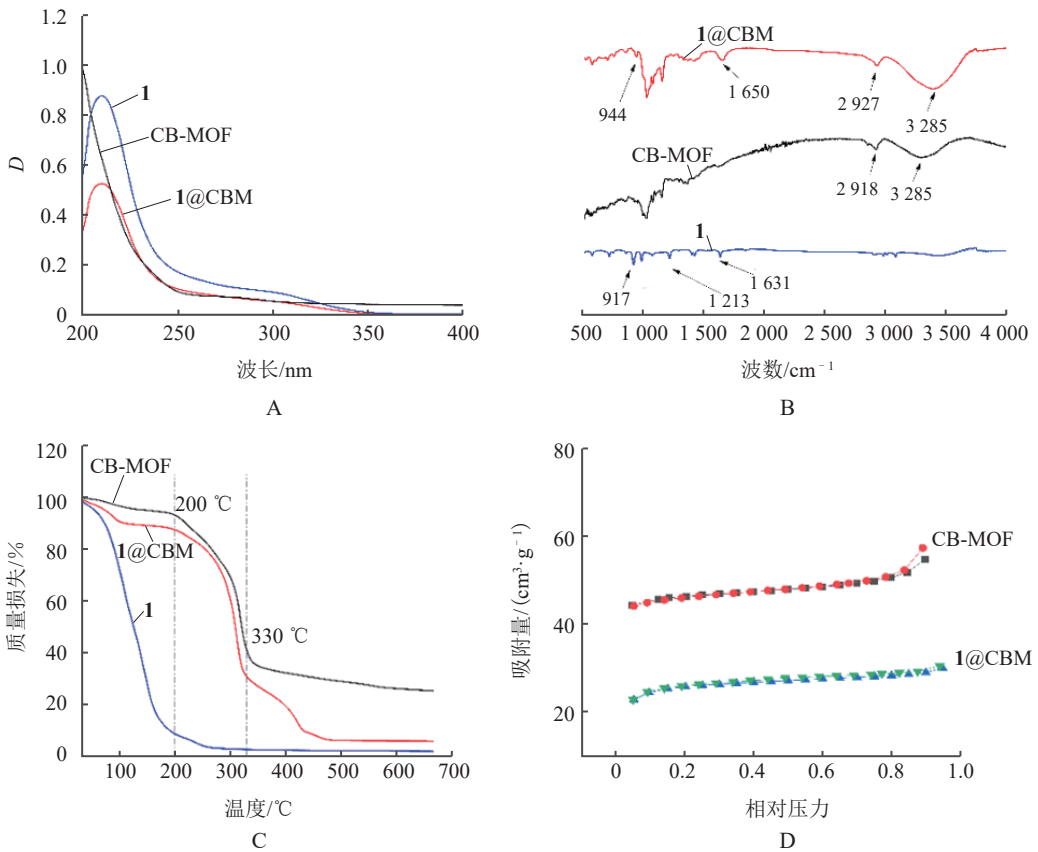
取适量 **1** 溶于乙醇，另将 CB-MOF 及 **1**@CBM 粉末分散于乙醇中，在 200 ～ 500 nm 内进行紫外扫描。结果（图 2A）显示，**1** 及 **1**@CBM 都在 220 nm 处有吸收峰。

2.2.4 FT-IR 分析

采用衰减全反射（attenuated total reflectance，ATR）法测定样品的 FT-IR 光谱。取适量 **1**、CB-MOF 及 **1**@CBM 粉末，平铺于金刚石晶体上，旋转压力塔使样品与晶体紧密接触，设置波数范围为 400 ～ 4 000 cm^{-1}。结果（图 2B）显示，**1** 的 FT-IR 图谱中含有 S—S（917 cm^{-1}）、C—S（1 213 cm^{-1}）以及 C—C（1 631 cm^{-1}）的伸缩振动吸收峰，与文献[17]一致。CB-MOF 的特征峰为 C—H（2 918 cm^{-1}）及 O—H（3 285 cm^{-1}）的吸收峰。而 **1**@CBM 的 FT-IR 图谱中包含 CB-MOF 和 **1** 的特征峰，特别是 **1** 中的 S—S 伸缩振动峰及 CB-MOF 中的 O—H 振动峰。

2.2.5 TGA

分别精密称取适量 **1**、CB-MOF 及 **1**@CBM 粉末，采用 TGA 仪分析。设置升温速率为 10 ℃ /min，从室温加热到 800 ℃。结果（图 2C）显示，由于 **1** 热不稳定[3]，从 85 ℃开始迅速分解，同时因 **1** 的沸点为 248.6 ℃，当温度到达 250 ℃时，其质量损失大于 98%。而 CB-MOF 及 **1**@CBM 在 100 ℃均有轻微质量损失，对应的是少量结合水损失[18]；200 ～ 330 ℃，CB-MOF 和 **1**@CBM 都出现较大的质量损失，对应有机物 CD 和 BTC 的分解，其中 **1**@CBM 的质量损失更大。值得注意的是，**1**@CBM 在 0 ～ 150 ℃的质量损失明显大于 CB-MOF，可能是由于其中负



A—UV-Vis 光谱；B—FT-IR 光谱；C—热重曲线；D—N_2 吸附 - 脱附曲线。

图 2 1@CBM 的理化性能表征

Fig.2 Physicochemical Property Characterization of **1**@CBM

载 **1** 快速分解所致。因此，热重曲线可初步证明 **1** 被负载到 CB-MOF 上。

2.2.6 比表面积和孔隙度分析

分别取适量 CB-MOF 及 **1**@CBM 粉末，置仪器中，于 - 196.15 ℃通过氮吸附法测量样品的比表面积。测量前，每个样品需在 80 ℃脱气 4 h。结果（图 2D）显示，CB-MOF 呈现典型的Ⅱ型等温曲线，表明其具有大孔结构。而 **1**@CBM 的吸附量明显低于 CB-MOF，可能是由于 **1** 占据了 CB-MOF 的一些内部空间。

2.3 **1**@CBM 中 **1** 的载药量及包封率

使用 UV-Vis 法测定 **1** 的含量。

系列标准溶液的配制：精密称取 **1** 10 mg，置 100 mL 量瓶中，用乙醇定容，摇匀，制成 100 μg/mL 的 **1** 标准溶液。用乙醇稀释成 **1** 质量浓度分别为 5、7.5、10、15、20 μg/mL 的系列标准溶液。

在 220 nm 处测定上述系列标准溶液的吸光度（*D*），以质量浓度（*c*）为横坐标，*D* 为纵坐标绘制标准曲线。结果显示，*c* 为 5 ～ 20 μg/mL 时与 *D* 线性关系良好，标准曲线方程为 $D=0.047\,39c+0.441\,26$，$R^2=0.997\,4$。按下式计算得 **1**@CBM 中 **1** 的载药量和包封率为（13.66±0.37）%和（68.08±0.22）%（*n*=3）。

载药量 =（载体内的药量 / 载体总质量）×100%

包封率 =（载体内的药量 / 初始投入药量）×100%

2.4 **1**@CBM 中 **1** 的体外释放行为

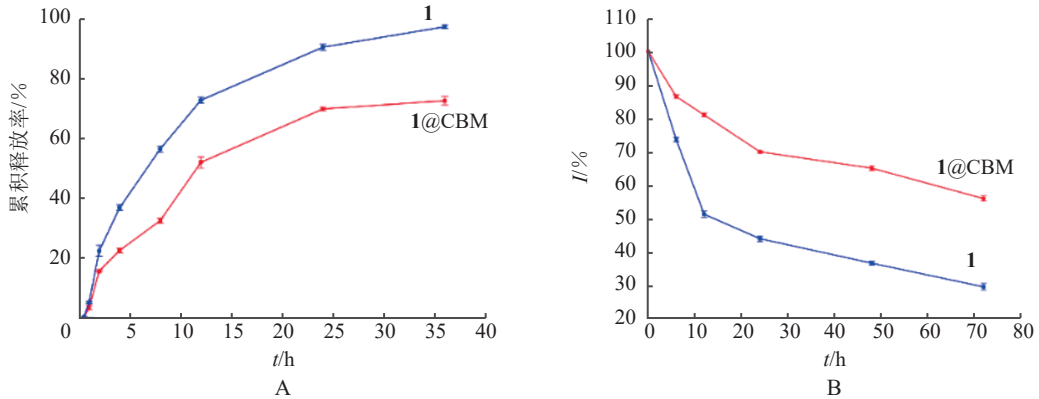
采用透析法测定 **1**@CBM 的体外释放性能。取 **1** 及 **1**@CBM 粉末各 10 mg，分散于少量乙醇中，用 PBS（pH 7.4）定容至 10 mL。各取 5 mL，置透析袋（截留分子量为 3 500）中，在 37 ℃、150 r/min 条件下透析，透析外液为 pH 7.4 的 PBS 200 mL。分别于 0.5、1、2、4、8、12、24 及 36 h 时收集透析外液 2 mL（同时补充同温、等量 PBS），采用 UV-Vis 法测定 **1** 含量，并计算累积释放率。结果（图 3A）表明，**1**@CBM 的 36 h 累积释放率为（72.43±1.37）%（*n*=3），明显低于原料药的释放速率，提示该制品有一定的缓释效果。原因可能为部分 **1** 存在于 MOF 孔道中，难以通过扩散作用完全释放，形成“滞留”效应，导致累积释放率降低[19]。**1**@CBM 中的 **1** 在 0 ～ 12 h 释放较快，12 h 累积释放率即达到（51.86±1.90）%（*n*=3），24 h 累积释放率达到（69.65±1.05）%（*n*=3），24 h 后的释放速率进一步减缓。

2.5 **1**@CBM 的初步稳定性研究

使用 UV-Vis 法初步测试 **1**@CBM 的稳定性。取 **1**、**1**@CBM 粉末各 1 mg，分别加水 20 mL，用 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液调至 pH 8.2，于 37 ℃保存，分别于 0、6、12、24、48、72 h 时取出 1 mL，在 220 nm 处测定 *D* 值，根据下式计算相对强度（*I*）。

$I=D_t/D_0\times100\%$

式中：D_t 和 D_0 表示 *t* 时刻和 0 h 时样品的 *D* 值。



A—游离 **1** 和 **1**@CBM 的体外释放曲线；B—游离 **1** 和 **1**@CBM 在热碱性溶液中的稳定性。

图 3　1 和 1@CBM 的释放性能及稳定性研究（*n*=3）

Fig.3　Investigation on the Release Performance and Stability of **1** and **1**@CBM (*n*=3)

结果如图3B所示，在pH 8.2的37 ℃水中，**1**@CBM的相对强度一直高于**1**，在48 h时仍能达到(65.05±0.71)%（n=3），而游离**1**在48 h时的相对强度仅为(36.69±0.58)%。在相同时间内，**1**@CBM的相对强度降低趋势小于游离**1**，说明**1**@CBM能有效提高**1**的稳定性。原因可能是**1**存在于CB-MOF的孔道中，释放速度减缓，从而减少了**1**与热的碱性溶剂的接触，最终减缓了**1**的氧化分解[19]。

2.6 1@CBM的抗氧化性能研究

采用DPPH自由基（DPPH·）清除法和ABTS自由基（$ABTS^{+}$·）清除法检测**1**@CBM的抗氧化性能。

首先，配制0.1 mmol/L的DPPH乙醇溶液。随后取**1**@CBM 5 mg分散于乙醇10 mL中，得到500 μg/mL的样品溶液，并用乙醇梯度稀释至250、125、62.5、31.25 μg/mL。分别取DPPH乙醇溶液与样品溶液各1 mL，充分混匀，于25 ℃、避光反应30 min，在517 nm处测量D值。另以纯水为对照，同法测定。按下式计算DPPH · 清除率。

用50%乙醇溶解适量ABTS制成浓度为7.4 mmol/mL的溶液，与2.6 mmol/L过硫酸钾溶液按体积比1∶1混合，于4 ℃、避光静置过夜，生成$ABTS^{+}$·；用50%乙醇稀释至734 nm处的D值为0.700±0.005，取2.5 mL，与上述样品溶液0.1 mL混合，避光静置12 min，然后在734 nm处测量D值。另以纯水为对照，同法测定。按下式计算$ABTS^{+}$· 清除率。

$$清除率=(D_{对照组}-D_{样品组})/D_{对照组}\times100\%$$

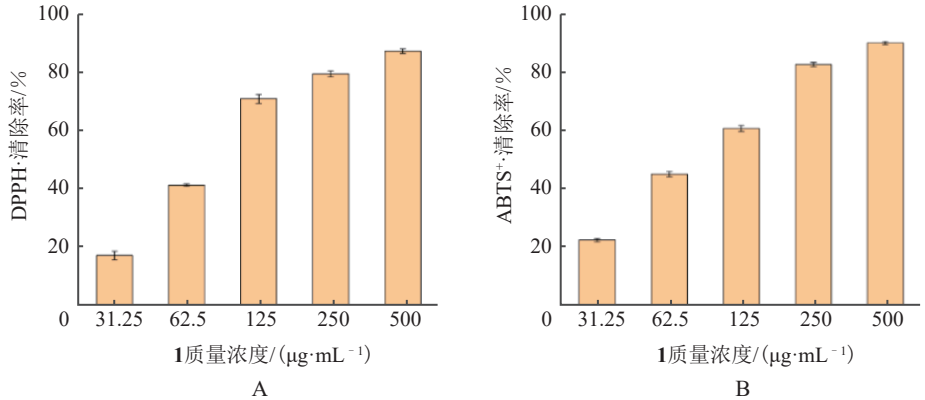
结果（图4）显示，**1**@CBM对自由基DPPH·及$ABTS^{+}$·的清除率具有浓度依赖性。当**1**质量浓度达到250 μg/mL时，对DPPH·及$ABTS^{+}$·的清除率分别达到(80.28±1.06)%和(82.31±0.69)%（n=3）。这与文献[20]报道的**1**具有较强的抗氧化性相符。

2.7 1@CBM的抗菌性能研究

2.7.1 体外抗菌试验

此前有研究[15-16]报道**1**对细菌及真菌具有广谱抗菌活性。因此，本研究测试了**1**@CBM对大肠埃希菌（革兰阴性菌）、金黄色葡萄球菌（革兰阳性菌）及白念珠菌（真菌）的体外抗菌活性。

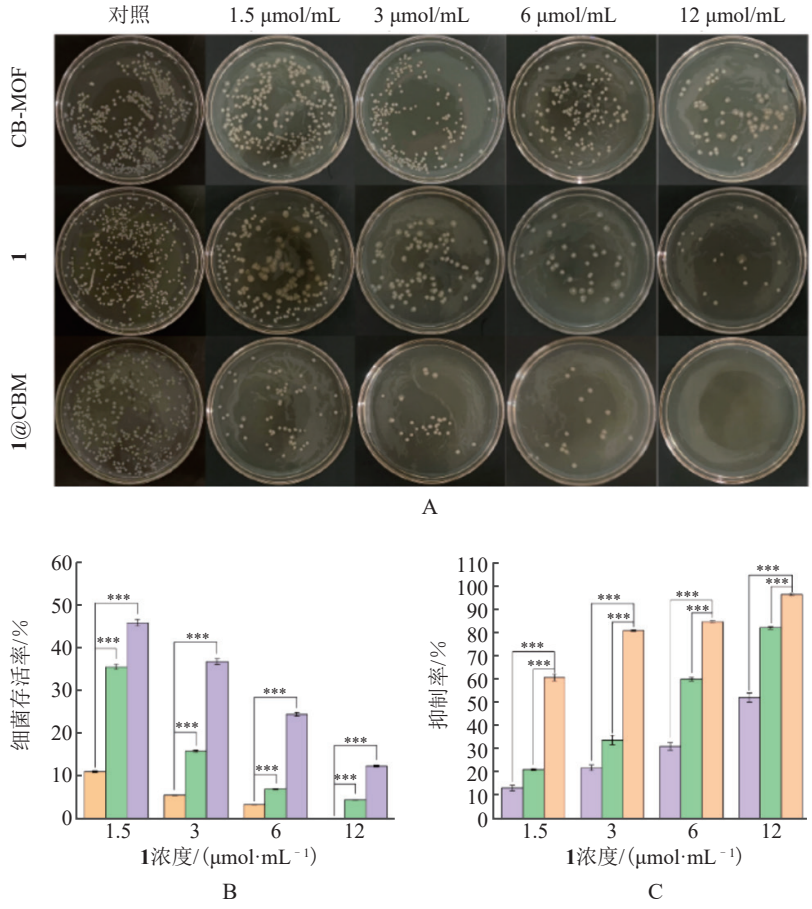
参考文献[15-16]检测**1**@CBM对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌的抗菌作用，使用酶标仪测定菌液在600 nm处的光密度（OD_{600}）值，从而计算抑制率，并由涂布菌落数量计算细菌存活率。结果如图5、6所示，在所含**1**浓度相同的条件下，**1**@CBM抑制大肠埃希菌的效果比**1**好，显著降低了对大肠埃希菌的MIC（从12 μmol/mL降至3 μmol/mL）；**1**@CBM对金黄色葡萄球菌的抑制效果也优于**1**，MIC从12 μmol/mL降至6 μmol/mL。**1**@CBM的抗菌活性更高，原因可能是BTC作为合成MOF的有机配体，也具备一定的抗菌活性[13]。同时制得的CB-MOF和**1**@CBM粒径较小，分别为531和615 nm，有利于与细菌表面充分接触，延长作用时间，从而显著



A—DPPH· 清除率；B—$ABTS^{+}$· 清除率。

图4 1@CBM的自由基清除率（n=3）

Fig.4 Free Radical Scavenging Rates of **1**@CBM (n=3)



A—涂布菌落照片；B—存活率（n=3）；C—抑制率（n=3）。

—1@CBM；—1；—CB-MOF。

注：与 CB-MOF 处理组相比，*** 表示 P<0.001。

图 5　不同浓度的不同样品对大肠埃希菌的体外抑菌效果

Fig.5　*In vitro* Antibacterial Effects of Different Samples on *Escherichia coli* at Different Concentrations

增强了抗菌活性。

参考文献[21]方法检测 **1**@CBM 对白念珠菌的抗真菌性能，计算抑制率和存活率。结果（图 7）显示，**1**@CBM 对白念珠菌也有抑制效果，而且将 **1** 对白念珠菌的 MIC 从 3 μmol/mL 降低至 0.75 μmol/mL。

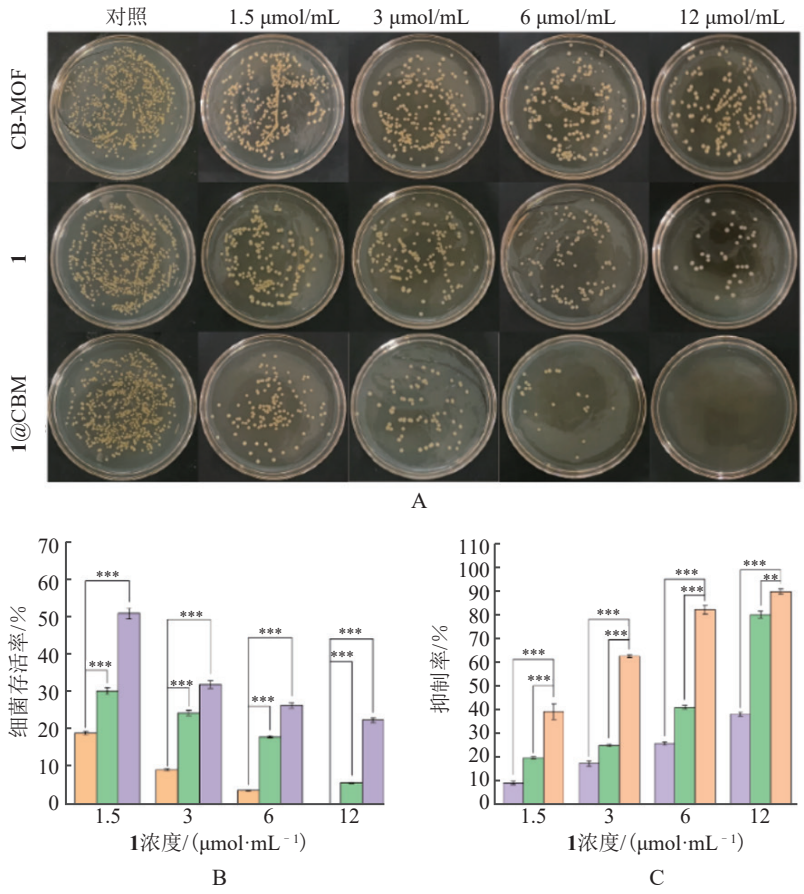
2.7.2　细菌及真菌形态观察

为更直观地展示载药双配体 MOF 的抑菌效果，用 SEM 观察经生理盐水（对照组）、**1** 和 **1**@CBM 处理的金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌及白念珠菌。结果（图 8）显示，经 **1**@CBM 处理的 3 种菌，菌体表面都发生了明显的破裂、塌陷，导致内容物流出，说明细菌或真菌已死亡；且经 **1**@CBM 处理的 3 种菌的菌体破损程度都比经 **1** 处理的严重，说明针对这 3 种菌，**1**@CBM 的抑制效果都强于 **1**。

2.8　溶血试验

取健康家兔心脏血液，搅拌（200 r/min）10 min 去除纤维蛋白，用 0.9%氯化钠溶液洗涤至上清液澄清，加入质量浓度为 0.125、0.25、0.5、1 mg/mL 的 **1**@CBM 溶液，在 37 ℃孵育 12 h。以 0.9%氯化钠溶液为阴性对照，以超纯水（ddH_2O）为阳性对照。通过观察上清液初步判断是否发生溶血现象[19]。测定各组样品在 540 nm 处的 D 值，按下式计算溶血率。

$$溶血率=(D_{样品组}-D_{阴性组})/(D_{阳性组}-D_{阴性组})\times100\%$$



A—涂布菌落照片；B—存活率（n=3）；C—抑制率（n=3）。

—**1**@CBM；—**1**；—CB-MOF。

注：与 CB-MOF 处理组相比，** 表示 P<0.01，*** 表示 P<0.001。

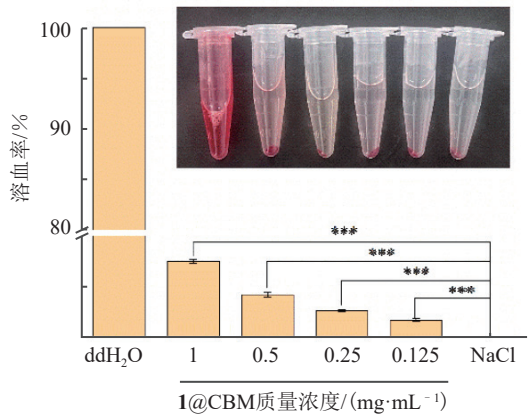
图 6 不同浓度的不同样品对金黄色葡萄球菌的体外抑菌效果

Fig.6 *In vitro* Antibacterial Effects of Different Samples on *Staphylococcus aureus* at Different Concentrations

结果（图 9）表明，**1**@CBM 质量浓度低于 0.5 mg/mL 的样品组未出现明显溶血现象，表明其溶血率低于 5%，即生物相容性较好，可能成为安全性较好的药物载体。

3 总结

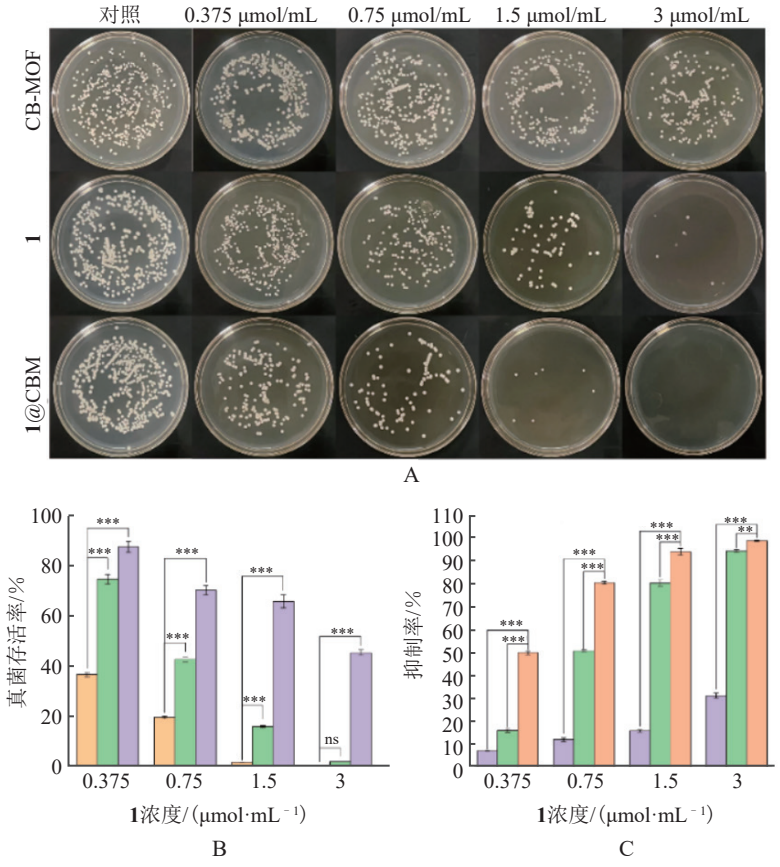
本研究采用溶剂蒸发法首次成功制备了以 CD 及 BTC 为有机配体、钾为金属核心的金属有机框架 CB-MOF，并成功装载 **1**，得到了 **1**@CBM，载药量为 13.66%。体外试验表明该复合物的 36 h 累积释放率高达 72.43%，具有良好的抗氧化活性，可有效降低 **1** 对 3 种菌的 MIC，显著提高了其广谱抗菌活性。**1**@CBM 对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌及白念珠菌的 MIC 分别从 12、12 及 3 μmol/mL 降低至 3、6



注：与阴性对照组相比，*** 表示 P<0.001。

图 9 不同质量浓度 1@CBM 的溶血率（n=3）

Fig.9 Hemolysis Rates of **1**@CBM at Different Mass Concentrations (n=3)



A—涂布菌落照片；B—存活率（n=3）；C—抑制率（n=3）。

—**1**@CBM；—**1**；—CB-MOF。

注：与 CB-MOF 处理组相比，ns 表示 P>0.05，** 表示 P<0.01，*** 表示 P<0.001。

图 7　不同浓度样品对白念珠菌的体外抑菌效果

Fig.7　*In vitro* Autifungal Effects of Samples on *Candida albicans* at Different Concentrations

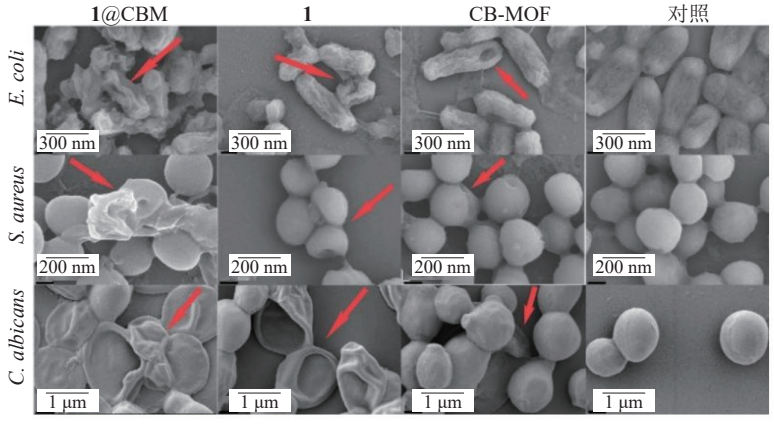


图 8　经不同样品处理的大肠埃希菌（×200 000）、金黄色葡萄球菌（×200 000）及白念珠菌（×100 000）的 SEM 照片

Fig.8　SEM Images of *E. coli*（×200 000）, *S. aureus*（×200 000）and *C. albicans*（×100 000）after Treatment with Different Samples

及 0.75 μmol/mL。另外，体外溶血试验表明 **1**@CBM 有较好的生物相容性，是一种有潜力的抗菌药物。

参考文献：

[1] THAKUR P, DHIMAN A, KUMAR S, *et al*. Garlic (*Allium sativum* L.): a review on bio-functionality, allicin's potency and drying methodologies [J]. *S Afr J Bot*, 2024, **171**: 129-146.

[2] 张玉艳, 陈倩梅, 刘银欢, 等. 大蒜素治疗大肠埃希菌诱导的急性膀胱炎的分子机制研究[J]. 今日药学, 2024, **34**(1): 32-39.

[3] ELFIYANI R, AMALIA A, CHENIA A. Allicin chemical stability test in the phytosome of garlic extract (*Allium sativum* L) [J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2021, **819**(1): 012084.

[4] LI J J, HUANG K L, SONG Y H, *et al*. Synergistic effect on nonalcoholic fatty liver disease by aptamer functionalized liposome loading allicin [J]. *J Future Foods*, 2026, **6**(1): 55-65.

[5] 刘玉萍, 陈 彦, 瞿 鼎, 等. 包载大蒜素的细胞微颗粒载药系统及其制备方法和应用: 中国, 111265491A [P]. 2020-06-12.

[6] WANG T, YU Y F, GAO R X, *et al*. Aptamer-functionalized-nanoflower loading allicin ameliorates obesity through regulating adipose tissue energy expenditure [J]. *J Drug Delivery Sci Technol*, 2024, **92**: 105367.

[7] WANG Z H, ZHOU D Y, LIU D H, *et al*. Ethanol-mediated synthesis of γ-cyclodextrin-based metal-organic framework as edible microcarrier: performance and mechanism [J]. *Food Chem*, 2023, **418**: 136000.

[8] 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.

[9] SHEN M F, FORGHANI F, KONG X Q, *et al*. Antibacterial applications of metal-organic frameworks and their composites [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2020, **19**(4): 1397-1419.

[10] SHEN M F, LIU D H, DING T. Cyclodextrin-metal-organic frameworks (CD-MOFs): main aspects and perspectives in food applications [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2021, **41**: 8-15.

[11] SI Y X, LUO H Z, ZHANG P, *et al*. CD-MOFs: from preparation to drug delivery and therapeutic application [J]. *Carbohydr Polym*, 2024, **323**: 121424.

[12] FATEMINIA Z, CHINIFOROSHA H. Optimization and synthesis of a La-TMA MOF with some improvements in its properties [J]. *ACS Omega*, 2022, **8**(1): 262-270.

[13] LELOUCHE S N K, ALBENTOSA-GONZÁLEZ L, CLEMENTE-CASARES P, *et al*. Antibacterial Cu or Zn-MOFs based on the 1,3,5-*tris*-(styryl) benzene tricarboxylate [J]. *Nanomaterials* (Basel), 2023, **13**(16): 2294.

[14] SHAHZAIB A, SHAILY, AHMAD I, *et al*. Ultrarapid and highly efficient reduction of nitroaromatic compounds using cyclodextrin MOF [J]. *Catal Commun*, 2023, **174**: 106569.

[15] KANG L X, LIANG Q F, ABDUL Q, *et al*. Preparation technology and preservation mechanism of γ-CD-MOFs biaological packaging film loaded with curcumin [J]. *Food Chem*, 2023, **420**: 136142.

[16] PANG Y P, ZHAO M F, XIE Y H, *et al*. Multifunctional Ac@ZIF-8/AgNPs nanoplatform with pH-responsive and ROS scavenging antibacterial properties promotes infected wound healing [J]. *Chem Eng J*, 2024, **489**: 151485.

[17] 贾惜文, 刘九阳, 王静杰, 等. 豌豆分离蛋白/普鲁兰/大蒜素复合静电纺丝纳米纤维材料的制备及抑菌性[J]. 食品科学, 2023, **44**(16): 121-126.

[18] QIU C, JULIAN M D, JIN Z Y, *et al*. Resveratrol-loaded core-shell nanostructured delivery systems: cyclodextrin-based metal-organic nanocapsules prepared by ionic gelation [J]. *Food Chem*, 2020, **317**: 126328.

[19] 陈 进, 林令琪, 钱 昆, 等. 生物型金属有机骨架MOF-79的合成、表征及载槲皮素药物性能的研究[J]. 中国医药工业杂志, 2023, **54**(1): 75-84.

[20] NADEEM M S, KAZMI I, ULLAH I, *et al*. Allicin, an antioxidant and neuroprotective agent, ameliorates cognitive impairment [J]. *Antioxidants* (Basel), 2021, **11**(1): 87.

[21] YUAN Y, CHEN L, SONG K X, *et al*. Stable peptide-assembled nanozyme mimicking dual antifungal actions [J]. *Nat Commun*, 2024, **15**: 5636.