DOI:10.12441/spyswjs.20250623001　　[文章编号] 1673-1689(2025)08-0107-09

余甘提取液制备纳米银的结构表征与抑菌活性

刘靖媛[1]　王文婷[2*]

(1. 福建农林大学园艺学院,福建 福州 350002; 2. 忻州师范学院生物系,山西 忻州 034000)

摘要:【目的】探究余甘(*Phyllanthus emblica*)提取液制备的纳米银(AgNPs)的结构表征、抑菌活性和抗氧化能力。【方法】以余甘提取液为还原剂制备AgNPs,通过X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、纳米粒度分析仪(PCS)、透射电子显微镜(TEM)等对AgNPs的结构进行表征,并研究了不同质量浓度的AgNPs对大肠杆菌(*Escherichia coli*)ATCC25922、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)ATCC25933、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)PAO1的抑菌活性、最小抑菌浓度(minimum inhibitory concentrations,MIC),以及其清除超氧阴离子自由基、$ABTS^+$自由基能力和还原能力。【结果】余甘提取液制备的AgNPs呈面心立方结构,粒径主要分布在10~30 nm,具有良好的分散性。其抑菌活性随着AgNPs质量浓度升高逐渐增强;且AgNPs对大肠杆菌ATCC25922的抑制效果最强、铜绿假单胞菌PAO1次之,对金黄色葡萄球菌ATCC25933的抑制效果相对较弱,MIC分别为0.031、0.063、0.125 mg/mL。高质量浓度的AgNPs具有较强的抗氧化能力,当质量浓度为1.000~2.000 mg/mL时,AgNPs对超氧阴离子自由基、$ABTS^+$自由基均表现出较强的清除能力,但是还原能力相对较弱。【结论】采用余甘提取液绿色制备的AgNPs分散性良好,具有较强的抑菌活性和抗氧化能力,为AgNPs保鲜剂的研究和开发提供科学指导,同时为其在未来食品保鲜中的应用提供借鉴。

关键词:余甘提取液;纳米银;抑菌活性;抗氧化能力

Structural Characteristics and Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Prepared from *Phyllanthus emblica* Extract

LIU Jingyuan[1]　*WANG Wenting*[2*]

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Department of Biology, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China)

Abstract: [**Objective**] The aim of this study is to investigate the structural characteristics, antibacterial activity, and antioxidant capacity of silver nanoparticles (AgNPs) prepared from *Phyllanthus emblica* extract. [**Method**] AgNPs were prepared with *Phyllanthus emblica* extract as a reducing agent. The structure of the AgNPs was characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), photon correlation spectroscopy (PCS), and transmission electron microscopy (TEM). Furthermore, the inhibitory effects of AgNPs at different mass concentrations on *Escherichia coli* ATCC25922, *Staphylococcus aureus* ATCC25933, and *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 were assessed, with the minimum inhibitory concentrations (MIC) being determined. In addition, the superoxide anion and $ABTS^+$ free radical scavenging abilities and the reducing capacity of AgNPs were determined. [**Result**] The AgNPs prepared with *Phyllanthus emblica* extract presented a face-centered cubic structure with a particle size range from 10 to 30 nm and good dispersion. Their antibacterial properties gradually increased with the rising mass concentration of AgNPs. AgNPs had strong, moderate, and weak inhibitory effects

基金项目:山西省科技厅基础研究计划项目(20210302124516)。

通信作者:王文婷(1992—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事植物天然产物活性研究。E-mail:wangwtsci@163.com

收稿日期:2025-06-23　**修回日期:**2025-07-14

on *Escherichia coli* ATCC25922, *Pseudomonas aeruginosa* PAO1, and *Staphylococcus aureus* ATCC25933, with the MICs of 0.031, 0.063, and 0.125 mg/mL, respectively. AgNPs at high mass concentrations exhibited strong antioxidant properties. At 1.000 to 2.000 mg/mL, AgNPs showed high superoxide anion and $ABTS^+$ free radical scavenging abilities but weak reducing capacity. [**Conclusion**] The AgNPs prepared by the green method from *Pseudomonas emblica* extract has good dispersion, strong antibacterial activity, and strong antioxidant capacity. The results provide scientific guidance for the research and development of AgNPs as a preservative and offer a reference for their future application in food preservation.

Keywords: *Phyllanthus emblica* extract; silver nanoparticle; antibacterial activity; antioxidant capacity

二十一世纪以来，随着科学技术的发展，纳米技术已在众多领域广泛应用。AgNPs作为一种集导电、催化、抑菌、无毒等特点于一身的新型材料，已在医药卫生、航天、环境保护、食品保鲜等领域展现出优异性能，具有较大的应用前景[1-4]。

鉴于AgNPs优异的物理性质及抗菌效果，其可作为抗菌剂应用于食品保鲜领域[5]。王鑫等[6]研究表明，PVA-甜玉米芯多糖AgNPs复合薄膜能延长草莓的货架期。AgNPs的制备方法有很多种，化学还原法最为常用，常用的化学还原剂有柠檬酸钠和硼氢化钠等，然而这些化学还原剂可能具有一定的生物毒性，同时还会导致环境污染[7]。人们期待更绿色、安全的还原剂来制备AgNPs[8]。以多糖作为还原剂的生物还原法成为最佳选择。多糖的结构单元中含有大量的羟基，能够与多种金属离子的化学键相连，引导贵金属纳米晶体的生长，并起到稳定AgNPs的作用[9]。刘冲冲等[10]以生姜提取液为还原剂，与硝酸银混合后形成混合溶液，经过85 ℃加热处理后于4 ℃避光保存，制得粒径5~30 nm、稳定性较好的AgNPs。据研究报道，已有多种植物提取物用于制备AgNPs，包括芒果[11]、桑叶[12]、绿茶[13]、陈皮[14]、黑心菊花[15]、西青果[16]等。

作为一种大戟科叶下珠属植物，余甘是一种逐渐被人们发掘和认可的药食两用植物，具有提高免疫力、消除自由基、减轻氧化胁迫、抑制毒素的作用，应用前景广阔[17]。余甘提取液中包含大量的多糖、多酚等物质，具有增强机体免疫力、提高抗氧化能力等生物特性[18]，而且多糖中含有大量的羟基和羧基，可以作为合成AgNPs的还原剂，并对AgNPs具有一定的稳定作用[19]。AgNPs因独特的化学结构，具有较强的催化能力、氧化能力和还原能力。在多糖溶液中，AgNPs受O_2和H^+的协同作用产生O_2^-，H_2O产生羟基，同时释放Ag^+；Ag^+在较高浓度下可重新聚集形成Ag^0。这个过程中持续消耗O_2，使其在周围产生强氧化性自由基，对细胞壁进行攻击，最终导致细菌死亡，从而起到抑菌作用[20]。廖正萍等[21]用余甘多糖绿色合成AgNPs复合粒子，显示了生物制备AgNPs的巨大优势，但其抑菌活性和抗氧化能力仍不清楚。

为研究余甘提取液绿色制备AgNPs的抑菌活性和抗氧化能力，作者以余甘提取液作为还原剂制备AgNPs，采用XRD、SEM、PCS、TEM等对AgNPs进行结构表征及粒径分析，并研究了不同质量浓度的AgNPs对大肠杆菌ATCC25922、金黄色葡萄球菌ATCC25933、铜绿假单胞菌PAO1的抑菌活性，以及AgNPs清除超氧阴离子自由基、$ABTS^+$自由基能力和还原能力，旨在为通过生物方法制备高活性AgNPs提供研究基础，为今后进一步把生物制备的AgNPs开发成具有抑菌及抗氧化功能的新型保鲜剂提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

余甘果：福建省泉州市惠安县紫山镇蓝田村。

大肠杆菌ATCC25922、铜绿假单胞菌PAO1、金黄色葡萄球菌ATCC25933：广东省微生物菌种保藏中心；无水乙醇、硝酸银、氯化钠、盐酸：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；三氯乙酸（TCA）、三氯化铁、铁氰化钾、高硫酸钾：分析纯，南京化学试剂股份有限公司；二丁基羟基甲苯（BHT）：厦门研科生物技术有限公司；$ABTS^+$：美国Sigma公司；蛋白胨、酵母提取物、琼脂：广东环凯微生物科技有限公司。

LB培养基：蛋白胨10 g/L，酵母提取物5 g/L，氯化钠5 g/L；pH 7.0。

1.2 仪器与设备

电子天平：BAS224型，德国Sartorius公司；离心机：5811型，德国Eppendorf公司；紫外分光光度计：U-290型，日本Hitachi公司；全温度摇瓶柜：HYG-B型，太仓市实验设备厂；多点磁力搅拌器：MS-15SV型，美国精骐有限公司；微波炉：C80F20CN2L-B8（RO）型，佛山市顺德区格兰仕微波炉电器有限公司；SEM：Nova NanoSEM 230型，捷克FEI CZECH REPUBLIC S. R. O.；TEM：TECNAI G2 F20型，美国FEI公司。X射线衍射仪：UltimaIV型，日本理学株式会社；PCS：Zetasizer Nano S90型，英国马尔文公司。

1.3 余甘提取液的制备

余甘果经洗净、晾干、去核和粉碎处理，过40目筛得到余甘粉末。参照王芳等[22]的方法，按照1 g∶20 mL的料液比将余甘粉末与去离子水混匀，制备成溶液，置于100 ℃的水浴锅中提取5 h，取出后降至室温，24 ℃、10 000 r/min高速离心5 min，取上清液，置于4 ℃冰箱中待用。

1.4 AgNPs的制备

将0.85 g硝酸银粉末、150 mL余甘提取液、0.1 g氯化钠混合，搅拌后制成混合溶液，经波长为365 nm的紫外线照射辅助生成AgNPs，待反应完成后，反复离心收集沉淀，冻干后置于−4 ℃冰箱中待用。

1.5 AgNPs的结构表征

XRD分析：取10 mg AgNPs粉末置于样品台上，设置扫描速度为10（°）/min，衍射角范围2θ=0°~85°，扫描得到图谱[23]。

SEM及PCS分析：将AgNPs固定在铜台上，进行表面喷金处理，采用SEM对AgNPs形貌结构进行观察。并将AgNPs配成溶液，倒入PCS的测试皿中测定AgNPs的粒径大小和分布[24]。

TEM及高分辨率透射电镜分析：将AgNPs溶胶滴在400目铜网上，利用TEM进行测试，观察分析AgNPs的形貌和结晶状况。

1.6 AgNPs的抑菌活性试验

选用大肠杆菌ATCC25922、铜绿假单胞菌PAO1、金黄色葡萄球菌ATCC25933作为试验菌，采用LB培养基，在30 ℃、150 r/min的条件下振荡培养12 h进行活化，以抑菌圈法进行抑菌试验，测定AgNPs的抑菌活性。所使用器具及培养基均需经121 ℃高压灭菌20 min，整个操作过程在无菌条件下进行。

1.6.1 抑菌圈法

分别取200 μL上述3种菌株菌液与20 mL LB培养基混合，菌液体积分数约1%，在全温度摇瓶柜中进行活化。加热LB培养基，待其冷却至50 ℃，将上述活化好的菌液倒入培养皿中，待培养基凝固后，将6 mm的无菌滤纸片置于LB培养基正中央，并分别加入15 μL不同质量浓度（0.312 5、0.625 0、1.250 0、2.500 0、5.000 0 mg/mL）的AgNPs溶液，置于30 ℃的恒温培养箱中培养24 h，取出后测量抑菌圈直径。每个处理重复3次。

1.6.2 MIC测定

按1.6.1节的方法分别将3种菌株进行活化。取出AgNPs与无菌水混合，配制成AgNPs质量浓度为1 mg/mL的混合液，按照1∶2、1∶4、1∶8、1∶16、1∶32、1∶64、1∶128进行倍比稀释，分别取2 mL不同质量浓度的AgNPs混合液至已经加热融化的20 mL LB培养基中，混匀倒至培养皿中，待其凝固后，加入0.05 mL菌液（1×10^6 CFU/mL）进行涂板，37 ℃培养24 h，计算菌落数。

MIC结果判定：LB培养基上无明显细菌菌落生长时，AgNPs最大稀释质量浓度为MIC。

1.7 AgNPs的抗氧化能力试验

1.7.1 AgNPs溶液的制备

利用倍半稀释法将AgNPs配制成质量浓度为2.000、1.000、0.500、0.250、0.125 mg/mL的溶液备用。

1.7.2 清除超氧阴离子自由基能力

将0.05 mol/L Tris-HCl（pH 8.2）缓冲液在25 ℃条件下预热20 min，取此缓冲液1 mL，分别加入0.5 mL不同质量浓度的AgNPs溶液，再加入0.4 mL 3 mmol/L的邻苯三酚，剧烈振荡使其充分反应，4 min后取0.1 mL 3 mol/L的盐酸终止反应，在325 nm处测定吸光度。空白对照组的吸光度以0.5 mL的蒸馏水代替样品溶液测定吸光度，样品空白对照组的吸光度以0.4 mL的蒸馏水代替邻苯三酚测定吸光度[25]，以BHT为阳性对照，超氧阴离子自由基清除率按式（1）计算。

$$S=\frac{A_0-A_1+A_2}{A_0}\times100\% \quad (1)$$

式中：

S——超氧阴离子自由基清除率，%；

A_0——空白对照组的吸光度；

A_1——加入样品溶液后的吸光度；

A_2——样品空白对照组的吸光度。

1.7.3 清除 $ABTS^+$ 自由基能力

$ABTS^+$和高硫酸钾用去离子水分别溶解后混合，制备 $ABTS^+$ 储备液，使其最终浓度分别为 7.00 mmol/L 和 2.45 mmol/L。测定时用磷酸盐缓冲液（10 mmol/L，pH 7.4）将 $ABTS^+$ 储备液稀释，使其吸光度达到 0.70±0.02，形成 $ABTS^+$ 测定液。吸取 2.0 mL $ABTS^+$ 测定液，分别加入 20 μL 不同质量浓度的 AgNPs 溶液，摇动 30 s，待反应 6 min 后，于 734 nm 处测定吸光度。每个样品每个质量浓度下重复测定 3 次。$ABTS^+$ 自由基清除率按式（2）计算。

$$R=\frac{A_3-A_4}{A_3}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

R——$ABTS^+$ 自由基清除率，%；

A_3——$ABTS^+$ 溶液的吸光度；

A_4——加入样品溶液后的吸光度。

1.7.4 还原能力测定

取 1 mL 不同质量浓度的 AgNPs 溶液，加入 2.5 mL 0.2 mol/L 的磷酸缓冲液（pH<6.6）及 10 g/L 的铁氰化钾，将混合液在 50 ℃下保温 20 min 后，冰浴冷却至室温，加入 2.5 mL 100 g/L 的 TCA 混匀，在 10 000 r/min 下高速离心 10 min，然后取 2.5 mL 上清液加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 1 g/L 的三氯化铁，混匀后静置 10 min，在 700 nm 处测定吸光度。溶液的吸光度越高，说明该样品的还原能力越强。重复测定 3 次，以 BHT 代替 AgNPs 为阳性对照。

1.8 数据分析

试验数据采用 SPASS 19.0 软件进行分析，采用 Duncan 法进行多重比较分析，P<0.05 时差异显著，以上试验重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 AgNPs 的结构表征分析

2.1.1 XRD 分析

AgNPs 的 XRD 扫描结果如图 1 所示，AgNPs 粉末在 X 射线衍射仪下显示出 4 个明显的特征峰，其对应的 2θ 分别为 38.18°、44.36°、64.54°、77.42°，与银粉末衍射标准数据（JCPDS01-087-0597）基本吻合（2θ 分别为 38.096°、44.257°、64.406° 和 77.452°），对应于立方晶系（111）、（200）、（220）和（311）晶面。因此，制备的 AgNPs 是典型的面心立方结构。由此可知，制备的 AgNPs 特征峰明显，说明余甘提取液制备的 AgNPs 结晶性质良好[26]。

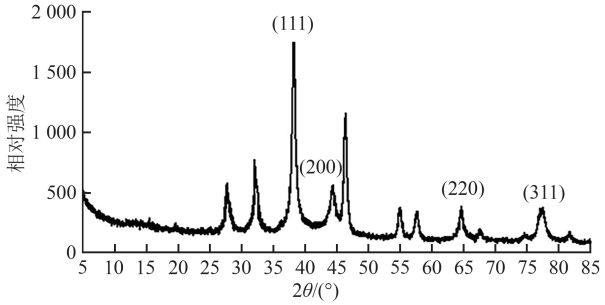


图 1 AgNPs 的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of AgNPs

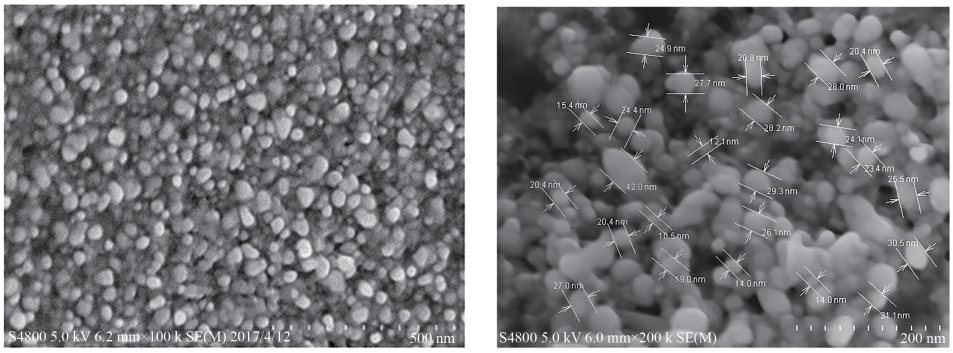
2.1.2 AgNPs 的形貌及粒径分析

将制备的 AgNPs 用 SEM、TEM 及 PCS 进行形貌与粒径分析。SEM 分析结果见图 2，AgNPs 形状为圆球状和椭球状，小部分呈棒状及三角状，分散性较好，基本未出现团聚现象；另外，AgNPs 粒径主要分布在 10~30 nm。从图 3 粒径分析结果可知，制备的 AgNPs 平均粒径为 100.96 nm，但大部分 AgNPs 的粒径仍集中在 10 nm，与 SEM 结果一致。而从 TEM 分析结果（见图 4）可知，制备的 AgNPs 为典型的面心立方结构，与 XRD 分析得出的结论相符。

2.2 AgNPs 的抑菌活性分析

AgNPs 具有较强的抑菌性，其与 DNA 碱基中的磷络合形成交叉链接，使嘧啶或嘌呤中相邻氮原子间的氢键被置换，分子内磷酸二酯键被破坏，形成嘧啶二聚体，造成双螺旋结构消失，引起 DNA 双链断裂且无法修复，导致细菌失活[27-29]。有研究表明，当粒径在 10 nm 左右时，AgNPs 能够附着在细胞壁表面，释放 Ag^+ 和 Ag^0，起到超强的抑菌活性[30]。

不同质量浓度的 AgNPs 对 3 种细菌的抑菌效果见表 1。结果表明，不同质量浓度的 AgNPs 对大肠杆菌 ATCC25922、金黄色葡萄球菌 ATCC25933、铜绿假单胞菌 PAO1 均有明显的抑制作用。在 AgNPs 质量浓度为 0.312 5 mg/mL 时可观察到抑菌圈，但抑菌圈直径较小；随着 AgNPs 质



(a) AgNPs的SEM图(100 000×)　　(b) AgNPs的SEM图(200 000×)

图 2　AgNPs 的 SEM 图

Fig. 2　SEM images of AgNPs

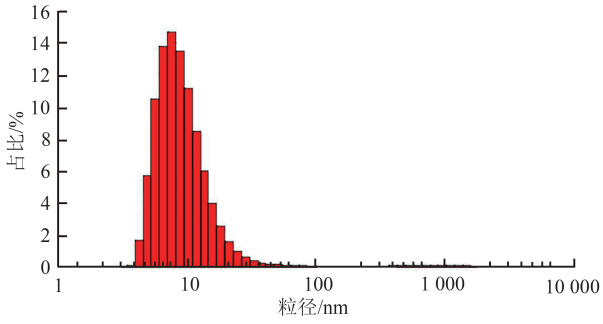
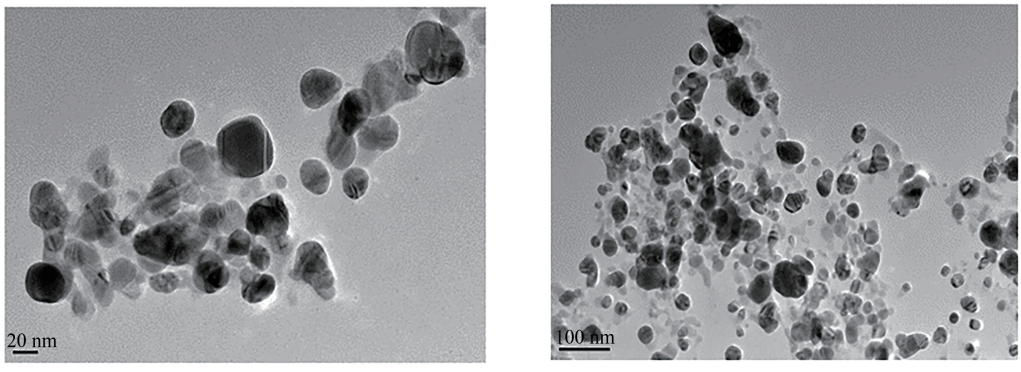


图 3　AgNPs 的粒径分布

Fig. 3　Particle size distribution of AgNPs

量浓度的升高，抑菌圈直径逐渐增大，在 AgNPs 质量浓度为 5.000 0 mg/mL 时，达到最大值。MIC 结果显示，AgNPs 对大肠杆菌 ATCC25922、金黄色葡萄球菌 ATCC25933、铜绿假单胞菌 PAO1 的 MIC 分别为 0.031、0.125、0.063 mg/mL。说明低质量浓度的 AgNPs 能够有效抑制 3 种细菌的生长，并随着质量浓度的升高抑菌活性逐渐增强。其中对大肠杆菌 ATCC25922 的抑制效果最好，其次是铜绿假单胞菌 PAO1，对金黄色葡萄球菌 ATCC25933 的抑制效果相对较弱。



(a) AgNPs的TEM图(71 000×)　　(b) AgNPs的TEM图(29 000×)

图 4　AgNPs 的 TEM 图

Fig. 4　TEM images of AgNPs

2.3　AgNPs 的抗氧化能力分析

2.3.1　清除超氧阴离子自由基能力结果

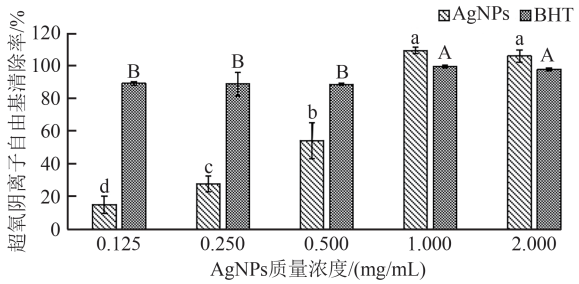
邻苯三酚在碱性条件下会发生自氧化，产生超氧阴离子自由基和中间产物。当 pH<9.0 时，其自氧化速度与超氧阴离子自由基浓度呈正相关，因此可通过测定邻苯三酚自氧化中间产物间接测定氧化剂清除超氧阴离子自由基能力[31]。如图 5 所示，超氧阴离子自由基清除率随着 AgNPs 质量浓度的增加不断升高，且呈现一定的量效关系。当 AgNPs 质量浓度为 0.125 mg/mL 时，超氧阴离子自由基清除率最低，为 14.99%；当 AgNPs 质量浓度在 0.500~1.000 mg/mL 时，超氧阴离子自由基清除率急剧上升，从 54.13% 上升至 108.99%。这可能由于 AgNPs 过量，导致显

表 1 AgNPs对大肠杆菌 ATCC25922、金黄色葡萄球菌 ATCC25933 和铜绿假单胞菌 PAO1 的抑菌效果

Table 1 Inhibitory effects of AgNPs on *Escherichia coli* ATCC25922, *Staphylococcus aureus* ATCC25933, and *Pseudomonas aeruginosa* PAO1

菌株	抑菌圈直径/mm					MIC/（mg/mL）
	0.312 5 mg/mL	0.625 0 mg/mL	1.250 0 mg/mL	2.500 0 mg/mL	5.000 0 mg/mL	
大肠杆菌 ATCC25922	14.043 ± 0.041^{aA}	16.027 ± 0.129^{aA}	17.112 ± 0.058^{bA}	19.220 ± 0.114^{cA}	20.173 ± 0.095^{cA}	0.031
金黄色葡萄球菌 ATCC25933	7.916 ± 0.027^{aB}	9.906 ± 0.098^{bC}	12.680 ± 0.027^{bB}	14.020 ± 0.090^{cB}	15.756 ± 0.034^{dBC}	0.125
铜绿假单胞菌 PAO1	9.529 ± 0.088^{aB}	12.210 ± 0.136^{aB}	13.958 ± 0.230^{bB}	15.132 ± 0.118^{cB}	17.439 ± 0.137^{cB}	0.063

注：a~d 表示同一行中在不同质量浓度 AgNPs 下抑菌圈直径的差异性分析，不同字母表示差异显著（$P<0.05$）；A~C 表示同一列中不同菌株抑菌圈直径的差异性分析，不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。



不同小写字母代表不同质量浓度AgNPs处理下组间差异显著($P<0.05$);
不同大写字母代表不同质量浓度BHT处理下组间差异显著($P<0.05$)。

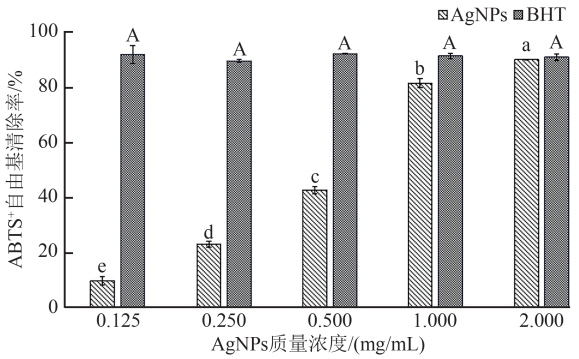
图 5 不同质量浓度 AgNPs 清除超氧阴离子自由基能力

Fig. 5 Abilities of AgNPs at different mass concentrations to scavenge superoxide anions free radicals

色剂邻苯三酚与超氧阴离子自由基的反应被完全抑制，甚至逆转，使得溶液的颜色变化超过阳性对照组，在 AgNPs 质量浓度为 1.000 mg/mL 时，超氧阴离子自由基清除率达到最大值。当 AgNPs 质量浓度不高于 0.500 mg/mL 时，其清除超氧阴离子自由基的能力低于 BHT；当 AgNPs 质量浓度高于 0.500 mg/mL 时，其清除超氧阴离子自由基的能力高于 BHT。在该试验所测定的质量浓度范围内，AgNPs 具有较好的清除超氧阴离子自由基能力。

2.3.2 清除 $ABTS^+$ 自由基能力结果

ABTS 经强氧化剂氧化后生成稳定的蓝绿色阳离子自由基 $ABTS^+$。样品中存在抗氧化成分，可通过提供电子或氢原子与 $ABTS^+$ 自由基发生氧化还原反应，将其还原为无色的 ABTS，其反应程度与自由基被清除程度呈定量关系[32]。由图 6 可知，不同质量浓度的 AgNPs 清除 $ABTS^+$ 自由基的能力呈现剂量依赖性，即 AgNPs 的质量浓度越高，其清除 $ABTS^+$ 自由基的能力越强[33]。AgNPs 在质量浓度为 1.000 mg/mL 时已经具有较强的清除 $ABTS^+$ 自由基的能力；在 AgNPs 质量浓度为 2.000 mg/mL 时，$ABTS^+$ 自由基清除率达到最大值，为 89.98%。在该试验所测定的质量浓度范围内，AgNPs 具有较好的清除 $ABTS^+$ 自由基能力。



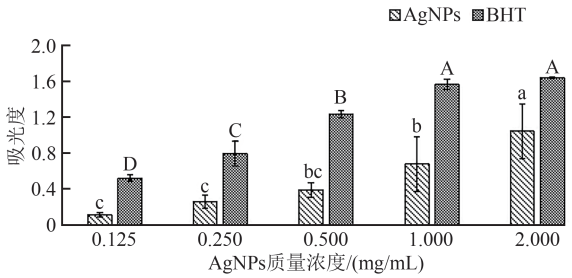
不同小写字母代表不同质量浓度AgNPs处理下组间差异显著($P<0.05$);
不同大写字母表示不同质量浓度BHT处理下组间差异显著($P<0.05$)。

图 6 不同质量浓度 AgNPs 清除 $ABTS^+$ 自由基能力

Fig. 6 Abilities of AgNPs at different mass concentrations to scavenge $ABTS^+$ free radicals

2.3.3 还原能力结果

研究表明，抗氧化剂的还原能力与抗氧化性之间具有一定的联系[34]。抗氧化剂能将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+}，在波长 700 nm 处有最大光吸收。吸光度越大，表明抗氧化剂还原能力越强，抗氧化活性越高。如图 7 所示，所测试样品的质量浓度与吸光度呈正相关，即 AgNPs 质量浓度越高还原能力越强。当 AgNPs 质量浓度增至 2.000 mg/mL 时，吸光度达到最大值，为 1.04，说明 AgNPs 具有较好的还原能力。在该试验所测定的质量浓度范围内，AgNPs 具有较好的还原能力，但与 BHT 相比还原能力较弱。



不同小写字母代表不同质量浓度AgNPs处理下组间差异显著(P<0.05)；不同大写字母表示不同质量浓度BHT处理下组间差异显著(P<0.05)。

图7　不同质量浓度AgNPs的还原能力

Fig. 7　Reducing capacity of AgNPs at different mass concentrations

3　结论

以余甘提取液作为还原剂和稳定剂制备AgNPs，利用抑菌圈法对大肠杆菌ATCC25922、铜绿假单胞菌PAO1和金黄色葡萄球菌ATCC25933进行抑菌试验，确定了AgNPs的抑菌活性及抗氧化能力[35]。结果表明，余甘提取液制备的AgNPs在质量浓度为0.312 5~5.000 0 mg/mL时均表现出一定的抑菌效果，其抑菌活性随着AgNPs质量浓度的升高而逐渐增强，其中对大肠杆菌ATCC25922、金黄色葡萄球菌ATCC25933、铜绿假单胞菌PAO1的MIC分别为0.031、0.125、0.063 mg/mL，可见其对大肠杆菌ATCC25922和铜绿假单胞菌PAO1的抑菌活性明显高于金黄色葡萄球菌ATCC25933。这可能是由于革兰氏阴性菌细胞壁外层的脂多糖带负电荷，而AgNPs的银离子带正电荷，因此更容易与革兰氏阴性菌发生反应，所以相同质量浓度的AgNPs对革兰氏阴性菌产生的效果会更好[36]。同时，经过对AgNPs体外抗氧化指标的测定，发现AgNPs具有一定的抗氧化能力。AgNPs在质量浓度为1.000~2.000 mg/mL时对超氧阴离子自由基、$ABTS^{+}$自由基均表现出较好的清除能力，但是还原能力相对较弱，这可能是由于还原能力与化学物质极性相关，一般极性较强的物质还原能力也较强[37]。综上所述，余甘提取液绿色制备的AgNPs呈面心立方结构，粒径主要分布在10~30 nm，分散性良好，具有较好的抑菌活性和抗氧化能力，且兼具绿色、安全、无毒等优势，可以作为天然保鲜剂的原料。鉴于每个菌种活性差异及抗氧化条件比较单一，在今后的试验中可以选择更多的菌种，同时采用多种抗氧化活性方法来评价AgNPs的抑菌活性和抗氧化能力，并进行AgNPs活体保鲜的应用试验研究，为新型环保保鲜剂的开发和应用提供理论依据。

参考文献

[1] 张星晖. 纳米技术在食品包装防腐性能提升中的作用分析[J]. 现代食品，2025，31(8)：52-54.
ZHANG X H. Analysis on the role of nanotechnology in improving the anticorrosion performance of food packaging [J]. Modern Food，2025，31(8)：52-54.(in Chinese)

[2] 刘小莉，图尔荪阿依•图尔贡，王帆，等. 纳米银对革兰氏阴性水产品腐败菌的抑制作用[J]. 中国食品学报，2019，19(11)：186-190.
LIU X L，TURSUNAY T，WANG F，et al. Inhibitory activity of silver nanoparticles against gram-negative bacteria in spoiled fishes[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2019，19(11)：186-190.(in Chinese)

[3] 孙永进，王泓杰，黄静，等. 羧化壳聚糖-果胶基纳米银的制备、结构表征及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技，2025，46(12)：91-100.
SUN Y J，WANG H J，HUANG J，et al. Preparation，structural characterization and antioxidant activity of carboxylated chitosan-pectin-based silver nanoparticles[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(12)：91-100.(in Chinese)

[4] 李晓凯，王柯柯，范兰兰，等. 传感器用银纳米材料研究进展[J]. 当代化工研究，2023(2)：6-10.
LI X K，WANG K K，FAN L L，et al. Progress in the synthesis of silver nanomaterials for sensors[J]. Modern Chemical Research，2023(2)：6-10.(in Chinese)

[5] 李丹，仇顺海，林迎童，等. 纳米材料在航海食品保鲜中的应用[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志，2021，28(3)：400-404.
LI D，QIU S H，LIN Y T，et al. Application of nano-materials in preservation of seafood[J]. Chinese Journal of Nautical Medicine and Hyperbaric Medicine，2021，28(3)：400-404.(in Chinese)

[6] 王鑫，周卓，岳振歌，等. PVA-甜玉米芯多糖纳米银复合薄膜的制备及草莓保鲜应用[J]. 精细化工，2024，41(9)：2018-2030.
WANG X，ZHOU Z，YUE Z G，et al. Preparation of PVA-sweet corncob polysaccharide nano-silver composite film and its application in strawberry preservation[J]. Fine Chemicals，2024，41(9)：2018-2030.(in Chinese)

[7] NILUXSSHUN M C D, MASILAMANI K, MATHIVENTHAN U. Green synthesis of silver nanoparticles from the extracts of fruit peel of *Citrus tangerina*, *Citrus sinensis*, and *Citrus limon* for antibacterial activities[J]. Bioinorganic Chemistry and Applications, 2021, 2021(1): 6695734.

[8] 程体艳,张振. 菊苣叶提取物绿色合成纳米银的表征及其生物活性研究[J]. 食品与发酵工业,2024,50(15):119-125.
CHENG T Y, ZHANG Z. Characterization and bioactivity of green synthesis nano-silver from chicory leaf extract[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 119-125. (in Chinese)

[9] 覃引,苟琴,熊音如,等. 树莓多糖绿色合成纳米银颗粒的表征及其抗氧化活性研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2019,32(3):453-458.
QIN Y, GOU Q, XIONG Y R, et al. Characterization of silver nanoparticles biosynthesized using crude polysaccharides of *Rubus idaeus* and their antioxidant activities[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 32(3): 453-458. (in Chinese)

[10] 刘冲冲,王磊,徐慧,等. 姜提取物生物合成纳米银抑菌活性的研究[J]. 食品与生物技术学报,2017,36(6):590-597.
LIU C C, WANG L, XU H, et al. Antibacterial study of silver nanoparticles biosynthesized with ginger extract [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2017, 36(6): 590-597. (in Chinese)

[11] 徐超,何朝晖,彭蕾,等. 芒果生物合成纳米银化妆品及抗菌性能研究[J]. 山东化工,2024,53(6):68-71.
XU C, HE Z H, PENG L, et al. Study on mango biosynthesis nano silver cosmetics and antibacterial properties[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(6): 68-71. (in Chinese)

[12] 陈泓岐. 桑叶多糖-纳米银复合粒子介导合成及其抑菌活性评价[D]. 重庆:重庆工商大学,2024.

[13] 孙立硕,卢苗,顾丽争,等. 绿色茶叶制备纳米银及其影响因素研究[J]. 信息记录材料,2025,26(3):6-9.
SUN L S, LU M, GU L Z, et al. Preparation of silver nanoparticles from green tea and its influencing factors [J]. Information Recording Materials, 2025, 26(3): 6-9. (in Chinese)

[14] 杨博玥,张卫,孙奕,等. 基于陈皮提取物的纳米银绿色合成方法研究[J]. 当代化工,2020,49(8):1605-1608.
YANG B Y, ZHANG W, SUN Y, et al. Study on green synthesis of AgNPs based on dried tangerine peel extract [J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(8): 1605-1608. (in Chinese)

[15] 丁金刚,曲峰,贺长霞,等. 黑心菊花提取物绿色合成纳米银的表征及细菌抑制性能研究[J]. 山东化工,2024,53(11):22-24.
DING J G, QU F, HE C X, et al. Study on the characterization and bacteriostatic effect of nano-silver synthesized from the extract of *Rudbeckia hirta* L.[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(11): 22-24. (in Chinese)

[16] 冯琦. 西青果生物合成纳米银及抗马拉色菌活性研究[D]. 开封:河南大学,2024.

[17] 张琳,吴晓雯,王宏,等. 余甘果的生物活性物质及其功效研究进展[J]. 食品研究与开发,2023,44(1):211-218.
ZHANG L, WU X W, WANG H, et al. Bioactive constituents of *Phyllanthus emblica* L. and its healthy benefits[J]. Food Research and Development, 2023, 44(1): 211-218. (in Chinese)

[18] LI Y Y, CHEN J Y, CAO L L, et al. Characterization of a novel polysaccharide isolated from *Phyllanthus emblica* L. and analysis of its antioxidant activities[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(7): 2758-2764.

[19] 杨晓倩. 茯苓多糖绿色合成纳米银颗粒及其应用研究[D]. 昆明:云南农业大学,2023.

[20] 韩婉毓. 紫苏籽壳纳米银颗粒和羧甲基纤维素的制备[D]. 太原:中北大学,2024.

[21] 廖正萍,王芳,王文婷,等. 余甘多糖绿色合成纳米银复合粒子的制备及响应面优化[J]. 天然产物研究与开发,2017,29(8):1409-1414.
LIAO Z P, WANG F, WANG W T, et al. Optimization of preparation process for emblic polysaccharide-silver nanoparticles by response surface methodology [J]. Natural Product Research and Development, 2017, 29(8): 1409-1414. (in Chinese)

[22] 王芳,曹莉莉,刘杭,等. 余甘粗多糖对HepG-2细胞氧化应激反应的影响[J]. 天然产物研究与开发,2016,28(9):1437-1442.
WANG F, CAO L L, LIU H, et al. Effect of crude polysaccharide from *Phyllanthus emblic* fruit on oxidative stress in HepG-2 cells[J]. Natural Product Research and Development, 2016, 28(9): 1437-1442. (in Chinese)

[23] 封张萍. 大米血管紧张素转换酶抑制肽的制备及其活性评价[D]. 杭州:浙江大学,2021.

[24] 郭芳芳. 稀土掺杂的WLED用 $Ca_2SiO_3Cl_2$ 单基质荧光

粉的制备及性能[D]. 西安：陕西科技大学，2013.

[25] 宁雪. 甘草蜜酒炙炮制工艺优化及抑菌抗氧化活性研究[D]. 长春：吉林农业大学，2020.

[26] 程菁菁，汤成，张慧，等. 党参多糖的提取、表征及其纳米银复合物的制备与分析[J]. 湖北中医药大学学报，2024，26(2)：42-46.
CHENG J J，TANG C，ZHANG H，et al. Extraction and characterization of *Codonopsis pilosulae* polysaccharide and its dispersion on silver nanoparticle[J]. Journal of Hubei University of Chinese Medicine，2024，26(2)：42-46.(in Chinese)

[27] 侯勇. 基于超分子结构的两种中草药化学成分及其组装功能活性的研究[D]. 北京：北京协和医学院，2023.

[28] 周采宜. 银纳米颗粒微生物绿色合成及其抗菌活性的研究[D]. 桂林：广西师范大学，2020.

[29] PEI J W，FU B F，JIANG L F，et al. Biosynthesis，characterization，and anticancer effect of plant-mediated silver nanoparticles using *Coptis chinensis*[J]. International Journal of Nanomedicine，2019，14：1969-1978.

[30] ZHU Z L，WANG Z P，LI S H，et al. Antimicrobial strategies for urinary catheters[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A，2019，107(2)：445-467.

[31] 贾红玉，王亚森，田晓辉，等. 邻苯三酚自氧化法在SOD活性测定中的应用[J]. 河北大学学报(自然科学版)，2018，38(3)：284-290.
JIA H Y，WANG Y S，TIAN X H，et al. Pyrogallol autoxidation and its application to SOD activity assay[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition)，2018，38(3)：284-290.(in Chinese)

[32] 董丹，卢志全，唐琳琳，等. 红树莓籽油贮藏稳定性的主成分分析[J]. 现代食品科技，2022，38(1)：206-215.
DONG D，LU Z Q，TANG L L，et al. Principal component analysis of storage stability of red raspberry seed oil[J]. Modern Food Science and Technology，2022，38(1)：206-215.(in Chinese)

[33] 钱伟，阳斌，邵博，等. 超声辅助酶法降解枳实果胶及其衍生物抗氧化性能[J]. 日用化学工业(中英文)，2024，54(8)：947-955.
QIAN W，YANG B，SHAO B，et al. Ultrasound-assisted enzymatic degradation to obtain pectin derivatives from *Citrus aurantium* L. and its antioxidant properties[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics，2024，54(8)：947-955.(in Chinese)

[34] 李明杨，刘帅光，卢梦娇，等. 不同抗氧化剂体外抗氧化活性及其对肉品氧化稳定性的影响[J]. 食品科学，2022，43(1)：67-75.
LI M Y，LIU S G，LU M J，et al. Comparison of antioxidant activity *in vitro* of antioxidants used in heat-processed meat products and their effects on oxidation[J]. Food Science，2022，43(1)：67-75.(in Chinese)

[35] 曹兴业，谢闰生，赵志远，等. 百香果提取液绿色制备银纳米粒子及其抗菌研究[J]. 食品与发酵工业，2024，50(6)：130-137.
CAO X Y，XIE R S，ZHAO Z Y，et al. Green preparation of silver nanoparticles from passion fruit extract and their antibacterial research [J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(6)：130-137.(in Chinese)

[36] WU C N，FUH S C，LIN S P，et al. TEMPO-oxidized bacterial cellulose pellicle with silver nanoparticles for wound dressing[J]. Biomacromolecules，2018，19(2)：544-554.

[37] 李昌勤，姚辰，朱荣遥，等. 基于DPPH、ABTS和FRAP的中药女贞子抗氧化谱效关系研究[J]. 中国中药杂志，2016，41(9)：1670-1677.
LI C Q，YAO C，ZHU R Y，et al. Spectrum-effect relationship in antioxidant activity of Ligustri Lucidi Fructus based on DPPH，ABTS and FRAP assays[J]. China Journal of Chinese Materia Medica，2016，41(9)：1670-1677.(in Chinese)

（责任编辑：许艳超）