

澳洲坚果青皮多酚纳米银的绿色合成及结构表征

张明¹, 帅希祥¹, 李娅², 刘裕洁¹, 杜丽清^{1*}

(1. 中国热带农业科学院亚热带作物研究所, 农业农村部热带果树生物学重点实验室, 广东湛江 524091) (2. 海南省热带园艺采后处理与保鲜重点实验室, 广东湛江 524091)

摘要: 该研究以澳洲坚果青皮多酚为原料, 采用生物法绿色合成纳米银 (Silver Nanoparticles, AgNPs) 研究澳洲坚果青皮多酚质量浓度以及反应时间对 AgNPs 合成的影响, 同时利用傅里叶变换红外光谱仪、纳米粒度及 Zeta 电位分析仪、透射电子显微镜等现代仪器解析其结构特性。结果表明, 澳洲坚果青皮多酚纳米银绿色合成条件为澳洲坚果青皮多酚质量浓度 2.0 mg/mL、AgNO₃ 溶液浓度 0.1 mmol/L、反应时间 48 h、多酚溶液与 AgNO₃ 溶液体积比 1:9; 傅里叶变换红外光谱图谱表明, 苯环上的 -OH 参与了 AgNPs 的合成; 纳米粒度及 Zeta 电位分析结果表明, 合成的 AgNPs 水合粒径介于 70~130 nm 之间, 粒径小, 分散性良好, 且带负电荷; 透射电子显微镜及能谱图图像显示, 合成的 AgNPs 形貌近似球形, Ag 元素周围紧密包裹着 C、O 元素, Ag 元素占比为 62.31%。综上, 澳洲坚果青皮多酚可作为绿色合成 AgNPs 的天然还原剂和稳定剂, 合成的 AgNPs 分散性良好, 为澳洲坚果青皮的综合利用提供新思路。

关键词: 澳洲坚果青皮多酚; 纳米银; 绿色合成; 结构特性

文章编号: 1673-9078(2025)08-158-165

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0902

Green Synthesis and Structural Characterization of Silver Nanoparticles from Macadamia Green Peel Polyphenol

ZHANG Ming¹, SHUAI Xixiang¹, LI Ya², LIU Yujie¹, DU Liqing^{1*}

(1. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Key Laboratory of Tropical Fruit Biology of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang 524091, China) (2. Key Laboratory of Hainan Province for Postharvest Physiology and Technology of Tropical Horticultural Products, Zhanjiang 524091, China)

Abstract: Silver nanoparticles (AgNPs) were synthesized by a green method employing macadamia green peel polyphenol, and the effects of the mass concentration of macadamia green peel polyphenol and reaction time on the synthesis of the silver nanoparticles were evaluated. The synthesized AgNPs were structurally characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy, nanoparticle size and zeta potential analyses, as well as transmission electron microscopy. The conditions for the synthesis of the AgNPs using macadamia green peel polyphenol were as follows: mass concentration of macadamia green peel polyphenol: 2.0 mg/mL (*m/V*), molar concentration of AgNO₃ solution: 0.1 mmol/L, reaction

引文格式:

张明, 帅希祥, 李娅, 等. 澳洲坚果青皮多酚纳米银的绿色合成及结构表征[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 158-165.

ZHANG Ming, SHUAI Xixiang, LI Ya, et al. Green synthesis and structural characterization of silver nanoparticles from macadamia green peel polyphenol [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 158-165.

收稿日期: 2024-06-26

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目 (322QN376); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1630062024001; 1630062024030)

作者简介: 张明 (1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品精深加工及副产物综合利用, E-mail: zhangmingqau@163.com

通讯作者: 杜丽清 (1975-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农产品精深加工及副产物综合利用, E-mail: duliqing927618@163.com

time: 48 h, volume ratio of polyphenol solution to AgNO_3 solution=1:9. Fourier-transform infrared spectroscopy revealed that the -OH on the benzene ring participated in the synthesis of the AgNPs. The nanoparticle size and zeta potential analyses indicated that the synthesized AgNPs showed good dispersion with a small particle size (70~130 nm) and negative charge. The transmission electron microscopy images and energy dispersive spectra demonstrated that the synthesized AgNPs were nearly spherical in shape, and Ag was closely surrounded by C and O with a proportion of 62.31%. Importantly, macadamia green peel polyphenol can be used as a natural reducing agent and stabilizer in the green synthesis of AgNPs, and the synthesized AgNPs display good dispersibility, which provides a new concept for the comprehensive utilization of macadamia green peel.

Key words: macadamia green peel polyphenol; silver nanoparticle; green synthesis; structural characterization

近年来, 纳米银因优良的抑菌、吸附、催化等性能而广泛应用于医学、农业、材料等领域^[1]。当前, 纳米银制备方法主要有物理研磨法、化学还原法和生物还原法^[2]。其中, 物理研磨法以及化学还原法与低毒、环保、低成本的新材料制备理念相背, 因此限制了其在纳米银合成中的应用。由此, 开发一种高效绿色的纳米银合成方法成为当前研究热点。与物理研磨法、化学还原法相比, 生物还原法是基于细菌、植物、海藻等自身的生物活性将 Ag^+ 还原为纳米颗粒, 具有能耗低、操作简单、环境友好等优点^[3]。在生物还原法中, 植物材料因易得、低廉而广受青睐, 利用植物提取物介导合成纳米银也备受关注。目前, 已有研究利用植物种子^[4]、花^[5]、叶片^[6]等提取物成功合成纳米银, 且结构稳定, 性能优良。然而, 相关研究在澳洲坚果领域仍为空白。

澳洲坚果 (*Macadamia ternifolia*) 是一种原产于澳大利亚新南威尔士、昆士兰的常绿高大乔木^[7]。经近五十年的发展, 我国澳洲坚果种植面积已超过澳大利亚、南非、美国等, 成为种植面积最大的国家^[8]。前期研究结果表明^[9], 占鲜果重量一半以上的澳洲坚果青皮中含有丰富的酚类物质, 如 3,4-二羟基苯甲醛、香草酸、对羟基苯甲酸、没食子儿茶素等, 且具有良好的 DPPH· 和 ABTS⁺ 自由基清除能力、 Fe^{3+} 还原能力以细胞抗氧化能力。本文基于前期澳洲坚果青皮多酚提取、纯化相关研究结果^[9], 开展澳洲坚果青皮多酚绿色合成纳米银 (Silver Nanoparticles, AgNPs) 研究, 对澳洲坚果青皮多酚质量浓度、反应时间对 AgNPs 合成的影响进行了研究, 同时采用傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)、透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscopy, TEM) 以及纳米粒度及 Zeta 电位分析仪等现代仪器分析手段表征 AgNPs 结构, 以期为澳洲坚果青皮的创新利用提供新思路, 为后续生物活性研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 植物材料

澳洲坚果青皮 (南亚 1 号), 中国热带农业科学院亚热带作物研究所澳洲坚果种质资源圃提供。

1.1.2 试剂与仪器

硝酸银 ($\geq 99.8\%$, 分析纯), 上海凌峰化学试剂有限公司; 无水乙醇 (分析纯), 广东光华科技股份有限公司; ADS17 大孔吸附树脂, 陕西乐博生化科技有限公司; 蒸馏水, 广州屈臣氏食品饮料有限公司。

XH-300A+ 电脑微波超声波组合合成萃取仪, 北京祥鹤科技发展有限公司; Spark 10 M 酶联免疫分析仪, 瑞士 TECAN 公司; RE-6000A 旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂; SN-MS-6D 多联磁力搅拌器, 上海尚仪电子有限公司; Zetasizer Nano ZS90 纳米粒度及 Zeta 电位分析仪, 英国马尔文公司; Tecnai G2 F20 透射电子显微镜, 美国 FEI 公司; Nicolet iN10 傅里叶变换红外光谱仪, 美国赛默飞世尔科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 澳洲坚果青皮多酚的制备

澳洲坚果青皮多酚提取^[9]: 澳洲坚果青皮经清洗、沥干后进行干燥、粉碎, 在料液比为 1:45 (g/mL)、乙醇体积分数为 30% (V/V)、超声功率为 140 W、提取温度为 43 °C 条件下提取 10 min, 于 4 000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清液进行浓缩, 直至无乙醇味。澳洲坚果青皮多酚纯化: 采用湿法装柱 (层析柱: $\phi 20 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$; 柱体积 (Bed Volume, BV): 24 mL); 动态吸附条件为: 以 2 BV/h 流出速度上样 6 BV; 上样结束后, 用 4 BV 蒸馏水洗脱; 动态解吸条件为: 用 40% (V/V) 乙醇溶液以 2 BV/h 流

出速度进行洗脱,直至流出液基本无颜色。洗脱结束后进行浓缩、冻干,制得澳洲坚果青皮多酚[纯度为24.62% (m/m)]。

1.2.2 澳洲坚果青皮多酚纳米银的制备

参照 Mustapha 等^[3]的方法制备澳洲坚果青皮多酚纳米银(图1),具体方法如下:分别配置质量浓度为0.25、0.5、1.0、2.0、4.0 mg/mL的澳洲坚果青皮多酚溶液,准确吸取澳洲坚果青皮多酚溶液3 mL与1 mmol/L AgNO₃溶液按1:9 (V/V)的比例进行混合,在室温条件下以150 r/min转速进行搅拌,利用酶联免疫分析仪分别扫描反应体系在0、3、6、12、24、36、48、60、72 h时的光谱强度,波长扫描范围为300~800 nm,扫描步长为2 nm,得到最佳反应时间及多酚浓度。不同质量浓度澳洲坚果青皮多酚(0.25~4.0 mg/mL)合成的AgNPs依次记为AgNPs1、AgNPs2、AgNPs3、AgNPs4、AgNPs5。

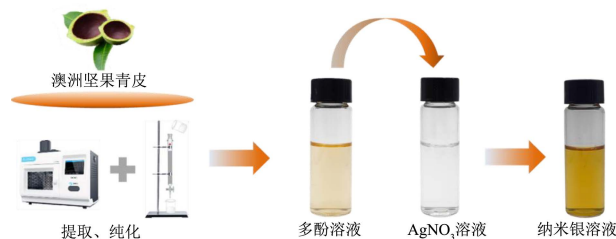


图1 澳洲坚果青皮多酚纳米银制备流程

Fig.1 The preparation process of silver nanoparticle by macadamia green peel polyphenol

1.2.3 FT-IR分析

参照 Keskin 等^[2]的方法,将适量合成的AgNPs溶液置于液体池,采用傅里叶变换红外光谱分析仪扫描400~4 000 cm⁻¹波长范围下的红外图谱。

1.2.4 TEM分析

参照 Gowda 等^[10]的方法对TEM进行测定:取一滴合成的AgNPs溶液滴加至铜网上,自然风干后,采用场发射透射电镜在加速电压为300 kV条件下进行TEM观察,同时通过能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)对纳米银进行能谱分析,扫描方式为点扫。

1.2.5 纳米粒度及Zeta电位分析

参照 Sharma 等^[1]的方法对纳米粒度及Zeta电位及进行分析:取适量合成的AgNPs溶液,采用激光粒度仪测定AgNPs的平均水合粒径、聚合物分散性指数(Polymer Dispersity Index, PDI),同时测定其Zeta电位,重复测定3次。测试温度25℃,电

位运行5次。

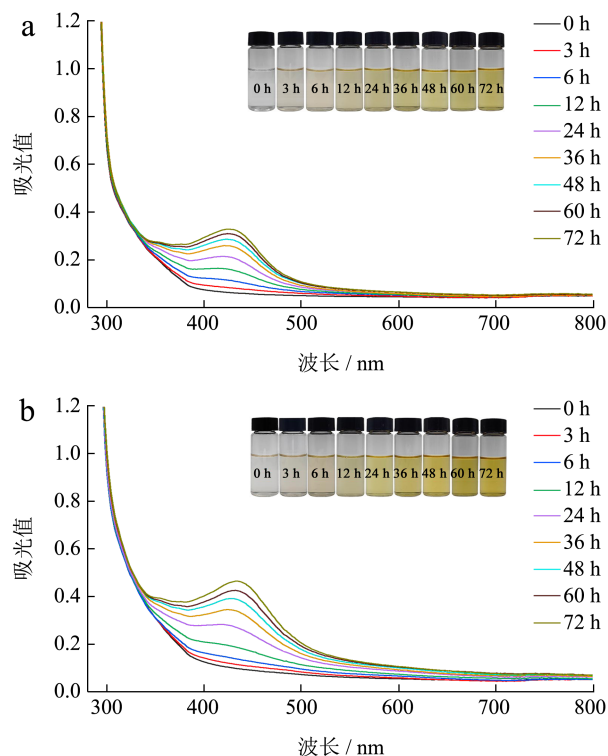
1.3 数据统计与分析

实验数据采用SPSS 27.0进行处理,并分析 $P < 0.05$ 水平上的显著性差。实验数据采用origin 8进行作图。每个实验重复三次。

2 结果与分析

2.1 澳洲坚果青皮多酚质量浓度对AgNPs合成的影响

澳洲坚果青皮多酚质量浓度(0.25~4.0 mg/mL)对AgNPs合成的影响如图2所示。由图2可知,随反应时间增加,反应体系颜色逐渐加深。同时,由图2a~2e可知,随澳洲坚果青皮多酚质量浓度的增加,反应体系颜色由0.25 mg/mL时的金黄色变为4.0 mg/mL时的棕色。Gowda 等^[10]以地桃花叶提取物为还原剂绿色合成纳米银时,反应体系也呈现相近的颜色变化。有研究表明^[3],反应体系颜色的变化与植物提取物还原Ag⁺生成AgNPs有关。同时,当澳洲坚果青皮多酚质量浓度在0.25~1.0 mg/mL范围内,反应体系颜色无明显变化;当澳洲坚果青皮多酚质量浓度大于1.0 mg/mL时,反应体系颜色逐渐加深。综上,澳洲坚果青皮多酚作为还原剂和稳定剂合成AgNPs是一种行之有效的绿色生物合成方法。



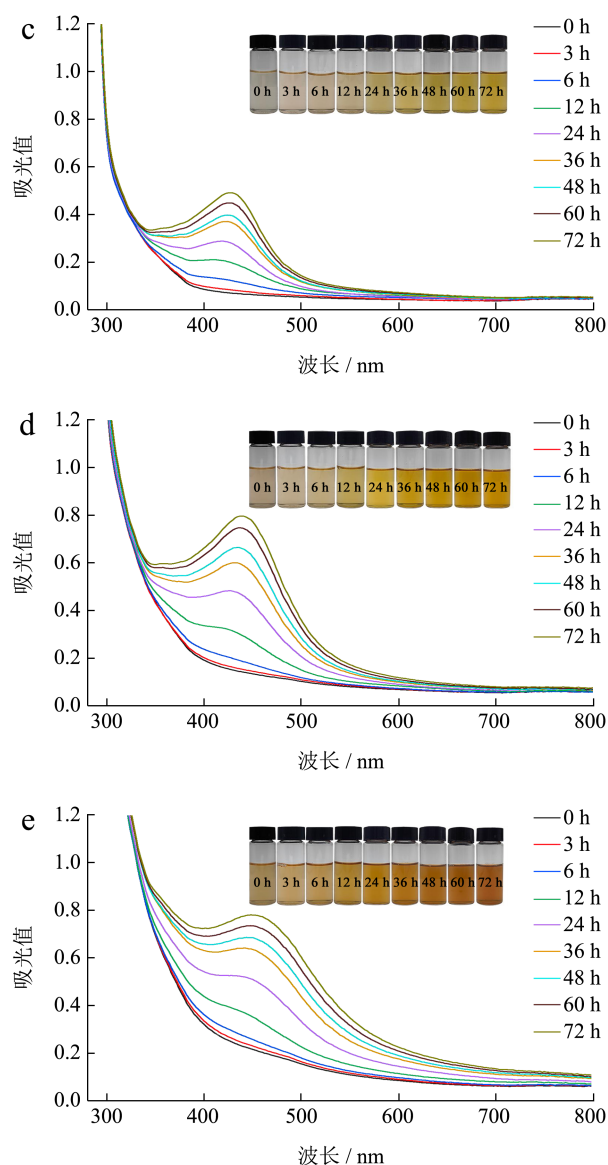


图2 澳洲坚果青皮多酚浓度对AgNPs制备的影响

Fig.2 The effect of the concentration of macadamia green peel on the preparation of AgNPs

注: a~e 分别为多酚质量浓度为 0.25、0.5、1.0、2.0、4.0 mg/mL 时反应体系在 300~800 nm 的全波长扫描图。

由图 2 可知, 反应体系在 420 nm 波长处出现吸收峰, 且吸光值随反应时间增加而逐渐增强, 这也验证了上述 AgNPs 生成与颜色呈正相关的推论。Maitra 等^[11]利用黄连种子提取物合成 AgNPs 时, 吸收峰也为 420 nm。这表明 420 nm 处吸收峰可作为 AgNPs 生成的一个特征吸收峰。同时, 由图 2 可知, 澳洲坚果青皮多酚质量浓度在 0.25~2.0 mg/mL 范围内, 反应体系吸光值与多酚质量浓度呈正相关, 多酚质量浓度对 AgNPs 生成起促进作用; 当多酚质量浓度大于 2.0 mg/mL 时, 反应体系吸光值无明显变

化。这可能与反应体系中 Ag^+ 反应完全有关。然而, 多酚质量浓度增加, 多酚用量增加, 多酚制备工作量加大, 能耗也增加。综合考虑, 澳洲坚果青皮多酚质量浓度宜为 2.0 mg/mL。

此外, 澳洲坚果青皮多酚还原 Ag^+ 生成 AgNPs 的反应速率, 可由 0~72 h 内 300~800 nm 波长曲线疏密进行判断。由图 2a~2e 可知, 在反应开始的最初 6 h 内, AgNPs 生成速率较慢; 当反应时间在 6~48 h 内时, AgNPs 生成速率明显加快; 当反应时间在 48~72 h 时, 波长曲线较密集, AgNPs 生成速率减慢。这也符合 Lukman 等^[12]提出的纳米银生长理论: 短暂诱导期、生长期和终止期。然而, Dhanalakshmi 等^[13]采用狭叶吊金钱叶水提物合成 AgNPs 时仅需 3 h 即可制备完全。这主要由以下几方面原因: 狭叶吊金钱叶水提物未经纯化^[14]; 多酚类物质组成不同。反应时间越长, 能耗越大。综合考虑, 反应时间宜为 48 h。

2.2 澳洲坚果青皮多酚纳米银 FT-IR 分析

利用 FT-IR 对合成的 AgNPs 进行光谱分析, 确定合成的 AgNPs 表面可能对 AgNPs 合成和稳定起作用的主要官能团或生物分子^[15]。以澳洲坚果青皮多酚为还原剂和稳定剂制备的 AgNPs 的 FT-IR 光谱如图 3 所示, 0.25~4.0 mg/mL 澳洲坚果青皮多酚合成的五种 AgNPs 均在 3 450、2 070、1 640 和 556 cm^{-1} 出现吸收峰, 且峰形基本相同。3 500~3 200 cm^{-1} 主要为苯环上 O-H 伸缩振动^[16], AgNPs1~AgNPs5 的 FT-IR 光谱图上此处峰强度总体呈减弱趋势, 其中 AgNPs3 和 AgNPs4 无明显差异。此外, 与多酚 FT-IR 光谱相比, 随 AgNPs 的生成, 3 450 cm^{-1} 处吸收峰发生位移, 从 3 460 cm^{-1} 移至 3 450 cm^{-1} 。因此, 在合成 AgNPs 过程中, 酚羟基发挥了重要作用。2 070 cm^{-1} 则与 NH_3 或炔类有关^[17]。1 640 cm^{-1} 处吸收峰主要由苯环骨架上的 C=C 伸缩振动引起^[18], 表明澳洲坚果青皮多酚参与了本研究中 AgNPs 的合成。而 556 cm^{-1} 为烷基卤代物的伸缩振动^[19], 如 C-Br、C-Cl。同时, 在利用植提取物绿色合成 AgNPs 的许多研究^[16,20]中, 在 3 200~3 500、1 600~1 650 cm^{-1} 处均出现特征吸收峰, 表明 -OH 在 AgNPs 的合成中起到了重要作用, 进一步说明植物提取物中的多酚类活性物质对 Ag^+ 起到还原作用。然而, 不同植物提取物合成的 AgNPs 的 FTIR 图谱中的吸收峰数目也不尽相同, 这可能主要与提取物中的成分有关。

通常而言,在AgNPs合成中,还原过程主要为 Ag^+ 与多酚等生物活性物质中 $-\text{OH}$ 和 $\text{C}=\text{O}$ 的结合^[21],且多酚类物质的亲核芳香环也可通过其高螯合性能与 Ag^+ 结合^[22]。在图3澳洲坚果青皮多酚纳米银FT-IR图谱中也观察到了此现象。此外, Ag^+ 与活性基团的结合,导致活性 $-\text{OH}$ 解离,电子转移至 Ag^+ ,对 Ag^+ 起到还原作用^[23]。同时, Ag^+ 还原过程中生成的 $\text{C}=\text{O}$ 也可通过静电相互作用对AgNPs起到包封作用,因而对AgNPs的稳定也起到了至关重要的作用。结合FT-IR吸收峰强度的变化及位移证实了AgNPs的生成,澳洲坚果青皮多酚具有还原 Ag^+ 生成AgNPs的能力。

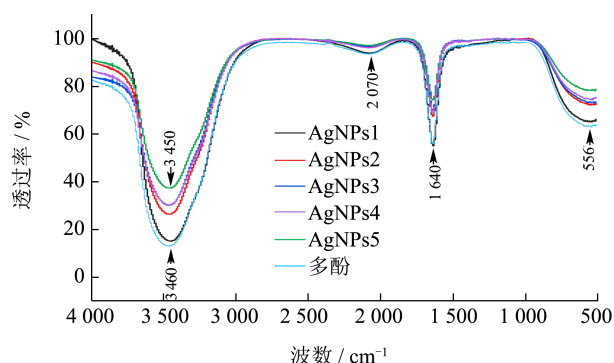


图3 澳洲坚果青皮多酚纳米银傅里叶变换红外光谱

Fig.3 FT-IR spectroscopy of AgNPs that prepared by macadamia green peel polyphenols

2.3 澳洲坚果青皮多酚纳米银水合粒径分析

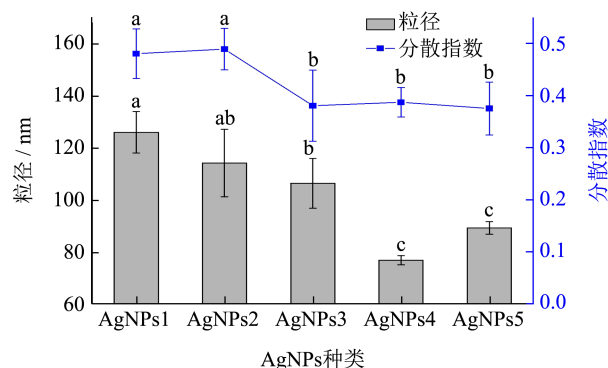


图4 AgNPs 粒径分布及分散指数

Fig.4 The particle size and polydispersity index of AgNPs

注:图中字母表示显著性差异($P < 0.05$)。下同。

澳洲坚果青皮多酚合成的AgNPs粒径测量结果如图4所示。0.25~4.0 mg/mL澳洲坚果青皮多酚合成的AgNPs水合粒径分布在70~130 nm,分别为126.07、114.3、106.5、77.1、89.47 nm,且呈先减小后增加的趋势。其中,AgNPs4水合粒径最小,

且显著小于其他AgNPs($P < 0.05$)。然而,柠檬草提取物^[24]、飞机草多酚提取物^[25]合成的AgNPs水合粒径分别为69.57、47.8 nm。除合成时间外,导致水合粒径差异的原因主要:一是提取物中的有效成分的包覆作用不足以防止团聚;二是 AgNO_3 过量的情况下可能导致核数较少而产生大颗粒^[26]。由于AgNPs平均粒径对其生物利用至关重要,如生物传感器、药物递送等,因此水合粒径比其他粒径测量方法更为重要^[27]。此外,图4展示了合成的AgNPs的PDI。PDI的取值范围为0~1。PDI值 < 0.5 时表示该体系是单分散体系;PDI值 > 0.5 时则表示该体系为多分散体系^[28];且PDI值越低,分散性越好,团聚的倾向性更小。本研究中,AgNPs1、AgNPs2、AgNPs3、AgNPs4、AgNPs5的PDI值分别为0.481、0.490、0.381、0.38、0.376,且AgNPs3~AgNPs5的PDI值显著小于AgNPs1、AgNPs2($P < 0.05$),表明1.0~4.0 mg/mL(m/V)澳洲坚果青皮多酚合成的AgNPs是单分散,且分散性较好。

2.4 澳洲坚果青皮多酚纳米银Zeta电位分析

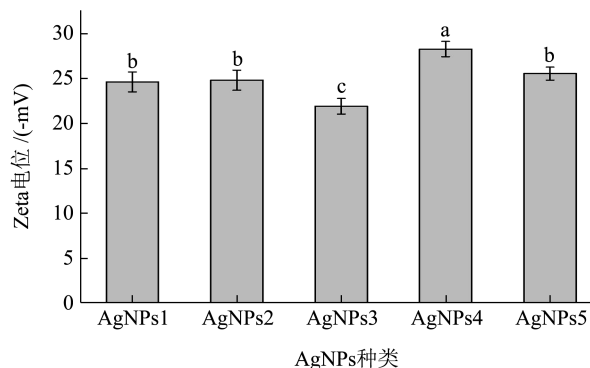


图5 Zeta 电位分析

Fig.5 The analysis of Zeta potential

粒子的团聚取决于其表面所带电荷性质,而表面Zeta电位影响其与其他粒子或分子之间的相互作用^[29]。图5所示为0.25~4.0 mg/mL澳洲坚果青皮多酚合成的AgNPs的Zeta电位图。由图5可知,0.25~4.0 mg/mL澳洲坚果青皮多酚合成的AgNPs均带负电荷,表明澳洲坚果青皮多酚合成的AgNPs表面带负电荷。一般而言,当Zeta电位大于+30 mV或小于-30 mV时,表明该纳米粒子具有稳定性;而当Zeta电位介于-10 mV到+10 mV之间时,表明该纳米粒子不稳定^[30]。Zeta电位绝对值越高,体系稳定性更好。由图5显著性分析结果可知AgNPs4的Zeta电位绝对值最高,为-28.3 mV,且显著高

于 AgNPs1、AgNPs2、AgNPs3、AgNPs5 ($P<0.05$), 故 2.0 mg/mL 澳洲坚果青皮多酚合成的 AgNPs 稳定性最好。这也验证了水合粒径、分散指数的实验结果。此外, EI Badawy 等^[31]的研究表明, 与表面带正电荷的 AgNPs 相比, 表面带负电荷的 AgNPs 与羧基、氨基等基团之间存在排斥力, 进而会限制其与一些生物大分子的相互作用, 细胞毒性更小。在本研究中, 不同质量浓度澳洲坚果青皮多酚合成的 AgNPs 表面均带有负电荷, 这为澳洲坚果青皮多酚纳米银的广泛应用提供了安全性支撑。

2.5 澳洲坚果青皮多酚纳米银形貌和元素分析

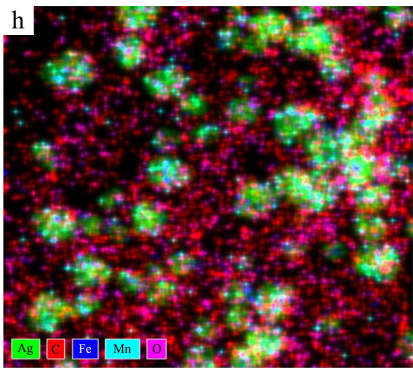
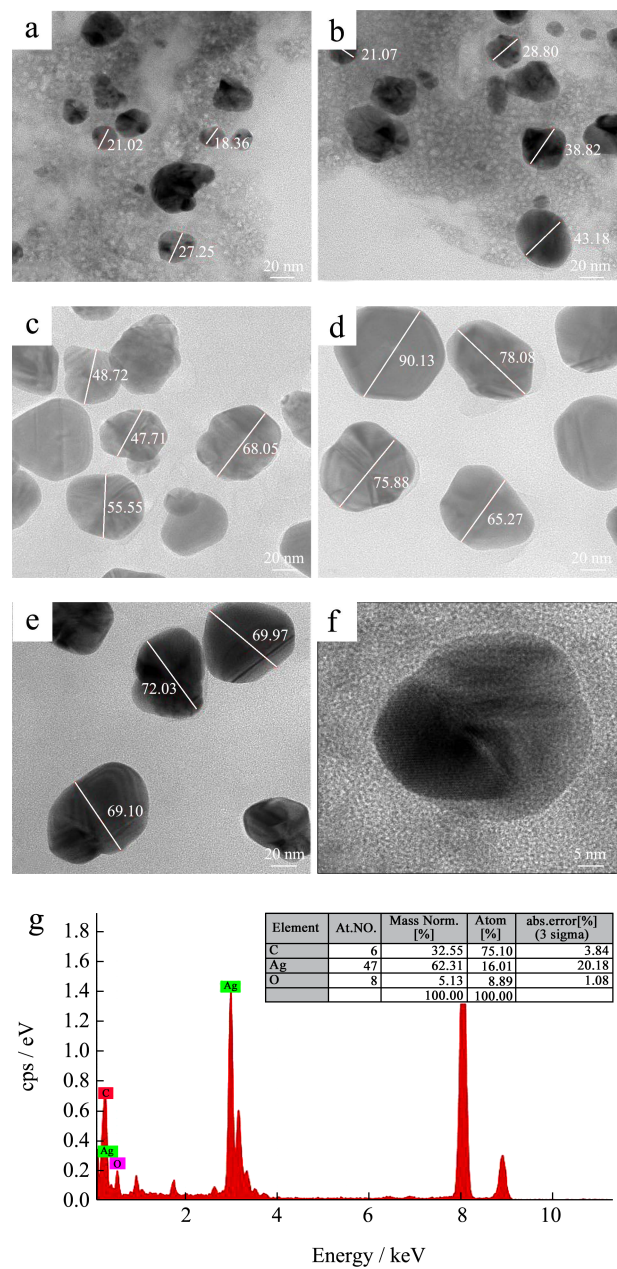


图 6 AgNPs 的透射电镜图
Fig.6 The TEM of AgNPs

注: a~e 分别为 20 nm 视野下 AgNPs1~AgNPs5 形貌图; f 为 5 nm 视野下 AgNPs 形貌图; g 为 AgNPs4 的元素分布图; h 为 AgNPs4 的 EDS 能谱图。

合成的 AgNPs 形貌由 TEM 进行观察。图 6a~6e 分别展示 AgNPs2~AgNPs5 在 20 nm 视野下的 TEM 图, 其中图 6f 还展示了 AgNPs2 在 5 nm 视野下的 TEM 图。图 6a~6e 所展示的 AgNPs 粒径与 2.2.2 水合粒径结果差异较大, 这主要是由溶液中的多酚以及其他成分附着在 AgNPs 表面所致^[32]。此外, Maitra 等^[11]也观察到 AgNPs 水合粒径大于 TEM 粒径的现象。同时, 由图 6a~6e 可知, 澳洲坚果青皮多酚合成的 AgNPs 呈近似球形。合成的 AgNPs 形貌与植物提取物组成以及 AgNPs 浓度有关, 除球形外, 还可呈六边形和三角形等^[33]。此外, 由图 6f 中的 5 nm 视野下, 还观察到 AgNPs 表面包裹着一层非晶体物质, 这可能是由于澳洲坚果青皮多酚在合成 AgNPs 过程中, 部分其他生物活性成分附着在 AgNPs 表面, 防止 AgNPs 团聚^[34]。由图 6g 元素分布图和 6H EDS 能谱图可知, AgNPs 特征吸收峰约为 3 keV, 表面存在 C、O 两种元素。这也表明澳洲坚果青皮多酚作为还原剂和稳定剂成功合成 AgNPs。同时, 由图 6g 可知, Ag 在三种元素中占比最高, 为 62.31%。综上所述, 利用植物多酚提取物绿色合成纳米银是一种可行的方法。

3 结论

澳洲坚果青皮多酚纳米银制备条件宜为: 澳洲坚果青皮多酚质量浓度 2.0 mg/mL、AgNO₃ 浓度 0.1 mmol/L、澳洲坚果青皮多酚与 AgNO₃ 溶液体积比为 1:9, 反应 48 h 后。AgNPs 的紫外可见图谱显示, AgNPs 在 420 nm 出现特征吸收峰, FT-IR 图谱

在 3 450、1 640 cm^{-1} 出现特征吸收峰, 澳洲坚果青皮多酚参与了 AgNPs 的合成。同时, 粒径分析及 TEM 结果表明, 合成的 AgNPs 为 C、O 元素包裹 Ag 元素的近似球形颗粒。纳米粒度及 Zeta 电位分析结果表明, AgNPs4 水合粒径最小, 为 77.11 nm, 分散性良好, 且带负电荷。该研究填补了澳洲坚果在 AgNPs 研究领域的空白, 为澳洲坚果青皮的创新利用提供了科学依据, 为澳洲坚果青皮的高值化、资源化利用提供了新思路。

参考文献

- [1] SHARMA K, GULERIA S, SALARIA K H, et al. Photocatalytic and biological properties of silver nanoparticles synthesized using *Callistemon lanceolatus* leaf extract [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 202: 116951.
- [2] KESKIN M, KAYA G, BAYRAM S, et al. Green synthesis, characterization, antioxidant, antibacterial and enzyme inhibition effects of chestnut (*Castanea sativa*) honey-mediated silver nanoparticles [J]. Molecules, 2023, 28(6): 2762.
- [3] MUSTAPHA T, ITHNIN N R, OTHMAN H, et al. Bio-fabrication of silver nanoparticles using *Citrus aurantifolia* fruit peel extract (CAFPE) and the role of plant extract in the synthesis [J]. Plants, 2023, 12(8): 1648.
- [4] PRADHAN S, ROY A, SAHA A, et al. Bioinspired synthesis of silver nanoparticles using *Luffa aegyptiaca* seed extract and assessment of pharmacological properties [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2024, 58: 103209.
- [5] LOGAMBAL S, THILAGAVATHI T, CHANDRASEKAR M, et al. Synthesis and antimicrobial activity of silver nanoparticles: Incorporated *Couroupita guianensis* flower petal extract for biomedical applications [J]. Journal of King Saud University-Science, 2023, 35(1): 102455.
- [6] AHMAD M Z, SAEED A M, ELNOUBI O A E, et al. Chitosan-based topical formulation integrated with green-synthesized silver nanoparticles utilizing *Camellia sinensis* leaf extracts: A promising approach for managing infected wounds [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128573.
- [7] LIN J, ZHANG W, ZHANG X, et al. Signatures of selection in recently domesticated macadamia [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 242.
- [8] 贺熙勇,陶亮,柳颀,等.我国澳洲坚果产业概况及发展趋势[J].热带农业科技,2015,38(3):12-16,19.
- [9] ZHANG M, LI Y, SHUAI X X, et al. Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from macadamia (*Macadamia integrifolia*) green peel: Purification, identification and antioxidant activities [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 18: 115552.
- [10] GOWDA S A M, GOVEAS L C, DAKSHAYINI K. Adsorption of methylene blue by silver nanoparticles synthesized from *Urena lobata* leaf extract: Kinetics and equilibrium analysis [J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 288: 126431.
- [11] MAITRA B, HALIMA K M, AHMED F, et al. Biosynthesis of *Bixa orellana* seed extract mediated silver nanoparticles with moderate antioxidant, antibacterial and antiproliferative activity [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2023, 16(5): 104675.
- [12] LUKMAN A I, GONG B, MARJO C E, et al. Facile synthesis, stabilization, and anti-bacterial performance of discrete Ag nanoparticles using *Medicago sativa* seed exudates [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, 353(2): 433-444.
- [13] DHANALAKSHMI M, LOSETTY V. Synthesis of sustainable silver nanoparticles using plant extract and their antimicrobial, anticancer, and photocatalytic dye degradation efficiency analysis [J]. Process Biochemistry, 2024, 144: 64-78.
- [14] ALI M Y, MAHMOUD A S, ABDALLA M, et al. Green synthesis of bio-mediated silver nanoparticles from *Persea americana* peels extract and evaluation of their biological activities: *In vitro* and *in silico* insights [J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2024, 28(3): 101863.
- [15] OTHMAN A M, ELSAYED M A, ALBALAKOCY N G, et al. Biosynthesis and characterization of silver nanoparticles induced by fungal proteins and its application in different biological activities [J]. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 2019, 17(1): 1-13.
- [16] OHIDUZZAMAN M, KHAN M N I, KHAN K A, et al. Biosynthesis of silver nanoparticles by banana pulp extract: Characterizations, antibacterial activity, and bioelectricity generation [J]. Heliyon, 2024, 10(3): e25520.
- [17] ALKHULAIFI M M, ALSHEHRI J H, ALWEHAIBI M A, et al. Green synthesis of silver nanoparticles using *Citrus limon* peels and evaluation of their antibacterial and cytotoxic properties [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2020, 27(12): 3434-3441.
- [18] SHANMUGANATHAN R, BRINDHADEVI K, ALANSARI M M, et al. *In vitro* investigation of silver nanoparticles synthesized using *Gracilaria verucosa*-A seaweed against multidrug resistant *Staphylococcus aureus* [J]. Environmental Research, 2023, 227: 115782.
- [19] JEBUN N, ALAM M Z, MAMUN A A, et al. Novel myco-coagulant produced by *Lentinus squarrosulus* for removal of water turbidity: Fungal identification and flocculant

- characterization [J]. Journal of Fungi, 2024, 8(2): 192.
- [20] MANISHA B, ISHWOR P, ANITA B, et al. Synthesis of silver nanoparticles assisted by aqueous root and leaf extracts of *Rhus chinensis* Mill and its antibacterial activity [J]. Heliyon, 2024, 10(13): e33603.
- [21] HAI N D, DAT N M, HUONG L M, et al. Phytosynthesis of silver nanoparticles using *Mangifera indica* leaves extract at room temperature: Formation mechanism, catalytic reduction, colorimetric sensing, and antimicrobial activity [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2022, 220: 112974.
- [22] VIDHU V K, AROMAL S A, PHILIP D. Green synthesis of silver nanoparticles using *Macrotyloma uniflorum* [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2011, 83(1): 392-397.
- [23] LAGUTA I, STAVINSKAYA O, KAZAKOVA O, et al. Green synthesis of silver nanoparticles using *Stevia* leaves extracts [J]. Applied Nanoscience, 2018, 9: 755-765.
- [24] 佟彤. 柠檬草提取物纳米银的绿色合成及其抗菌保鲜作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [25] JAYEOYE T J, EZE F N, OLATUNDE O O, et al. Synthesis of silver and silver@zero valent iron nanoparticles using *Chromolaena odorata* phenolic extract for antibacterial activity and hydrogen peroxide detection [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(3): 105224.
- [26] BARBHUIYA R I, SINGHA P, ASATHAMBI N, et al. Ultrasound-assisted rapid biological synthesis and characterization of silver nanoparticles using pomelo peel waste [J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132602.
- [27] HASSAN H U, RAJA N I, ABASI F, et al. Comparative study of antimicrobial and antioxidant potential of *Olea ferrugine* fruit extract and its mediated selenium nanoparticles [J]. Molecules, 2022, 27(16): 5194.
- [28] WEN M M, FARID R M, KASSEM A A. Nano-proniosomes enhancing the transdermal delivery of mefenamic acid [J]. Journal of Liposome Research, 2014, 24(4): 280-289.
- [29] SAFA M A T, KOOHESTANI H. Green synthesis of silver nanoparticles with green tea extract from silver recycling of radiographic films [J]. Results in Engineering, 2024, 21: 101808.
- [30] MANOSALVA N, TORTELLA G, DIEZ M C, et al. Green synthesis of silver nanoparticles: Effect of synthesis reaction parameters on antimicrobial activity [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2019, 35(6): 88.
- [31] EI BADAWY A M, SILVA R G, MORRIS B, et al. Surface charge-dependent toxicity of silver nanoparticles [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(1): 283-287.
- [32] WALLACE R R, MILENA T P, BRUNA A L, et al. Green tea extract mediated biogenic synthesis of silver nanoparticles: Characterization, cytotoxicity evaluation and antibacterial activity [J]. Applied Surface Science, 2019, 463: 66-74.
- [33] SELVAM K, SUDHAKAR C, PRASATH A R. Green synthesis and characterization of silver nanoparticles from sandalwood (*Santalum album* L.) extract for efficient catalytic reduction, antioxidant and antibacterial activity [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2024, 57: 103094.
- [34] PATEL D A, ISHNAVA K B. Biogenic synthesis of silver nanoparticles from the leaf extract of *Enicostema axillare* (Poir. ex Lam.) A. Raynal and its alpha amylase inhibition activity [J]. Food Chemistry Advances, 2024, 4: 100624.