

沙棘果渣多糖-纳米银复合粒子的制备及其抑菌活性

王薇, 曹雯

(哈尔滨商业大学, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘要: 该文以沙棘果渣多糖和硝酸银为材料, 研究沙棘果渣多糖-纳米银的制备工艺, 并探究其抑菌活性。结果表明, 反应温度 35 ℃、pH9、硝酸银和沙棘果渣多糖体积比为 1.0:1、反应 24 h 后紫外照射 60 min 条件下制备的沙棘果渣多糖-纳米银粒径最小, 为 31.77 nm, 且该复合纳米颗粒对大肠杆菌和白色葡萄球菌的生长均具有较强的抑制作用, 最小抑菌浓度分别为 4 μg/mL 和 6 μg/mL。

关键词: 沙棘果渣; 多糖; 纳米银; 抑菌活性; 最小抑菌浓度

Preparation and Antibacterial Activity of Seabuckthorn Pomace Polysaccharide-Silver Nanoparticle

WANG Wei, CAO Wen

(Harbin University of Commerce, Harbin 150028, Heilongjiang, China)

Abstract: In this paper, seabuckthorn pomace polysaccharide and silver nitrate were used as materials to study the preparation process of seabuckthorn pomace polysaccharide-silver nanoparticle and explore its antibacterial activity. The experimental results showed that the optimal conditions for the preparation of seabuckthorn pomace polysaccharide-silver nanoparticle were temperature of 35 ℃, pH value at 9, volume ratio of silver nitrate to seabuckthorn pomace polysaccharide of 1.0:1, reaction time of 24 h, and ultraviolet irradiation time of 60 min. Under these conditions, the particle size of seabuckthorn pomace polysaccharide-silver nanoparticle was the smallest, up to 31.77 nm. Moreover, the composite nanoparticle had a strong inhibitory effect on the growth of *Escherichia coli* and *Staphylococcus albus*, and the minimum inhibitory concentrations were 4 μg/mL and 6 μg/mL, respectively.

Key words: seabuckthorn pomace; polysaccharide; silver nanoparticles; antibacterial activity; minimum inhibitory concentration

引文格式:

王薇, 曹雯. 沙棘果渣多糖-纳米银复合粒子的制备及其抑菌活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(5): 148-154.

WANG Wei, CAO Wen. Preparation and Antibacterial Activity of Seabuckthorn Pomace Polysaccharide-Silver Nanoparticle[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5): 148-154.

我国沙棘资源丰富, 种植面积占全世界沙棘种植总面积的 99% 以上^[1-2]。目前沙棘果主要应用于果汁的生产, 榨汁后会产生 20% 的沙棘果残渣。据报道, 我国沙棘产业每年可产生近百万吨的沙棘果渣^[3-4]。这些果渣包括果皮、种子、残余果肉等, 在这些果渣中仍然含有很多的有效物质, 如黄酮、维生素 B₁、维生素 B₂、维生素 C、维生素 E、氨基酸、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、鞣质、糖、三萜及甾体类等^[5]。这些被废弃的果渣不仅会

造成资源的浪费, 而且还会造成环境的污染。研究表明, 沙棘果渣中的主要成分为天然多糖, 且植物多糖是一种具有良好生物活性的天然抗菌剂和天然生物防腐剂。目前在工业生产中, 已经有很成熟技术可以提取出副产物中的多糖^[6]。

纳米银作为一种新型抗菌活性材料, 以其自身抗菌功能特性较好、抗菌谱较广泛, 且抗菌不容易引起宿主细胞感染产生抗耐药性反应等优点受到广泛关

注^[7-10]。由于天然多糖的生物相容性极佳,当其纳米银协同使用时能够减少纳米银的用量,从而使纳米银的生物毒性降低^[11-15]。因此,本试验以富含多糖的沙棘果渣为原料,选择大肠杆菌和白色葡萄球菌为食源性致病菌的代表,用单因素试验优化合成沙棘果渣多糖-纳米银工艺流程,并研究沙棘果渣多糖-纳米银对两种致病菌的抑制效果,为沙棘果渣的开发利用提供参考,同时可以为寻找新的可替代传统化学抑菌剂的植物源抑菌剂提供新的途径。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

沙棘果渣多糖:哈尔滨商业大学生物催化与发酵实验室自制;牛肉膏:北京奥博星生物技术有限责任公司;蛋白胨:北京索莱宝科技有限公司;琼脂:北京兰杰柯科技有限公司;大肠杆菌、白色葡萄球菌:哈尔滨商业大学生物催化与发酵实验室;NaCl:天津市鼎盛鑫化工有限公司;氢氧化钠:天津市大陆化学试剂厂;硝酸银:天津市科密欧化学试剂开发中心;盐酸:广东省精细化学品工程技术研究开放中心。以上试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

H2050R 高速冷冻离心机:湖南湘仪离心机仪器有限公司;PHS-3C 型 pH 计:上海仪电科学仪器股份有限公司;W201B 恒温水浴锅:上海申胜生物技术有限公司;UV5100B 型紫外/可见分光光度计:上海元析仪器制造有限公司;PerkinElmer100 傅立叶红外光谱:美国 PerkinElmer 公司;Nano-ZS90 马尔文激光粒度仪:英国马尔文仪器有限公司;JJ200 精密电子天平:美国双杰兄弟有限公司;FDU-1200 真空冷冻干燥机:东京理化器械株式会社;LDZX-50KB 高压蒸汽灭菌锅:上海申安医疗器械厂;LRH-70F 恒温培养箱:上海一恒科学仪器有限公司;SMP6 酶标仪:美谷分子仪器(上海)有限公司;MIRA4 扫描电镜:泰思肯有限公司。

1.3 方法

1.3.1 单因素试验设计

将浓度为 50 mmol/L 的硝酸银溶液和 1 mg/mL 沙棘果渣多糖溶液按 0.5 : 1 的体积比混合,并在 pH7 和 25 ℃条件下反应 4 h,然后用波长 365 nm 的紫外光照射 10 min 辅助生成纳米银。在上述工艺条件基础上,以对沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱和粒径影响为指标,进行单因素试验。分别考察反应时间(4、8、12、16、20、24 h)、反应温度(25、30、35、40、45 ℃)、硝酸银和沙棘果渣多糖的体积比(0.5 : 1、1.0 : 1、1.5 : 1、2.0 : 1、2.5 : 1)、pH 值(7、8、9、10、11)、紫外照射时间(10、20、30、40、50、60 min)对沙棘果渣多糖-纳米银的紫外

可见光谱和粒径影响。反应完成后 10 000 r/min 离心 30 min,反复离心 2 次,去除上清液,收集沉淀,得到棕褐色沉淀即沙棘果渣多糖-纳米银复合粒子,冻干后置于-4 ℃冰箱备用。

1.3.2 表征分析

1.3.2.1 紫外可见光谱分析

将 1.3.1 制得的沙棘果渣多糖-纳米银溶液使用 UV5100B 型紫外/可见分光光度计进行分析,检测波长范围为 300 nm~800 nm。

1.3.2.2 傅里叶红外光谱分析

分别将沙棘果渣多糖和沙棘果渣多糖-纳米银样品冷冻干燥后得到的固体粉末用傅立叶红外光谱仪测定。波长扫描范围为 4 000 cm⁻¹~500 cm⁻¹。

1.3.2.3 粒径分析

用马尔文激光粒度仪进行粒径的检测。

1.3.2.4 扫描电镜分析

将少量沙棘果渣多糖-纳米银溶液滴于硅片表面,待样品干燥后,使用 MIRA4 扫描电镜观察颗粒形态。

1.3.3 抑菌试验

1.3.3.1 制备方法

参考李琴琴^[16]的方法制备纳米银,将 0.02 mol/L 硝酸银溶液和 3% 聚乙烯吡咯烷酮溶液 1 : 1(体积比)混合,然后室温 24 ℃搅拌 2 h,最后在搅拌的同时,逐滴滴加 10 mL 的 0.01% 硼氢化钠溶液,即得到纳米银溶液。

用无菌水将沙棘果渣多糖、化学法制得的纳米银和单因素试验制得粒径最小的沙棘果渣多糖-纳米银这 3 种样品稀释成不同浓度。

1.3.3.2 抑菌试验方法

抑菌试验采用牛津杯琼脂板扩散法^[17]。本试验以白色葡萄球菌和大肠杆菌为试验菌株。取适量菌液在固体培养基表面涂匀,将牛津杯(内径 7.8 mm)放置在平板上,然后添加 100 μL 不同浓度(5、10、15、20 μg/mL)的沙棘果渣多糖溶液、纳米银溶液和沙棘果渣多糖-纳米银溶液,置于 37 ℃的恒温培养箱中培养,24 h 后观察测量抑菌圈直径并记录结果。

1.3.4 最低抑菌浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)的确定

在 96 孔板中分别添加 100 μL 的大肠杆菌和白色葡萄球菌菌悬液,再分别添加 100 μL 不同浓度(1、2、3、4、5、6 μg/mL)的沙棘果渣多糖-纳米银溶液。将 96 孔板置于 37 ℃下培养 24 h,每间隔 1 h 通过酶标仪测每孔在 600 nm 处的吸光值。每孔的最大吸光值和最小吸光值之差(阳性对照组的吸光值差值是最大的)可直接反映出细菌生长的情况,吸光值差值在负值区域表

明其对应的处理能完全抑制供试菌的生长,吸光值差值为0时对应的抑菌剂浓度为最低抑菌浓度。根据公式(1)计算吸光值差值(ΔOD)。

$$\Delta OD = OD_{\max} - OD_{\min} \quad (1)$$

式中: $OD_{\max}$ 为最大吸光值; $OD_{\min}$ 为最小吸光值。

1.4 数据处理

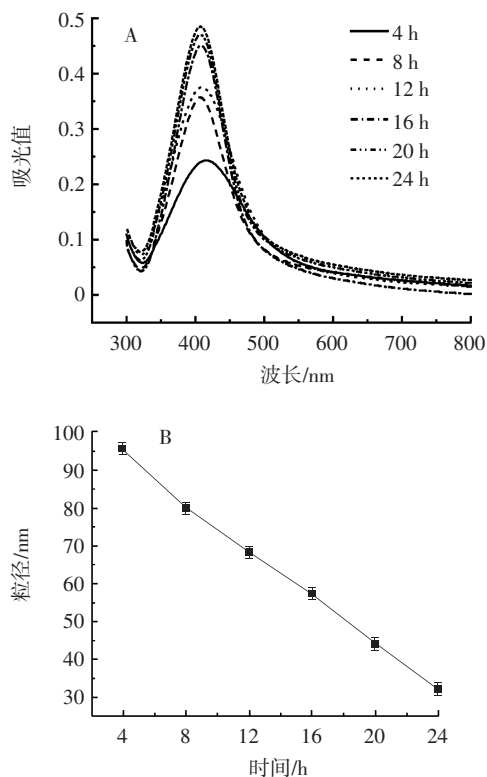
采用 SPSS 2019 对数据进行统计分析,Origin 2019 进行绘图,以上所有试验均重复3次,结果取平均值,并以平均值 $\pm$ 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 不同反应时间对沙棘果渣多糖-纳米银形成的影响

当反应时间分别为4、8、12、16、20、24 h时,对沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱和粒径影响见图1。



A.沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱;B.沙棘果渣多糖-纳米银的粒径。

图1 不同反应时间对复合颗粒紫外可见光谱和粒径的影响

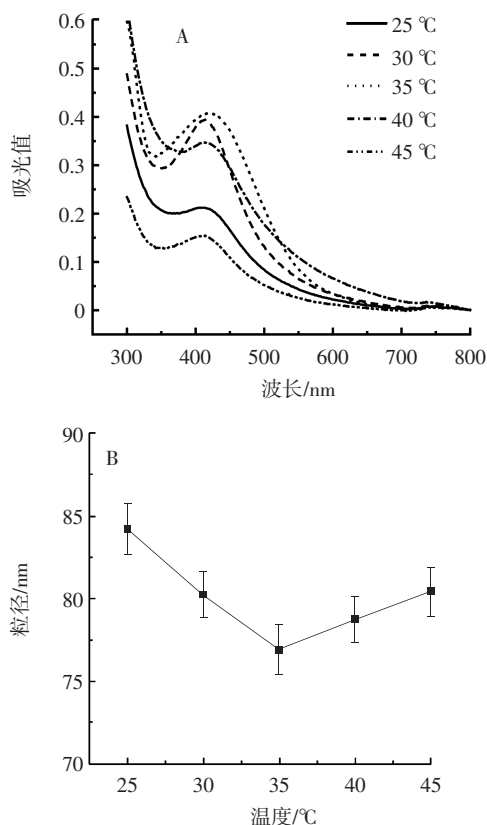
Fig.1 Effects of different reaction times on UV and particle size of composite particle

如图1A所示,在波长为420 nm处出现一个较强的吸收峰,为纳米银的特征吸收峰,表明在沙棘果渣多糖的还原作用下,硝酸银被还原成单质状态的纳米银。随着反应时间的延长,紫外吸收峰逐渐升高,反应16 h后,增加幅度基本不变。这可能是由于反应时间越

长,沙棘果渣多糖对硝酸银还原反应越充分,而当反应时间达到16 h后,还原反应基本完成,所以16 h后,峰值的增加幅度基本不变。如图1B所示,生成的沙棘果渣多糖-纳米银复合粒子的粒径随着反应时间的延长而减小。这是由于反应时间过短,反应不充分,影响了纳米银复合粒子成核,造成粒子的粒径过大。反应时间越长,反应越充分,所以粒子粒径越来越小。在反应时间为24 h时生成的沙棘果渣多糖-纳米银粒径最小,最小粒径为32.17 nm。所以选择反应24 h为最佳反应时间。

2.1.2 不同反应温度对沙棘果渣多糖-纳米银形成的影响

当反应温度分别为25、30、35、40、45℃时,对沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱和粒径影响见图2。



A.沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱;B.沙棘果渣多糖-纳米银的粒径。

图2 不同反应温度对复合颗粒紫外可见光谱和粒径的影响

Fig.2 Effects of different reaction temperatures on UV and particle size of composite particle

如图2A所示,当反应温度为25℃~35℃时,随着反应温度的增加,紫外吸收峰也在增加,并在35℃时达到一个最大值。当反应温度为35℃~45℃时,随着反应温度的增加峰值逐渐降低。因为温度会改变反应速度,温度越高反应速度越快,生成的沙棘果渣多糖-纳米银复合粒子也增加,但温度过高可能使硝酸银转化

为氧化银,所以温度过高峰值越低^[18-19]。因此,35℃为最佳反应温度。如图2B所示,沙棘果渣多糖-纳米银的粒径先减小后增大,但不同反应温度对粒径的整体影响不大,在35℃时生成的沙棘果渣多糖-纳米银的粒径最小,最小粒径为76.9 nm。这是由于温度会影响粒子布朗运动,温度过高布朗运动加快,会加速纳米银粒子的团聚^[20]。结合紫外-可见吸收光谱以及实际成本及设备维修率等问题,选择最佳反应时间为35℃。

2.1.3 不同硝酸银和沙棘果渣多糖的体积比对沙棘果渣多糖-纳米银形成的影响

当硝酸银和沙棘果渣多糖的体积比分别为0.5:1、1.0:1、1.5:1、2.0:1、2.5:1时,对沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱和粒径影响见图3。

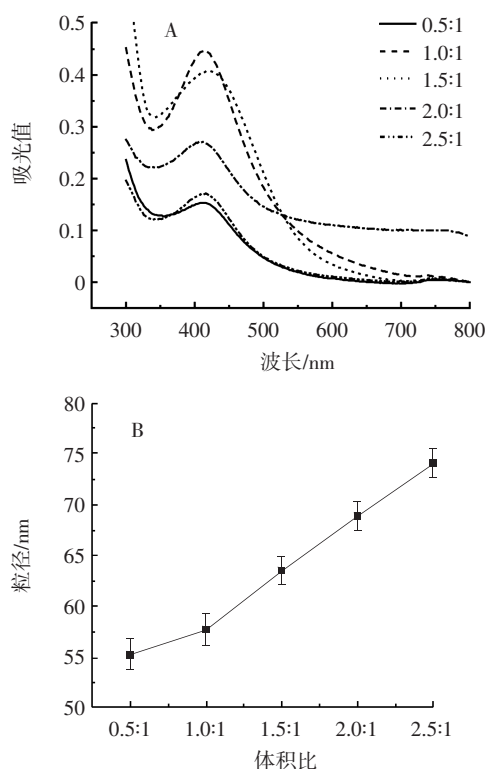


图3 不同体积比对复合颗粒紫外可见光谱和粒径的影响
Fig.3 Effects of different volume ratios on UV and particle size of composite particle

如图3A所示,随着硝酸银溶液体积的增加,紫外吸收峰也在增大,在硝酸银溶液与沙棘果渣多糖溶液体积比为1.0:1时峰值达到最大值,之后随着硝酸银溶液体积的增加,峰值逐渐减小。所以硝酸银溶液与沙棘果渣多糖溶液体积比为1.0:1为最佳反应条件。如图3B所示,以0.5:1的体积比制备的沙棘果渣多糖-纳米银颗粒尺寸最小,其最小颗粒直径为55.3 nm。当硝酸银溶液与沙棘果渣多糖溶液的体积比为1.0:1时的粒径与体积比为0.5:1时的粒径大小相差甚微。研究

表明,硝酸银的含量会影响粒径的大小,硝酸银含量过多,生成的粒子容易聚集,造成粒子粒径过大;而硝酸银含量低,生成的粒子逐渐变成球形,且粒径逐渐变小^[21]。所以硝酸银含量越低,所生成沙棘果渣多糖-纳米银的粒径越小。结合图3A结果,选择体积比1.0:1为最佳反应条件。

2.1.4 不同pH值对沙棘果渣多糖-纳米银形成的影响

当pH值分别为7、8、9、10、11时,对沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱和粒径影响见图4。

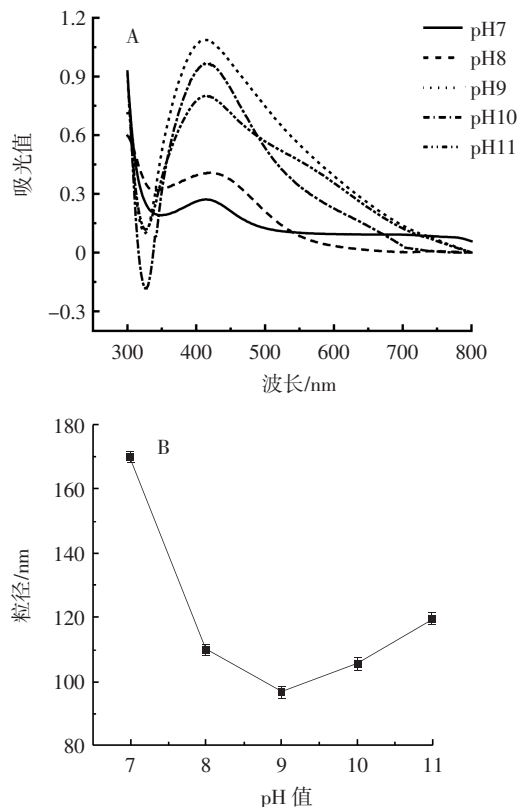
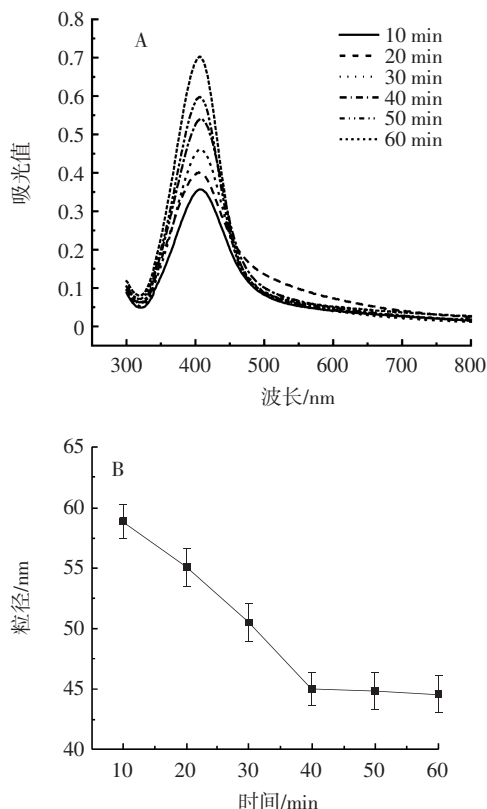


图4 不同pH值对复合颗粒紫外可见光谱和粒径的影响
Fig.4 Effect of different pH values on UV and particle size of composite particle

如图4A所示,随着pH值的增加,紫外吸收峰也在增大,在pH9时峰值达到最大值,随后随着pH值的增加峰值减小。可能是因为随着pH值的升高,沙棘果渣多糖的还原性增强,促使 Ag^+ 还原成单质银。但pH值过高导致单质银过多,造成纳米银含量低,进而峰值下降。同时可看出,强碱性条件下峰值更高,弱碱性条件下峰值较低。如图4B所示,在反应溶液pH9时生成的沙棘果渣多糖-纳米银的粒径最小,最小粒径为96.78 nm。不同pH值反应溶液所制得的沙棘果渣多糖-纳米银的粒径相比于其他单因素条件下所制得的沙棘果渣多糖-纳米银的粒径较大,原因可能是在调节pH值时,由于硝酸银在碱性条件下容易生成氧化银,

导致反应液不稳定。综上所述,pH9 为最佳反应条件。
2.1.5 不同紫外照射时间对沙棘果渣多糖-纳米银形成的影响

当紫外照射时间分别为 10、20、30、40、50、60 min 时,对沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱和粒径影响见图 5。



A.沙棘果渣多糖-纳米银的紫外可见光谱;B.沙棘果渣多糖-纳米银的粒径。

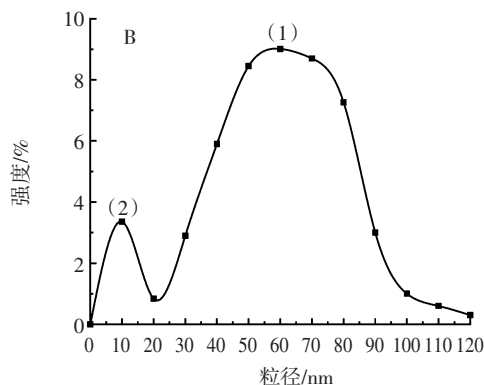
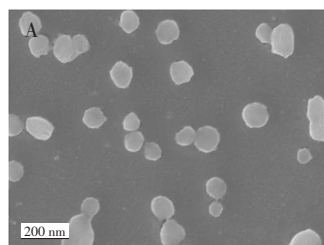
图5 不同紫外照射时间对复合颗粒紫外可见光谱和粒径的影响
Fig.5 Effect of different UV irradiation times on UV and particle size of composite particle

如图 5A 所示,随着紫外照射时间的延长,紫外吸收峰也随之增加。如图 5B 所示,紫外照射时间越长,所制得的沙棘果渣多糖-纳米银的粒径越小,当紫外照射时间达到 40 min 后,纳米银粒径几乎不变。当紫外照射 60 min 时,其粒径最小,为 44.54 nm。结合紫外可见吸收光谱,在紫外照射时间为 60 min 时,峰值最高。因此,选择紫外照射 60 min 为最佳反应条件。

2.2 沙棘果渣多糖-纳米银结构表征

2.2.1 粒径和扫描电镜分析

通过单因素试验结果,确定反应温度 35 ℃、pH9、硝酸银溶液与多糖溶液的体积比 1.0:1、反应时间 24 h、紫外照射 60 min 条件下反应制得的纳米银粒径最小,将该条件下制得的沙棘果渣多糖-纳米银用于扫描电镜和粒径表征,结果如图 6 所示。



A.沙棘果渣多糖-纳米银的扫描电镜图;B.沙棘果渣多糖-纳米银的粒径分布。

图6 沙棘果渣多糖-纳米银的扫描电镜和粒径分析图
Fig.6 SEM image and particle size image of seabuckthorn pomace polysaccharide-silver nanoparticle

由图 6 可知,沙棘果渣多糖-纳米银粒子的粒径平均粒径为 31.77 nm,其形状多呈球状。图 6B 中峰(1)的平均粒径在 69.14 nm,相对强度为 80.3%,表明在沙棘果渣多糖-纳米银溶液中,更多颗粒呈单分散分布。然而,峰(2)的相对强度为 19.7%,表明很少有颗粒是多分散的,并且在某些地方出现团聚。

2.2.2 红外光谱分析

将沙棘果渣多糖和沙棘果渣多糖-纳米银进行红外表征,旨在找出沙棘果渣多糖中参与还原纳米银的相关有机基团。沙棘果渣多糖和沙棘果渣多糖-纳米银的红外光谱见图 7。

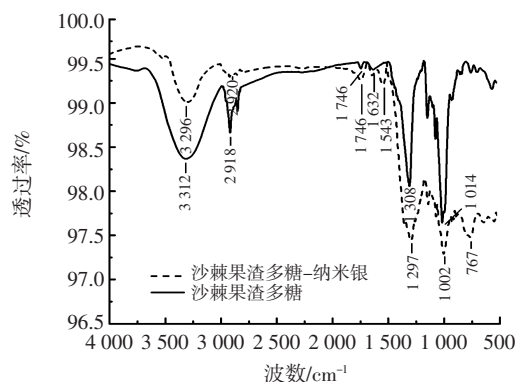
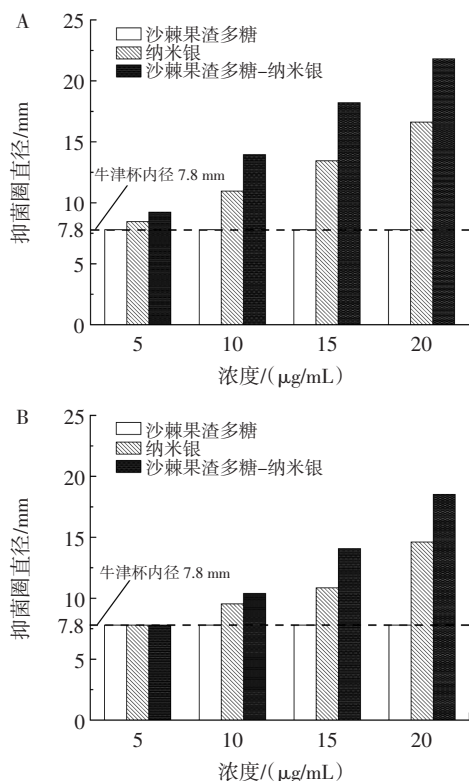


图7 沙棘果渣多糖和沙棘果渣多糖-纳米银的红外光谱
Fig.7 Infrared spectrogram of seabuckthorn pomace polysaccharides and seabuckthorn pomace polysaccharide-silver nanoparticle

如图7所示,在 $3\,312\text{ cm}^{-1}$ 附近的特征宽吸收带为沙棘果渣多糖中羟基的拉伸振动,在形成沙棘果渣多糖-纳米银后特征峰红移至 $3\,296\text{ cm}^{-1}$ 处,并且特征峰面积有所降低,这可能由纳米银和沙棘果渣多糖结构中羟基之间的相互作用引起的^[22]。在沙棘果渣多糖的红外光谱中,在 $2\,918\text{ cm}^{-1}$ 处对应于C-H的对称和非对称伸缩振动,该峰在沙棘果渣多糖-纳米银的红外光谱中明显减弱,且 $1\,543\text{ cm}^{-1}$ 处出现一个代表C=C伸缩振动的新峰,说明纳米银的生成过程与沙棘果渣多糖中亚甲基有关^[14]。在 $1\,632\text{ cm}^{-1}$ 处可能是酰胺的羰基拉伸模式。在 $1\,308\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,297\text{ cm}^{-1}$ 处的尖峰是由于沙棘果渣多糖和沙棘果渣多糖-纳米银中羧基功能的对称拉伸所致。 $1\,014\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,002\text{ cm}^{-1}$ 处的峰值归因于醇和醚键的C-O-C拉伸^[23-24]。

2.3 抑菌试验结果

不同浓度的沙棘果渣多糖、纳米银和沙棘果渣多糖-纳米银对大肠杆菌和白色葡萄球菌进行牛津杯抑菌试验,结果如图8所示。



A.大肠杆菌;B.白色葡萄球菌。

图8 沙棘果渣多糖、纳米银和沙棘果渣多糖-纳米银对大肠杆菌和白色葡萄球菌的抑菌圈直径

Fig.8 Inhibition zone diameter of seabuckthorn pomace polysaccharides, nano silver, and seabuckthorn pomace polysaccharide-silver nanoparticle against *Escherichia coli* and *Staphylococcus albus*

由图8可知,当浓度在 $5\text{ }\mu\text{g/mL}$ ~ $20\text{ }\mu\text{g/mL}$ 时,化学法制成的纳米银和沙棘果渣多糖-纳米银对大肠杆

菌有很好的抑制作用,且沙棘果渣多糖-纳米银的抑制效果最好。两种纳米银抑菌作用都随着浓度的增加而增强,且整体对大肠杆菌的抑制作用强于白色葡萄球菌。Kvítek等^[25]研究表明纳米银具有很强的抑菌活性,特别是对革兰氏阳性菌,这可能是由于细菌细胞膜的结构和化学组成的不同。但在此浓度下,沙棘果渣多糖对两种供试菌均没有呈现抑制区域。

2.4 沙棘果渣多糖-纳米银最低抑菌浓度(MIC)的确定

通过文献[26]可知,尺寸更小、表面积更大的纳米银颗粒具有更高的杀菌性能,因其可以增大细菌细胞膜的通透性从而导致细胞死亡。所以本试验测定 31.77 nm 粒径的沙棘果渣多糖-纳米银对两种供试菌的MIC值,结果见图9。

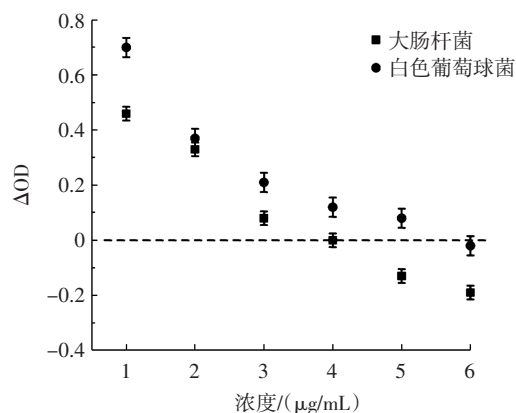


图9 沙棘果渣多糖-纳米银对两种供试菌的MIC

Fig.9 MICs of seabuckthorn pomace polysaccharide-silver nanoparticle against the two strains

由图9可知,沙棘果渣多糖-纳米银能明显抑制影响大肠杆菌和白色葡萄球菌的生长,且抑菌性随着复合纳米颗粒的浓度升高而增强, ΔOD 值在负值区域表明能完全抑制供试菌的生长。在相同浓度下,沙棘果渣多糖-纳米银对大肠杆菌的抑制作用比对白色葡萄球菌的抑制作用强。大肠杆菌的最小抑制浓度为 $4\text{ }\mu\text{g/mL}$,白色葡萄球菌的最小抑制浓度为 $6\text{ }\mu\text{g/mL}$ 。

3 结论

本文采用沙棘果渣多糖还原硝酸银中的银单质,以制备沙棘果渣多糖-纳米银,并通过单因素试验得出, 1 mg/mL 沙棘果渣多糖溶液和 50 mmol/L 硝酸银溶液,在硝酸银和沙棘果渣多糖体积比 $1.0:1$ 、反应温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{pH}9$ 时反应 24 h 后,在 365 nm 紫外灯下照射 60 min 条件下,生成的沙棘果渣多糖-纳米银含量最高,粒径最小。经粒度仪和SEM分析可知沙棘果渣多糖-纳米银多为球形,最小平均粒径为 31.77 nm 。对比分析沙棘果渣多糖、化学法制成的纳米银和沙棘果渣多糖-纳米银三者对大肠杆菌和白色葡萄球菌的抑菌效果,结果表明在较低浓度下,沙棘果渣多糖-纳米银

的抑菌效果优于化学法制的纳米银,而沙棘果渣多糖对白色葡萄球菌没有明显抑制作用。两种纳米银对大肠杆菌的抑菌圈直径均大于白色葡萄球菌的抑菌圈直径,这说明大肠杆菌比白色葡萄球菌对两种纳米银更敏感。沙棘果渣多糖-纳米银的最低抑菌浓度测定试验得出对大肠杆菌的MIC为4 $\mu\text{g/mL}$,对白色葡萄球菌的MIC为6 $\mu\text{g/mL}$ 。因此该法成功制备的沙棘果渣多糖-纳米银具有良好的抑菌性能,可以为新型抑菌剂在食品行业中的开发和应用提供参考。

参考文献:

- [1] 樊金玲. 沙棘籽原花色素的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006.
FAN Jinling. Study on proanthocyanidins from sea buckthorn seed[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2006.
- [2] 易冬梅, 陈玉琴. 沙棘植物资源的综合利用[J]. 江西园艺, 2005(4): 9-11.
YUN Dongmei, CHEN Yuqin. Comprehensive utilization of seabuckthorn plant resources[J]. Jiangxi Horticulture, 2005(4): 9-11.
- [3] 朱丹丹. 沙棘果渣系列产品加工工艺研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
ZHU Dandan. Study on the processing technology of a series of seabuckthorn pomace[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [4] 牟春堂, 郝小燕, 刁小高, 等. 沙棘果渣在动物饲料中应用的研究进展[J]. 动物营养学报, 2019, 31(7): 2965-2970.
MU Chuntang, HAO Xiaoyan, DIAO Xiaogao, et al. Research progress of application of sea buckthorn pomace in animal diets[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(7): 2965-2970.
- [5] 田志梅, 马现永, 鲁慧杰, 等. 果渣营养价值及其发酵饲料在畜禽养殖中的应用[J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46(10): 2955-2963.
TIAN Zhimei, MA Xianyong, LU Huijie, et al. Nutrient value of fruit pomace and the application of its fermented feed in livestock breeding[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2019, 46(10): 2955-2963.
- [6] 刘思扬, 陆雅琦, 海日汉, 等. 功能性植物多糖及其应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 444-453.
LIU Siyang, LU Yaqi, HAI Rihan, et al. Research progress on plant functional polysaccharides and its application[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 444-453.
- [7] 郭文阳, 张宗源, 潘梦诗, 等. 纳米银粒子的生物制备、表征及抗菌性研究[J]. 河南科学, 2022, 40(4): 517-523.
GUO Wenyang, ZHANG Zongyuan, PAN Mengshi, et al. Biosynthesis, characterization and antibacterial activity of silver nanoparticles[J]. Henan Science, 2022, 40(4): 517-523.
- [8] 薛文强, 于世平. 纳米银的抗菌机制及临床应用研究[J]. 中国微生物学杂志, 2022, 34(1): 117-120.
XUE Wenqiang, YU Shiping. Antibacterial mechanism and clinical application of silver nanoparticles[J]. Chinese Journal of Microecology, 2022, 34(1): 117-120.
- [9] 陆露. 纳米银的合成及其抗菌机制研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
LU Lu. Studies on the synthesis of silver nanoparticles and their antimicrobial mechanism[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.
- [10] GHODAKE G, KIM M, SUNG J S, et al. Extracellular synthesis and characterization of silver nanoparticles-antibacterial activity against multidrug-resistant bacterial strains[J]. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 2020, 10(2): 360.
- [11] 夏海钦. 岩藻多糖的结构解析及其在含纳米银抗菌膜制备中的应用[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
XIA Haiqin. Structure characterization of A fucose-rich exopolysaccharide and its application in antibacterial EPS/nanosilver film[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [12] 余宁翔. 多糖基纳米银材料构建及其协同抗菌研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
YU Ningxiang. The preparation of polysaccharide-based silver nanomaterials and its synergistic antibacterial research[D]. Nanchang: Nan-chang University, 2020.
- [13] VENKATPURWAR V, POKHARKAR V. Green synthesis of silver nanoparticles using marine polysaccharide: Study of *in-vitro* antibacterial activity[J]. Materials Letters, 2011, 65(6): 999-1002.
- [14] DEEPAK, KADAM, BILAL, et al. Physicochemical and functional properties of chitosan-based nano-composite films incorporated with biogenic silver nanoparticles[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 211: 124-132.
- [15] SANYASI S, MAJHI R K, KUMAR S, et al. Polysaccharide-capped silver nanoparticles inhibit biofilm formation and eliminate multi-drug-resistant bacteria by disrupting bacterial cytoskeleton with reduced cytotoxicity towards mammalian cells[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24929.
- [16] 李琴琴. 不同制法纳米银的抗菌活性及其应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
LI Qinqin. Antifungal activity and application of silver nanoparticles synthesized by different methods[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [17] 余之蕴, 黄宝莹, 刘海卿, 等. 牛津杯法测定食品添加剂对五种益生菌的抑菌活力[J]. 食品工业, 2016, 37(1): 171-174.
SHE Zhiyun, HUANG Baoying, LIU Haiqing, et al. Antibacterial activity of foods additives against five strains of probiotics by Oxford plate assay system[J]. The Food Industry, 2016, 37(1): 171-174.
- [18] 王芳. 活性多糖纳米银复合粒子的制备及荔枝保鲜的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
WANG Fang. Study on the preparation of polysaccharide-silver nanoparticles and its application in Litchi preservation[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [19] 吴宗山, 李莉. 天然产物绿色合成小尺寸纳米银及抗菌性[J]. 精细化工, 2014, 31(8): 964-968, 973.
WU Zongshan, LI Li. Green synthesis of small size silver nanoparticles by nature product and their antimicrobial properties[J]. Fine Chemicals, 2014, 31(8): 964-968, 973.
- [20] CAO X L, CHENG C, MA Y L, et al. Preparation of silver nanoparticles with antimicrobial activities and the researches of their biocompatibilities[J]. Journal of Materials Science Materials in Medicine, 2010, 21(10): 2861-2868.
- [21] 胡云睿. 纳米银及其复合抗菌材料的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
HU Yunrui. Research of AgNPs and its composite antibacterial material[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [22] 马正欣. 纳米银/多糖抗菌复合材料的构建与性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
MA Zhengxin. Construction and performance of silver nanoparticles/polysaccharide antibacterial composite materials[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [23] LUO L J, WU Y, LIU C, et al. Elaboration and characterization of curcumin-loaded soy soluble polysaccharide (SSPS)-based nanocarriers mediated by antimicrobial peptide nisin[J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127669.
- [24] WANG J, ZHANG Y, XU X, et al. ASP2-1, a polysaccharide from *Acorus tatarinowii* Schott, inhibits osteoclastogenesis via modulation of NFATc1 and attenuates LPS-induced bone loss in mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 2219-2230.
- [25] KVÍTEK L, PANÁČEK A, SOUKUPOVÁ J, et al. Effect of surfactants and polymers on stability and antibacterial activity of silver nanoparticles (NPs)[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(15): 5825-5834.
- [26] SAADA N S, ABDEL-MAKSoud G, EL-AZIZ M, et al. Green synthesis of silver nanoparticles, characterization, and use for sustainable preservation of historical parchment against microbial biodegradation[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2021, 32: 101948.