

纳米银绿色合成技术的研究进展：方法、机制及应用前景

侯柏宇, 张群利*

东北林业大学家居与艺术设计学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

纳米银(AgNPs)凭借其卓越的物理化学性质及广谱生物活性, 已成为材料科学、生物医药等领域的研究重心。针对传统物理化学合成法存在的能耗高、环境毒性大等局限性, 利用生物资源作为还原剂与稳定剂的绿色合成技术展现出显著的可持续优势。本文系统综述了纳米银绿色合成技术的最新研究进展, 重点剖析了植物提取法的“活化-成核-生长”机制、微生物法的胞内外还原途径以及多糖分子(如壳聚糖、海藻酸钠)在实现AgNPs原位还原与界面稳定中的双重功能。文中详细探讨了反应温度、pH值、反应时间及前驱体浓度等关键工艺参数对AgNPs形貌及其在复合材料基体中粒径(1~100 nm)的精准调控规律。同时, 总结了AgNPs在抗菌包装、催化降解、食品保鲜及临床医疗等领域的应用现状, 并分析了生物包覆层对提升复合材料界面稳定性的贡献。最后, 针对当前面临的标准化体系缺失及专利壁垒等瓶颈问题提出了应对策略, 并对其在电子信息及可持续工业领域的产业化前景进行了展望, 旨在为高性能功能化纳米银复合材料的研发与技术创新提供理论依据。

关键词

纳米银, 绿色合成, 合成机制, 复合材料

Research Progress on Green Synthesis Technology of Nano-Silver: Methods, Mechanisms and Application Prospects

Boyu Hou, Qunli Zhang*

College of Home and Art Design, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: April 25, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 侯柏宇, 张群利. 纳米银绿色合成技术的研究进展: 方法、机制及应用前景[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 388-398. DOI: 10.12677/ms.2026.165131

Abstract

Silver nanoparticles (AgNPs) have become a research focus in fields such as materials science and biomedicine due to their outstanding physicochemical properties and broad-spectrum biological activities. In response to the limitations of traditional physical and chemical synthesis methods, such as high energy consumption and significant environmental toxicity, green synthesis techniques that utilize biological resources as reducing and stabilizing agents have demonstrated significant sustainable advantages. This paper systematically reviews the latest research progress in green synthesis technologies of AgNPs, with a focus on the “activation-nucleation-growth” mechanism of the plant extraction method, the intracellular and extracellular reduction pathways of the microbial method, and the dual functions of polysaccharide molecules (such as chitosan and sodium alginate) in achieving *in-situ* reduction and interface stabilization of AgNPs. The paper also elaborates on the precise regulation laws of AgNPs morphology and particle size (1~100 nm) in composite material matrices by key process parameters such as reaction temperature, pH value, reaction time, and precursor concentration. Meanwhile, it summarizes the current application status of AgNPs in areas such as antibacterial packaging, catalytic degradation, food preservation, and clinical medicine, and analyzes the contribution of biological coating layers to enhancing the interface stability of composite materials. Finally, it proposes strategies to address the current bottlenecks, such as the lack of a standardized system and patent barriers, and looks forward to the industrialization prospects of AgNPs in the fields of electronic information and sustainable industry, aiming to provide a theoretical basis for the research and development of high-performance functionalized AgNPs composite materials and technological innovation.

Keywords

Silver Nanoparticles (AgNPs), Green Synthesis, Synthesis Mechanisms, Composite Materials

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代金属纳米材料研究领域, 纳米银(AgNPs)因其在电学、光学及生物学方面的卓越性能而处于核心地位。纳米银通常指粒径在 1~100 nm 之间的银单质颗粒[1]。其表现出的表面等离子体共振(SPR)效应、量子尺寸效应及巨大的比表面积, 使其成为构建高性能功能复合材料的理想填料。随着全球医疗健康与电子工业的协同发展, 预计到 2033 年, 纳米银的市场规模将突破 27 亿美元, 其在复合材料基体中的高效分散与功能化应用已成为学术界与产业界的共同焦点。然而, 高性能复合材料的性能高度依赖于纳米颗粒的形貌可控性及其与基体的界面相容性。传统的物理法与化学合成法虽然能实现规模化制备, 但普遍面临能耗高、化学试剂毒性大以及环境安全性差等问题[2]。更重要的是, 传统方法制备的 AgNPs 往往缺乏天然生物活性表面, 导致其在复杂基体(如高分子或生物质材料)中的结合力不足。为克服这些局限, 绿色合成技术应运而生, 其核心在于利用天然生物资源中的活性分子作为还原剂和稳定剂, 在实现环境友好生产的同时, 赋予纳米颗粒独特的生物包覆层。

针对这一领域的机制探索, 学界已取得了显著进展。Rajeshkumar 等[3]通过系统性综述阐明了植物介导合成中生物分子的作用机理, 为理解复杂的氧化还原过程提供了理论框架。在形貌精准调控方面, Ren 等[4]利用银杏叶提取物成功制备出单分散性良好的纳米银颗粒; Li 等[5]则深入分析了辣椒叶中的蛋白质

如何通过捕获银离子诱导其定向成核, 实现了对晶体生长过程的有效干预。此外, Yao 等[6]将绿色合成的 AgNPs 应用于催化降解领域, 验证了该类材料在环境修复复合体系中的应用价值。

除了植物资源, 微生物与多糖介导的合成路径也展现出巨大的潜力[7]。Das 等[8]与朱雨婕等人的研究分别证明了细菌与食用菌无细胞滤液在胞外高效还原纳米银的可行性, 这种原位还原方式极大地简化了复合材料的后期加工程序。在界面稳定机制研究中, Wang 等[9]发现黄精多糖不仅能显著缩小 AgNPs 粒径, 还能通过氢键吸附显著提升其生物相容性。特别值得关注的是, Meng 等[10]与 Cai 等[11]的工作揭示了黑木耳多糖等三螺旋结构对纳米颗粒的空间限域与包埋作用, 这种特殊的结构稳定性对于开发耐高温、强剪切力的工业级复合材料(如木塑复合材料)具有重要的借鉴意义。在终端应用层面, Faid 等[12]构建的银/石墨烯纳米复合体系以及 Tordi 等[13]制备的载银海藻酸钠纤维, 均展示了绿色 AgNPs 在构建多功能复合材料方面的优异性能; 而邹惠美等[14]的临床研究则进一步夯实了纳米银复合敷料在医学领域的实效性基础。

尽管绿色合成技术在实验室阶段已展现出显著优势, 但如何实现其在复杂复合基体中的可控释放、解决高温加工中的失活问题, 以及建立统一的工业评价标准, 仍是当前亟待突破的瓶颈。本文旨在系统分析植物、微生物及多糖类资源的合成机制, 深入探讨工艺参数(如温度、pH 值、前驱体浓度)对 AgNPs 形貌及其在复合材料中分布规律的影响。通过对比分析不同生物介导路径的优劣, 本文为高性能、低成本且可持续发展的纳米银复合材料的研发与产业化应用提供理论指导与参考依据。

2. 绿色合成方法

2.1. 植物提取法

植物提取法作为目前应用最广泛的纳米银绿色合成技术, 其核心在于原料丰富、操作简便且无需复杂的生物培养过程, 完全符合绿色合成中“环境友好”与“可持续发展”的核心原则。该方法利用植物组织(如根、茎、叶、花等)中的黄酮、多酚、萜类及生物碱等活性成分作为天然还原剂和稳定剂。在反应体系中, 这些生物分子通过羟基(-OH)及醛基(-CHO)等官能团将 Ag^+ 还原为 Ag^0 , 并原位包覆在纳米颗粒表面, 有效防止了 AgNPs 的团聚。

2.1.1. 合成机制和过程

(1) 成核阶段: Li 等通过辣椒叶(*Capsicum annuum* L.)提取物实验证实, 植物中的蛋白质、酶及氨基酸等生物分子首先通过静电相互作用捕获银离子, 随后蛋白质表面的还原性基团诱导银核的初步形成[15]。

(2) 晶体生长与包覆: 随着银离子的持续还原, 银核通过电子积累不断生长。Shameli 等研究表明, 在木蝴蝶属(*Callicarpa maingayi*)介导的合成中, 植物分子会与银形成 $[Ag\ Callicarpa\ maingayi]^+$ 复合物, 通过多肽中的酰胺 I 带(-C=O, C=N)实现对金属颗粒的封端与稳定[16]。

2.1.2. 植物资源筛选的多元维度与典型物种

1、高效还原植物选择

根据活性成分含量与还原效率, 可分为三类, 见表 1。

Table 1. Reduced plant species

表 1. 还原植物种类

植物类型	代表物种	关键活性物	还原效率
高多酚植物	杜仲、银杏叶	槲皮素($\geq 8\%$)	产率 > 95%, 粒径 10~30 nm
高糖类植物	柑橘皮[17]、海藻酸钠	还原糖(15%~30%)	低温反应, 产率 > 98%
生物碱富集植物	牛心番荔枝、乌药	乌药碱、睡茄碱	增强杀虫活性(LC ₅₀ = 12.5 $\mu\text{g/mL}$)

2、功能性植物选择

在绿色合成体系中, 针对功能性植物的选择已从单纯的还原效率评价转向对纳米复合体系“生物功能化”的深度定制。利用具有特定药理价值或化学特性的植物提取物, 可使生成的 AgNPs 表面原位修饰一层具有生物活性的分子膜, 从而构建出具有多靶点协同效应的生物纳米材料。以桑科药用植物菩提树 (*Ficus religiosa*) 为例, Yadav 等[17]利用其树皮、叶片及根部的混合水提取物制备了 AgNPs, 通过紫外可见光谱、透射电子显微镜(TEM)及 X 射线衍射(XRD)等表征手段证实了所得颗粒的球形结构与高结晶度, 该复合材料在 DPPH 实验中表现出卓越的自由基清除能力, 并能有效抑制铜绿假单胞菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌及金黄色葡萄球菌等多种致病菌, 展现出显著的抗氧化与广谱抗菌协同潜力。Yang 等[18]以海藻酸钠为还原剂和稳定剂, 通过水热法成功制备了粒径均匀的纳米银颗粒。研究发现, 海藻酸钠中的羟基和羧基不仅参与银离子的还原, 还能通过静电与空间位阻效应有效控制颗粒生长, 所得 AgNPs 表现出优异的表面增强拉曼散射性能和对有机染料的高效催化降解能力, 拓展了多糖基绿色合成纳米银在分析检测与环境修复领域的应用潜力。Bindhu 等[19]则筛选辣木(*Moringa oleifera*)花提取物作为合成介质, 不仅实现了 AgNPs 的绿色制备, 更利用植物分子的特异性修饰赋予了颗粒对环境铜离子(Cu^{2+})的高度敏感性, 实现了生物活性与光学传感功能的集成。此外, Zangeneh 等[20]利用阿尔泰葱(*Allium saralicum*)提取物合成的 AgNPs 展现出多维度的生物学性能, 包括显著的体外抗氧化、细胞毒性(抗癌)以及抗真菌活性, 这种“天然药物-无机纳米”复合结构有效降低了单一用药产生的耐药性风险。如表 2 所示, 通过精准筛选具有伤口愈合能力的乌药、具有抗氧化特色的银杏叶及具有光学传感潜力的桉树等资源, 研究者可以实现对 AgNPs 性能的定向调控, 这种基于植物资源功能的复合设计模式为开发智能化、多功能化的绿色纳米复合材料提供了关键的理论支撑与实践路径。

Table 2. Comparison of characteristics of AgNPs synthesis in different plants

表 2. 不同植物资源合成 AgNPs 的特性比较

植物种类	植物部位	粒径范围(nm)	形貌	主要生物活性
银杏	叶	10~30	球形/饼状	抗菌、催化
桉树	叶	22~42	球形	抗菌、光学传感
乌药	根	15~40	球形	伤口愈合、抗氧化
牛心番荔枝	叶	7.67~8.34	球形	杀幼虫、抗菌
辣木	花	8	球形	抗菌、铜敏感性
	树皮 + 叶 + 根	50~70	球形	
阿尔泰葱	叶	8	球形	抗菌、抗氧化、抗癌活性

2.2. 微生物合成法

微生物合成法通过利用细菌、真菌或藻类的代谢产物或其菌体自身还原银离子, 展现出环境适应性强、培养周期短及易于通过调节培养条件控制菌体代谢等显著优势。相较于复杂的胞内合成, 胞外合成途径因其简化了后期回收 AgNPs 的繁琐程序, 在产业化研究中备受青睐。在这一生化反应中, 微生物分泌的胞外酶、多肽及次级代谢产物协同充当了高效的还原剂与稳定剂。由于微生物普遍对金属具有较高的耐受性及吸附能力, 这种天然的亲和力显著提升了其对 Ag^+ 的捕获与结合效率。

在具体研究实践中, 学界针对不同生境的微生物资源进行了广泛探索并取得了实质性成果[21]。Das 等[8]利用从工业区分离的蜡芽孢杆菌(*Bacillus strain CS 11*)成功实现了纳米银的胞外高效合成, 为特殊

环境下的生物资源化利用提供了典型范例。在真菌合成方向, 朱雨婕等[22]利用金针菇(*Flammulina velutipes*)的无细胞滤液制备出粒径控制在 1.5~10 nm 之间、具有优异抗氧化性能的超球球形颗粒; Seetharaman 等[23]则通过内生真菌枫香拟茎点菌(*Phomopsis liquidambaris*)合成的 AgNPs 展现出显著的抗菌与杀幼虫活性。此外, 针对极端生境的开发, John 等[24]利用与南极嗜冷原生动动物相关的假单胞菌(*Pseudomonas strain*)合成了具有生物活性的纳米银, 极大拓展了绿色合成的地理与生物学边界。

学术界对微生物多样性对颗粒性质的调控作用也进行了深入剖析[24](表 3)。Alsharif 等[25]通过对不同分类群微生物制备的球形颗粒进行研究, 揭示了物种差异对 AgNPs 物理化学性质的微观调控机制。同时, Husain 等[26]将蓝细菌作为生物反应器, 系统探讨了反应条件对粒径分布的影响及其在染料脱色中的高效催化降解能力。如图 1 所示, 以蜡样芽孢杆菌 *Bacillus cereus* A1~5 为典型工艺案例, 其合成流程涉及在 35°C 条件下震荡培养、离心洗涤沉淀以及在黑暗条件下孵育等核心步骤。通过监测溶液由无色向黄褐色的显色转变这一关键物理指标, 配合表征分析可获得粒径在 6~50 nm 区间内、分散性良好的球形纳米银。这种由微生物代谢产物原位构建的纳米复合结构, 不仅保证了高产量的同质化生产, 也为其在生物医药及环境修复复合材料体系中的稳定化应用奠定了坚实的界面基础。

Table 3. Microbial resources for green synthesis of AgNPs

表 3. AgNPs 绿色合成的微生物资源

微生物种类	粒径	形状	主要生物活性
金针菇[27]	1.5~10	球形	抗氧化
枫香拟茎点菌[28]	10~20	球形	抗菌性、杀幼虫活性
印度梨形孢[9]	6~15	球形	抗氧化、抗癌活性
蜡样芽孢杆菌[29]	6~50	球形	抗癌、杀幼虫活性
假单胞菌[30]	20~70	球形	抗菌性
微毛藻属[25]	60~80	球形	染料降解

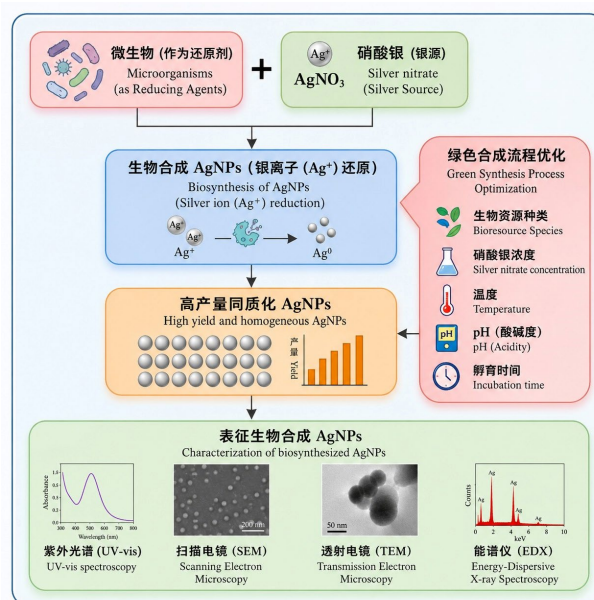


Figure 1. Schematic presentation of microbial-mediated synthesis of AgNPs

图 1. 微生物介导合成 AgNPs 的流程示意图

2.3. 多糖

目前, 越来越多的绿色合成方法被提出且被实践, 与此同时多糖这一可再生性与低环境负荷的材料也逐渐进入科学家的视线中。多糖合成纳米金属离子的例子有很多[10], 其本身还有诸多官能团, 且本身结构可以用来控制晶核的成核和生长。多糖本身含有的羟基和醛基在水溶液中生成游离的羟基。游离的羟基可以和一些金属离子反应将其还原成纳米金属, 多糖本身被氧化成羧酸。这种还原能有效防止纳米粒子的团聚[31]。多糖作为还原-稳定双功能试剂时, 具有反应速度快、产物纯度高的特点。其中海藻酸钠、淀粉、壳聚糖等因富含羟基和醛基, 成为理想的绿色合成模板。

2.3.1. 多糖在纳米银合成中作稳定剂

多糖在纳米银的合成中分别充当着稳定剂和还原剂的作用。在充当稳定剂时, 多糖利用其独特的三维结构在空间上稳定纳米银, 将纳米银固定多糖基材料上实现纳米银的稳定。多糖同样也可以通过基团和链构进行稳定。多糖通过氢键吸附并包覆稳定纳米银。如黄精多糖中的羟基在合成纳米银后, 与普通纳米银相比经过氢键稳定后的纳米银从 60 nm 降低到 10 nm, PDI 值从 0.359 降低至 0.206。与此同时, 其 Zeta 电位值更大, 表明其稳定性更高[32]。Hamouda 等[33]的研究表明, 纳米纤维素, 一种具有刚性和稳定结构、大比表面积等特性的多糖也可以稳定纳米颗粒。其巨大的比表面积促进了对纳米银的包埋, 将纳米银的尺寸稳定在 12 nm 至 19 nm 范围内, 保证了在空间上的稳定和分散。

一些具有独特链构象的多糖, 其链结构同样在稳定纳米银中起着关键作用[34][35]。一些以氢键作用维持的三螺旋结构的多糖, 在通过对氢键的破坏恢复以实现糖链的解旋和复旋, 及自组装作用[36], 进而利用多糖的这种特性来进行包埋和稳定纳米材料[37]。Cai 等[11]利用 DMSO 溶液控制三螺旋结构的黑木耳多糖来制备纳米银材料。游离的羟基经过 Ag-O 键经过螯合反应将纳米银螯合在结构内部, 使其尺寸稳定在 10 nm 以内, 并阻止其进一步的聚集。除了三螺旋黑木耳多糖, 其他的一些三螺旋多糖[38]如香菇多糖[39]、裂褶多糖[40]也通过这样的方式实现合成纳米银中稳定剂的作用。所以, 通过吸附和牢固的吸附和包埋可以使纳米银稳定性更高并减少其尺寸[41]。

多糖中带负电荷的羧基、乙酸酯等基团也可以通过静电作用相互吸引银离子来达到合成纳米银并对纳米银进行稳定和修饰。Al-Muhanna 团队[42]利用果胶中的羧基对纳米银的静电作用来合成, 并成功地将纳米银的尺寸减少到 8 nm。储存三个月后, 纳米银的稳定性仍然良好, 紫外吸收峰和颗粒大小无明显变化。Tordi 团队[13]发现 SA 中的羧基基团可以和银离子作用产生交联作用, 在加入还原剂后, 利用 SA 的结构静电吸引交联并稳定纳米银使得每毫克的复合物在 24 h 内仅释放 9 μg 。Bucciol 团队[43]使用果胶来作稳定剂的同时加入土霉素, 在稳定了纳米银的同时, 也提高了纳米银的抗菌能力。Lin 等人[28]利用黄原胶来作为纳米银的稳定剂和封端剂, 黄原胶糖链中的丙酮酸和乙酸酯基团携带负电荷可以与纳米银作用产生强烈的排斥作用使纳米颗粒的 PDI 值为 0.291, Zeta 电位达 -41.3 mV, 尺寸明显低于普通颗粒。此外, 多糖内的多种其他负电荷基团也存在通过静电相互作用来稳定纳米银的潜力[44]。

更多多糖在纳米银合成中作稳定剂的机制及效果如表 4 所示。

Table 4. Mechanism and effect of polysaccharide stabilizer

表 4. 多糖稳定剂的机制及效果

多糖	稳定机制	效果
黄岑多糖[45]	羟基氢键吸附 羧基静电吸引	尺寸从 51.18 nm 缩小至 11.18 nm, Zeta 电位从 -4.07 mV 变为 -23.05 mV, pH 值 5 至 14 和 0°C 至 80°C 范围内颜色和紫外光谱稳定, 储存 30 天

续表

羧甲基壳聚糖[46]	羟基氢键吸附 氨基氢键吸附 羧基静电吸引	尺寸 20 nm, 稳定至少 90 天
核桃壳多糖[47]	羟基 Ag-O 配位键	尺寸 15.87 nm, 负载量达 19.81%, 20 天仅释放十亿分之二百
羧基化凝胶多糖	羧基静电吸引	尺寸 15 nm, Zeta 电位-20 mV, 稳定至少 3 个月
果胶	羧基静电吸引	尺寸 12.8 nm, 颜色及紫外光谱稳定性能保持 5 年
透明质酸	羧基静电吸引	尺寸 120 nm, Zeta 电位-22.92 mV, 稳定至少 49 天

2.3.2. 多糖在纳米银合成中作还原剂

多糖具有羟基、氨基、醛基和酮基等基团, 具有一定的还原能力。通过碱性、微波和光照等条件时可以提高其还原性, 提高还原纳米银的产率。羟基可以被银离子氧化为醛基和羧基, 不仅可以还原银离子, 还能稳定纳米银。多糖中起还原作用的多为伯羟基, 而仲羟基不会参与还原反应[12]。从橄榄叶中采用醇提取和脱蛋白的方式提取的脱糖可以合成尺寸为 64.42 nm 的纳米银[48] [49]。在自然界中还有很多其他的植物如芦荟和棉花树皮等植物提取的多糖也可以利用羟基成功合成纳米银。氨基对孤对电子具有还原的能力。图 2 为壳聚糖的糖链与还原基团反应示意图。

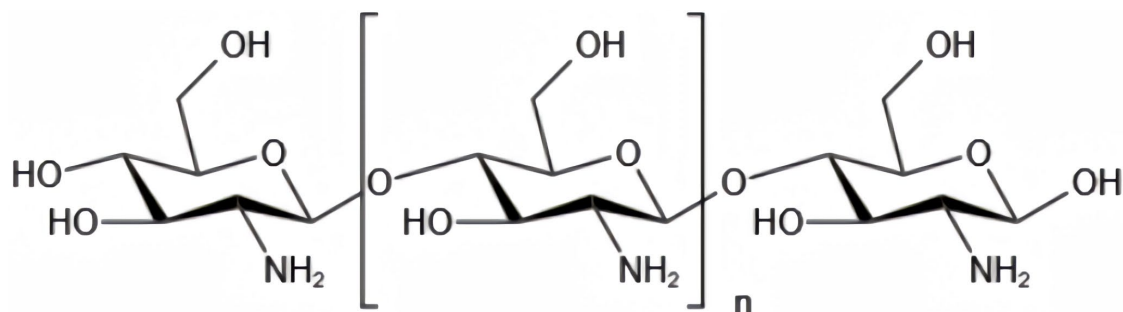


Figure 2. Glycosyl chains and reducing groups of chitosan

图 2. 壳聚糖的糖链及还原基团

Faid 等[12]利用壳聚糖溶液在 90℃ 条件下静置 12 h 成功合成 12.8 nm 小尺寸的纳米银。Chen 等[47]则是先制备了壳聚糖凝胶, 再将凝胶浸入硝酸银溶液中合成尺寸范围为 50 nm~100 nm 的纳米银。在不同体系下, 壳聚糖的氨基均能提供还原电子。为了提高多糖的还原性和反应性, 可以通过碱性、微波、及光辅助来改善, 实现纳米银的高效合成。表 5 为一些提高多糖还原性的机制。

Table 5. Mechanism of auxiliary methods to improve the reducing properties of polysaccharides

表 5. 辅助方法提高多糖还原性的机制

方法	机制	不足
碱性条件	断裂糖苷键, 产生具有还原性的小分子片段生成更多还原片段; 转化多糖形式	需净化产物溶液
微波辐射	快速和均匀加热, 快速提高反应速率	提高反应设备要求
光照射	提供能量, 促进电子转移还原银离子	反应时间较长
改性	引入还原基团, 改善多糖性质	增加合成反应物和步骤

3. 纳米银材料的应用前景

在经济迅速发展如今,人们对于安全卫生的要求也同样提高。纳米银材料凭借本身的独特性能,已在多个领域有了广泛应用。在造纸包装领域,汤建新等[50]利用纳米银制备了抗菌纸。使用 PVA、纳米银为原材料制备的抗菌包装纸对大肠杆菌有着较好的抗菌效果,大肠杆菌抑菌环直径达到了 25.1 mm,且在抗菌液质量分数较低时纳米银抗菌纸随着抗菌液质量分数的增加而增强。在食品保鲜领域,胡灿[51]将纳米银加入纤维素制备了复合薄膜并对圣女果的保鲜效果进行了测试。研究表明,载银复合膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有着明显的抗菌效果。同时还能暂缓水果的腐烂情况,有着一定的保鲜作用,延长圣女果保鲜期 4 d。纳米银优秀的抗菌效果和对生物的协同性同样也受到了医学方面的青睐[52]。纳米银所制成的医疗器械在抵御细菌的同时,也可以促进伤口的愈合。邹惠美等将负压引流与纳米银敷料一同用于治疗手术后的感染切口。结果显示,纳米银敷料能有效地减少伤口炎症,减少手术切口处的感染。同时,还能促进伤口的愈合并减少患者的疼痛[14]。

4. 展望

纳米银绿色合成技术目前正处于从实验室创新向规模化产业应用跨越的战略临界点,其未来的深入发展将对全球可持续材料体系产生深远影响。随着生物介导合成工艺的持续优化与成熟,预计纳米银的制备成本将降低约 40%,这将显著提升其在功能性复合材料市场中的竞争优势。除了卓越的广谱抗菌特性外,绿色合成纳米银所展现出的优异导电性、柔韧性及可拉伸性,正推动其在柔性电子器件、智能纺织品及下一代传感器领域的深度应用与推广。然而,该技术的全面产业化仍受限于全球性评价标准的缺失以及严峻的专利壁垒(如美国杜邦公司掌握着 60%以上的核心专利),这要求未来的科研工作必须聚焦于建立覆盖“合成-加工-应用-回收”的全生命周期监管体系,并积极参与国际标准与安全规范的制定。在政府“环保与可持续发展”政策的强力驱动下,绿色合成纳米银及其复合材料有望在 2030 年前转型为支撑循环经济的重要基础功能材料,并在提升公共卫生水平及推动先进绿色制造等多个领域发挥不可替代的战略价值。

参考文献

- [1] Hussain, I., Singh, N.B., Singh, A., Singh, H. and Singh, S.C. (2015) Green Synthesis of Nanoparticles and Its Potential Application. *Biotechnology Letters*, **38**, 545-560. <https://doi.org/10.1007/s10529-015-2026-7>
- [2] Singh, R.K., et al. (2025) Plant-Mediated Synthesis of AgNPs: Mechanisms and Applications. *Plasmonics*, **40**, 301-315.
- [3] Rajeshkumar, S. and Bharath, L.V. (2017) Mechanism of Plant-Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles—A Review on Biomolecules Involved, Characterisation and Antibacterial Activity. *Chemico-Biological Interactions*, **273**, 219-227. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2017.06.019>
- [4] Ren, Y., Yang, H., Wang, T. and Wang, C. (2016) Green Synthesis and Antimicrobial Activity of Monodisperse Silver Nanoparticles Synthesized Using Ginkgo Biloba Leaf Extract. *Physics Letters A*, **380**, 3773-3777. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.09.029>
- [5] Li, S., Zhang, Y., Xu, X. and Zhang, L. (2011) Triple Helical Polysaccharide-Induced Good Dispersion of Silver Nanoparticles in Water. *Biomacromolecules*, **12**, 2864-2871. <https://doi.org/10.1021/bm2001439>
- [6] Yao, P., et al. (2018) Biosynthesis of *Eucommia ulmoides* Silver Nanoparticles and Application Thereof in Reductive Catalytic Degradation of Direct Orange 26. *Journal of Textile Research*, **39**, 104-110.
- [7] Gupta, S., Choudhary, D.K. and Sundaram, S. (2024) Green Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles Using Citrus Sinensis (Orange Peel) Extract and Their Antidiabetic, Antioxidant, Antimicrobial and Anticancer Activity. *Waste and Biomass Valorization*, **16**, 1101-1114. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02782-z>
- [8] Das, V.L., Thomas, R., Varghese, R.T., Soniya, E.V., Mathew, J. and Radhakrishnan, E.K. (2013) Extracellular Synthesis of Silver Nanoparticles by the Bacillus Strain CS 11 Isolated from Industrialized Area. *3 Biotech*, **4**, 121-126. <https://doi.org/10.1007/s13205-013-0130-8>

- [9] Wang, R., Li, R., Zheng, P., Yang, Z., Qian, C., Wang, Z., *et al.* (2023) Silver Nanoparticles Modified with Polygonatum Sibiricum Polysaccharide Improve Biocompatibility and Infected Wound Bacteriostasis. *Journal of Microbiology*, **61**, 543-558. <https://doi.org/10.1007/s12275-023-00042-8>
- [10] Meng, Y., Zhang, H., Hu, N., Zhang, B., Qiu, Z., Hu, J., *et al.* (2021) Construction of Silver Nanoparticles by the Triple Helical Polysaccharide from Black Fungus and the Antibacterial Activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, **182**, 1170-1178. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.130>
- [11] Cai, L., Zhang, L. and Xu, X. (2022) One-Step Synthesis of Ultra-Small Silver Nanoparticles-Loaded Triple-Helix β -Glucan Nanocomposite for Highly Catalytic Hydrogenation of 4-Nitrophenol and Dyes. *Chemical Engineering Journal*, **442**, Article 136114. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136114>
- [12] Faid, A.H., Rafea, M.A., Gad, S., Sharaky, M. and Ramadan, M.A. (2024) Antitumor Efficiency and Photostability of Newly Green Synthesized Silver/Graphene Oxide Nanocomposite on Different Cancer Cell Lines. *Cancer Nanotechnology*, **15**, Article No. 17. <https://doi.org/10.1186/s12645-024-00255-5>
- [13] Tordi, P., Gelli, R., Ridi, F. and Bonini, M. (2024) A Bioinspired and Sustainable Route for the Preparation of Ag-Cross-linked Alginate Fibers Decorated with Silver Nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, **326**, Article 121586. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121586>
- [14] 邹惠美, 王蓉, 杨剑英, 成沛玉, 等. 负压引流联合纳米银敷料治疗感染切口的临床研究[J]. 中国医学创新, 2017, 14(29): 85-88.
- [15] Li, S., Shen, Y., Xie, A., Yu, X., Qiu, L., Zhang, L., *et al.* (2007) Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using *Capsicum annuum* L. Extract. *Green Chemistry*, **9**, 852-858. <https://doi.org/10.1039/b615357g>
- [16] Shameli, K., Bin Ahmad, M., Jaffar Al-Mulla, E.A., Ibrahim, N.A., Shabanzadeh, P., Rustaiyan, A., *et al.* (2012) Green Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using *Callicarpa maingayi* Stem Bark Extraction. *Molecules*, **17**, 8506-8517. <https://doi.org/10.3390/molecules17078506>
- [17] Yadav, V., Tak, S.S., Singh, H. and Daga, K. (2025) Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using a Mixed Aqueous Extract of *Ficus Religiosa* Bark, Leaf, and Root: Free Radical Interactions and Antibacterial Evaluation. *Rasayan Journal of Chemistry*, **18**, 538-545. <https://doi.org/10.31788/rjc.2025.1819198>
- [18] Yang, J. and Pan, J. (2012) Hydrothermal Synthesis of Silver Nanoparticles by Sodium Alginate and Their Applications in Surface-Enhanced Raman Scattering and Catalysis. *Acta Materialia*, **60**, 4753-4758. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.05.037>
- [19] Bindhu, M.R., Umadevi, M., Esmail, G.A., Al-Dhabi, N.A. and Arasu, M.V. (2020) Green Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles from *Moringa Oleifera* Flower and Assessment of Antimicrobial and Sensing Properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **205**, Article 111836. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.111836>
- [20] Zangeneh, M.M., Bovandi, S., Gharehyakkeh, S., Zangeneh, A. and Irani, P. (2019) Green Synthesis and Chemical Characterization of Silver Nanoparticles Obtained Using allium *Saralicum* Aqueous Extract and Survey of *in Vitro* Antioxidant, Cytotoxic, Antibacterial and Antifungal Properties. *Applied Organometallic Chemistry*, **33**, e4961. <https://doi.org/10.1002/aoc.4961>
- [21] Qiao, Y., Shen, L., Zhang, Y., Zhou, M. and Sun, Z. (2024) Boldine Promotes Stemness of Human Urine-Derived Stem Cells by Activating the Wnt/ β -Catenin Signaling Pathway. *Molecular and Cellular Biochemistry*, **479**, 243-254. <https://doi.org/10.1007/s11010-023-04721-3>
- [22] 朱雨婕, 代安然, 李佳铭, 等. 金针菇无细胞滤液合成纳米银颗粒[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 71-78.
- [23] Seetharaman, P.K., Chandrasekaran, R., Gnanasekar, S., Chandrakasan, G., Gupta, M., Manikandan, D.B., *et al.* (2018) Antimicrobial and Larvicidal Activity of Eco-Friendly Silver Nanoparticles Synthesized from Endophytic Fungi *Phomopsis Liquidambaris*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **16**, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.006>
- [24] John, M.S., Nagoth, J.A., Ramasamy, K.P., Mancini, A., Giuli, G., Natalello, A., *et al.* (2020) Synthesis of Bioactive Silver Nanoparticles by a *Pseudomonas* Strain Associated with the Antarctic Psychrophilic Protozoon *euplotes focardii*. *Marine Drugs*, **18**, Article 38. <https://doi.org/10.3390/md18010038>
- [25] Alsharif, S.M., Salem, S.S., Abdel-Rahman, M.A., Fouda, A., Eid, A.M., El-Din Hassan, S., *et al.* (2020) Multifunctional Properties of Spherical Silver Nanoparticles Fabricated by Different Microbial Taxa. *Heliyon*, **6**, e03943. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03943>
- [26] Husain, S., Afreen, S., Yasin, D., Afzal, B. and Fatma, T. (2019) Cyanobacteria as a Bioreactor for Synthesis of Silver Nanoparticles—An Effect of Different Reaction Conditions on the Size of Nanoparticles and Their Dye Decolorization Ability. *Journal of Microbiological Methods*, **162**, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2019.05.011>
- [27] Buccioli, F., Manzoli, M., Zhang, C., Di Nardo, G., Gilardi, G., Calcio Gaudino, E., *et al.* (2024) Ultrasound-Driven Deposition of Au and Ag Nanoparticles on Citrus Pectin: Preparation and Characterisation of Antimicrobial Composites. *ChemPlusChem*, **89**, e202300774. <https://doi.org/10.1002/cplu.202300774>

- [28] Lin, J., Sathiyaseelan, A., Zhang, X., Jin, Y. and Wang, M. (2024) Utilization of Xanthan Gum-Silver Nitroprusside Nanoparticles for Prospective Advancements in Bacteriostasis and Wound Healing. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, **34**, 4133-4145. <https://doi.org/10.1007/s10904-023-02992-3>
- [29] Xu, X., Pan, Y., Liu, X., Han, Z. and Chen, S. (2023) Constructing Selenium Nanoparticles with Enhanced Storage Stability and Antioxidant Activities via Conformational Transition of Curdlan. *Foods*, **12**, Article 563. <https://doi.org/10.3390/foods12030563>
- [30] Biscari, G., Malkoch, M., Fiorica, C., Fan, Y., Palumbo, F.S., Indelicato, S., et al. (2024) Gellan Gum-Dopamine Mediated in Situ Synthesis of Silver Nanoparticles and Development of Nano/Micro-Composite Injectable Hydrogel with Antimicrobial Activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, **258**, Article 128766. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128766>
- [31] Jia, X., Yao, Y., Yu, G., Qu, L., Li, T., Li, Z., et al. (2020) Synthesis of Gold-Silver Nanoalloys under Microwave-Assisted Irradiation by Deposition of Silver on Gold Nanoclusters/triple Helix Glucan and Antifungal Activity. *Carbohydrate Polymers*, **238**, Article 116169. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116169>
- [32] Wu, J., Zhang, F. and Zhang, H. (2012) Facile Synthesis of Carboxymethyl Curdlan-Capped Silver Nanoparticles and Their Application in Sers. *Carbohydrate Polymers*, **90**, 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.033>
- [33] Hamouda, R.A., Makhariha, R.R., Qarabai, F.A.K., Shahabuddin, F.S., Saddiq, A.A., Bahammam, L.A., et al. (2023) Antibacterial Activities of Ag/Cellulose Nanocomposites Derived from Marine Environment Algae against Bacterial Tooth Decay. *Microorganisms*, **12**, Article 1. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12010001>
- [34] Abdel-Mohsen, A.M., Abdel-Rahman, R.M., Fouda, M.M.G., Vojtova, L., Uhrova, L., Hassan, A.F., et al. (2014) Preparation, Characterization and Cytotoxicity of Schizophyllan/Silver Nanoparticle Composite. *Carbohydrate Polymers*, **102**, 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.040>
- [35] Zhang, Y., Zhang, Y., Jian, M., Pei, Y., Liu, J., Zheng, X., et al. (2024) Sustained-Release, Antibacterial, Adhesive Gelatin Composite Hydrogel with AgNPs Double-Capped with Curdlan Derivatives. *International Journal of Biological Macromolecules*, **277**, Article 134222. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134222>
- [36] Nigoghossian, K., dos Santos, M.V., Barud, H.S., da Silva, R.R., Rocha, L.A., Caiut, J.M.A., et al. (2015) Orange Pectin Mediated Growth and Stability of Aqueous Gold and Silver Nanocolloids. *Applied Surface Science*, **341**, 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.02.140>
- [37] Wu, X.D., Lu, C.H., Zhou, Z.H., Yuan, G., Xiong, R. and Zhang, X. (2014) Green Synthesis and Formation Mechanism of Cellulose Nanocrystal-Supported Gold Nanoparticles with Enhanced Catalytic Performance. *Environmental Science: Nano*, **1**, 71-79. <https://doi.org/10.1039/c3en00066d>
- [38] Antunes, D.R., Forini, M.M.L.H., Coqueiro, Y.A., Pontes, M.S., Lima, P.H.C., Cavalcante, L.A.F., et al. (2024) Effect of Hyaluronic Acid-Stabilized Silver Nanoparticles on Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Seed Germination. *Chemosphere*, **364**, Article 143080. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143080>
- [39] Yan, Y.C., Li, G.F., Su, M.M., et al. (2024) *Scutellaria baicalensis* Polysaccharide-Mediated Green Synthesis of Smaller Silver Nanoparticles with Enhanced Antimicrobial and Antibiofilm Activity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 45289-45306. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c07770>
- [40] Deng, Y.F., Luo, S.W., Li, J.F., Bi, S., Wei, F., Xu, C., et al. (2024) In Situ Ultrafast Construction of Polysaccharide-Based Janus Hydrogel Films by Asymmetric Cross-Linking for On-Demand Sterilization. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **12**, 10905-10918. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c02961>
- [41] Wang, G.L., Yang, X., Chen, X., Huang, J., He, R., Zhang, R., et al. (2024) Construction and Antibacterial Activities of Walnut Green Husk Polysaccharide Based Silver Nanoparticles (AgNPs). *International Journal of Biological Macromolecules*, **276**, Article 133798. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133798>
- [42] Al-Muhanna, M.K.A., Hileuskaya, K.S., Kulikouskaya, V.I., Kraskouski, A.N. and Agabekov, V.E. (2015) Preparation of Stable Sols of Silver Nanoparticles in Aqueous Pectin Solutions and Properties of the Sols. *Colloid Journal*, **77**, 677-684. <https://doi.org/10.1134/s1061933x15060022>
- [43] Buccioli, F., Manzoli, M., Zhang, C., Di Nardo, G., Gilardi, G., Calcio Gaudino, E., et al. (2024) Ultrasound-Driven Deposition of Au and Ag Nanoparticles on Citrus Pectin: Preparation and Characterisation of Antimicrobial Composites. *ChemPlusChem*, **89**, e202300774. <https://doi.org/10.1002/cplu.202300774>
- [44] Hashmi, S.S., Ibrahim, M., Adnan, M., Ullah, A., Khan, M.N., Kamal, A., et al. (2024) Green Synthesis of Silver Nanoparticles from *Olea europaea* L. Extracted Polysaccharides, Characterization, and Its Assessment as an Antimicrobial Agent against Multiple Pathogenic Microbes. *Open Chemistry*, **22**, Article 20240016. <https://doi.org/10.1515/chem-2024-0016>
- [45] Xiao, S., Lao, Y., Liu, H., Li, D., Wei, Q., Ye, L., et al. (2024) A Nanocomposite Hydrogel Loaded with Ag Nanoparticles Reduced by Aloe Vera Polysaccharides as an Antimicrobial Multifunctional Sensor. *International Journal of Biological Macromolecules*, **267**, Article 131541. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131541>
- [46] Nagaraja, K. and Oh, T.H. (2024) Green Synthesis of Carbohydrate Polymer Based Gum Kondagogu/Hydroxypropyl Cellulose

- Blend Silver Nanocomposite Film and Their Antimicrobial Activity. *Journal of Polymers and the Environment*, **32**, 4525-4537. <https://doi.org/10.1007/s10924-024-03226-4>
- [47] Chen, X.S., Zhang, H.M., Yang, X., Zhang, W., Jiang, M., Wen, T., *et al.* (2021) Preparation and Application of Quaternized Chitosan- and AgNPs-Base Synergistic Antibacterial Hydrogel for Burn Wound Healing. *Molecules*, **26**, Article 4037. <https://doi.org/10.3390/molecules26134037>
- [48] Shao, Y., Wu, C., Wu, T., Yuan, C., Chen, S., Ding, T., *et al.* (2018) Green Synthesis of Sodium Alginate-Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, **111**, 1281-1292. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.012>
- [49] Li, S., Lu, X., Chen, Y. and Luo, J. (2026) Preparation of Boron Nitride/Epoxy Acrylate Hybrid Microcapsules by Photopolymerization and Its Application in Self-Lubricating Coatings. *Polymer*, **358**, Article 130205. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2026.130205>
- [50] 汤建新, 邓靖, 李文, 等. 纸质基材抗菌包装及性能研究[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(5): 6-8.
- [51] 胡灿. 油菜秆混杂纳米纤维素的制备及其在保鲜包装膜中的应用与研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南工业大学, 2021.
- [52] 薛文强, 于世平. 纳米银的抗菌机制及临床应用研究[J]. 中国微生态学杂志, 2022, 34(1): 117-120.