

生物法绿色合成纳米银及其抗菌应用进展

魏国涛¹, 张群利^{1,3*}, 崔琳琳²

(1. 东北林业大学 工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨商业大学 药学院, 黑龙江 哈尔滨 150076; 3. 森林持续经营与环境微生物工程黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 纳米银是研究和应用最广泛的纳米材料之一。近年来, 为避免纳米银合成过程中产生有毒副产物, 研究者在纳米银的绿色合成方面进行了诸多研究。首先, 综述了生物法绿色合成纳米银, 重点介绍了微生物法、植物提取物法; 接着, 介绍了纳米银抗菌性的机理和影响因素; 然后, 总结了纳米银的抗菌应用; 最后, 指出植物各组织和微生物细胞中富含的各类天然化合物均可完成纳米银的绿色合成, 不同生物源合成纳米银的潜力有待进一步发掘。纳米银尺寸和形状的可控化以及在使纳米银发挥抗菌作用的前提下减少迁移、减少副作用是下一步的研究重点, 对未来发展提出了建议。

关键词: 纳米材料; 银; 绿色合成; 抗菌性能; 抗菌应用

中图分类号: TB383.1; O614.122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2024) 01-0013-10

Progress on green synthesis and antibacterial applications of silver nanoparticles by biological synthesis method

WEI Guotao¹, ZHANG Qunli^{1,3*}, CUI Linlin²

(1. School of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. School of Pharmacy, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, Heilongjiang, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Forest Management & Environmental Microbiology in Heilongjiang Province, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Silver nanoparticles are one of the most widely studied and applied nanomaterials. In recent years, extensive researches have been conducted on green synthesis of silver nanoparticles to avoid toxic by-products in the synthesis process. Herein, the green biological synthesis methods, especially the microbial method and plant extract method, of silver nanoparticles were firstly reviewed. The mechanism and influencing factors of the nano-silver antibacterial performance were introduced, followed by summarization on their antimicrobial applications. Finally, it was pointed out that the green synthesis of silver nanoparticles could be achieved by all kinds of natural compounds rich in plant tissues and microbial cells, while the synthesis potential of silver nanoparticles from different biological sources needed to be further explored. The future development directions should be focused on the size and shape control of silver nanoparticles as well as the reduction of migration and side effects when silver nanoparticles exert their antibacterial effects.

Key words: nanomaterials; silver; green synthesis; antimicrobial properties; antimicrobial applications

纳米技术是 20 世纪 90 年代逐步发展起来的与多学科交叉的前沿科技领域。纳米材料具有独特的体积效应、表面效应和量子尺寸效应, 这导致材料的力学、磁性、光学乃至热力学等性能有了惊人的

改变。金 (Au)、银 (Ag)、铜 (Cu)、铁 (Fe)、锌 (Zn) 等金属纳米粒子表现出良好的抗菌活性, 相较于其他金属, 银纳米颗粒 (AgNPs) 拥有更好的经济效益和更优秀的抗菌性能, 从而更合乎工业发

收稿日期: 2023-02-01; 定用日期: 2023-04-07; DOI: 10.13550/j.jxhg.20230053

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2572019BL01)

作者简介: 魏国涛 (1998—), 男, 硕士生, E-mail: 1614496407@qq.com。联系人: 张群利 (1978—), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhangqunli@nefu.edu.cn。

展的需要^[1]。

AgNPs 的合成方法可以分为两大类：自上而下法和自下而上法^[2]（如表 1 所示）。自上而下法是指通过激光烧蚀、研磨、光刻等破坏性手段将银金属处理到纳米级，被认为是物理法^[3]。化学和生物法则被认为是自下而上的方法，是将银前体在原子、分子级别合成为 AgNPs。化学方法包括化学还原、电化学、光化学、微乳液等多种手段，被认为是方便、高效和易于后处理的方法，应用最为广泛，但这种方法会有有毒的副产物产生^[4]。虽然采用化学和物理方法可制备出稳定、纯净的纳米颗粒，但是成本高昂且对环境有潜在危险。生物法则利用微生物（如细菌、真菌等）和植物提取物合成 AgNPs 的绿色合成方法。生物法中的绿色植物合成 AgNPs，是一种生态友好、无毒且具有成本效益的方法，此方法合成得到的 AgNPs 稳定性好、粒径均匀且合成过程中携带的副产物无毒^[2]。由此可见，绿色合成 AgNPs 合乎工业发展要求，具有广阔的应用前景，是当今的研究热点。

表 1 AgNPs 的合成方法
Table 1 Methods for synthesizing AgNPs

自上而下	自下而上	
物理法	化学法	生物法
激光烧蚀	化学还原	植物提取物
研磨	电化学	微生物
光刻	光化学	
蒸汽-冷凝等	微乳液等	

1 生物法绿色合成 AgNPs

生物合成 AgNPs 是一种简单、直接的绿色合成方法，目前主要分为植物提取物法和微生物法。生物法绿色合成的 AgNPs 具有良好的生物相容性，这种生物相容性会随着使用的生物来源不同而发生变化^[5]。此方法中所需的还原剂均为生物基化合物（例如：黄酮、多糖、蛋白质、多酚和有机酸等），这些

物质在反应过程中覆盖于 AgNPs 表面，起着封端剂的作用^[6]。近年来，人们广泛研究了植物和微生物介导合成不同形状、尺寸和抗菌效果的 AgNPs。

1.1 微生物法

微生物法合成 AgNPs，是利用细菌、真菌等微生物介导的合成 AgNPs 的一种绿色方法（如图 1 所示）。微生物法合成 AgNPs 是在研究 AgNPs 抗菌性能的过程中发现的一种合成 AgNPs 的方法。AgNPs 对大多数微生物细胞具有高细胞毒性，但少数几种微生物细胞表现出银抗性，可以在富银环境中存活甚至可以在细胞壁处积累银，因此利用微生物收集矿石工业中的银的想法被提出^[7]。微生物法具有反应产物不易团聚、反应条件温和、有毒副产物较少等优点^[8]。但同时此方法也存在一些缺陷，从选取合适菌株的高昂经济成本到培养菌株所需的苛刻条件，再到合成 AgNPs 漫长的时间成本，同时整个过程中 pH、温度、浓度等变量因素带来的影响都限制此方法的发展和应^[9]。

细菌对重金属离子有良好的还原能力，拥有细胞内和细胞外两种合成 AgNPs 的途径^[10]，如图 2 所示。细菌可以在细胞壁上积累 Ag^+ ，将其吸收进细胞内由胞内生物物质还原为 Ag 原子^[11]，也可以通过细胞生物物质或者培养液上清液中的胞外酶合成 AgNPs^[12]。THOMAS 等^[13]以一种新型海洋假单胞菌进行了细胞内和细胞外两种方式的 AgNPs 合成，成功合成出粒径尺寸范围在 156~265 nm 之间的球形 AgNPs。细菌细胞内合成 AgNPs 是一个复杂的过程，需要超声处理或使用化学试剂破坏细胞壁来释放聚集的 AgNPs，后续还需要多种后处理来去除杂质^[14]。细菌细胞外合成 AgNPs 相对简单，通过利用细胞生物物质或培养物的上清液来实现胞外的合成过程，后续处理简单，更具经济效益，更适合大规模 AgNPs 的生产^[15]。

真菌同样是 AgNPs 生物合成的优良还原剂和稳定剂^[16]。真菌能分泌大量的酶和其他代谢产物，无论是在真菌细胞内，还是在细胞生物物质和培养液上清液中均表现出对 Ag^+ 的还原性^[17-18]。

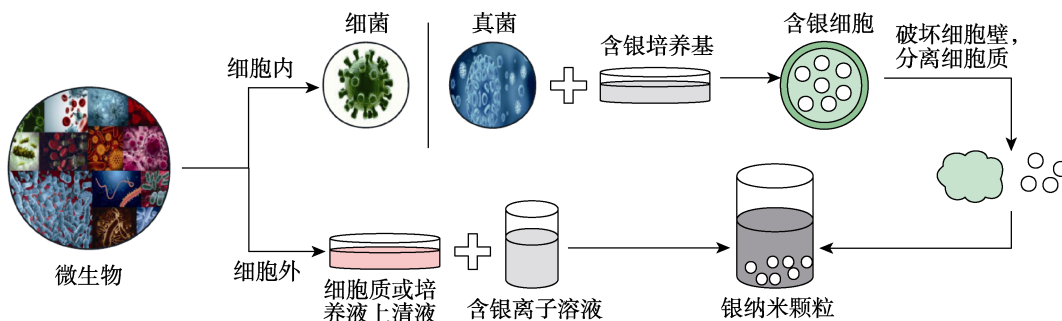
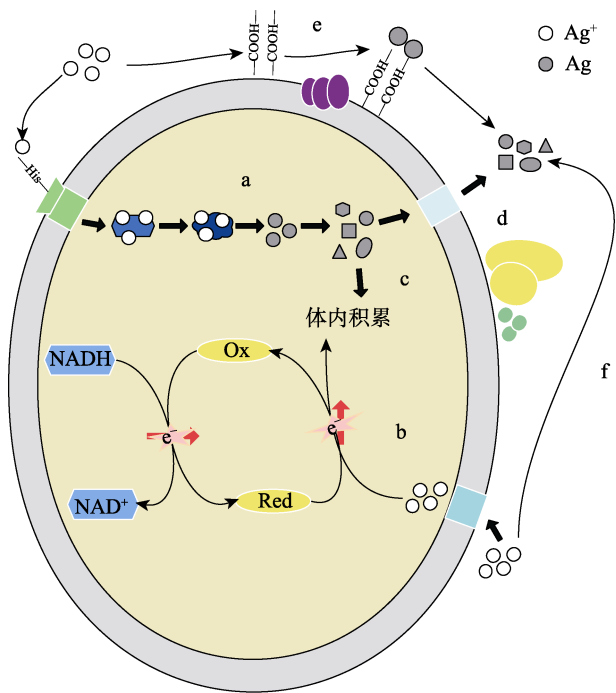


图 1 微生物介导的 AgNPs 绿色合成过程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of microbial-mediated green synthesis of AgNPs



a—细胞摄取银离子并激活银还原机制；b—涉及各种辅因子和酶的电子穿梭系统；c、d—AgNPs 的细胞内或细胞外定位；e—银离子与细胞壁成分之间的静电相互作用；f—通过胞外酶和溶液中释放的其他有机分子进行还原；NADH 是指还原型辅酶 I，是烟酰胺腺嘌呤二核苷酸的还原态；NAD⁺是指烟酰胺腺嘌呤二核苷酸，简称为氧化型辅酶 I；His 是一种必需氨基酸；Ox 代表氧化；Red 代表还原

图 2 微生物介导的 AgNPs 合成机制^[10]

Fig. 2 Mechanisms of microbial-mediated synthesis of AgNPs^[10]

与细菌相比，真菌具有更高的结合和生物累积能力、更容易的细胞内摄取和后处理等优势^[19]。真菌合成 AgNPs 主要涉及两个步骤，一是在真菌菌丝体的最外层表面上包埋 Ag⁺；二是真菌因为 Ag⁺的附着而进入一种自我保护状态，分泌胞外酶和代谢物，从而导致 Ag⁺还原为 Ag⁰，聚集形成 AgNPs^[20]。因此，真菌合成 AgNPs 的过程更易在细胞外进行。且真菌的细胞内合成同样需要物理或者化学方法破坏细胞来释放合成的 AgNPs，所以真菌细胞外合成 AgNPs 是更广泛的使用方法^[21]。

1.2 植物提取物法

利用植物提取物介导合成 AgNPs，是通过将植物洗净切碎，将其干燥或直接使用新鲜植物放入去离子水或醇中加热来制备提取物，之后将 Ag⁺前体

(通常为硝酸银)与提取物混合来合成 AgNPs^[22](如图 3 所示)。合成效果受 pH、温度、反应时间、植物提取物和 Ag⁺浓度等多个因素影响^[23]。植物提取物可来源于植物的花、茎、叶、根、果实等各个部分^[24]。这些植物组织中富含多种初级和次级代谢化合物(如多糖、蛋白质、黄酮、类黄酮、生物碱、多酚等)，在 AgNPs 的合成过程中充当还原剂和封端剂^[25](如图 4 所示)。此方法所需条件简单、对环境无任何危害、经济效益高且原料来源广泛，工业生产可行性很高。MAHENDRAN 等^[26]认为，利用植物介导合成 AgNPs 是一种适于大规模生产的，绿色且稳定的工艺，已成功通过芳香蕨叶提取物合成了粒径尺寸在 44 nm 左右的 AgNPs。RODRÍGUEZ-FÉLIX 等^[27]利用红花水提取物为原料绿色合成了 AgNPs，认为农业食品废弃物同样适用于 AgNPs 的绿色合成，既可减少环境污染，又可满足 AgNPs 的合成需求，是一种环境友好的可持续方法。利用植物提取物介导合成 AgNPs 具有良好的发展前景。近期部分植物提取物介导 AgNPs 合成的结果列于表 2。

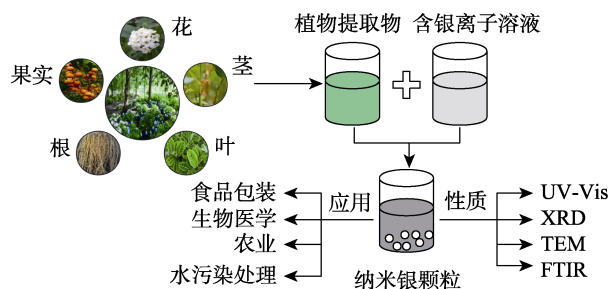


图 3 植物提取物介导的 AgNPs 绿色合成过程示意图
Fig. 3 Schematic diagram of plant extract-mediated green synthesis of AgNPs

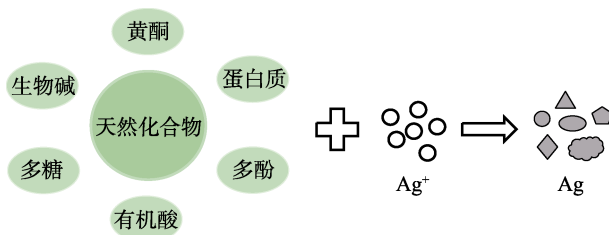


图 4 植物提取物介导的 AgNPs 绿色合成机制示意图
Fig. 4 Schematic diagram of plant extract-mediated green synthesis mechanism of AgNPs

表 2 植物提取物介导 AgNPs 的合成
Table 2 Plant extracts mediate AgNPs synthesis

植物种类	植物部位	粒径/nm	形状	检测出的代谢物	参考文献
橙子	果实	24	球形和椭圆形	有机酸、酚类、黄酮类	[28]
葡萄柚	果实	31	球形和椭圆形	有机酸、酚类、黄酮类	
番茄	果实	73	球形和椭圆形	有机酸、酚类、黄酮类	
籼稻	叶	58.9	球形	酚类、多糖、还原酶	[29]
黑穗醋栗	叶	61.14	球形	黄酮类、酚类	[30]

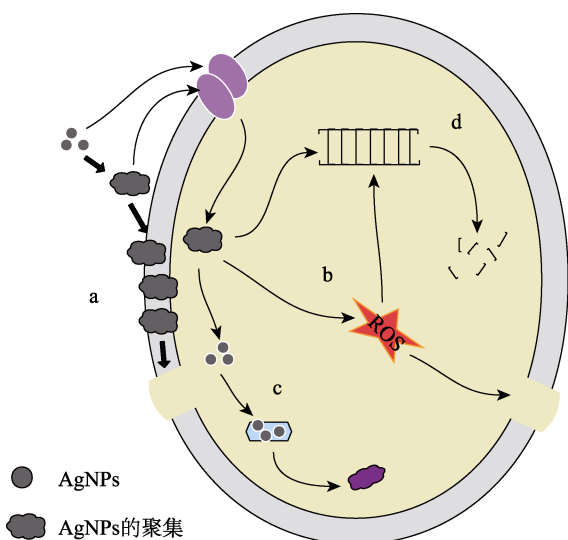
续表 2

植物种类	植物部位	粒径/nm	形状	检测出的代谢物	参考文献
大马士革蔷薇	花	8.6~49.7	球形	有机酸、醇类	[31]
黄钟花	花	20~50	球形、不规则	萜醌类	[32]
柑橘	果皮	12	球形	黄酮类、酚类	[33]
芒果	果皮	10~90	球形、六边形和不规则	黄酮类、酚类、有机酸	[34]
海枣	种子	14	球形	蛋白质、多糖、有机酸	[35]
豌豆	种子	30	球形	黄酮类、酚类	[36]
刺蒺藜	根	34.2	球形	皂苷、酚类、黄酮类、多糖	[37]
芦笋	根	16	球形	酰胺、醛类	[38]

2 AgNPs 抗菌性的机理和影响因素

2.1 AgNPs 抗菌机理

AgNPs 抗菌性能的研究一直是热门方向, 其抗菌机理同样是争论的热点, 是通过本身还是释放 Ag^+ 发挥作用, 通过哪种途径发挥作用, 哪一种起主要作用等均没有定论。AgNPs 抗菌机理主流的说法有以下几种 (如图 5 所示): (a) 破坏细胞膜。释放 Ag^+ 吸附于微生物细胞膜, 凭借其较大的比表面积, 逐步渗透并破坏细胞膜, 使细胞质外流导致微生物死亡^[39]。(b) 催化产生活性自由基。凭借 AgNPs 较强的催化活性, 促进微生物细胞内活性自由基的产生, 破坏细胞质, 抑制细菌生长, 从而达到抑菌效果^[40]。(c) 抑制蛋白质作用。与细胞内蛋白质中的磷和硫结合, 影响其活性, 导致细胞的正常功能受损, 实现抗菌效果^[41]。(d) 影响 DNA 合成。破坏 DNA 保护蛋白, 与 DNA 发生交联, 抑制 DNA 合成与复制, 使 DNA 断裂成小分子, 从根本上阻断微生物的繁殖, 达到抗菌目的^[42]。



a—破坏细胞膜; b—催化产生活性自由基 (ROS); c—抑制蛋白质作用; d—影响 DNA 合成

图 5 AgNPs 的抗菌机制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of antimicrobial mechanisms of AgNPs

2.2 影响因素

AgNPs 的抗菌效果受粒径、形状、浓度等多个因素影响。AgNPs 对微生物细胞破坏作用和细胞毒性主要依赖纳米颗粒的数量和比表面积, 粒径越小, 比表面积越大, 更易附着于微生物细胞的表面, 从而渗透进细胞内部, 进而表现出更好的抗菌作用^[43]。YUNUSOV 等^[44]研究不同粒径尺寸的 AgNPs 对棉织物抗菌性的增强效果, 研究发现, 与长 130~420 nm、宽 15~40 nm 的 AgNPs 晶须相比, 5~35 nm 的球形 AgNPs 即使在浓度低一个数量级的条件下, 仍表现出更强的抑菌活性, 证明 AgNPs 的尺寸越小, 抗菌效果越好。除粒径外, AgNPs 抗菌效果还与纳米颗粒形状有关, DEBASHISH 等^[45]对不同形状 AgNPs 抗菌效果的研究结果表明, 球形、棒状、三角形和六边形的 AgNPs 均具有良好的抗菌活性, 在相同浓度下, 球形 AgNPs 有更高的杀菌率, 尤其在质量浓度为 200 mg/L 时, 球形 AgNPs 杀菌率在 70% 以上, 而其他几种形状 AgNPs 的杀菌率均在 30% 以下。AgNPs 携带的表面电荷同样是影响其抗菌活性的重要因素, 由于细胞表面携带负电荷, 所以表面电荷为正的 AgNPs 比表面电荷为负的 AgNPs 更易附着于细胞表面, 而表面电荷为正的 AgNPs 比表面电荷为负的 AgNPs 在细胞内存在的时间更长, 所以表面电荷为正的 AgNPs 表现出的抗菌活性更好^[46]。AgNPs 的抗菌效果在实际作用时受以上多因素协同影响, 综合考量下, 粒径小、形状规则偏球形且表面电荷为正的 AgNPs 的抗菌活性更好。

在 AgNPs 合成过程中, 对粒径和形状有影响作用的主要是时间、温度等实验条件和分散剂、封端剂的添加。实验条件方面, 温度的影响尤为明显, 在不影响反应各组份活性的范围内, 高温要比低温更易形成小粒径、球形的 AgNPs^[4]。分散剂的使用是为了得到均匀、稳定、高纯度的 AgNPs, 具体效果与种类、用量均有联系。AgNPs 合成过程中常用的分散剂有水性聚合物、肽类以及一些小分子类分散剂等。其中, 小分子类分散剂效果更为明显, 可使 AgNPs 粒径更小^[23,47]。封端剂可以抑制 AgNPs

的生长, 从而得到更小粒径的 AgNPs, 但剂量需与银前体的量达到平衡, 过低效果不理想, 过高会有反效果, 使 AgNPs 粒径变大^[48]。常用的封端剂有多酚、聚合物、表面活性剂、羧酸衍生物等, 柠檬酸盐是最为常用的封端剂之一, 其作为封端剂的同时还起到调节 pH 和保护配体的作用, 保证了 AgNPs 的稳定和生长^[49]。分散剂和封端剂的种类则是影响 AgNPs 形状的主要因素, 使用的分散剂和封端剂不同, 得到 AgNPs 的形状也不同^[23]。ZENG 等^[50]以分子动力学模拟方法计算了酯磺酸盐、十二烷基硫醇和十六烷基三甲基铵等多种表面活性剂与银晶面的相互作用能, 并与实际 AgNPs 的制备进行比较, 确定金属纳米颗粒的形状可以通过使用不同的表面活性剂来控制。植物提取物中各类天然化合物充当分散剂和封端剂的作用, 由不同植物源提取物合成的 AgNPs 的粒径和形状也不相同 (表 2)。

2.3 AgNPs 的迁移

AgNPs 在诸多应用中均存在迁移现象, 细胞毒性是限制其发展的最主要因素。环境方面, AgNPs 在各类应用中的最终流向都是水环境和土壤, 其对原有生态环境中各级生物均有严重影响, 由底层的微生物层层向上, AgNPs 的富集和对细胞的影响层层加深, 影响整个生态系统, 是一种很严重的环境破坏^[51]。人类作为生物链的顶端, AgNPs 同样会在人类细胞中富集, AgNPs 进入人体后, 可分布于人体各器官, 其对微生物细胞的抑制作用同样适用于人体细胞, 会导致毒性作用和慢性疾病, 如过敏、哮喘、各种炎症、心血管疾病和癌症等^[52]。降低 AgNPs 迁移最有效的方法是对其进行包覆, 包覆技术可以通过银颗粒之间的静电稳定作用来提高银纳米颗粒的稳定性, 减少银纳米颗粒的团聚, 从而避免 AgNPs 对活细胞的影响^[53]。PARK 等^[54]探索裸露的 AgNPs 和不同有机物包覆的 AgNPs 对红摇蚊的生理毒性, 以裸露的 AgNPs 处理的幼虫死亡率在最高质量浓度 5 mg/L 下 <10%, 而由有机物包覆的 AgNPs 的致死率在不同质量浓度下均 <5%, 有机物包覆的 AgNPs 水中逸散出的离子的量和聚集程度比裸露的 AgNPs 均有所降低, 结果证明, 包覆可有效降低 AgNPs 的迁移和生物毒性。

3 AgNPs 的抗菌应用

AgNPs 抗菌性能十分优秀, 作为抗菌剂在食品包装、生物医学、农业、水污染治理等多个行业具有广泛的应用 (如图 6 所示)。但 AgNPs 在诸多具体应用中存在迁移现象, 其细胞毒性是限制应用方向的主要因素。

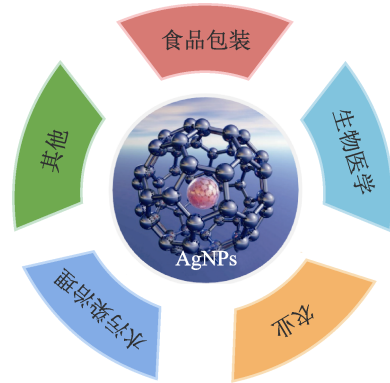


图 6 AgNPs 的应用

Fig. 6 Application of AgNPs

3.1 食品包装

防止食物腐败变质、阻止微生物滋长引起的疾病传播、全面延长食品保质期是食品包装行业重要的目标, 所以研究开发抗菌性能优异且安全可靠的活性食品包装是十分迫切的。食品包装行业中常见的方法是在包装中通过添加相关有机物 (有机酸、酶和聚合物等) 或者无机材料 (金属纳米颗粒或者金属氧化物) 来实现^[55]。金属或金属氧化物的纳米颗粒能承受更加严苛的加工条件且不会对食品本身感官属性产生影响, 在实际应用中更为流行^[56]。食品包装中纳米材料的应用大致分为两类: (1) 基于纳米复合材料的抗微生物包装, 可以保护食品免受食品腐败微生物的侵害, 并提高食品的货架期; (2) 将纳米材料加入聚合物基体中改进包装, 以提高其机械和阻隔性能^[57]。AgNPs 对食源性微生物有明显抑制和灭杀作用, 在食品包装中加入 AgNPs 可有效保证食品质量^[58]。AgNPs 具有细胞毒性, 在实际应用过程中 AgNPs 存在向食品迁移的现象, 据欧洲食品安全局 (EFSA) 规定包装中银迁移的允许限值, 水中为 0.05 mg/L, 食品中为 0.05 mg/kg。因此, 如何使 AgNPs 在发挥抗菌作用的同时, 降低迁移量, 保持在安全范围, 是之后相关研究的重点。近期 AgNPs 应用在食品包装领域的研究成果如表 3 所示。

3.2 生物医学

AgNPs 在生物医学领域的应用主要有药物输送、伤口敷料、癌症治疗、牙科技术和组织支架等^[64]。AgNPs 本身粒径较小且具有良好的生物相容性, 可穿透组织细胞并稳定滞留, 提高药物吸收能力, 在目标位置发挥作用, 是一种良好的药物输送载体^[65]。而 AgNPs 应用于伤口敷料能有效抑制伤口处的细菌滋生, 灭杀有害微生物^[66]。AgNPs 的比表面积较大, 含 AgNPs 敷料能促进伤口更快愈合^[67]。研究表明, AgNPs 以剂量依赖性方式显示出对癌细胞具有高选择性的有效抗癌活性^[68]。

表 3 AgNPs 在食品包装中的应用
Table 3 Application of AgNPs in food packaging

食品包装材料	性能改善	参考文献
含 AgNPs 可溶性大豆多糖基纳米复合膜	AgNPs 的加入提高了薄膜的热稳定性和紫外光阻隔性能, 此薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好的抑制活性	[59]
含 AgNPs 明胶基纳米复合膜	AgNPs 的加入改善了纳米复合膜的机械和阻隔性能, AgNPs 对食源性致病菌表现出显著的抗菌活性	[60]
AgNPs 修饰淀粉/聚乙烯醇/柠檬酸复合膜	AgNPs 的加入提高了复合膜的机械性能, 复合膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好的抑菌活性	[61]
AgNPs 改性聚乳酸薄膜	AgNPs 的加入提高了薄膜的力学性能及其对水蒸气和氧气的阻隔能力, 该膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌表现出良好的抑制作用	[62]
壳聚糖/精油/AgNPs 复合膜	AgNPs 的加入增加了复合膜的机械性能, 该复合膜对大肠杆菌、单核细胞增生李斯特菌、鼠伤寒沙门氏菌和尼日尔曲霉具有较强的抗菌活性	[63]

而植物介导合成的 AgNPs 可通过细胞周期停滞降低癌细胞的增殖率来显示其抗癌活性^[69]。在牙科技术中使用 AgNPs 主要是将其掺杂进牙科修复材料、牙科植入物和龋齿抑制溶液等口腔材料中, 减少口腔材料上的微生物定殖, 防止牙科手术期间和术后的感染^[70-72]。AgNPs 覆于组织支架中可有效灭杀细菌, 防止感染, 应用于支气管、骨组织、血管等多种人体组织支架^[73-74]。AgNPs 是在各种疾病的管理中研究和使用的最多的纳米颗粒, 在生物医学领域拥有广阔的应用前景^[75]。近期 AgNPs 应用在生物医学领域的研究成果如表 4 所示。

3.3 农业

纳米技术应用于农业可以提高植物耐压力, 使控释和靶向的农用化学品递送 DNA 或 RNA, 促进植物转基因, 引发种子发芽和早期检测^[80]。具体应用有纳米肥料、纳米除草剂、纳米农药、智能纳米

输送系统等^[81]。在土壤环境中, 纳米材料能有效地吸附在矿物表面, 其在土壤中迁移的延迟可避免养分流失^[82]。纳米结构可以保证活性物质更稳定地长期存在, 对害虫、病菌等有更长时间的灭杀和抑制作用, 因此纳米肥料、除草剂、农药等比常规种类更稳定、高效^[83]。掺有 AgNPs 的肥料可集肥效、杀菌和生长调节于一体, 高效利用肥料, 降低环境危害^[84]。传感器上的电极沉积 AgNPs 可以更灵敏地检测除草剂是否发挥作用, 及时对其进行脱氯, 有效减少除草剂对人体健康和生态环境的不利影响^[85]。但 AgNPs 细胞毒性仍是不可忽视的弊端, 在各类应用中 AgNPs 最终大多都会流向土壤, 其在灭杀有害微生物的同时也会危及有益菌群^[51]。纳米技术应用于农业仍在起步阶段, 多种理论还未得到验证, 需要更多的实践研究来支撑。近期 AgNPs 应用在农业领域的研究成果如表 5 所示。

表 4 AgNPs 在生物医学中的应用
Table 4 Application of AgNPs in biomedicine

应用方向	具体作用	参考文献
药物输送	还原氧化石墨烯负载 AgNPs/聚乙烯醇型抗菌水凝胶, 具有优秀的抗菌性能, 生物相容性好, 拥有分布均匀的孔洞, 有负载药物的潜力	[76]
伤口敷料	羧甲基壳聚糖/聚乙烯醇 AgNPs 抗菌水凝胶, 具有优异抗菌性能和良好的细胞相容性, 有作为伤口敷料的潜力	[77]
癌症治疗	AgNPs 介孔二氧化硅纳米颗粒, 与抗肿瘤剂和抗菌剂一起或单独用作细胞毒剂, 可以克服常规治疗的障碍, 并通过提供更好的靶向、药物递送和释放而在癌症和感染的联合治疗中发挥多功能作用	[78]
牙科技术	AgNPs 掺杂纳米石墨烯复合牙本质黏结剂, 显示出优化的抗生物膜特性, 且不影响标准黏附特性	[79]
组织支架	聚己内酯-顺铂-AgNPs 纤维薄膜包覆气道支架, 抑制了人胚胎肺成纤维细胞的生长, 对金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌和白色念珠菌表现出优异的抗菌活性, 成功起到抗炎和抗增生作用	[74]

表 5 AgNPs 在农业中的应用
Table 5 Application of AgNPs in agriculture

应用方向	具体作用	参考文献
纳米农药	AgNPs 和纳米氧化铁处理对甜瓜白粉病具有一定的防治效果	[86]
纳米农药	用壳寡糖和壳寡糖席夫碱分别合成了壳寡糖-AgNPs 和壳寡糖席夫碱-AgNPs, 能够较好地诱导烟草对烟草花叶病毒产生抗性, 提高烟草免疫力, 从而减轻烟草花叶病毒对烟草的侵害	[87]
杀虫剂	使用昆虫病原菌苏云金芽孢杆菌生物合成 AgNPs, 对卷心菜蚜虫和黑蛾表现出显著的杀幼虫活性	[88]
杀虫剂	以海藻提取物绿色合成 AgNPs, 表现出良好的杀幼虫和杀成虫活性	[89]
智能纳米系统	利用喷墨打印技术制备了基于导电纳米银材料的柔性温度传感芯片, 可快速准确地获取待测对象的温度变化, 具有良好的农业应用前景	[90]

3.4 水污染治理

纯净可靠的水资源是人类生存与发展的重要前提, 近年来由水污染引起的环境和健康问题不断增加, 治理水污染问题迫在眉睫。与传统水处理方法相比, 纳米技术是一种综合效益很高的方法, 正被越来越多地应用于水污染治理中。AgNPs 被认为是应用于水污染处理的最佳纳米材料之一^[91]。AgNPs 无论作为单独的纳米颗粒 (NPs) 使用或负载于其他材料 (纳米复合材料) 使用, 在水污染处理中均有良好的表现^[92-93]。水污染引起的疾病主要由水中的病原细菌等微生物引起, 优异的抗菌性能且在水

环境中良好的分散性使 AgNPs 能很好地起到灭杀病原菌的作用^[94]。工业、农业以及生活废水中含有多有机化合物, 不经处理对环境和人体健康都有极大危害, AgNPs 可通过吸附、催化降解、与其他材料复合使用等方法处理水中污染物^[95]。由植物提取物介导绿色合成的 AgNPs 是环境友好的, 近年来与其相关的水污染处理研究不断增加。但 AgNPs 在治理水污染的同时, 可能会对环境中原有的生物有一定危害, 如何使 AgNPs 更好地吸附在应用材料中, 更合理地使用 AgNPs 是之后相关研究的重点。近期 AgNPs 应用在水污染治理领域的研究成果如表 6 所示。

表 6 AgNPs 在水污染治理中的应用
Table 6 Application of AgNPs in water pollution control

应用方向	具体作用	参考文献
污水处理	聚乙烯醇/生物炭/AgNPs 多孔凝胶, 具有高效、持久的杀菌性能和可重复使用性, 模拟污水处理实验中也表现出较好的性能	[93]
污水处理	AgNPs 改性活性炭, 有效的固相萃取剂, 用于从水介质中吸附染料	[96]
污水处理	AgNPs 装饰三维多孔木材, 对多种染料的分解表现出良好的催化活性, 具有很好的可重复使用性	[89]
水消毒剂	AgNPs 对不同自来水中微小隐孢子虫的数量和存活率均有明显影响	[97]
水消毒剂	AgNPs 和氧化锌纳米粒子协同作用使杀菌作用比单独使用显著增强	[98]

3.5 其他应用

AgNPs 还可应用于纺织工业, 用于制备内部织物具有纳米颗粒的银纳米复合纤维^[99]。郭锐等^[100]以茜草根提取物绿色合成的 AgNPs 对羊毛织物进行功能整理, 得到的羊毛织物具有良好的抗菌性能, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌有明显的抑制作用。秦圆等^[101]使用金银花提取物为还原剂制备了纳米氧化锌和 AgNPs, 以浸轧法将纳米粒子负载到棉织物上, 二者配合使用赋予了棉织物良好的抗紫外和抗菌性能, 紫外防护系数数值达到了 41.06, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率均达到 95% 以上。

在涂料中添加 AgNPs 可有效抑制细菌、真菌等微生物的病原性危害, 减少交叉感染, 从而最大程度减少施加此类涂料表面上的染色和材料降解^[102]。LI 等^[103]采用空气喷涂法在聚合物薄膜上制备了茂金属聚乙烯/纳米银复合涂层, 此复合涂层对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抑菌率均在 99.9% 以上, 在医疗器械和软包装薄膜等领域具有潜在的应用前景。

4 结束语与展望

生物法绿色合成 AgNPs 是一种成本效益高、生态友好、适于大规模生产的方法, 是化学和物理合成方法的一大进步。综合比较几种生物源合成 AgNPs 的方法, 植物提取物介导合成的 AgNPs 综合效益最高, 适于工业化生产。优秀的抗菌性能使 AgNPs 在食品包装、生物医学、农业、水污染治理

等行业中均有良好的应用前景。中国此领域的相关研究多关注于农业废弃物的利用, 但具体关于 AgNPs 抗菌效果的尺寸与形状控制的相关研究与国际学者相比是不足的。在使用需求不断细化、应用条件愈加严苛的当下, AgNPs 的形貌可控化以及如何在保证发挥抗菌作用的前提下减少迁移量是相关研究的下一步重点。生物法绿色合成 AgNPs 中影响 AgNPs 形貌的最主要因素是生物的种类, 其中植物提取物介导合成的 AgNPs 形貌还与使用的植物部位有关。生物法绿色合成 AgNPs 应聚焦于更多的生物种类, 以及相同种类不同部位的 AgNPs 合成效果, 并对其差异化原因进行更深层次的研究。

参考文献:

- [1] MISHRA M, CHAUHAN P. Evaluation of antibacterial behaviour of silver nanoparticles[J]. International Journal of Advanced Research, 2018, 6(3): 1062-1067.
- [2] MUSTAPHA T, MISNI N, ITHNIN N R, et al. A review on plants and microorganisms mediated synthesis of silver nanoparticles, role of plants metabolites and applications[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(2): 674-691.
- [3] BEYENE H D, WERKNEH A A, BEZABH H K, et al. Synthesis paradigm and applications of silver nanoparticles (AgNPs), a review[J]. Sustainable Materials & Technologies, 2017, 13: 18-23.
- [4] YAQOUB A A, UMAR K, IBRAHIM M N M. Silver nanoparticles: Various methods of synthesis, size affecting factors and their potential applications-A review[J]. Applied Nanoscience, 2020, 10: 1369-1378.
- [5] ABDALLAH S A, TOKA A H, NOURAN R, et al. Green synthesis of silver nanoparticles using *Ocimumbasilicum* L. and *Hibiscus sabdariffa* L. extracts and their antibacterial activity in combination

- with *Phage zcse6* and sensing properties[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2022, 32(6): 1951-1965.
- [6] ZHANG Q S (张青山), YUE X P (岳秀萍). Research progress on biological preparation and application of silver nanoparticles[J]. *Materials Reports (材料导报)*, 2014, 28(1): 53-58.
- [7] POOLEY F D. Bacteria accumulate silver during leaching of sulphide ore minerals[J]. *Nature*, 1982, 296(5858): 642-643.
- [8] KANNAN B N, NATARAJAN S. Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, 156(1/2): 1-13.
- [9] RAFIQUE M, SADAF I, RAFIQUE M S, *et al.* A review on green synthesis of silver nanoparticles and their applications[J]. *Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology*, 2017, 45(7): 1272-1291.
- [10] SINGH R, SHEDBALKAR U U, WADHWANI S A, *et al.* Bacteriogenic silver nanoparticles: Synthesis, mechanism, and applications[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99: 4579-4593.
- [11] POOLEY F D. Bacteria accumulate silver during leaching of sulphide ore minerals[J]. *Nature*, 1982, 296(5858): 642-643.
- [12] SHIVAJI S, MADHU S, SHASHI S. Extracellular synthesis of antibacterial silver nanoparticles using psychrophilic bacteria[J]. *Process Biochemistry*, 2011, 46(9): 1800-1807.
- [13] THOMAS R, VISWAN A, RADHAKRISHNAN E K. Evaluation of antibacterial activity of silver nanoparticles synthesized by a novel strain of marine *Pseudomonas* sp[J]. *Nano Biomedicine and Engineering*, 2012, 4(3): 139-143.
- [14] KALISHWARALAL K, RAMKUMARPANDIAN S B, DEEPAK V, *et al.* Biosynthesis of silver nanocrystals by *Bacillus licheniformis*[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 65(1): 150-153.
- [15] ANANDA C B, RICHA S, PRIYANKA W, *et al.* Synthesis, optimization, and characterization of silver nanoparticles from *Acinetobacter calcoaceticus* and their enhanced antibacterial activity when combined with antibiotics[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2013, 8: 4277-4290.
- [16] QIAO Z P (乔自鹏), WANG Q Z (王奇志), YANG D M (杨道茂), *et al.* Research progress of fungus-mediated nanosilver biosynthesis [J]. *Biotechnology Bulletin (生物技术通报)*, 2021, 37(3): 185-197.
- [17] GHANY T, RHAMAN A, SHATER M, *et al.* Silver nanoparticles biosynthesis by *Fusarium moniliforme* and their antimicrobial activity against some food-borne bacteria[J]. *Mycopath*, 2013, 11(1): 1-7.
- [18] KHAN N, JAMEEL N, REHMAN S. Optimizing physioculture conditions for the synthesis of silver nanoparticles from *Aspergillus niger*[J]. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 2016, 7(5): 7-10.
- [19] KIM Y, LEE B, ROH Y. Microbial synthesis of silver nanoparticles[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, 13(6): 3897-3900.
- [20] MUKHERJEE P, AHMAD A, MANDAL D, *et al.* Fungus-mediated synthesis of silver nanoparticles and their immobilization in the mycelial matrix: A novel biological approach to nanoparticle synthesis[J]. *Nano Letters*, 2001, 1(10): 515-519.
- [21] RAJPUT S, WEREZUK R, LANGE R M, *et al.* Fungal isolate optimized for biogenesis of silver nanoparticles with enhanced colloidal stability[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2016, 32(34): 8688-8697.
- [22] ARSENE M M J, VIKTOROVNA P, ALLA M V, *et al.* Optimization of ethanolic extraction of enantia chloranta bark, phytochemical composition, green synthesis of silver nanoparticles, and antimicrobial activity[J]. *Fermentation*, 2022, 8(10): 530-560.
- [23] RESTREPO C V, VILLA C C. Synthesis of silver nanoparticles, influence of capping agents, and dependence on size and shape: A review[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2021, 15: 100428.
- [24] VANLALVENI C, LALLIANRAWNA S, BISWAS A, *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles using plant extracts and their antimicrobial activities: A review of recent literature[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(5): 2804-2837.
- [25] SHAKEEL A, MUDASIR A, BABU L S, *et al.* A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise[J]. *Journal of Advanced Research*, 2016, 7(1): 17-28.
- [26] MAHENDRAN V, GURUSAMY A. Coleus aromaticus leaf extract mediated synthesis of silver nanoparticles and its bactericidal activity[J]. *Applied Nanoscience*, 2013, 3(3): 217-223.
- [27] RODRÍGUEZ-FÉLIX F, LÓPEZ-COTA A G, MORENO-VÁSQUEZ M J, *et al.* Sustainable-green synthesis of silver nanoparticles using safflower (*Carthamus tinctorius* L.) waste extract and its antibacterial activity[J]. *Heliyon*, 2021, 7(4): e06923.
- [28] WENG X L, YANG K R, OWENS G, *et al.* Biosynthesis of silver nanoparticles using three different fruit extracts: Characterization, formation mechanism and estrogen removal[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115224.
- [29] ALQAHTANI O, MIRAJKAR K K, KUMAR K R A, *et al.* *In vitro* antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticles using azadirachta indica aqueous leaf extract against mdr pathogens[J]. *Molecules*, 2022, 27(21): 7244-7253.
- [30] HOVHANNISYAN Z, TIMOTINA M, MANOYAN J, *et al.* *Ribes nigrum* L. extract-mediated green synthesis and antibacterial action mechanisms of silver nanoparticles[J]. *Antibiotics*, 2022, 11(10): 1415-1432.
- [31] PERON S, HADI F, AZARBANI F, *et al.* Antimicrobial, antioxidant, anti-glycation and toxicity studies on silver nanoparticles synthesized using *Rosa damascena* flower extract[J]. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2021, 14(3): 519-533.
- [32] KAVITHA K R, VIJAYALAKSHMI S, MURALI B B. Synthesis and characterization of silver nano particles using *Tecoma stans* flower extract[J]. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2019, 8(4): 5624-5629.
- [33] MOGOLE L, OMWOYO W, VILJOEN E, *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles using aqueous extract of *Citrus sinensis* peels and evaluation of their antibacterial efficacy[J]. *Green Processing and Synthesis*, 2021, 10(1): 851-859.
- [34] XING Y G, LIAO X M, LIU X C, *et al.* Characterization and antimicrobial activity of silver nanoparticles synthesized with the peel extract of mango[J]. *Materials*, 2021, 14(19): 5878-5891.
- [35] FARSHORI N N, AL-OQAIL M M, AL-SHEDDI E S, *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles using *Phoenix dactylifera* seed extract and its anticancer effect against human lung adenocarcinoma cells[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2022, 70: 103260.
- [36] ALARJANI K M, HUESSIEN D, RASHEED R A, *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles by *Pisum sativum* L. (pea) pod against multidrug resistant foodborne pathogens[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2022, 34(3): 101897.
- [37] SHARIFIRAD M, POHL P, EPIFANO F, *et al.* Green synthesis of silver nanoparticles using *Astragalus tribuloides Delile*. root extract: Characterization, antioxidant, antibacterial, and anti-inflammatory activities[J]. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 2020, 10(12): 2383-2400.
- [38] TRIPATHI D, MODI A, SMITA S S, *et al.* Biomedical potential of green synthesized silver nanoparticles from root extract of *Asparagus officinalis*[J]. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 2022, 31(1): 213-218.
- [39] CATALINA M, ERIC M V H. A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2010, 12(5): 1531-1551.
- [40] KAVIYA S, SANTHANALAKSHMI J, VISWANATHAN B, *et al.*

- Biosynthesis of silver nanoparticles using citrus sinensis peel extract and its antibacterial activity[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2011, 79(3): 594-598.
- [41] YANG X Y, GONDIKAS A P, MARINAKOS S M, *et al.* Mechanism of silver nanoparticle toxicity is dependent on dissolved silver and surface coating in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 1119-1127.
- [42] POORNIMA D, ISHITA M, UDAY K S, *et al.* Perturbation of cellular mechanistic system by silver nanoparticle toxicity: Cytotoxic, genotoxic and epigenetic potentials[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 221: 4-21.
- [43] SHAHNAZ B, AMANDA H. Toxicological considerations, toxicity assessment, and risk management of inhaled nanoparticles[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17(6): 929-946.
- [44] YUNUSOV K H E, MULLAJONOVA S V, SARYMSAKOV A A, *et al.* Antibacterial effect of cotton fabric treated with silver nanoparticles of different sizes and shapes[J]. *International Journal of Nanomaterials, Nanotechnology and Nanomedicine*, 2019, 5(2): 16-23.
- [45] DEBASHISH A, PIYUSH P, BIDHAN M. A comparative study on the antibacterial activity of different shaped silver nanoparticles[J]. *Chemical Papers*, 2021, 75(9): 4907-4915.
- [46] ZHANG X F, LIU Z G, SHEN W, *et al.* Silver nanoparticles: synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17(9): 1534-1568.
- [47] NATSUKI J, NATSUKI T, ABE T. Low molecular weight compounds as effective dispersing agents in the formation of colloidal silver nanoparticles[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2013, 15: 1-8.
- [48] SUN Y G, XIA Y N. Shape-controlled synthesis of gold and silver nanoparticles[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2176-2179.
- [49] HUSANU E, CHIAPPE C, BERNARDINI A, *et al.* Synthesis of colloidal Ag nanoparticles with citrate based ionic liquids as reducing and capping agents[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 538: 506-512.
- [50] ZENG Q H, JIANG X C, YU A B, *et al.* Growth mechanisms of silver nanoparticles: A molecular dynamics study[J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(3): 035708.
- [51] GHOBASHY M M, ELKODOUS M A, SHABAKA SOHA H, *et al.* An overview of methods for production and detection of silver nanoparticles, with emphasis on their fate and toxicological effects on human, soil, and aquatic environment[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2021, 10(1): 954-977.
- [52] PRIMOŽIČ M, KNEZ Ž, LEITGEB M. (Bio) Nanotechnology in food science-food packaging[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(2): 292-321.
- [53] FAHMY H M, MOSLEH A M, ABD ELGHANY A, *et al.* Coated silver nanoparticles: Synthesis, cytotoxicity, and optical properties[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(35): 20118-20136.
- [54] PARK S Y, CHUNG J, COLMAN B P, *et al.* Ecotoxicity of bare and coated silver nanoparticles in the aquatic midge, *Chironomus riparius*[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(9): 2023-2032.
- [55] KRAŚNIEWSKA K, GALUS S, GNIEWOSZ M. Biopolymers-based materials containing silver nanoparticles as active packaging for food applications-A review[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(3): 698-716.
- [56] ISTIQOLA A, SYAFIUDDIN A. A review of silver nanoparticles in food packaging technologies: Regulation, methods, properties, migration, and future challenges[J]. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 2020, 67(11): 1942-1956.
- [57] AHARI H, ANVAR A A, ATAEE M, *et al.* Employing nanosilver, nanocopper, and nanoclays in food packaging production: A systematic review[J]. *Coatings*, 2021, 11(5): 509-538.
- [58] ZHAO X X, WANG K, AI C Y, *et al.* Improvement of antifungal and antibacterial activities of food packages using silver nanoparticles synthesized by iturin A[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 28: 100669.
- [59] LIU J, MA Z X, LIU Y C, *et al.* Soluble soybean polysaccharide films containing *in-situ* generated silver nanoparticles for antibacterial food packaging applications[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 31: 100800.
- [60] KOWSALYA E, MOSACHRISTAS K, BALASHANMUGAM P, *et al.* Sustainable use of biowaste for synthesis of silver nanoparticles and its incorporation into gelatin-based nanocomposite films for antimicrobial food packaging applications[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(3): e13641.
- [61] OUNKAEW A, JANAUM N, KASEMSIRI P, *et al.* Synergistic effect of starch/polyvinyl alcohol/citric acid films decorated with *in-situ* green-synthesized nano silver on bioactive packaging films[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(6): 106793.
- [62] CHENG J, LIN X T, WU X L, *et al.* Preparation of a multifunctional silver nanoparticles polylactic acid food packaging film using mango peel extract[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 188: 678-688.
- [63] SHANKAR S, KHODAEI D, LACROIX M. Effect of chitosan/essential oils/silver nanoparticles composite films packaging and gamma irradiation on shelf life of strawberries[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106750.
- [64] SIMON S, SIBUYI N R S, FADAKA A O, *et al.* Biomedical applications of plant extract-synthesized silver nanoparticles[J]. *Biomedicines*, 2022, 10(11): 2792.
- [65] LI S Y, WANG H D, SHAN Y P. The mechanism of nano-drug delivery[J]. *Current Pharmacology Reports*, 2019, 5(33): 410-420.
- [66] ZHANG K H, LI Y R, HE J R, *et al.* Therapeutic effect of epidermal growth factor combined with nano silver dressing on diabetic foot patients[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, 12: 627098.
- [67] LIN H J, BOLATAI A, WU N. Application progress of nano silver dressing in the treatment of diabetic foot[J]. *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy*, 2021, 14: 4145-4154.
- [68] JABEEN S, QURESHI R, MUNAZIR M, *et al.* Application of green synthesized silver nanoparticles in cancer treatment-A critical review[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(9): 092001.
- [69] KAROLINA N, EWELINA Z, MAREK W R, *et al.* Metal nanoparticles in dermatology and cosmetology: Interactions with human skin cells[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2017, 295: 38-51.
- [70] TALAPKO J, MATIJEVIĆ T, JUZBAŠIĆ M, *et al.* Antibacterial activity of silver and its application in dentistry, cardiology and dermatology[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(9): 1400-1413.
- [71] CHANDANI D, SIDDHARTH D. Silver nanoparticles in dental cure scenario and confronts[J]. *Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2018, 2(2): 64-69.
- [72] RANJEET A B, TANAY V C, CHAITANYA P J, *et al.* An overview of application of silver nanoparticles for biomaterials in dentistry[J]. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications*, 2018, 91: 881-898.
- [73] GAMZE M, LALE T, EMRE B. Biocompatibility of nanosilver-coated orthodontic brackets: An *in vivo* study[J]. *Progress in Orthodontics*, 2016, 17(1): 1-8.
- [74] LI Z N, TIAN C, JIAO D C, *et al.* Synergistic effects of silver nanoparticles and cisplatin in combating inflammation and hyperplasia of airway stents[J]. *Bioactive Materials*, 2022, 9: 266-280.
- [75] ALMATROUDI A. Silver nanoparticles: Synthesis, characterisation and biomedical applications[J]. *Open Life Sciences*, 2020, 15(1): 819-839.
- [76] XU Y Q (许雨琴), ZHANG Y Q (张毅倩), YANG J J (杨建军), *et al.* Preparation and properties of reduced graphene oxide-supported nanosilver/polyvinyl alcohol antibacterial hydrogel[J]. *Fine Chemicals*

- (精细化工), 2023, 40(1): 69-74, 86.
- [77] CHEN G (陈功), XIANG Z Y (项舟洋), SONG T (宋涛). Preparation of nanosilver antibacterial hydrogel by one-pot method of dialdehyde xylan[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2022, 39(10): 2027-2034.
- [78] HE X, CHEN F M, CHANG Z M, *et al.* Silver mesoporous silica nanoparticles: Fabrication to combination therapies for cancer and infection[J]. The Chemical Record, 2022, 22(4): e202100287.
- [79] AKRAM Z, AATI S, CLODE P, *et al.* Formulation of nano-graphene doped with nano silver modified dentin bonding agents with enhanced interfacial stability and antibiofilm properties[J]. Dental Materials, 2022, 38(2): 347-362.
- [80] HONG H W, ZHAO H L. Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performance[J]. The Crop Journal, 2022, 10(01): 1-12.
- [81] GHASEMNEZHAD A, GHORBANPOUR M, SOHRABI O, *et al.* A general overview on application of nanoparticles in agriculture and plant science[J]. Comprehensive Analytical Chemistry, 2019, 87: 85-110.
- [82] JOO S H, AL-ABED S R, LUXTON T. Influence of carboxymethyl cellulose for the transport of titanium dioxide nanoparticles in clean silica and mineral-coated sands[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(13): 4954-4959.
- [83] SYED B, TATIANA V, SVETLANA V P, *et al.* Nanoagroparticles emerging trends and future prospect in modern agriculture system[J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2017, 53: 10-17.
- [84] FOUADA M M G, ABDELSALAM N R, EL-NAGGAR M E, *et al.* Impact of high throughput green synthesized silver nanoparticles on agronomic traits of onion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 1304-1317.
- [85] FILIP J, VINTER S, SKACELIK P, *et al.* Silver integrated with carbonaceous 2D nanomaterials as an electrocatalyst for reductive dechlorination of chloroacetanilide herbicide[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(3): 037504.
- [86] DONG Y X (董玉昕), ZHENG Z (郑植), WANG W K (王文康), *et al.* Study on the prevention and control of powdery mildew of melon by nanosilver and nano-iron oxide[J]. China Agricultural Science and Technology Review (中国农业科技导报), 2022, 24(11): 137-147.
- [87] WANG Y (王莹), SUN C H (孙翠红), XU C L (徐翠莲), *et al.* Resistance and mechanism of nanosilver to tobacco mosaic virus (TMV)[J]. Tobacco Science and Technology (烟草科技), 2016, 49(1): 22-30.
- [88] SAYED A M M, KIM S, BEHLE R W. Characterisation of silver nanoparticles synthesised by *Bacillus thuringiensis* as a nanobiopesticide for insect pest control[J]. Biocontrol Science and Technology, 2017, 27(11): 1308-1326.
- [89] TRIVEDI S, ALSHEHRI M A, PANNEERSELVAM C, *et al.* Insecticidal, antibacterial and dye adsorbent properties of sargassum muticum decorated nano-silver particles[J]. South African Journal of Botany, 2021, 139: 432-441.
- [90] LU X (路道), LI H H (李浩臻), LIU G (刘刚), *et al.* Design and experiment of nano-silver flexible agricultural temperature sensing chip[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报), 2021, 37(10): 198-205.
- [91] FERNANDA D G, MOHAMED F A, DANIEL C W, *et al.* Nanotechnology for environmental remediation: Materials and applications[J]. Molecules, 2018, 23(7): 1760-1783.
- [92] ISMAIL A O, AJAYI S O, ALAUSA A O, *et al.* Antimicrobial and antibiofilm activities of green synthesized silver nanoparticles for water treatment[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1734(1): 012043.
- [93] ZHAO H, LI X X, ZHANG L, *et al.* Preparation and bacteriostatic research of porous polyvinyl alcohol/biochar/nanosilver polymer gel for drinking water treatment[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 12205.
- [94] ESLAM I E, MOUSTAFA M Z, MAGED E. Optical and electrochemical studies of silver nanoparticles biosynthesized by haplophyllum tuberculatum extract and their antibacterial activity in wastewater treatment[J]. Materials Research Express, 2019, 6(10): 105016.
- [95] RAGHUNATH D, VENKATA SATYANARAYANA S, KAMDEM BHAUMIK H, *et al.* Silver decorated magnetic nanocomposite (Fe₃O₄@PPy-MAA/Ag) as highly active catalyst towards reduction of 4-nitrophenol and toxic organic dyes[J]. Applied Catalysis. B, Environmental, 2019, 244: 546-558.
- [96] EWAISS H A. Adsorption of malachite green cationic dye from aqueous media by activated carbon modified by nanosilver[J]. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2022, 96(S1): S113-S121.
- [97] HASSAN D, FARGHALI M, ELDEEK H, *et al.* Antiprotozoal activity of silver nanoparticles against *Cryptosporidium parvum* oocysts: New insights on their feasibility as a water disinfectant[J]. Journal of Microbiological Methods, 2019, 165: 105698.
- [98] VENIS R A, BASU O D. Silver and zinc oxide nanoparticle disinfection in water treatment applications: Synergy and water quality influences[J]. H₂Open Journal, 2021, 4(1): 114-128.
- [99] ILIEȘ A, HODOR N, PANTEA E, *et al.* Antibacterial effect of eco-friendly silver nanoparticles and traditional techniques on aged heritage textile, investigated by dark-field microscopy[J]. Coatings, 2022, 12(11): 1688-1703.
- [100] GUO R (郭锐), ZHANG Z G (张智刚), LIU H H (刘慧宏), *et al.* Synthesis of Rubi root extract nanosilver and its application in wool fabric[J]. Wool Science and Technology (毛纺科技), 2021, 49(11): 28-32.
- [101] QIN Y (秦圆), LI H (李红), ZHU J L (朱炯霖), *et al.* Multifunctional finishing of cotton fabrics by nano zinc oxide and nano silver[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2021, 38(7): 1386-1392, 1458.
- [102] MANSOUR R, ELSHAFEI A. Antimicrobial effect of additive silver nanoparticles to paints for reducing the risk of cross-contamination [J]. Asian Journal of Advanced Research and Reports, 2021, 15(2): 1-12.
- [103] LI L, WANG Y L, ZHU Y C. Facile preparation and good performance of nano-ag/metallocene polyethylene antibacterial coatings[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2018, 15: 593-602.