

金属纳米粒子的微生物合成及其环境应用研究进展

Qiaoqing Xie

¹ 同济大学环境科学与工程学院 上海

² 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室 上海

【摘要】 金属纳米粒子已被用于在一个范围广泛的应用程序在区域纳米氧化铝因其独特的物理化学性质，广泛应用于化工、医药、环保等领域。相比于传统的物理化学合成方法，纳米氧化铝能耗高、环境友好，且具有良好的经济效益，因此受到越来越多的关注。金属纳米粒子的生物合成方法由于其易降解、成本高等缺点，因其能耗低、环境友好、生物相容性好等特点，逐渐成为研究的热点。微生物合成金属纳米粒子具有显著的优势，因为它通过生物还原过程将金属离子转化为金属纳米粒子。由于微生物合成过程受温度、pH、金属离子浓度、微生物生物量等多种因素的影响，不同微生物（如细菌、真菌、酵母、放线菌、微藻和病毒）的合成特点各异。因此，通过优化上述条件，可以调控纳米粒子的形貌、尺寸和分散性。此外，与基因工程的结合为纳米粒子的可控合成提供了新的方向，在丰富生物合成纳米粒子的种类、加快合成速度、提高产量方面发挥着至关重要的作用。微生物合成的金属纳米粒子具有优异的稳定性和生物相容性，在环境改善和药物递送方面具有广阔的应用前景。本文综述了微生物合成金属纳米粒子的研究进展，全面分析了不同微生物在纳米粒子合成中的优势与局限性，研究了影响其合成过程的因素及相应机制，提出了控制纳米粒子形貌、尺寸、均匀性、分散性，提高合成速率的可能策略。

【关键词】 金属纳米粒子；生物合成；微生物；生物合成机制；纳米生物技术

【收稿日期】 2025 年 6 月 23 日 **【出刊日期】** 2025 年 7 月 22 日 **【DOI】** 10.12208/j.nn.20250001

Advances in microbial synthesis of metal nanoparticles and their environmental applications

Qiaoqing Xie

¹ College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai,

² State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai

【Abstract】 Metal nanoparticles have been used in a wide range of applications in areas such as chemical engineering, medicine, and environmental protection for their unique physicochemical properties. Compared with traditional physical and chemical synthesis methods, which are characterized by high energy consumption, environmental degradation, and high costs, biosynthesis methods have gradually become a research highlight because of their lower energy consumption, environmental friendliness, and good biocompatibility. The microbial synthesis of metal nanoparticles offers significant advantages since its biological reduction process converts metal ions into metal nanoparticles. Characteristics of this process vary among different microorganisms such as bacteria, fungi, yeasts, actinomycetes, microalgae, and viruses, as the microbial synthesis process is influenced by various factors including temperature, pH, metal ion concentration, and microbial biomass. Therefore, the morphology, size, and dispersion of the nanoparticles could be regulated given the above condition being optimized. Moreover, the combination of genetic engineering provides new directions for the controlled synthesis of nanoparticles, plays a crucial role in diversifying biologically synthesized nanoparticles, as well as speeding up synthesis rates and increasing production yields. Metal nanoparticles synthesized by microorganisms present excellent stability and

biocompatibility, which will present us a wider application foreground in environmental improvement and drug delivery. This review summarizes the research advances in the microbial synthesis of metal nanoparticles, providing a comprehensive analysis of the advantages and limitations of different microorganisms in nanoparticle synthesis, researching the factors that affects its process and corresponding mechanisms, and proposing possible strategies for controlling nanoparticle shape, size, uniformity, dispersion, and improving synthesis rates.

【Keywords】 Metal nanoparticles; Biosynthesis; Microorganisms; Biosynthesis mechanisms; Nanobiotechnology

1 简介

金属纳米粒子因其独特的物理化学性质而备受关注。精确调控纳米粒子的尺寸、形貌、材料组成和表面功能结构,可以获得丰富的光学、化学和电化学性质,以及优异的表面活性^[1]。这些特性赋予了金属纳米粒子在众多学科领域(包括但不限于化学工程、医学、电子学、环境、农业、光学和力学)中展现出众多创新应用潜力^[2]。

金属纳米材料的合成方法大致可分为三大类:物理合成法、化学合成法和生物合成法。物理合成法包括高能球磨法、惰性气体冷凝法、高压磁控溅射法和激光烧蚀法等。然而,这些方法通常需要消耗大量能源,有些技术还需要专用设备,这会导致高昂的成本和巨大的能源消耗^[3]。化学合成法包括液相还原法、气相沉积法、溶胶-凝胶法和激光热解法,通常需要使用有机溶剂和有毒化学试剂。此外,合成过程通常会大量产生有毒物质和不良副产物,从而对环境造成巨大压力^[4]。而生物合成法则使用危害较小的化学品,并大幅降低能耗,同时合成的金属纳米颗粒还具有更高的生物相容性。因此,开发一种环境友好、经济高效、易于扩展且可持续的生物合成方法具有广泛的应用潜力和重要的研究价值。

纳米粒子的生物合成主要通过生物累积、沉淀、生物矿化和生物吸附等过程完成。在这些生物过程中,金属离子在细胞生物分子存在下被还原为金属纳米粒子^[5]。微生物已被证实具有强大的合成金属纳米粒子的能力。这种能力归因于多种因素,包括它们在环境中的广泛分布、物种的多样性、培养条件的简便性、快速的生长周期、对金属的卓越抵抗力以及在极端环境压力下生长的能力^[6]。此外,纳米技术与生物技术的融合,尤其是分子生物学、代谢工程、合成生物学和基因工程的进步,极大地促进了微生物纳米技术的进步。因此,许多研究人员对各种金属纳米粒子的微生物合成进行了广泛的研

究。本文回顾了近年来与金属纳米粒子生物合成相关的研究。综述范围包括微生物种类、合成影响因素、相关机制及其应用领域研究进展。

2 微生物类型

目前,多种微生物已被用于合成金属纳米颗粒的研究。这些微生物包括细菌、真菌、酵母、放线菌、微藻和病毒^[7]。不同的微生物已被证明在这方面具有不同的优势。以下分析将总结这些微生物在金属纳米颗粒合成中的优势和局限性。图1总结了各种微生物在金属纳米颗粒合成中的独特优势。

2.1 细菌

细菌合成金属纳米材料的优势包括:其还原金属离子的能力相对较强、繁殖速度快、适应极端环境的能力强、以及易于操控纳米材料合成条件^[8]。细菌可以通过合成特定的还原酶(例如NADH还原酶和硝酸还原酶)来还原金属离子。细菌细胞壁内的胞外多糖、蛋白质和脂质也在金属纳米颗粒的合成中发挥着关键作用。先前的研究已经从镰刀菌(*Fusarium spinosum*)中纯化了硝酸还原酶和植物螯合素,并利用这些物质在胞外合成银纳米颗粒^[9]。非细胞合成方法已被确定为解决光伏应用下游加工问题(从生物质中分离银纳米颗粒)的潜在解决方案。在存在大量微生物的极端环境中,一些研究人员利用耐辐射奇球菌(*Deinococcus radiodurans*)来合成银金双金属纳米颗粒。这些细菌具有极强的抗辐射和环境胁迫能力,这在修复重金属离子污染的环境方面尤为有益^[10]。细菌对环境条件的要求不高,厌氧菌和孤雌厌氧菌可以在厌氧条件下存活和繁殖。因此,一些研究利用希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis*)作为电子受体,在厌氧呼吸过程中有机酸氧化过程中还原金属离子^[11]。然而,细菌细胞内合成金属纳米颗粒伴随着许多复杂的纯化和分离问题。为了释放细胞内合成的纳米颗粒,需要额外的处理步骤,例如超声处理或与合适的去垢剂反应。

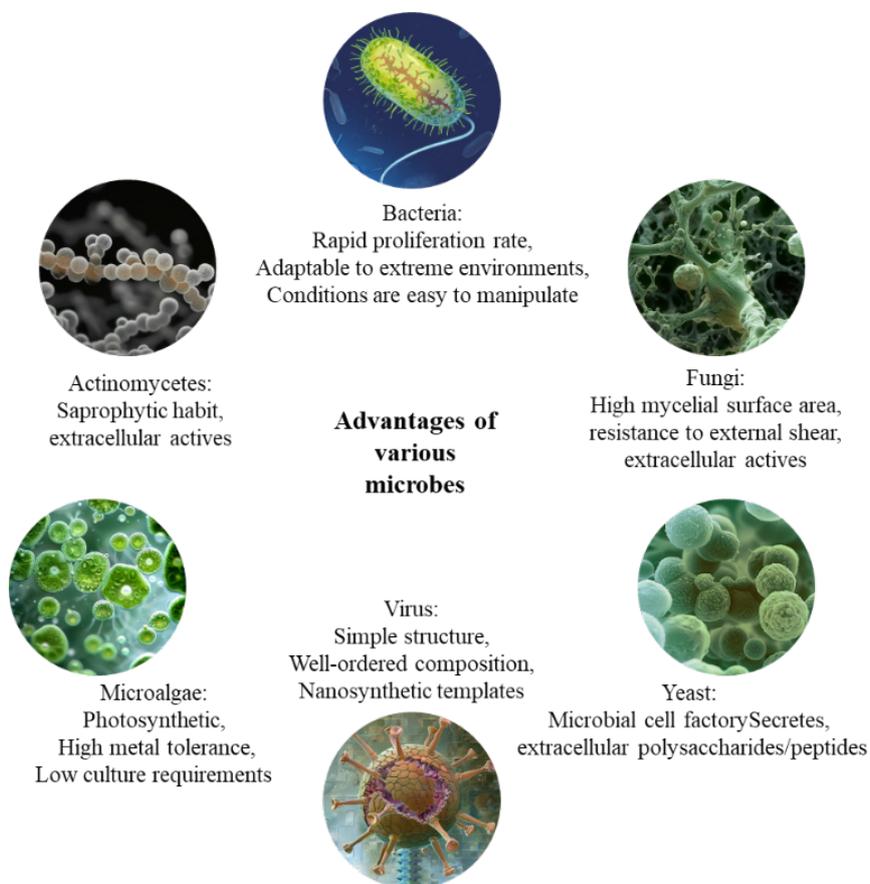


图 1 用于金属纳米粒子生物合成的微生物种类及其相应的优势

2.2 真菌

真菌菌丝体具有较大的表面积，从而能够增强与金属离子的相互作用。此外，菌丝体对外部剪切力表现出优异的适应性^[12]。真菌能够分泌胞外还原酶和大量高浓度的活性代谢物，从而促进具有特定形状、尺寸和显著单分散特性的纳米颗粒的合成^[13]。例如，利用轮枝菌合成银纳米颗粒，将轮枝菌暴露于 10^{-4} mol/L 硝酸银中。72 小时后成功合成粒径为 25 ± 12 纳米的银纳米颗粒，并且银纳米颗粒均匀分布在真菌细胞壁上^[14]。已有研究认为，真菌中的酶促反应促进了金属离子的还原。具体而言，已观察到镰刀菌合成尺寸范围为 5-15 纳米的银纳米颗粒。此外，实验证据表明，真菌分泌的蛋白质在这些银纳米颗粒的形成和稳定中起着至关重要的作用^[15]。真菌在纳米颗粒的生物合成方面表现出某些缺陷。这些缺陷包括生长速度较慢和世代时间较长。与细菌相比，真菌需要更长的时间才能达到足够的生物量水平。此外，真菌也不太容易进行基因操作^[12]。

2.3 酵母

酵母已被证实可作为有效的微生物细胞工厂。这些生物能够通过多种机制抵消环境金属对酵母细胞的有害影响，包括细胞膜吸附、酶促氧化/还原、胞外多糖/肽螯合、膜转运和主动外排转移^[16]。酵母已被证实能够合成生物活性物质，包括谷胱甘肽、金属硫蛋白和植物螯合素。该过程发生在细胞内，是解毒机制的一部分。在该机制中，金属离子被吸收并形成复合共聚物。同时，金属纳米颗粒被合成并稳定在纳米级^[17]。使用酵母提取物作为还原剂和封端剂，有助于合成球形银纳米颗粒，该颗粒具有可控的形貌和良好的分散性。所得纳米颗粒的平均粒径经测定为 13.8 纳米。此外，傅里叶变换红外（FTIR）光谱分析证实了酵母提取物中的还原氨基酸、亚麻酸和碳水化合物等生物分子在银纳米粒子形成过程中的关键作用^[18]。除了前面提到的方法外，其他相关技术包括利用酵母进行细胞外银纳米粒子合成以及银纳米粒子表面活性物质的分析。结果表

明, 酵母分泌的醇、酚、羧酸和芳香胺发挥着重要作用^[19]。据估计, 目前已鉴定出约 1500 种酵母, 其中相当一部分可用于大规模制备金属纳米粒子^[20]。

2.4 放线菌

利用放线菌合成金属纳米粒子的研究相对较少。放线菌利用其腐生习性合成大量胞外酶、氨基酸、维生素和其他活性成分, 这些成分作为生物还原剂具有显著的优势^[21]。研究观察到, 放线菌细胞壁酶中带负电荷的羧基团通过静电机制与银离子相互作用, 从而促进银离子在细菌群体中积累, 并随后形成银核^[22]。一项研究利用红球菌属 (*Rhodococcus* spp) 合成了尺寸约为 5-50 纳米的银纳米粒子。透射电子显微镜分析显示, 这些粒子的合成发生在细胞质内。此外, 纳米粒子表面的蛋白质似乎能使纳米粒子在胶体溶液中保持稳定^[23]。最近的研究表明, 除了活放线菌外, 还可以直接从放线菌分泌的活性物质合成金属纳米颗粒。例如, 从薄荷叶中分离出的链霉菌属 (*Streptomyces* sp.) 被发现能分泌酶和蛋白质, 并从中成功合成了粒径在 13 至 40 纳米之间的银纳米颗粒。这些银纳米颗粒在 6.25 至 100 毫克/升的浓度范围内, 对枯草芽孢杆菌和大肠杆菌等细菌菌株表现出有效的抑菌活性。在另一项研究中, 研究人员利用从海绵中分离出的两种放线菌, 并以所得细胞滤液和培养基作为还原剂, 合成了球形银纳米颗粒。这些纳米颗粒的粒径分别为 8.66 ± 2 纳米和 35 ± 2 纳米, 并对多种细菌菌株表现出显著的抑菌活性^[24]。如本报告所述, 已经证明放线菌嗜热菌属、链霉菌属、红球菌属和诺卡氏菌属能够合成纳米颗粒^[25]。

2.5 微藻

微藻被定义为能够进行光合作用的水生微生物。这些生物既有多细胞形式, 例如红藻纲, 也有单细胞形式, 例如绿藻小球藻。藻类对培养基的要求较低, 光合能力强, 对金属离子的耐受性强^[26]。与其他微生物类似, 藻类在纳米颗粒的生物合成和重金属积累中发挥着重要作用。藻类细胞提取物 (包括色素和抗氧化剂) 可作为生物相容性还原剂, 在金属离子的还原和金属纳米结构的合成中发挥关键作用^[27]。此外, 蓝藻门、绿藻门和褐藻门的藻类一直是合成金属纳米颗粒的研究重点^[28]。

2.6 病毒

病毒以其卓越的适应性为特点, 这使得它们能够根据环境变化改变活性并释放遗传物质。在医学领域, 病毒的应用主要与基因传递、药物递送以及疫苗的研发相关^[29]。病毒的蛋白质外壳表面具有高密度的活性位点, 能够结合金属离子, 从而作为模板自组装制备纳米颗粒^[30]。例如, 烟草花叶病毒的外壳由 2130 个相同的蛋白质亚基组成, 其病毒内外表面暴露出多个重复的功能基团。这种有序且结构明确的特性使其成为纳米材料合成的理想模板^[31]。在此过程中, 金纳米粒子均匀地与病毒表面的蛋白质结合, 溶液中的金原子沉积在病毒表面, 形成病毒-金纳米粒子复合物^[32]。类似地, 直径约为 32 纳米的中国南瓜卷叶病毒可用作纳米颗粒合成的模板。在特定条件下, 该病毒可用于形成银金纳米颗粒。这些纳米颗粒是在阳光下暴露于硝酸银和氯金酸溶液五分钟后形成的^[33]。已观察到金属离子在病毒蛋白质外壳上成核, 逐渐形成病毒-金属混合纳米材料, 该材料在纳米尺度上表现出显著的取向性。此外, 噬菌体合成的金属纳米颗粒具有靶向递送药物的能力。这一特性使得病毒合成金属纳米颗粒的研究成为生物合成领域的一个关键研究方向^[34]。然而, 现有文献中关于基于病毒合成金属纳米颗粒的研究仍然匮乏。阻碍病毒大规模生产的一个显著制约因素是其对宿主生物进行蛋白质表达的依赖^[35]。

3 生物合成的影响因素及调控策略

利用天然微生物合成金属纳米粒子是一种环境友好、安全可靠的绿色方法。与化学合成相比, 生物法制备的金属纳米粒子更稳定, 且易于在室温下保存。然而, 由于微生物生命活动的复杂性以及参与合成过程的微生物种类和生物分子的多样性, 生物法在精确调控金属纳米粒子的形状和尺寸方面面临挑战。此外, 生物合成速率低和合成量低也阻碍了微生物合成在工业应用中的规模化。在合成过程中, 调控纳米粒子的粒径分布并防止其发生不利的聚集至关重要, 以确保其在实际应用中的活性和耐久性。因此, 必须在合成过程中调控纳米粒子的尺寸、形状和分散性。先前的综述总结了贵金属微生物合成纳米材料尺寸和形状调控的研究^[36]。本节将进一步讨论金属纳米粒子均匀分散的可控调控, 以及通过培养条件优化、基因工程改造等提高合成速率和生产率。

3.1 培养条件优化

微生物的培养条件已被证实对其生长繁殖以及其分泌的活性物质（如酶、蛋白质、多糖等）的种类、含量和活性有显著的影响。反过来，这些分泌物又会影响金属纳米颗粒的合成^[37]。相反，通过优化微生物的生长条件和合成金属纳米颗粒的反应条件（如环境温度、pH 值、金属浓度和微生物生物量），可以精确调控合成金属纳米颗粒的形貌和粒径^[38]。电子穿梭体可以加速微生物与矿物质之间的细胞外电子转移，这对微生物合成纳米颗粒也很重要。利用腐殖质、硫和生物炭作为电子穿梭体已被证实可以提高还原效率和反应速率^[39]。

3.1.1 温度

不同微生物对最适温度的要求差异很大。例如，乳酸乳球菌（*Lactococcus lactis*）的最适生长温度为 30 °C，热芽孢杆菌（*Bacillus caldotenax*）的最适生长温度为 65 °C，而芽孢杆菌（*Bacillus sp. LY*）的最适生长温度范围为 80~85 °C。在微生物最适温度条件下，适度升高温度可加快金属纳米颗粒的合成速率。例如，研究表明，在不同温度下利用节杆菌属（*Arthrobacter sp.*）胞外多糖合成银纳米颗粒呈现出时间-温度曲线。具体而言，在 70 °C 下合成需要 10 min，在 80 °C 下需要 5 min，而在 90 °C 下则需要不到 2 min。已证实，在微生物的最适温度下，生物因子表现出更高的活性，从而促进金属离子的还原和积累，促进金属纳米颗粒的形成^[40]。在微生物最适温度下，生物因子活性升高，从而加速金属离子的还原和积累，促进金属纳米颗粒的形成^[41]。然而，温度升高会导致酶和蛋白质的失活，阻碍纳米颗粒的稳定分散，加剧团聚现象^[42]。相反，高温条件下金属纳米颗粒的成核速率加快、金属前驱体的快速消耗，可能导致纳米颗粒尺寸减小^[43]。因此，有效的温度控制对于实现高效合成和稳定分散至关重要。

3.1.2 pH

已证实 pH 值对微生物系统合成的金属纳米材料的形貌、粒径、合成速率和位置有显著影响。例如，pH 值为 4.0 时，铜绿假单胞菌合成的金纳米片的粒径约为 200 纳米，而 pH 值为 7.0 时合成的金纳米颗粒的粒径仅为 10-20 纳米^[44]。在中性条件下，*P. cloudii* 蛋白合成银纳米颗粒需要 72 小时，而在碱

性条件下，合成速率显著提高至仅需 1 小时^[45]。pH 值为 7.0 和 pH 值为 2.8 时，金纳米颗粒均在细菌细胞的周质区形成。pH 值为 7.0 时，金纳米颗粒沉积在细菌细胞上，产生的金纳米颗粒的尺寸范围为 15-200 纳米，形貌各异。当 pH 值为 2.8 时，沉积过程产生的金纳米颗粒平均尺寸为 20 纳米，可以在细胞壁上观察到。值得注意的是，当 pH 值为 2.0 时，金纳米颗粒沉积在细胞壁上，而较大的金纳米颗粒（约 350 纳米）则在细胞外形成^[46]。pH 值对金属纳米颗粒合成的影响可能与质子浓度有关。在质子含量较高的环境中，微生物及其活性因子表面会携带更多正电荷。这反过来又会影响金属离子的吸附、积累和还原过程，导致合成速率降低^[47]。此外，极端酸性和碱性条件已被证明会影响参与微生物合成过程的酶、蛋白质和其他活性物质的性质。这些条件还可能改变细胞膜的通透性，进而影响金属纳米颗粒合成的形态、速率和位置^[48]。因此 pH 值的变化是调控微生物合成金属纳米粒子的关键因素之一。

3.1.3 金属溶液的浓度

已证实金属溶液浓度对合成纳米颗粒的形貌和合成位置有显著影响。例如，已观察到梭形芽孢杆菌在 Na₂SeO₃ 浓度范围为 0.3 至 2.0 mmol/L 时合成球形硒纳米颗粒，而在 2.5 至 4.0 mmol/L 的较高浓度下合成棒状硒纳米颗粒^[49]。当金离子前体的浓度为 0.5 至 1.0 mmol/L 时，金纳米颗粒的合成主要发生在壁膜间质中，而当金离子浓度升高至 1.5 或 2.0 mmol/L 时，则在细胞壁中合成无定形金纳米颗粒^[50]。此外，随着金离子浓度的增加，纳米颗粒变得更大，粒度分布范围也更广。金属溶液浓度对生物合成有显著的影响，因为它会改变参与合成和稳定的生物分子相对于金属离子浓度的比例。奥斯特瓦尔德熟化过程进一步加剧了这种关系。此外，已证明过量的金属离子有可能超过微生物的耐受阈值，导致微生物细胞结构受损、活性因子失活，最终导致微生物死亡。这反过来又会干扰金属纳米颗粒的合成^[51]。因此，精确调节金属溶液浓度对于高效、可控地合成金属纳米颗粒至关重要。

3.1.4 生物量浓度

已证明生物量浓度的变化会影响纳米粒子的尺寸及其分布范围。例如，在利用绿色木霉合成金纳米粒子的研究中，当生物量为 1 克或 2 克时，金纳

米粒子的粒径分布范围为几纳米到 300 纳米。然而,当生物质增加到 8 克时,超过 98%的金纳米粒子的粒径小于 50 纳米^[50]。已证明生物质的增加可诱导铍和银离子在细胞表面甚至细胞内部的吸附。当细菌生物质在 600 纳米处的吸光度为 1 时,合成的 Pd-Ag/rGO 尺寸更小,不易聚集^[43]。这表明,适当增加生物质可以调节纳米粒子的尺寸和分散性。

3.1.5 电子传递介质

微生物能够利用环境中存在的或细胞自身合成的还原性物质,促进细胞内外电子的转移。这些物质通常被称为氧化还原介质或电子穿梭体。在这种还原机制中,电子最初从细胞内转移到电子穿梭体,经还原后,电子穿梭体将电子转移给金属离子,从而完成金属的还原过程。同时,电子穿梭体恢复到原始状态,从而启动后续的电子转移循环^[39]。例如,蒽醌-2,6-二磺酸盐(AQDS)和核黄素已被观察到能够促进希瓦氏菌(*Shewanella* spp.)合成硒纳米颗粒,加速亚硒酸根离子的还原速率,并促进细菌细胞外金属前体的还原^[52]。在脱卤厌氧菌还原硒离子的过程中,AQDS的加入会促进亚硒酸根离子的还原。这绕过了氧化还原蛋白的作用,提供了另一条电子传递途径。结果,促进了亚硒酸根离子的还原,并促进了硒的生物转化^[53]。此外,其他醌类,包括甲萘醌和蒽醌-2-磺酸盐,已被证明具有电子穿梭体的功能,从而显著增强了大肠杆菌中亚硒酸根和亚碲酸根的还原^[54]。因此,识别并增加起关键作用的电子穿梭体含量,可以促进细胞外电子转移和金属离子的还原速率,从而提高生物合成的速率。

3.2 基因工程改造

与其他方法相比,金属纳米粒子的生物合成存在尺寸分布不均、合成速度缓慢等缺点,阻碍了其实际应用。然而,微生物的基因操作为这些挑战提供了潜在的解决方案。通过基因工程,人们有望有效地改造微生物来解决这些问题。目前的研究正在通过基因沉默来探究预测基因在金属纳米粒子合成中的作用,以识别和理解与纳米粒子生物合成相关的核心机制^[55]。已证明,负责金属离子还原的外源基因或同源/异源蛋白质编码基因的整合可以增强微生物对金属离子的亲和力并增强还原能力。这反过来又促进了金属纳米粒子的可控合成,从而提高了生物合成效率和纳米粒子的产量。例如,已证实

将重组质粒引入大肠杆菌可合成 60 多种不同的纳米材料,包括单元素金属纳米颗粒,如镉、硒、锌、金、银,以及其他金属复合纳米材料,如金纳米棒-铁壳^[56]。已证实使用重组大肠杆菌进行体内合成的还原能力是使用野生型大肠杆菌进行体外合成的 3.5 倍^[57]。在另一项研究中,将 PCR 组装的白色念珠菌金属硫蛋白基因转移到大肠杆菌 DH5 细胞中。结果表明,基因工程大肠杆菌产生银纳米颗粒的速度比用 pUC19 空质粒载体转化的大肠杆菌细胞更快。此外,基因工程大肠杆菌细胞合成的银纳米颗粒的大小和形状更加均一^[58]。此外,已有研究利用表达 γ -谷氨酰半胱氨酸合成酶(γ -GCS)或谷胱甘肽合成酶(GS)的重组大肠杆菌进行纳米颗粒生物合成。最高颗粒产量约为野生型细胞的 2.5 倍^[59]。因此,通过操控遗传元件来促进金属纳米颗粒的可控合成并提高合成速率的前景广阔。然而,值得注意的是,这项研究仍处于起步阶段,面临着重大挑战,包括生物安全问题、公众接受度和转基因逃逸。

尽管众多研究者对生物法合成金属纳米粒子的影响因素进行了广泛的研究,但对微生物合成金属纳米粒子的核心机制的深入了解仍处于探索阶段,而这对于精细调控金属纳米粒子的生物合成至关重要。因此,本文将在后续章节中对当前机制研究的相关理论进行总结和讨论。

4 生物合成机制

微生物合成金属纳米颗粒的机制复杂多样。事实上,即使在同一微生物中,这些过程也可能涉及多种机制的协同作用。微生物生命活动的三大主要类型密切相关:微生物对极端环境的抵抗力、选择性吸收无机物质作为营养来源以及储存或利用无机物质还原释放的能量。在恶劣的环境条件下,微生物可以通过特定的遗传和生化机制增强其耐受性^[14]。这种抵抗力通常与其化学解毒功能有关,包括改变金属的价态、细胞壁吸附、细胞内生物累积以及通过肽和多糖等生物分子进行螯合。此外,微生物能够通过主动运输系统(包括 ATP 酶、趋化机制和质子抗性转运系统)将重金属颗粒从细胞中排出^[60]。例如,大肠杆菌利用主动运输系统将银离子从细胞内转移到细胞外环境,从而减轻银离子对微生物的毒性作用^[61]。相比之下,铜绿假单胞菌采用不同的机制来抵消环境中的毒性物质。它将金属离子

还原为金属单体，随后合成纳米颗粒，从而减少细胞损伤^[62]。

根据合成位置，微生物合成金属纳米粒子的过程大致可分为两类：细胞内合成和细胞外合成。合成过程首先需要微生物细胞表面捕获金属离子，而微生物细胞表面的羧酸基团有助于这一过程。此外，由蛋白质和多糖组成的细胞外聚合物也被观察到在金属离子的粘附和捕获中发挥着重要作用。在细胞内合成过程中，金属离子通过细胞膜转运系统穿过细胞质，随后在细胞质中被还原^[63]。细胞内外金属离子的还原主要取决于细胞内还原剂的合成，例如蛋白质、酶、糖和氨基酸^[64]。生物活性基团不断吸引金属离子，从而促进纳米粒子的快速成核和生长。

微生物活性，尤其是微生物活性酶，在金属纳米粒子生物合成中的重要性已被众多研究人员广泛研究。例如，某些海洋放线菌分泌的硝酸还原酶已被用作还原剂来合成银纳米粒子^[65]。某些细菌菌株

（如铜绿假单胞菌和嗜麦芽假单胞菌）中存在特定的 NADPH 依赖性酶，有助于金纳米粒子的合成。该过程涉及通过电子穿梭机制将金离子还原为金单体^[66]。据观察，脱硫弧菌利用细胞质和周质氢化酶催化铂离子还原为铂纳米粒子^[67]。除酶外，其他非酶物质在金属纳米粒子的合成中也发挥着重要作用。例如，希瓦氏菌分泌的细胞外蛋白（如细胞色素 c）已被证明能促进 Ag^{2+} 还原为 AgNP。此外，研究已在希瓦氏菌的胞外多糖（EPS）中发现了大约 20 种氧化还原蛋白，表明它们参与了异质金属还原菌的胞外电子转移过程^[68]。此外，已确定谷胱甘肽具有与多种金属离子结合的能力。谷胱甘肽中的硫醇基在金属离子的还原中也起着重要作用^[69]。

尽管现有的机理研究已经证实了微生物活性物质在金属还原和金属纳米颗粒合成中的关键作用，但由于微生物的异质性及其生命活动的复杂性，需要进一步深入研究以阐明其合成机理。

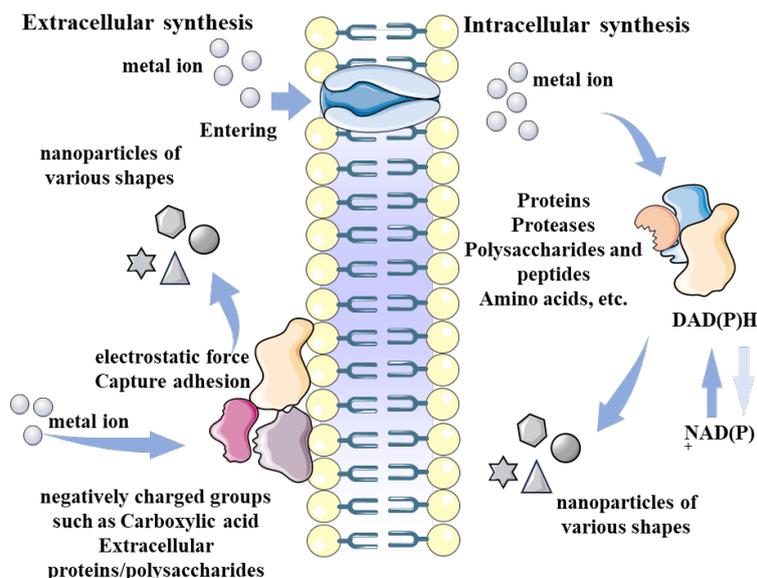


图 2 微生物细胞外/细胞内合成金属纳米粒子的机制

5 环境应用

微生物合成金属纳米粒子已在有机污染物去除、重金属提取、杀菌消毒以及环境检测等多个领域展现出显著的功效。本文将详细探讨微生物合成金属纳米粒子在环境领域的应用。

5.1 有机污染物的去除

在环境修复和有机污染物去除领域，最常用的金属纳米材料包括金、银、钯、钛和铁。生物合成的

金纳米粒子已被证明能有效降解硝基苯胺、对硝基苯酚和双氯芬酸等有机污染物。此外，在偶联化合物的协同作用下，生物合成的银纳米粒子已被证明能显著去除水溶性四溴荧光素染料，包括伊红黄、活性黄、活性红、亚甲蓝和孔雀石绿等^[70]。银纳米粒子与微生物的结合已被证明可以提高污染物的降解率。这种增强作用是通过金属纳米粒子附着在微生物细胞壁上来实现的，从而提高降解率。例如，由

红球菌属细菌合成的银纳米粒子。研究表明, PEVJ9 可在 72 小时内将邻苯二甲酸二乙基己酯 (DEHP) 的降解率提高 98%^[71]。此外, 银纳米粒子与嗜碱螺杆菌协同作用时, 能够使分散蓝 183 染料完全脱色^[72]。除金和银纳米粒子外, 生物合成的钨纳米粒子在低浓度下显著降解了七种剧毒的 PCB 同系物, 其性能优于相同浓度下的商用钨纳米粒子。

5.2 重金属的去除

工业废水中含有大量重金属, 其排放会造成环境重金属污染。生物合成金属纳米颗粒在去除重金属方面表现出显著的效果。一项研究利用希瓦氏菌合成了零价钨纳米粒子, 该粒子能够将致癌的六价铬 (Cr (VI)) 还原为毒性较低的三价铬 (Cr (III))^[73]。类似的研究也利用脱硫弧菌 (*Vibrio desulfuricans*) 包覆钨纳米粒子以去除六价铬 (Cr (VI))^[74]。除了去除六价铬外, 用木葡糖醋杆菌 (*Gluconacetobacter xylinum*) 生物合成的球形 Fe₃O₄/细菌纤维素纳米粒子还表现出对铅、锰和铬等重金属的强去除效果^[75]。

5.3 灭菌消毒

金属纳米粒子的表面效应和尺寸效应使其具有抵抗病原体的能力, 而生物合成的金属纳米粒子在抗菌消毒中发挥着重要作用。银本身具有优异的抗菌性能, 而银纳米粒子不仅保留了金属银的抗菌性能, 还表现出独特的纳米尺寸效应。因此, 银纳米粒子广泛应用于各行各业的抗菌灭菌。值得注意的是,

生物合成的银纳米粒子已被证明对各种细菌和真菌病原体具有显著的抑制作用, 包括金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、微小链球菌、大肠杆菌和白色念珠菌^[76]。类似地, 生物合成的 ZnO 纳米粒子的抗菌性能也已被证明是有效的。例如, 利用真菌合成的 ZnO 纳米粒子对包括金黄色葡萄球菌在内的各种病原体表现出显著的抑制活性^[77]。

5.4 环境检测

利用生物合成金属纳米粒子制造生物传感器是该领域的最新进展。这些金属纳米粒子具有多种优势特性, 包括高附着力、生物相容性和高比表面积。此外, 它们还表现出优异的电导性, 使其在环境检测中具有应用价值。例如, 葡萄糖不动杆菌合成的金纳米粒子已沉积在电极上, 用于检测水样中的苯基苯酚, 表现出良好的重复性、再现性、特异性和稳定性^[78]。生物合成金属纳米粒子在重金属检测中也具有重要应用。例如, 一项研究利用哈茨木霉合成了金纳米粒子, 该粒子在未经表面改性的情况下表现出快速检测 Hg²⁺ 的能力, 检测限达到 2.6 nmol/L, 并在复杂的水质条件下保持高效性^[79]。除了环境检测领域外, 生物合成金属纳米粒子已在病原体水平的快速检测中得到应用。例如, 阵列微电极与磁性纳米粒子的集成实现了牛肉中大肠杆菌的快速检测, 该检测方法高效、安全、便捷^[80]。这项相关研究为拓展生物合成金属纳米粒子在环境检测领域的应用提供了有价值的参考。

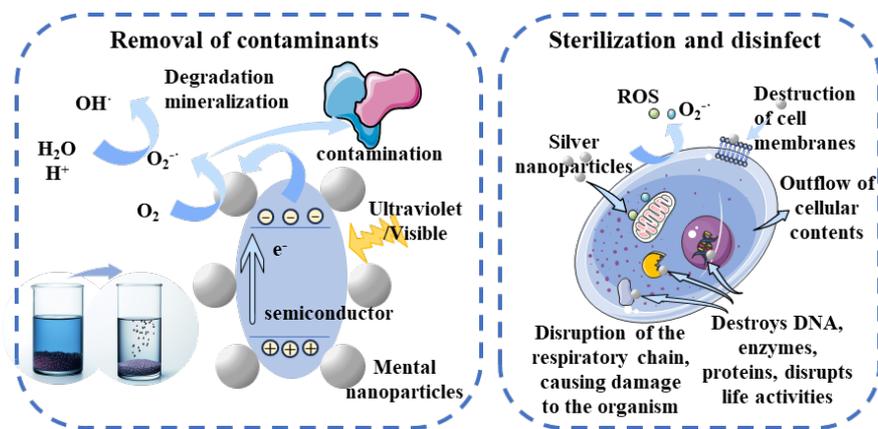


图3 金属纳米粒子生物合成的应用

6 结论与展望

微生物法合成金属纳米粒子因其成本效益高、环境可持续、绿色化学和无毒性等诸多优势而备受

关注。值得一提的是, 该方法可以与金属回收工艺无缝集成, 实现废水中金属离子的去除和金属纳米粒子的合成, 具有广泛的潜在应用前景。然而, 生物

法在大规模应用中仍遇到一些障碍，包括合成粒子尺寸和形貌的不一致以及精确调控物理化学性质的复杂性。微生物的生长过程和金属纳米粒子的合成与重要的生命活动和活性物质密切相关，需要对其合成机制进行进一步深入研究。

为了进一步推进该领域的发展，未来的研究应集中在以下领域：

(1) 将微生物合成与基因工程、代谢组学、转录组学等技术相结合，可以深入分析活体微生物细胞合成金属纳米粒子的过程，为金属纳米粒子的规模化合成和精准调控提供科学依据，实现金属纳米粒子的高效、可控制备。

(2) 开展微生物法合成金属纳米粒子的自动化在线研究至关重要。此外，构建连续合成装置对于快速制备形貌稳定、性质均一的金属纳米粒子至关重要。该装置技术的开发有望显著提高生产效率、降低成本，为工业化应用提供必要的技术支持。

(3) 全面评估微生物合成金属纳米粒子的光学、电学和催化特性，对于明确其在生物传感器、污染物降解等领域的潜在应用至关重要。通过优化这些特性并设计专用功能材料，可以显著拓展其在环境治理、能源和电子设备等领域的应用范围。

参考文献

- [1] Kimber RL, Lewis EA, Parmeggiani F, Smith K, Bagshaw H, Starborg T, et al. Biosynthesis and Characterization of Copper Nanoparticles Using *Shewanella oneidensis*: Application for Click Chemistry. *Small*. 2018;14(10):1703-145.
- [2] Navalón S, García H. Nanoparticles for Catalysis. *Nanomaterials*. 2016;6(7):123.
- [3] Sportelli MC, Izzi M, Volpe A, Clemente M, Picca RA, Ancona A, et al. The Pros and Cons of the Use of Laser Ablation Synthesis for the Production of Silver Nano-Antimicrobials. *Antibiotics*. 2018;7(3):67.
- [4] Chen G, Chen Y, Cui Y, Chen Q, Chen T, Yang Y. Morphology-controlled fabrication of nano Ag/poly (vinyl pyrrolidone) composites and their effect on electric conductive properties of UV ink. *Mater Technol*. 2016;31(sup1):17-22.
- [5] Jeevanandam J, Kiew S, Ansah S, Sie Yon JL, Barhoum A, Danquah M, et al. Green approaches for the synthesis of metal and metal oxide nanoparticles using microbial and plant extracts. *Nanoscale*. 2022;14.
- [6] Alavi M. Bacteria and fungi as major bio-sources to fabricate silver nanoparticles with antibacterial activities. *Expert Rev Anti Infect Ther*. 2022;20(6):897-906.
- [7] Annamalai J, Ummalyma SB, Pandey A, Bhaskar T. Recent trends in microbial nanoparticle synthesis and potential application in environmental technology: a comprehensive review. *Environ Sci Pollut Res*. 2021;28(36):49362-82.
- [8] Iravani S, Varma RS. Bacteria in Heavy Metal Remediation and Nanoparticle Biosynthesis. *ACS Sustain Chem Eng*. 2020;8(14):5395-409.
- [9] Rai M, Bonde S, Golinska P, Trzcińska-Wencel J, Gade A, Abd-Elsalam KA, et al. *Fusarium* as a Novel Fungus for the Synthesis of Nanoparticles: Mechanism and Applications. *J Fungi*. 2021;7(2):139.
- [10] Weng Y, Li J, Ding X, Wang B, Dai S, Zhou Y, et al. Functionalized Gold and Silver Bimetallic Nanoparticles Using *Deinococcus radiodurans* Protein Extract Mediate Degradation of Toxic Dye Malachite Green. *Int J Nanomedicine*. 2020;15:1823-35.
- [11] Yang J, Ju P, Dong X, Duan J, Xiao H, Tang X, et al. Green synthesis of functional metallic nanoparticles by dissimilatory metal-reducing bacteria “*Shewanella*”: A comprehensive review. *J Mater Sci Technol*. 2023;158:63-76.
- [12] Chauhan A, Anand J, Parkash V, Rai N. Biogenic synthesis: a sustainable approach for nanoparticles synthesis mediated by fungi. *Inorg Nano-Metal Chem*. 2023;53(5):460-73.
- [13] Mistry H, Thakor R, Patil C, Trivedi J, Bariya H. Biogenically proficient synthesis and characterization of silver nanoparticles employing marine procured fungi *Aspergillus brunneoviolaceus* along with their antibacterial and antioxidative potency. *Biotechnol Lett*. 2021;43(1):307-16.
- [14] Mukherjee P, Ahmad A, Mandal D, Senapati S, Sainkar SR, Khan MI, et al. Fungus-Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Immobilization in the Mycelial

- Matrix: A Novel Biological Approach to Nanoparticle Synthesis. *Nano Lett.* 2001;1(10):515-9.
- [15] Basavaraja S, Balaji SD, Lagashetty A, Rajasab AH, Venkataraman A. Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using the fungus *Fusarium semitectum*. *Mater Res Bull.* 2008;43(5):1164-70.
- [16] Zhang X, Qu Y, Shen W, Wang J, Li H, Zhang Z, et al. Biogenic synthesis of gold nanoparticles by yeast *Magnusiomyces ingens* LH-F1 for catalytic reduction of nitrophenols. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* 2016;497:280-5.
- [17] Asghari-Paskiabi F, Imani M, Eyboosh S, Rafii-Tabar H, Razzaghi-Abyaneh M. Population Kinetics and Mechanistic Aspects of *Saccharomyces cerevisiae* Growth in Relation to Selenium Sulfide Nanoparticle Synthesis. *Front Microbiol.* 2020;11:1-11.
- [18] Cheng Z, Tang S, Feng J, Wu Y. Biosynthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles using *Flos Sophorae Immaturus* extract. *Heliyon.* 2022;8(8):e10010.
- [19] Kim D-Y, Kim M, Sung J-S, Koduru JR, Nile SH, Syed A, et al. Extracellular synthesis of silver nanoparticle using yeast extracts: antibacterial and seed priming applications. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2024;108(1):150.
- [20] Roychoudhury A, editor. *Yeast-mediated Green Synthesis of Nanoparticles for Biological Applications.* 2020.
- [21] Salem SS, EL-Belely EF, Niedbała G, Alnoman MM, Hassan SE-D, Eid AM, et al. Bactericidal and In-Vitro Cytotoxic Efficacy of Silver Nanoparticles (Ag-NPs) Fabricated by Endophytic Actinomycetes and Their Use as Coating for the Textile Fabrics. *Nanomaterials.* 2020;10(10):2082.
- [22] Bizuye A, Gedamu L, Bii C, Gatebe E, Maina N. Molecular-Based Identification of Actinomycetes Species That Synthesize Antibacterial Silver Nanoparticles. *Int J Microbiol.* 2020;2020:8816111.
- [23] Otari S, Patil RM, Ghosh SJ, Thorat ND, Pawar SH. Intracellular synthesis of silver nanoparticle by actinobacteria and its antimicrobial activity. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 2015;136 Pt B:1175-80.
- [24] Hamed AA, Kabary H, Khedr M, Emam AN. Antibiofilm, antimicrobial and cytotoxic activity of extracellular green-synthesized silver nanoparticles by two marine-derived actinomycete. *RSC Adv.* 2020;10(17):10361-7.
- [25] Bennur T, Khan ZN, Kshirsagar R, Javdekar V, Zinjarde S. Biogenic gold nanoparticles from the Actinomycete *Gordonia amarae*: Application in rapid sensing of copper ions. *Sens Actuators B Chem.* 2016;233:684-90.
- [26] Annamalai J, Nallamuthu T. Characterization of biosynthesized gold nanoparticles from aqueous extract of *Chlorella vulgaris* and their anti-pathogenic properties. *Appl Nanosci.* 2015;5(5):603-7.
- [27] Khanna P, Kaur A, Goyal D. Algae-based metallic nanoparticles: Synthesis, characterization and applications. *J Microbiol Methods.* 2019;163:105656.
- [28] Choudhary S, Sangela V, Saxena P, Saharan V, Pugazhendhi A, Harish. Recent progress in algae-mediated silver nanoparticle synthesis. *Int Nano Lett.* 2023;13(3):193-207.
- [29] Hernandez-Garcia A, Kraft DJ, Janssen AFJ, Bomans PHH, Sommerdijk NAJM, Thies-Weesie DME, et al. Design and self-assembly of simple coat proteins for artificial viruses. *Nat Nanotechnol.* 2014;9(9):698-702.
- [30] Keum J-W, Hathorne AP, Bermudez H. Controlling forces and pathways in self-assembly using viruses and DNA. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol.* 2011;3(3):282-97.
- [31] Hamouda RA, Hussein MH, Abo-elmagd RA, Bawazir SS. Synthesis and biological characterization of silver nanoparticles derived from the cyanobacterium *Oscillatoria limnetica*. *Sci Rep.* 2019;9(1):13071.
- [32] Zahr OK, Blum AS. Solution Phase Gold Nanorings on a Viral Protein Template. *Nano Lett.* 2012;12(2):629-33.
- [33] Wu Y, Yang H, Shin H-J. Viruses as self-assembled nanocontainers for encapsulation of functional cargoes. *Korean J Chem Eng.* 2013;30(7):1359-67.
- [34] Ahiwale SS, Bankar AV, Tagunde S, Kapadnis BP. A Bacteriophage Mediated Gold Nanoparticles Synthesis and Their Anti-biofilm Activity. *Indian J Microbiol.* 2017;57(2):188-94.
- [35] Tauseef A, Hisam F, Hussain T, Caruso A, Hussain K,

- Châtel A, et al. Nanomicrobiology: Emerging Trends in Microbial Synthesis of Nanomaterials and Their Applications. *J Cluster Sci.* 2023;34(2):639-64.
- [36] Bai R, Tian XC, Wang SH, et al. Noble Metal Nanoparticles Produced by Microorganism. *Prog Chem.* 2019;31(6):872-881.
- [37] Balakumaran MD, Ramachandran R, Kalaichelvan PT. Exploitation of endophytic fungus, *Guignardia mangiferae* for extracellular synthesis of silver nanoparticles and their in vitro biological activities. *Microbiol Res.* 2015;178:9-17.
- [38] Khan MR, Urmi MA, Kamaraj C, Malafaia G, Ragavendran C, Rahman MM. Green synthesis of silver nanoparticles with its bioactivity, toxicity and environmental applications: A comprehensive literature review. *Environ Nanotechnol Monit Manag.* 2023;20:100872.
- [39] Zhao J, Li F, Cao Y, Zhang X, Chen T, Song H, et al. Microbial extracellular electron transfer and strategies for engineering electroactive microorganisms. *Biotechnol Adv.* 2021;53:107682.
- [40] Yumei L, Yamei L, Qiang L, Jie B. Rapid Biosynthesis of Silver Nanoparticles Based on Flocculation and Reduction of an Exopolysaccharide from *Arthrobacter* sp. B4: Its Antimicrobial Activity and Phytotoxicity. *J Nanomater.* 2017;2017:1-8.
- [41] Gurunathan S, Kalishwaralal K, Vaidyanathan R, Venkataraman D, Pandian SRK, Muniyandi J, et al. Biosynthesis, purification and characterization of silver nanoparticles using *Escherichia coli*. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2009;74(1):328-35.
- [42] Abdelrahim K, Mahmoud SY, Ali AM, Almaary KS, Mustafa AE-ZMA, Hussein SM. Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using *Rhizopus stolonifer*. *Saudi J Biol Sci.* 2016;24:208-16.
- [43] Han R, Song X, Wang Q, Qi Y, Deng G, Zhang A, et al. Microbial synthesis of graphene - supported highly - dispersed Pd - Ag bimetallic nanoparticles and its catalytic activity. *J Chem Technol Biotechnol.* 2019.
- [44] Singh PK, Kundu S. Biosynthesis of Gold Nanoparticles Using Bacteria. *Proc Natl Acad Sci India Sect B Biol Sci.* 2014;84(2):331-6.
- [45] Sanghi R, Verma P. Biomimetic synthesis and characterisation of protein capped silver nanoparticles. *Bioresour Technol.* 2009;100(1):501-4.
- [46] Konishi Y, Tsukiyama T, Tachimi T, Saitoh N, Nomura T, Nagamine S. Microbial deposition of gold nanoparticles by the metal-reducing bacterium *Shewanella* algae. *Electrochim Acta.* 2007;53:186-92.
- [47] Saxena J, Sharma PK, Sharma MM, Singh A. Process optimization for green synthesis of silver nanoparticles by *Sclerotinia sclerotiorum* MTCC 8785 and evaluation of its antibacterial properties. *SpringerPlus.* 2016;5(1):861.
- [48] Rajput S, Werezuk R, Lange RM, McDermott MT. Fungal Isolate Optimized for Biogenesis of Silver Nanoparticles with Enhanced Colloidal Stability. *Langmuir.* 2016;32(34):8688-97.
- [49] Wadhvani SA, Gorain M, Banerjee P, Shedbalkar UU, Singh R, Kundu GC, et al. Green synthesis of selenium nanoparticles using *Acinetobacter* sp. SW30: optimization, characterization and its anticancer activity in breast cancer cells. *Int J Nanomedicine.* 2017;12:6841-55.
- [50] Zhou J, Shi C, Zhu N. The possibility and influence factors of biosynthesis gold nanoparticles in *Trichoderma viride*. *Microbiology.* 2018;45(11):2387-2398.
- [51] Phanjom P, Ahmed G. Effect of different physicochemical conditions on the synthesis of silver nanoparticles using fungal cell filtrate of *Aspergillus oryzae* (MTCC No. 1846) and their antibacterial effect. *Adv Nat Sci Nanosci Nanotechnol.* 2017;8(4):045016.
- [52] Xia Z, Cheng Y, Kong W, Shi X, Yang T, Wang M, et al. Electron shuttles alter selenite reduction pathway and redistribute formed Se(0) nanoparticles. *Process Biochem.* 2016;51:408-13.
- [53] Zhang Y, Zahir, Amrhein C, Chang A, Frankenberger WT. Application of Redox Mediator To Accelerate Selenate Reduction to Elemental Selenium by *Enterobacter taylorae*. *J Agric Food Chem.* 2007;55(14):5714-7.
- [54] Zhang D, Nie Z, Liu L, et al. Mechanisms of microbial extracellular electron transfer and its application. *Chin Bull Life Sci.* 2018;30(6):6.

- [55] Lin IW-S, Lok C-N, Che C-M. Biosynthesis of silver nanoparticles from silver(I) reduction by the periplasmic nitrate reductase c-type cytochrome subunit NapC in a silver-resistant *E. coli*. *Chem Sci*. 2014;5(8):3144-50.
- [56] Jung JH, Lee SY, Seo TS. In Vivo Synthesis of Nanocomposites Using the Recombinant *Escherichia coli*. *Small*. 2018;14(42):e1803133.
- [57] Choi Y, Park TJ, Lee DC, Lee SY. Recombinant *Escherichia coli* as a biofactory for various single- and multi-element nanomaterials. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2018;115(23):5944-9.
- [58] Yuan Q, Bomma M, Xiao Z. Enhanced Silver Nanoparticle Synthesis by *Escherichia coli* Transformed with *Candida Albicans* Metallothionein Gene. *Materials*. 2019;12(24):4180.
- [59] Chen Y-L, Tuan HY, Tien C-W, Lo W-H, Liang H-C, Hu Y-C. Augmented biosynthesis of cadmium sulfide nanoparticles by genetically engineered *Escherichia coli*. *Biotechnol Prog*. 2009;25.
- [60] Soto ER, Ostroff GR. Characterization of Multilayered Nanoparticles Encapsulated in Yeast Cell Wall Particles for DNA Delivery. *Bioconjug Chem*. 2008;19(4):840-8.
- [61] Li XZ, Nikaido H, Williams KE. Silver-resistant mutants of *Escherichia coli* display active efflux of Ag⁺ and are deficient in porins. *J Bacteriol*. 1997;179(19):6127-32.
- [62] Lemire JA, Harrison JJ, Turner RJ. Antimicrobial activity of metals: mechanisms, molecular targets and applications. *Nat Rev Microbiol*. 2013;11(6):371-84.
- [63] Yilmaztürk B. Intracellular and extracellular green synthesis of silver nanoparticles using *Desmodesmus sp.*: their Antibacterial and antifungal effects. *Caryologia*. 2019;72(1).
- [64] Mishra A, Sardar M. Cellulase assisted synthesis of nano-silver and gold: Application as immobilization matrix for biocatalysis. *Int J Biol Macromol*. 2015;77:105-13.
- [65] Karthik L, Kumar G, Kirthi AV, Rahuman AA, Bhaskara Rao KV. *Streptomyces sp.* LK3 mediated synthesis of silver nanoparticles and its biomedical application. *Bioprocess Biosyst Eng*. 2014;37(2):261-7.
- [66] Nangia Y, Wangoo N, Goyal N, Shekhawat G, Suri CR. A novel bacterial isolate *Stenotrophomonas maltophilia* as living factory for synthesis of gold nanoparticles. *Microb Cell Fact*. 2009;8(1):39.
- [67] Riddin T, Gericke M, Whiteley CG. Biological synthesis of platinum nanoparticles: Effect of initial metal concentration. *Enzyme Microb Technol*. 2010;46(6):501-5.
- [68] Cao B, Ahmed B, Kennedy DW, Wang Z, Shi L, Marshall MJ, et al. Contribution of Extracellular Polymeric Substances from *Shewanella sp.* HRCR-1 Biofilms to U(VI) Immobilization. *Environ Sci Technol*. 2011;45(13):5483-90.
- [69] Cobbett CS. Phytochelatin biosynthesis and function in heavy-metal detoxification. *Curr Opin Plant Biol*. 2000;3(3):211-6.
- [70] Aziz N, Faraz M, Pandey R, Shakir M, Fatma T, Varma A, et al. Facile Algae-Derived Route to Biogenic Silver Nanoparticles: Synthesis, Antibacterial, and Photocatalytic Properties. *Langmuir*. 2015;31(42):11605-12.
- [71] Annamalai J, Vasudevan N. Enhanced biodegradation of an endocrine disrupting micro-pollutant: Di (2-ethylhexyl) phthalate using biogenic self-assembled monolayer of silver nanoparticles. *Sci Total Environ*. 2020;719:137115.
- [72] Nazari N, Kashi FJ. A novel microbial synthesis of silver nanoparticles: Its bioactivity, Ag/Ca-Alg beads as an effective catalyst for decolorization Disperse Blue 183 from textile industry effluent. *Sep Purif Technol*. 2020:118117.
- [73] Ma X. Microbial Synthesis of Sulfide Semiconductor Nanomaterials and Their Applications in the Environment [PhD Thesis]. Zhenjiang: Jiangsu University; 2014.
- [74] Mabbett AN, Yong P, Farr JP, Macaskie LE. Reduction of Cr(VI) by "palladized" biomass of *Desulfovibrio desulfuricans* ATCC 29577. *Biotechnol Bioeng*. 2004;87(1):104-9.
- [75] Zhu H, Jia S, Wan T, Jia Y, Yang H, Li J, et al. Biosynthesis of spherical Fe₃O₄/bacterial cellulose nanocomposites as adsorbents for heavy metal ions. *Carbohydr Polym*. 2011;86(4):1558-64.
- [76] Maghimaa M, Alharbi SA. Green synthesis of silver nanoparticles from *Curcuma longa* L. and coating on the

- cotton fabrics for antimicrobial applications and wound healing activity. *J Photochem Photobiol B*. 2020;204:111806.
- [77] Mohamed AA, Fouda A, Abdel-Rahman MA, Hassan SE-D, El-Gamal MS, Salem SS, et al. Fungal strain impacts the shape, bioactivity and multifunctional properties of green synthesized zinc oxide nanoparticles. *Biocatal Agric Biotechnol*. 2019.
- [78] Li G, Sun K, Li D, Lv P, Wang Q, Huang F, et al. Biosensor based on bacterial cellulose-Au nanoparticles electrode modified with laccase for hydroquinone detection. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2016;509:408-14.
- [79] Liu Z, Zhou H, Shen E, et al. Recent advances in microbes-mediated biosynthesis of gold nanoparticles. *Microbiology*. 2015;42(8):9.
- [80] Varshney M, Li Y. Interdigitated array microelectrode based impedance biosensor coupled with magnetic nanoparticle-antibody conjugates for detection of *Escherichia coli* O157:H7 in food samples. *Biosens Bioelectron*. 2007;22(11):2408-14.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS