

## *Trichosporon montevidense* WIN 合成纳米金的催化特性

李炫莹<sup>1</sup> 沈文丽<sup>1</sup> 张旭旺<sup>2</sup> 裴晓芳<sup>1</sup> 李亚飞<sup>1</sup> 殷庆鑫<sup>1</sup> 由胜男<sup>1</sup>

王经纬<sup>1</sup> 曲媛媛<sup>1\*</sup>

(1. 工业生态与环境工程教育部重点实验室 大连理工大学环境学院 辽宁 大连 116024)

(2. 工业生态与环境工程教育部重点实验室 大连理工大学食品与环境学院 辽宁 盘锦 124221)

**摘要:**【目的】考察菌株 *Trichosporon montevidense* WIN 合成纳米金的催化特性及应用。【方法】利用活性 WIN 菌作用不同浓度  $\text{HAuCl}_4$  (1、2 和 4 mmol/L) 合成纳米金的特性, 分别利用活性 WIN 菌和灭活 WIN 菌合成纳米金, 分析合成纳米金的形貌、粒径及其催化特性。【结果】 $\text{HAuCl}_4$  浓度为 1 mmol/L 时, 菌株 WIN 合成了纳米金,  $\text{HAuCl}_4$  浓度为 2 mmol/L 和 4 mmol/L 时, 菌株 WIN 合成了纳米金及较大尺寸的金颗粒。通过紫外-可见光谱扫描、透射电子显微镜分析, 发现活性和灭活 WIN 菌均能还原  $\text{Au}^{3+}$  合成纳米金, 合成的纳米金均以球形为主, 还有少量三角形、四边形及六边形。活性 WIN 菌合成的纳米金粒径范围为 3 nm–252 nm, 平均粒径为 45.2 nm, 而灭活 WIN 菌合成的纳米金为 1 nm–271 nm, 平均粒径为 38.3 nm。活性和灭活 WIN 菌合成的纳米金对还原 4-硝基苯酚的催化速率分别为  $2.76 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $4.84 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。【结论】菌株 *Trichosporon montevidense* WIN 的活性及灭活细胞均可以合成纳米金, 且合成的纳米金具有良好的催化特性, 在催化去除环境中难降解污染物中具有一定的应用前景。

**关键词:** 纳米金, 生物合成, *Trichosporon montevidense*, 催化活性

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51508068); Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-13-0077); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. DUT14YQ107)

\*Corresponding author: E-mail: qyy007@126.com

**Received:** January 26, 2017; **Accepted:** April 24, 2017; **Published online** (www.cnki.net): May 25, 2017

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51508068); 新世纪优秀人才支持计划项目(No. NCET-13-0077); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. DUT14YQ107)

\*通讯作者: E-mail: qyy007@126.com

收稿日期: 2017-01-26; 接受日期: 2017-04-24; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-05-25

## Catalytic characteristics of gold nanoparticles biosynthesized by *Trichosporon montevidense* WIN

LI Xuan-Ying<sup>1</sup> SHEN Wen-Li<sup>1</sup> ZHANG Xu-Wang<sup>2</sup> PEI Xiao-Fang<sup>1</sup> LI Ya-Fei<sup>1</sup>  
YIN Qing-Xin<sup>1</sup> YOU Sheng-Nan<sup>1</sup> WANG Jing-Wei<sup>1</sup> QU Yuan-Yuan<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering (Ministry of Education), School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

(2. Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering (Ministry of Education), School of Food and Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Panjin, Liaoning 124221, China)

**Abstract:** [Objective] To examine the catalytic characteristics of gold nanoparticles (AuNPs) biosynthesized by *Trichosporon montevidense* WIN. [Methods] The characteristics of gold particles synthesized by incubation strain WIN with 1 mmol/L, 2 mmol/L and 4 mmol/L HAuCl<sub>4</sub> were investigated. In addition, the AuNPs were biosynthesized by active and inactive cells of strain WIN, respectively. The morphology and particle size of the synthesized AuNPs were analyzed, and the catalytic activity of AuNPs for reduction of nitro aromatic compounds was also evaluated. [Results] When the concentration of HAuCl<sub>4</sub> was 1 mmol/L, AuNPs were produced by strain WIN, while AuNPs and large gold particles were formed with 2 mmol/L and 4 mmol/L HAuCl<sub>4</sub>. The active and inactive cells of strain WIN could synthesize AuNPs based on the analyses of UV-vis spectroscopy and transmission electron microscopy. The synthesized AuNPs were mainly spherical, and some triangle, hexagon and parallelogram. The size of AuNPs synthesized by active cells of strain WIN ranged in 3 nm–252 nm with an average size of 45.2 nm, while the size range and average size of AuNPs synthesized by inactive cells of strain WIN were 1 nm–271 nm and 38.3 nm, respectively. The AuNPs synthesized by active and inactive cells of strain WIN could effectively catalyze the 4-nitrophenol reduction with the catalytic rate constants of  $2.76 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  and  $4.84 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , respectively. [Conclusion] *Trichosporon montevidense* WIN could be used to synthesize AuNPs and the biosynthesized AuNPs exhibited good catalytic properties, which showed a potential application in catalytic removal of the refractory pollutants in environment.

**Keywords:** Gold nanoparticles, Biosynthesis, *Trichosporon montevidense*, Catalytic activity

纳米金颗粒一般指粒径为 1 nm–100 nm 的金颗粒<sup>[1]</sup>, 由于其特殊的结构和表面性能及良好的稳定性, 被广泛应用于化学催化<sup>[2]</sup>、生物传感器<sup>[3]</sup>、生物医药<sup>[4]</sup>等领域。目前合成纳米金的方法有物理法<sup>[5]</sup>、化学法<sup>[6]</sup>和生物法<sup>[7]</sup>。相比物理法和化学法, 生物法合成纳米金绿色环保无污染, 且合成的纳米金分散性较好、生物相容性高、产率高、成本低, 近年来受到广泛关注<sup>[8]</sup>。生物法合成纳米金常用的生物资源有细菌<sup>[9]</sup>、放线菌<sup>[10]</sup>、真菌<sup>[11–12]</sup>及植物提取液<sup>[13]</sup>等, 其中真菌能够分泌大量蛋白酶及次级代谢产物等, 合成的纳米金产量大、分散性好、易于分离<sup>[14]</sup>, 因此在生物合成纳米金中具有更大的优势和潜力。

本实验室前期从活性污泥中分离得到一株丝孢酵母菌 *Trichosporon montevidense* WIN, 证明其具有纳米金合成能力<sup>[15]</sup>。本文在前期实验的基础上, 进一步考察不同浓度氯金酸对菌株 WIN 合成纳米金的影响, 以及活性和灭活 WIN 菌两种反应体系合成纳米金的能力及其合成的纳米金对硝基芳烃污染物催化还原的特性。酵母菌作为简单的单细胞真核生物, 易于培养且生长迅速, 探究其合成纳米金的特性有助于酵母菌在商业应用方面的推广。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验材料

1.1.1 菌株: *Trichosporon montevidense* WIN 为本

实验室前期从活性污泥中筛选分离得到<sup>[15]</sup>, 保藏于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心, 保藏号为 CGMCC 10368。菌株 WIN 的 26S rRNA 基因序列(550 bp)已提交到 GenBank 数据库, 登录号为 KP676895。

**1.1.2 主要试剂和仪器:** 氯金酸( $\text{HAuCl}_4$ ), 百灵威科技有限公司; 硝基类化合物, 国药集团化学试剂有限公司; 所有化学试剂均为分析纯及以上。V-560 紫外-可见分光光度计, 日本分光株式会社; JY92-IIN 超声破碎仪, 宁波新芝生物科技股份有限公司; Perkin-Elmer Optima 2000DV 电感耦合等离子体光谱仪, 珀金埃尔默股份有限公司; Tecnai G220 S-Twin 透射电子显微镜, 美国 FEI 公司。

**1.1.3 培养基:** 改良马丁培养基(g/L):  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.0,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  1.0,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.5, 葡萄糖 5.0, pH 7.0。6.76 $\times 10^4$  Pa 灭菌 15 min。

## 1.2 实验方法

**1.2.1 菌株 WIN 生长曲线:** 改良马丁培养基灭菌后接种菌株 WIN, 接菌量为 10% (体积比), 置于 30 °C、150 r/min 振荡培养。以 660 nm 波长处的吸光度值( $OD_{660}$ )表示 WIN 菌液浓度, 每 12 h 测一次 WIN 菌液的  $OD_{660}$  值, 以  $OD_{660}$  值的变化趋势表示菌株 WIN 的生长趋势。

**1.2.2 不同浓度氯金酸对菌株 WIN 合成纳米金的影响:** 取稳定期 WIN 菌液( $OD_{660}$  为 1.0), 分别取 6 mL 于 3 个小管中, 加入  $\text{HAuCl}_4$  使其终浓度分别为 1、2 和 4 mmol/L, 30 °C、150 r/min 下避光培养。

**1.2.3 活性 WIN 菌合成纳米金:** 取稳定期菌液( $OD_{660}$  为 0.47) 7 mL 至小管中, 加入  $\text{HAuCl}_4$  使其终浓度为 1 mmol/L, 30 °C、150 r/min 下避光培养。

**1.2.4 灭活 WIN 菌合成纳米金:** 稳定期菌液( $OD_{660}$  为 0.47)湿热灭菌(6.76 $\times 10^4$  Pa, 15 min), 取 7 mL 至小管中, 加入  $\text{HAuCl}_4$  使其终浓度为 1 mmol/L, 30 °C、150 r/min 下避光培养。

**1.2.5 金颗粒的分离、鉴定及表征:** (1) 紫外-可见分光光度计分析法(UV-vis)。超声破碎仪破碎细胞 30 min, 低转速(3 000 r/min)离心 5 min 后收集上清液, 于 400–800 nm 波长范围进行全波扫描。

(2) 电感耦合等离子体光谱仪分析法(ICP)。取 0.4 mL 反应体系溶液于 2 mL 小管中, 20 °C、10 000 $\times g$  离心 20 min, 得到样品的上清液用电感耦合等离子体光谱仪在波长 267.595 nm 处测定反应液中剩余金元素含量。将反应体系菌液超声 30 min 后, 取 0.2 mL 于 2 mL 小管中, 用 1 mL 王水( $\text{HCl}:\text{HNO}_3=3:1$ , 体积比)溶解后定容至 2 mL, 利用 ICP 测定金元素含量。(3) 透射电子显微镜分析法(TEM)。取适量纳米金溶液, 超声波振荡 10 min, 取适量纳米金溶液滴在铜网上, 晾干, 重复 5–6 次后获得样品。在透射电子显微镜下观察纳米金的形貌及尺寸。

**1.2.6 纳米金对硝基芳烃化合物的催化还原:** 选择 4-硝基苯酚作为目标底物, 考察菌株 WIN 合成纳米金的催化活性。取 100  $\mu\text{L}$  4-硝基苯酚(2 mmol/L)与 400  $\mu\text{L}$   $\text{NaBH}_4$  (50 mmol/L)溶液混合, 然后加入 100  $\mu\text{L}$  合成的纳米金样品以及 1 400  $\mu\text{L}$  超纯水, 充分混合。使用紫外-可见分光光度计监测反应过程, 定时全波扫描, 检测范围为 250–500 nm, 扫描间隔为 1 nm。以不加入纳米金的实验组作为空白对照。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌株 WIN 生长曲线

菌株 WIN 的生长曲线见图 1。菌株 WIN 在 0–60 h 期间生长迅速, 60 h 后其生长量( $OD_{660}$  值)基本趋于稳定。因此, 选择培养 60 h 的菌株 WIN 用于纳米金的合成。

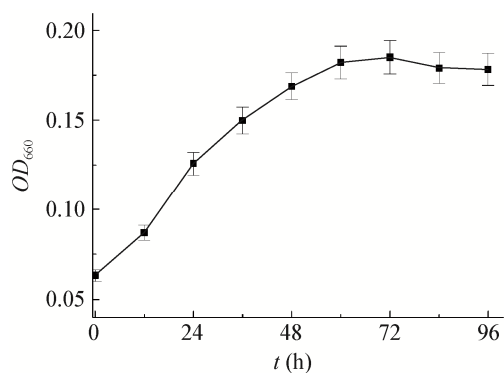


图 1 菌株 WIN 生长曲线

Figure 1 The growth curve of strain WIN

## 2.2 不同浓度氯金酸对菌株 WIN 合成纳米金的影响

考察 1、2 和 4 mmol/L 3 种浓度  $\text{HAuCl}_4$  对菌株 WIN 合成纳米金的影响, 3 种  $\text{HAuCl}_4$  浓度的反应体系颜色分别为紫色、浅棕色和黄色(图 2)。通过颜色观察发现, 加入 1 mmol/L  $\text{HAuCl}_4$  的管壁附着有紫黑色物质, 加入 2 mmol/L 和 4 mmol/L  $\text{HAuCl}_4$  的管壁附着有金颗粒。在 400–800 nm 波长范围内对 3 组反应体系进行全波扫描, 并与空白对照组进行对比发现,  $\text{HAuCl}_4$  浓度为 1 mmol/L 的反应体系在 600 nm 出现特征吸收峰, 而  $\text{HAuCl}_4$  浓度为 2 mmol/L 和 4 mmol/L 的两组体系未出现明显特征吸收峰。

由于尺寸差异, 纳米金的表面等离子体共振效应不同, 反应体系呈现出的颜色也不同, 而全波图中的最大吸收波长与纳米金粒径大小有着直接关联<sup>[7]</sup>。根据颜色观察及全波图分析,  $\text{HAuCl}_4$  浓度为 1 mmol/L 时, 菌株 WIN 合成了纳米金;  $\text{HAuCl}_4$  浓度为 2 mmol/L 和 4 mmol/L 时, 菌株 WIN 合成了粒径较大的金颗粒, 这些金颗粒在反应液中沉淀析出。

## 2.3 活性 WIN 菌合成纳米金

活性 WIN 菌作用  $\text{HAuCl}_4$  反应 12 h 后, 观察到

粉色物质生成。随着反应进行, 颜色逐渐加深, 并由粉色逐渐变为紫色, 管壁上也附着少量大尺寸金颗粒。取反应 9 d 后的产物, 利用紫外可见分光光度计在 450–650 nm 波长范围进行全波扫描。结果如图 3A 所示, 在 544 nm 处出现特征吸收峰, 与 AuNPs 的特征吸收峰相吻合, 证明合成了纳米金<sup>[16]</sup>。经 ICP 分析, AuNPs 浓度为 418.9  $\mu\text{mol/L}$ , 该体系 24 h 后  $\text{Au}^{3+}$  转化率为 98.87%。 $\text{Au}^{3+}$  转化率计算公式如下:

$$\text{Au}^{3+}\text{转化率} = \left(1 - \frac{C_1}{C_0}\right) \times 100\%$$

式中:  $C_0$ : 反应起始时刻  $\text{Au}^{3+}$  浓度, mg/L;  $C_1$ : 反应 1 d 后反应体系上清液中剩余的  $\text{Au}^{3+}$  浓度, mg/L。

利用 TEM 对合成的纳米金进行观察, 如图 3B 所示, 有三角形、四边形、六边形、球形等形貌, 以球形纳米金为主。用 Nano Measurer 1.2.5 粒径分析软件对 TEM 照片中的纳米金粒径进行分析, 发现活性 WIN 菌合成的纳米金粒径范围是 3 nm–252 nm, 平均粒径是 45.2 nm, 粒径 <10 nm 的纳米金占 5%, 粒径处于 3 nm–88 nm 范围内的纳米金占 90.4%, 也有少量 >200 nm 的金颗粒形成。

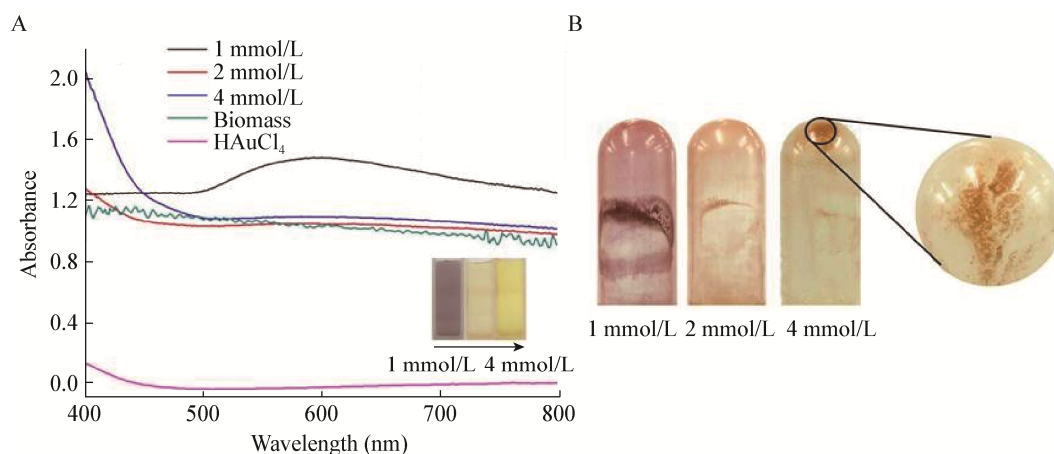


图 2 菌株 WIN 作用不同浓度氯金酸全波图以及还原产物图片

Figure 2 UV-vis spectra of strain WIN with different concentration of  $\text{HAuCl}_4$  and the photos of reductate

注: A: 菌株 WIN 作用不同浓度氯金酸的全波图, 插图为反应体系的颜色图; B: 菌株 WIN 作用不同浓度氯金酸的还原产物图片。  
Note: A: UV-vis spectra of strain WIN with different concentration of  $\text{HAuCl}_4$ , and the insets show the color change of reaction system with different concentration of  $\text{HAuCl}_4$ ; B: The appearance photos of reductate from different reaction system.

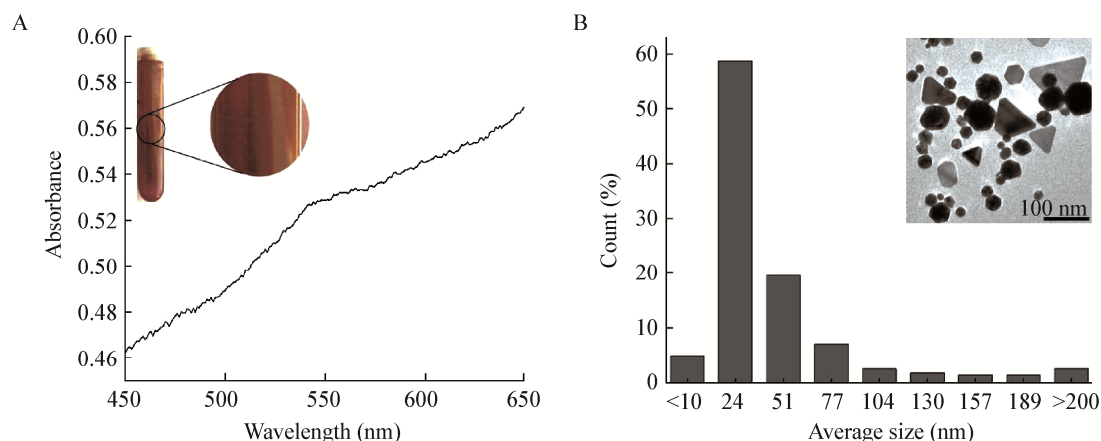


图3 活性 WIN 菌合成纳米金表征图

Figure 3 The characterization of AuNPs synthesized by active cells of WIN

注：A：活性 WIN 菌合成纳米金全波图，插图管壁金颗粒照片；B：活性 WIN 菌合成纳米金粒径分析图，插图纳米金的 TEM 照片。

Note: A: The UV-vis spectra of AuNPs synthesized by active cells of strain WIN, and the insert represents the photo of gold particles on tube wall; B: The particle size analysis of AuNPs synthesized by active cells of strain WIN, and the insert represents the TEM image of AuNPs.

## 2.4 灭活 WIN 菌合成纳米金

灭活 WIN 菌作用  $\text{HAuCl}_4$  反应 12 h 后，观察到粉色物质生成。随着反应进行，颜色逐渐加深，并由浅粉色逐渐变为浅粉紫色，管壁上同样有少量大尺寸金颗粒生成。取反应 9 d 后的样品进行分析，利用紫外可见分光光度计在 450–650 nm 波长范围内进行全波扫描。结果如图 4A 所示，其特征吸收峰出现在 570 nm 处，与 AuNPs 的特征吸收峰相吻合，证明合成了纳米金<sup>[16]</sup>。经 ICP 分析，AuNPs 浓度为  $516.5 \mu\text{mol/L}$ ，该体系 24 h 后  $\text{Au}^{3+}$  转化率为 95.81% (转化率公式同 2.3)。

利用 TEM 对合成的纳米金颗粒进行观察，如图 4B 所示，有三角形、四边形、六边形、球形等纳米金，以球形纳米金为主。粒径分析发现灭活 WIN 菌合成的纳米金粒径范围是 1 nm–271 nm，平均粒径是 38.3 nm，粒径 <10 nm 的纳米金占 20%，粒径处于 1 nm–88 nm 范围内的纳米金颗粒占 93.0%，也有少量 >200 nm 的金颗粒形成。

对比灭活 WIN 菌，活性 WIN 菌对  $\text{Au}^{3+}$  还原率高出 3.1%，说明活性 WIN 菌对  $\text{Au}^{3+}$  还原能力更强。但灭活 WIN 菌合成的纳米金平均粒径更小，

粒径小于 10 nm 的金颗粒也更多。

## 2.5 纳米金对硝基芳烃化合物的催化还原

为了考察菌株 WIN 合成纳米金的催化特性，将活性和灭活 WIN 菌株合成的纳米金各取 100  $\mu\text{L}$  用于 4-硝基苯酚的催化还原。4-硝基苯酚溶液呈淡黄色，在 320 nm 处有特征吸收峰。向 4-硝基苯酚溶液中加入  $\text{NaBH}_4$  会迅速产生 4-硝基苯酚钠，溶液由淡黄色变为深黄色，同时特征吸收峰由 320 nm 转移到 402 nm。向混合物中加入少量纳米金，溶液颜色逐渐由深黄色变为无色，同时 402 nm 处的吸收峰强度逐渐减弱，297 nm 处出现新的特征吸收峰，表明产生了新的物质——4-氨基苯酚。

如图 5 所示，活性和灭活 WIN 菌合成的纳米金对 4-硝基苯酚的催化还原过程中，4-硝基苯酚的去除率达到 90% 需要的时间分别为 16 min 和 9 min。由于反应体系中  $\text{NaBH}_4$  的浓度要远高于 4-硝基苯酚的浓度，可以认为  $\text{NaBH}_4$  的量在整个反应过程中保持不变，该反应遵循假一级反应。根据动力学方程计算可知活性和灭活 WIN 菌液合成纳米金催化 4-硝基苯酚降解的反应速率常数 ( $k$ ) 分别为  $2.76 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $4.84 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。



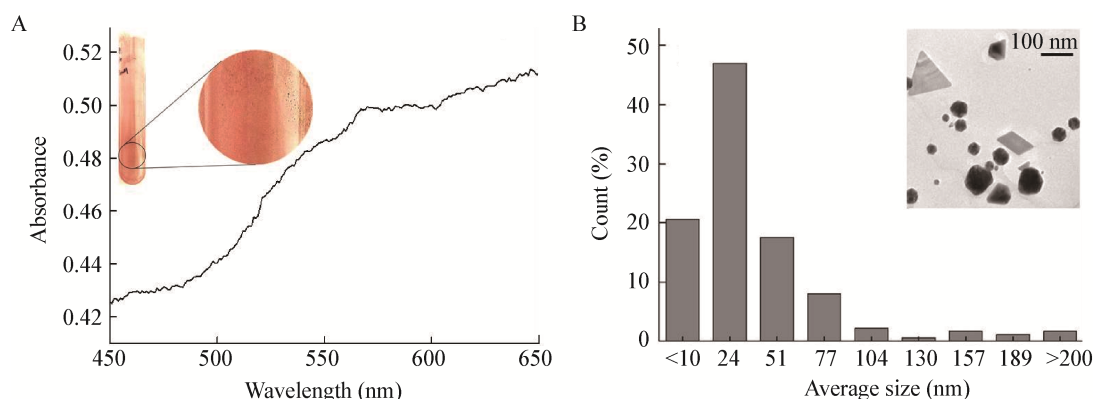
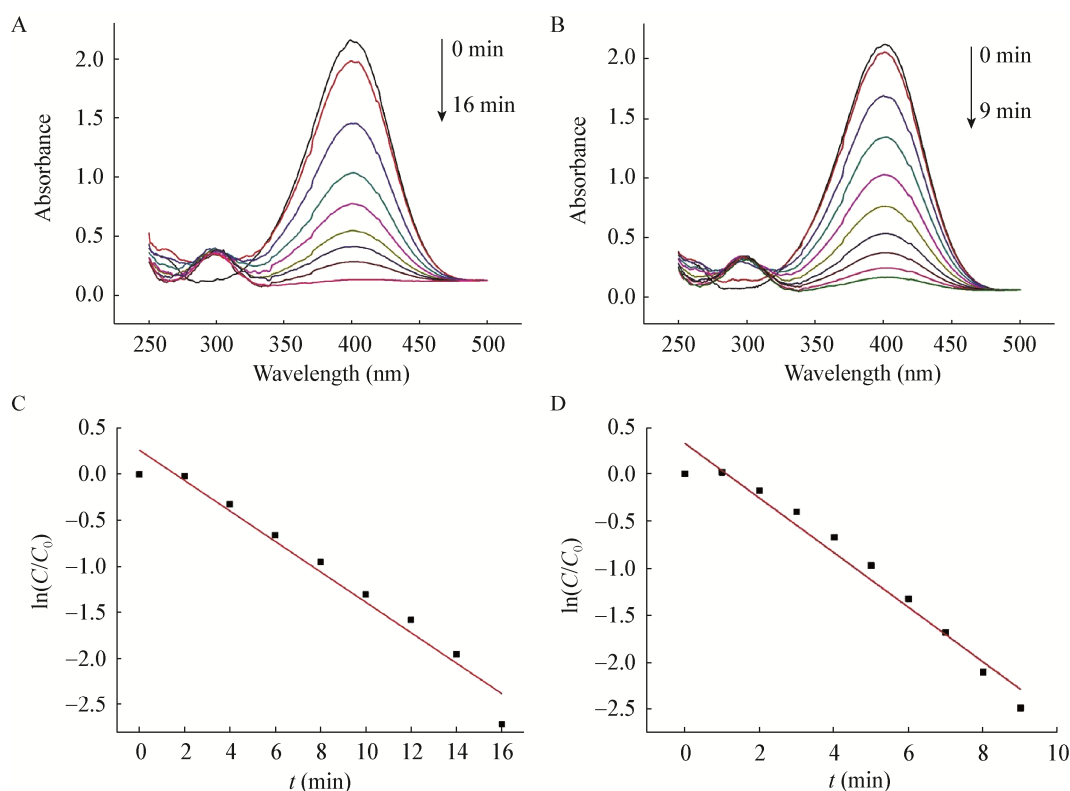


图4 灭活 WIN 菌合成纳米金表征图

Figure 4 The characterization of AuNPs synthesized by inactive cells of strain WIN

注：A：灭活 WIN 菌合成纳米金全波图，插图为管壁金颗粒照片；B：灭活 WIN 菌合成纳米金粒径分析图，插图为灭活 WIN 菌液合成纳米金的 TEM 照片。

Note: A: The UV-vis spectra of AuNPs synthesized by inactive cells of strain WIN, and the insert represents the photo of gold particles on tube wall; B: The particle size analysis of AuNPs synthesized by inactive cells of strain WIN, and the insert represents the TEM image of AuNPs.

图5 纳米金催化还原 4-硝基苯酚的 UV-vis 光谱图及  $\ln(C/C_0)$  随反应时间变化对纳米金的线性关系Figure 5 UV-vis spectra of nitroaromatics reduction catalyzed by AuNPs and linear correlation of  $\ln(C/C_0)$  with time for AuNPs

注：A：活性 WIN 菌合成的纳米金催化还原 4-硝基苯酚的 UV-vis 光谱图；B：灭活 WIN 菌合成的纳米金催化还原 4-硝基苯酚的 UV-vis 光谱图；C： $\ln(C/C_0)$  随反应时间变化对活性 WIN 菌合成的纳米金的线性关系；D： $\ln(C/C_0)$  随反应时间变化对灭活 WIN 菌合成的纳米金的线性关系。

Note: A: UV-vis spectra of nitroaromatics reduction catalyzed by AuNPs synthesized with active cells of strain WIN; B: UV-vis spectra of nitroaromatics reduction catalyzed by AuNPs synthesized with inactive cells of strain WIN; C: Linear correlation of  $\ln(C/C_0)$  with time using AuNPs synthesized by active cells of strain WIN; D: Linear correlation of  $\ln(C/C_0)$  with time using AuNPs synthesized by inactive cells of strain WIN.

### 3 讨论

本实验采用 *Trichosporon montevidense* WIN 合成纳米金,考察了不同浓度  $\text{HAuCl}_4$  对菌株 WIN 合成纳米金的影响。 $\text{HAuCl}_4$  浓度为 1 mmol/L 时合成了纳米金;当  $\text{HAuCl}_4$  浓度为 2 mmol/L 和 4 mmol/L 时,合成了较大尺寸的金颗粒,从反应液中沉淀析出。UV-vis 分析表明活性和灭活 WIN 菌均能合成纳米金。ICP 分析发现活性和灭活 WIN 菌对  $\text{Au}^{3+}$  的还原率分别为 98.87% 和 95.81%,活性和灭活 WIN 菌两组反应体系中 AuNPs 的含量分别为 418.9  $\mu\text{mol/L}$  和 516.5  $\mu\text{mol/L}$ ,说明活性 WIN 菌对  $\text{Au}^{3+}$  的还原能力更强,但灭活 WIN 菌反应体系中合成了更多的纳米金。TEM 图像显示活性和灭活 WIN 菌合成的纳米金形貌以球形为主,也有少量三角形、平行四边形和六边形。

活性和灭活 WIN 菌合成纳米金的平均粒径分别为 45.2 nm 和 38.3 nm,同时发现灭活 WIN 菌株合成的尺寸在 10 nm 左右的纳米金占有纳米金的 20% 以上。微生物合成纳米金被视作微生物应对重金属的脱毒作用,细胞会将重金属还原为毒性较小的零价态金属颗粒<sup>[17]</sup>。小粒径纳米金比表面积大,容易团聚形成大粒径金颗粒,而生物分子能够作为封端剂使小粒径纳米金稳定<sup>[18]</sup>。推测 WIN 菌灭活后可能释放出更多的生物小分子,从而有利于形成小尺寸纳米金颗粒。

活性和灭活 WIN 菌合成的纳米金催化还原 4-硝基苯酚的催化速率分别为  $2.76 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $4.84 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。一般认为,粒径在 10 nm 以下的纳米金粒子才具有较高的催化活性。Valden 等<sup>[19]</sup>研究表明,具有非金属特性尺寸(约 3.5 nm)的纳米金粒子具有最高的催化活性,将纳米金粒子的特殊催化效应归结于量子尺寸效应。结合粒径分析,灭活 WIN 菌合成了更多 10 nm 以下的纳米金粒子,比活性 WIN 菌合成的纳米金对 4-硝基苯酚的催化速率高,说明灭活 WIN 菌合成的纳米金对 4-硝基苯酚具有更好的催化能力,在硝基芳烃污染物降解方面具有潜在的应用价值。

本研究首次报道丝孢酵母菌可以同时合成三角形、平行四边形、六边形、球形纳米金,该现象的发现为调控微生物定向合成特定形貌的纳米金提供了可操作的空间,下一步工作可以就定向调控微生物合成特定形貌的纳米金展开研究。此外,微生物合成纳米金是复杂的生物化学过程,其机理尚不明晰,下一步研究工作主要是解析并分离参与合成纳米金还原与稳定的物质成分,探索微生物合成纳米金的分子生物学机制。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang JC, Liu K, Cao WL. Property, preparation and application of nanoparticle[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2001, 14(2): 21-26 (in Chinese)  
张敬畅,刘慷,曹维良. 纳米粒子的特性、应用及制备方法[J]. 石油化工高等学校学报, 2001, 14(2): 21-26
- [2] Larsson EM, Langhammer C, Zorić I, et al. Nanoplasmonic probes of catalytic reactions[J]. Science, 2009, 326(5956): 1091-1094
- [3] Zhang FX, Han L, Israel LB, et al. Colorimetric detection of thiol-containing amino acids using gold nanoparticles[J]. Analyst, 2002, 127(4): 462-465
- [4] Farokhzad OC, Langer R. Impact of nanotechnology on drug delivery[J]. ACS Nano, 2009, 3(1): 16-20
- [5] Das M, Shim KH, An SSA, et al. Review on gold nanoparticles and their applications[J]. Toxicology and Environmental Health Sciences, 2011, 3(4): 193-205
- [6] Turkevich J, Stevenson PC, Hillier J. A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold[J]. Discussions of the Faraday Society, 1951, 11: 55-75
- [7] Liu ZY, Zhou H, Shen E, et al. Recent advances in microbes-mediated biosynthesis of gold nanoparticles[J]. Microbiology China, 2015, 42(8): 1584-1592 (in Chinese)  
刘紫嫣,周豪,沈娥,等. 微生物介导的金纳米颗粒合成[J]. 微生物学通报, 2015, 42(8): 1584-1592
- [8] Suresh AK, Pelletier DA, Wang W, et al. Biofabrication of discrete spherical gold nanoparticles using the metal-reducing bacterium *Shewanella oneidensis*[J]. Acta Biomaterialia, 2011, 7(5): 2148-2152
- [9] Gericke M, Pinches A. Biological synthesis of metal nanoparticles[J]. Hydrometallurgy, 2006, 83(1/4): 132-140
- [10] Ahmad A, Senapati S, Khan MI, et al. Extracellular biosynthesis of monodisperse gold nanoparticles by a novel extremophilic actinomycete, *Thermomonospora* sp.[J]. Langmuir, 2003, 19(8): 3550-3553
- [11] Mishra AN, Bhadauria S, Gaur MS, et al. Extracellular microbial synthesis of gold nanoparticles using fungus *Hormoconis resinae*[J]. JOM, 2010, 62(11): 45-48
- [12] Du LW, Xian L, Feng JX. Rapid extra-/intracellular biosynthesis of gold nanoparticles by the fungus *Penicillium* sp.[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2011, 13(3): 921-930

- [13] Song JY, Jang HK, Kim BS. Biological synthesis of gold nanoparticles using *Magnolia kobus* and *Diopyros kaki* leaf extracts[J]. Process Biochemistry, 2009, 44(10): 1133-1138
- [14] Castro-Longoria E, Vilchis-Nestor AR, Avalos-Borja M. Biosynthesis of silver, gold and bimetallic nanoparticles using the filamentous fungus *Neurospora crassa*[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2011, 83(1): 42-48
- [15] Shen WL, Qu YY, Pei XF, et al. Green synthesis of gold nanoparticles by a newly isolated strain *Trichosporon montevidense* for catalytic hydrogenation of nitroaromatics[J]. Biotechnology Letters, 2016, 38(9): 1503-1508
- [16] Shankar SS, Ahmad A, Pasricha R, et al. Bioreduction of chloroaurate ions by geranium leaves and its endophytic fungus yields gold nanoparticles of different shapes[J]. Journal of Materials Chemistry, 2003, 13(7): 1822-1826
- [17] Nair B, Pradeep T. Coalescence of nanoclusters and formation of submicron crystallites assisted by *Lactobacillus* strains[J]. Crystal Growth & Design, 2002, 2(4): 293-298
- [18] Hulkoti NI, Taranath TC. Biosynthesis of nanoparticles using microbes—a review[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014, 121: 474-483
- [19] Valden M, Lai X, Goodman DW. Onset of catalytic activity of gold clusters on Titania with the appearance of nonmetallic properties[J]. Science, 1998, 281(5383): 1647-1650

## 征 稿 简 则

### 1 刊物简介与栏目设置

《微生物学通报》是由中国科学院微生物研究所和中国微生物学会主办的,以微生物学应用基础研究及技术创新与应用为主的综合性学术期刊。刊登内容包括:工业微生物学、海洋微生物学、环境微生物学、基础微生物学、农业微生物学、食品微生物学、兽医微生物学、药物微生物学、医学微生物学、微生物蛋白质组学、微生物功能基因组、微生物工程与药物等领域的最新研究成果,产业化新技术和新进展,以及微生物学教学研究改革等。设置的栏目有:研究报告、专论与综述、生物实验室、高校教改纵横、专栏等。

### 2 投稿方式

投稿时请登陆我刊主页 <http://journals.im.ac.cn/wwxwtbcn>, 点击作者投稿区,第一次投稿请先注册,获得用户名和密码,然后依照提示提交稿件,详见主页“投稿须知”。

### 3 写作要求

来稿要求论点明确,数据可靠,简明通顺,重点突出。

#### 3.1 参考文献

参考文献按文内引用的先后顺序排序编码,未公开发表的资料请勿引用。我刊参考文献需要注明著者(文献作者不超过3人时全部列出,多于3人时列出前3人,后加“等”或“et al.”,作者姓前、名后,名字之间用逗号隔开)、文献名、刊名、年卷期及页码。国外期刊名必须写完整,不用缩写,不用斜体。参考文献数量不限。

参考文献格式举例:

- [1] Marcella C, Claudia E, Pier GR, et al. Oxidation of cystine to cysteic acid in proteins by peroyacids as monitored by immobilized pH gradients[J]. Electrophoresis, 1991, 12(5): 376-377
- [2] Wang BJ, Liu SJ. Perspectives on the cultivability of environmental microorganisms[J]. Microbiology China, 2013, 40(1): 6-17 (in Chinese)
- 王保军, 刘双江. 环境微生物培养新技术的研究进展[J]. 微生物学通报, 2013, 40(1): 6-17
- [3] Shen T, Wang JY. Biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990: 87 (in Chinese)
- 沈同, 王镜岩. 生物化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 87
- [4] Liu X. Diversity and temporal-spatial variability of sediment bacterial communities in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Doctoral Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010 (in Chinese)
- 刘欣. 胶州湾沉积物细菌多样性及菌群时空分布规律[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2010

#### 3.2 脚注(正文首页下方)

Foundation item:

\*Corresponding author: Tel: ; Fax: ; E-mail:

Received: January 01, 20xx; Accepted: March 01, 20xx; Published online (www.cnki.net): March 31, 20xx

基金项目: 基金项目(No. )

\*通讯作者: Tel: ; Fax: ; E-mail:

收稿日期: 20xx-01-01; 接受日期: 20xx-03-01; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 20xx-03-31

(下转 p.1898)