

文章编号: 1000-7032(2018)03-0280-07

金纳米星/双锥的可控制备、光热转换及体外光热治疗

吴 頔, 樊 淼, 张露云, 邢晶晶, 吕树芳, 曾乐勇*

(河北大学 化学与环境科学学院, 河北 保定 071002)

摘要: 采用种子生长法, 分别制备了金纳米星和金纳米双锥, 利用透射电子显微镜、紫外-可见(UV-Vis)分光光度计等对样品进行了表征, 并评价了金纳米星和金纳米双锥的光热转换性能、生物相容性以及体外光热治疗性能。结果表明, 金纳米星和金纳米双锥的UV-Vis吸收峰位于808 nm和815 nm左右。在808 nm激光辐照下, 光热转换效率分别为48.43%和53.68%。细胞实验表明, 金纳米星和金纳米双锥具有良好的生物相容性。808 nm激光辐照5 min后, MCF-7细胞存活率分别降至22.54%和13.73%; 且在同等条件下, 金纳米双锥具有更加优异的光热治疗性能, 是一种安全、高性能的肿瘤光热治疗用纳米探针材料。

关键词: 金纳米星; 金纳米双锥; 光热治疗

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20183903.0280

Controllable Synthesis, Photothermal Conversion and *in vitro* Photothermal Therapy of Gold Nanostars/Nanobipyramids

WU Di, FAN Miao, ZHANG Lu-yun, XING Jing-jing, LYU Shu-fang, ZENG Le-yong*

(College of Chemistry & Environmental Science, Hebei University, Baoding 071002, China)

* Corresponding Author, E-mail: zenglyhbu@163.com

Abstract: Using seed-growth method, gold nanostars and gold nanobipyramids were synthesized, respectively, and they were characterized by transmission electron microscope and ultraviolet-visible (UV-Vis) spectrophotometer. Moreover, the photothermal conversion, biocompatibility and *in vitro* photothermal therapy (PTT) of gold nanostars and gold nanobipyramids were evaluated. The results show that the UV-Vis absorption peaks of gold nanostars and gold nanobipyramids are located at about 808 nm and 815 nm, and the photothermal conversion efficiency is calculated to be 48.43% and 53.68%. The cell experiments indicate that the gold nanostars and gold nanobipyramids have good biocompatibility, and the viabilities of MCF-7 cells incubate with gold nanostars and gold nanobipyramids are decreased to be about 22.54% and 13.73%, after they are irradiated by 808 nm laser for 5 min, respectively. Furthermore, compared with the gold nanostars, the gold nanobipyramids have more excellent PTT performance, which could be good candidate as safe and high-efficient nanoprobe material for PTT in tumors.

Key words: gold nanostars; gold nanobipyramids; photothermal therapy

收稿日期: 2017-09-14; 修订日期: 2017-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(51772074, U1732127); 河北省科技厅重点基础研究项目(17961302D); 河北省教育厅青年拔尖人才项目(BJ2017002); 河北大学大学生创新创业训练计划(2017145)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China (51772074, U1732127); Key Basic Research Foundation of Science & Technology Department of Hebei Province (17961302D); Youth Top-notch Talents of Education Department of Hebei Province (BJ2017002); Undergraduate' Innovation and Entrepreneurship Training Program of Hebei University (2017145)

1 引 言

恶性肿瘤疾病严重威胁人类的健康和生命,具有侵袭性强、易复发转移、预后差等缺点,给患者造成巨大的经济和心理负担。分子影像和分子探针技术的进步和发展,对实现恶性肿瘤的精准诊疗意义重大。与传统的手术、放疗、化疗方法相比,光热治疗(PTT)是一种无创、局部、安全的光学治疗方法,它利用纳米探针材料的光热转换性能,可以将光能转变为热能消融癌细胞,具有治疗程序简便、治疗时间短、恢复速度快等优点,在恶性肿瘤的治疗中具有重要的应用前景^[1-3]。

目前,用于肿瘤 PTT 的纳米探针材料主要包括贵金属纳米材料、碳基/铜基等无机纳米材料以及有机材料等^[4-10]。由于材料的光转换效率局限,通常需要提高光辐照通量以及光辐照时间才能发挥其优异的 PTT 性能。然而,过高能量的激发光会引起组织非特异性“热损伤”,热效应大。因此,寻找生物相容性好、光热转换效率高的纳米探针材料是实现其安全治疗的前提。金纳米材料具有特殊的表面等离子体共振(SPR)性质,具有毒性低、水溶性好及表面易官能化等优点^[11-12]。特别是金纳米星和金纳米双锥,其在近红外区的吸收光谱可连续调控,光热转换效率较高,是一类具有潜在应用前景的 PTT 用纳米探针材料^[13-14]。金纳米星和金纳米双锥的形貌具有明显差异,根据材料的形貌-结构-性能之间的构效关系,其在同等条件下的光热转换以及光热治疗性能应该与形貌具有对应关系。然而,到目前为止仍没有关于金纳米星和金纳米双锥光热性能的定量对比研究。因此,系统研究金纳米星和金纳米双锥的可控制备,并评价其光热性能和生物相容性,对实现它们在肿瘤安全、高效 PTT 中的应用具有重要的意义。

本文采用种子生长法,合成出了金纳米星和金纳米双锥材料,利用透射电子显微镜(TEM)、紫外-可见(UV-Vis)分光光度计对金纳米星和金纳米双锥的形貌和 SPR 吸收性质进行了表征;评价了它们在 808 nm 激光辐照下的光热性能,并计算了光热转换效率;最后,以人乳腺癌细胞 MCF-7 为对象,研究了金纳米星和金纳米双锥的生物相容性和体外 PTT 性能。

2 实 验

2.1 试剂与仪器

主要试剂:氯金酸(HAuCl_4 , 98%)和十六烷基三甲基溴化胺(CTAB, 99%)购自萨恩化学技术(上海)有限公司,柠檬酸钠(Alfa Aessar, 99%)、硝酸银(AgNO_3 , Alfa Aessar, 99%)和抗坏血酸(Alfa Aessar, 99%)购自北京伊诺凯科技有限公司,盐酸(HCl , AR)购自天津市科密欧化学试剂有限公司,羧基巯基聚乙二醇(SH-PEG-COOH , $M_w = 1\ 000$)和 3-(4,5-二甲基-2-噻唑基)-2,5-二苯基四氮唑溴化物(MTT, >98%)购自上海索宝生物科技有限公司。

主要仪器:TEM(FEI Tecnai F20)、UV-Vis 分光光度计(PerkinElmer Lambda 35)、红外热成像仪(武汉奥斯特光电, MAG-V30)、酶标仪(thermal Fisher, FC)、磁力搅拌器(德国 IKA, RCT Basic)、高速离心机(上海安亭, TGL-15B)。

2.2 金纳米星和金纳米双锥的制备

2.2.1 金纳米星的制备

向装有 49 mL 水的烧瓶中加入 1 mL 的 HAuCl_4 (50 mmol/L) 溶液,加热煮沸;然后向其中加入 7.5 mL 的柠檬酸钠(质量分数为 1%)溶液,继续加热煮沸 15 min 后,冷却至室温,即得到金种子溶液。向装有 15 mL 水的烧杯中,依次加入 100 μL 的 HAuCl_4 (59 mmol/L) 溶液、20 μL 的 HCl (1 mol/L) 溶液和 20 μL 的金种子溶液;室温搅拌 2 min 后,迅速向其中加入 40 μL 的 AgNO_3 (10 mmol/L) 溶液和 100 μL 的抗坏血酸(100 mmol/L) 溶液;30 s 后,向其中加入 0.5 mL 的 SH-PEG-COOH (0.2 mmol/L) 溶液,继续搅拌 30 min,离心收集,得到金纳米星样品。

2.2.2 金纳米双锥的制备

向装有 2 mL 的 HAuCl_4 (10 mmol/L) 溶液的烧瓶中依次加入 40 mL 的 CTAB (100 mmol/L) 溶液和 400 μL 的 AgNO_3 (10 mmol/L) 溶液制成生长溶液;然后将 800 μL 的盐酸(1 mol/L) 溶液和 100 μL 的抗坏血酸(100 mmol/L) 溶液加入到生长溶液中并持续搅拌;2 min 后,取 2.2.1 中制备的金种子溶液 280 μL 加入到上述溶液中,将其在 28 $^\circ\text{C}$ 水浴环境中静置、保温 5 h;待溶液颜色变为暗紫色时,离心并用去离子水清洗,然后向其中加入 2 mL 的 SH-PEG-COOH (0.2 mmol/L) 溶液;继

续搅拌 30 min,离心收集,得到金纳米双锥样品。

2.3 光热性能及光热转换效率

首先,研究纳米粒子浓度对光热性能的影响,分别将金纳米星和金纳米双锥分散于去离子水中,配制成不同浓度的纳米粒子溶液(0,20,40,60,80 $\mu\text{g}/\text{mL}$);然后利用 808 nm 激光(功率密度 $2.0 \text{ W}/\text{cm}^2$)对纳米粒子溶液进行辐照,辐照时间为 5 min,利用红外热成像仪监测溶液温度的变化,并绘制出温度随时间的变化曲线。其次,研究激光功率密度对光热性能的影响,取浓度为 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的金纳米星和金纳米双锥溶液,利用不同功率密度的 808 nm 激光(0,0.5,1.0,1.5,2.0 W/cm^2)进行辐照,辐照时间为 5 min,利用红外热成像仪监测溶液温度的变化,并绘制出温度随时间的变化曲线。最后,研究金纳米星和金纳米双锥的光热转换效率,利用红外热成像仪监测纳米粒子溶液经 808 nm 激光($2.0 \text{ W}/\text{cm}^2$)辐照 5 min 后的升温 and 降温情况。

2.4 细胞毒性及体外光热治疗

取对数生长期的人乳腺癌细胞 MCF-7 分别与不同浓度的金纳米星和金纳米双锥溶液(0,20,40,60 和 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$)共孵育 24 h,考察不同浓

度纳米粒子对细胞存活率的影响。将不同浓度的金纳米星和金纳米双锥溶液(0,20,40,60,80 $\mu\text{g}/\text{mL}$)分别与 MCF-7 细胞共孵育 4 h,然后利用 808 nm 激光(功率密度 $2.0 \text{ W}/\text{cm}^2$)进行辐照 5 min,继续孵育 20 h 后,测定细胞存活率。将浓度为 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的金纳米星和金纳米双锥溶液分别与 MCF-7 细胞共孵育 4 h,然后利用不同功率的 808 nm 激光(功率密度 0.5,1.0,1.5,2.0 W/cm^2)进行辐照 5 min,继续孵育 20 h 后,测定细胞存活率。

3 结果与讨论

3.1 金纳米星和金纳米双锥的制备及表征

对合成的金纳米星和金纳米双锥的形貌进行了表征。如图 1(a)和(b)为金纳米星的低倍和高倍 TEM 图,可以看出金纳米星分散性好、尺寸均一,具有明显的针状结构,单个金纳米星的尺寸约为 100~150 nm。图 1(c)和(d)为金纳米双锥的 TEM 图,可以看出金纳米双锥纯度高、分散性好、尺寸分布均匀,单个金纳米双锥的长径比约为 10:3(纵向长度约为 100 nm,横向宽度约为 30 nm)。

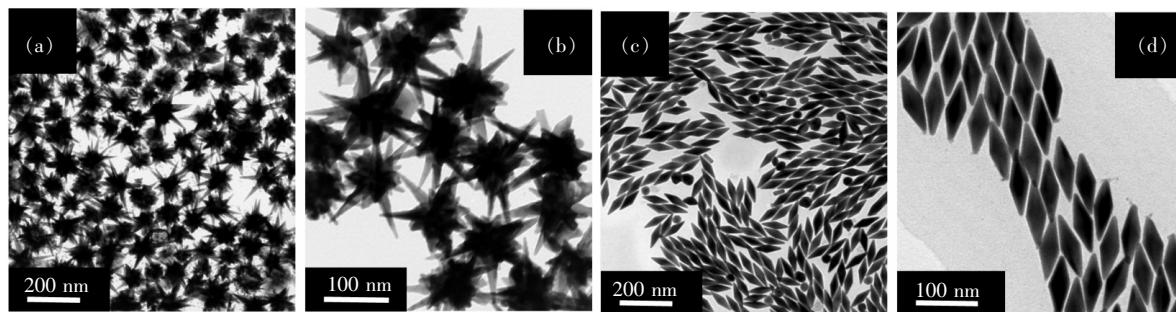


图 1 金纳米星和金纳米双锥的 TEM 图。(a),(b)金纳米星的低倍和高倍 TEM 图;(c),(d)金纳米双锥的低倍和高倍 TEM 图。

Fig.1 TEM images of gold nanostars and gold nanobipyramids. (a), (b) Low-and high-magnification TEM images of gold nanostars. (c), (d) Low-and high-magnification TEM images of gold nanobipyramids.

金纳米材料具有优异的 SPR 性质,其在近红外波段的吸收是评价其近红外光热转换以及光热治疗性能优劣的关键。图 2(a)和(b)分别为金纳米星和金纳米双锥的 UV-Vis 吸收光谱图,从图 2(a)中可以看出,金纳米星的中心吸收峰位于 808 nm 左右,其吸收峰较宽化,覆盖 600~1 000 nm 范围。在图 2(b)中,金纳米双锥具有两个明显的吸收峰,其中强度较低、位于 518 nm 左右的

吸收峰对应于金纳米双锥的横向特征峰,强度较高、位于 815 nm 左右的吸收峰对应于金纳米双锥的纵向特征峰;纵向与横向特征峰强度比值越大,金纳米双锥的纯度越高。在图 2(b)中,计算得到两个特征峰的强度比值约为 2.97,表明所合成的金纳米双锥具有较高的纯度。由于合成的金纳米星和金纳米双锥在 808 nm 附近均有特征吸收峰,因此可以用作近红外响应的热转换材料。

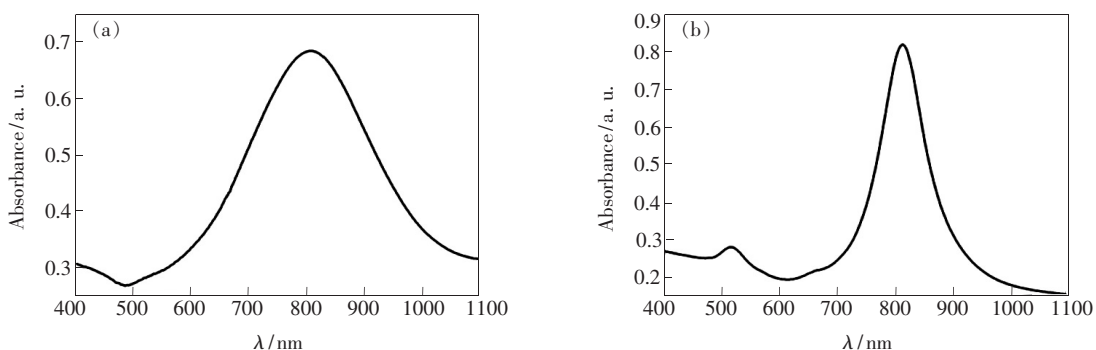


图2 金纳米星和金纳米双锥的 UV-Vis 吸收光谱图。(a)金纳米星;(b)金纳米双锥。

Fig. 2 UV-Vis absorption spectra of gold nanostars and gold nanobipyramids. (a) Gold nanostars. (b) Gold nanobipyramids.

3.2 材料的光热性能及光热转换效率计算

固定金纳米星和金纳米双锥溶液的体积为 2 mL,通过改变纳米粒子浓度和 808 nm 激光辐照功率,研究了金纳米星和金纳米双锥溶液的升温情况。图 3(a)和(c)分别是不同浓度的金纳米星和金纳米双锥溶液在 808 nm 激光(功率密度为 2.0 W/cm^2)辐照下的温度变化情况。从图中可知,随着纳米粒子浓度的提高,溶液的升温越来越快;而在相同条件下,纯水的温度仅升高了 $4.19 \text{ }^\circ\text{C}$,表明 808 nm 激光的热效应小,对正常组织不具有热损伤性。图 3(b)和(d)分别是浓度为 $80 \text{ } \mu\text{g/mL}$ 的金纳米星和金纳米双锥溶液在不同功率 808 nm 激光辐照下的温度

变化情况。可以看出,随着辐照功率的增加,纳米粒子溶液的升温越来越快。当金纳米星和金纳米双锥的浓度为 $80 \text{ } \mu\text{g/mL}$ 时,在 2.0 W/cm^2 的 808 nm 激光辐照下,金纳米星和金纳米双锥溶液的温度分别升高了 $35.50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $42.88 \text{ }^\circ\text{C}$,表明金纳米双锥具有更优异的光热性能。

光热转换效率是评价一种材料光热性能的重要指标。在实验中,采用功率密度为 2.0 W/cm^2 的 808 nm 激光,分别对 2 mL 的金纳米星和金纳米双锥溶液照射 5 min,同时监测溶液的升温 and 降温情况,如图 4(a)和 4(c)所示。根据文献[15]报道的方法,材料的光热转换效率计算公式如下:

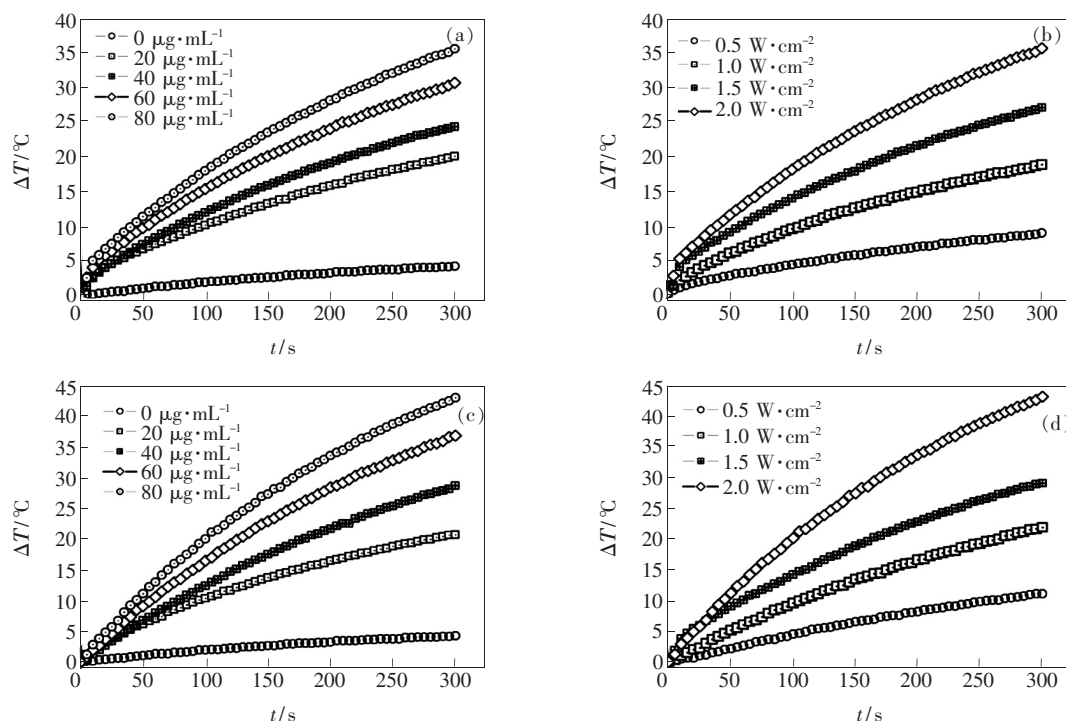


图3 不同浓度和不同功率条件下,金纳米星和金纳米双锥的温度变化曲线。(a),(b)金纳米星;(c),(d)金纳米双锥。

Fig. 3 Temperature variation curves of gold nanostars and gold nanobipyramids under different concentration of nanomaterials and different power density of 808 nm laser. (a), (b) Gold nanostars. (c), (d) Gold nanobipyramids.

$$\sum_i m_i C_{p,i} \frac{dT}{dt} = Q_{\text{NPs}} + Q_s - Q_{\text{loss}}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{hA(\Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{H}_2\text{O}})}{I(1 - 10^{-A_\lambda})}, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\text{max}}}, \quad (3)$$

$$t = \frac{\sum_i m_i C_{p,i}}{hA} \ln \theta, \quad (4)$$

其中 m_i 和 $C_{p,i}$ 分别为溶液中不同物质的质量和比热, ΔT_{max} 为金纳米星和金纳米双锥溶液在 5 min 内温度变化最大值, $\Delta T_{\text{H}_2\text{O}}$ 为纯水在 5 min 内温度变化最大值(可由图 3(a) 得到), I 为 808 nm 激光功率密度, A_λ 为金纳米星和金纳米双锥的特征

吸收峰强度值。为了计算出材料的光热转换效率 η , 必须得出 hA 值, 为此, 根据图 4(a) 和 (c) 可绘制出金纳米星和金纳米双锥溶液在降温阶段时间 (t) 与 $-\ln\theta$ 的关系曲线, 如图 4(b) 和 4(d), 直线拟合后斜率分别为 341.29 和 363.49。根据公式 (4) 可知, hA 值与图 4(b) 和 (d) 中的斜率负相关。在公式 (4) 中, 纳米粒子的质量可忽略不计, 仅考虑溶剂 (2 mL 水, 质量和比热均已知) 的质量, 则可求得金纳米星和金纳米双锥的 hA 分别为 0.024 6 和 0.023 1, 将其代入公式 (2), 得到金纳米星和金纳米双锥的光热转换效率分别为 48.43% 和 53.68%, 表明金纳米双锥具有更高的光热转换效率。

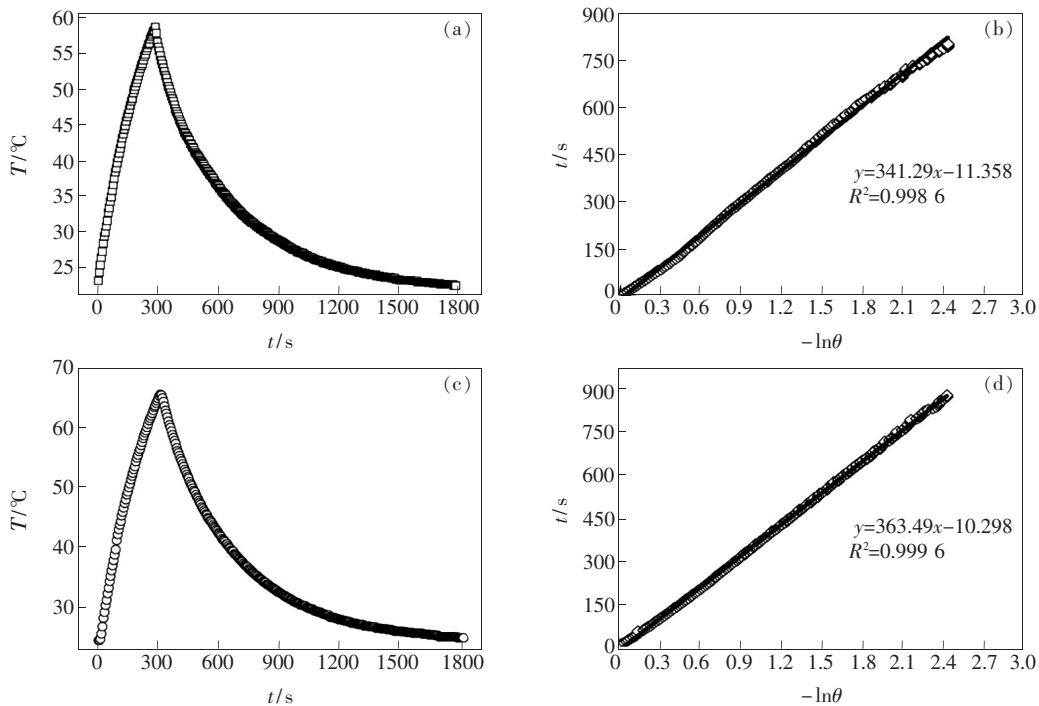


图 4 金纳米星和金纳米双锥的升温/降温曲线以及在降温阶段时间 (t) 与 $-\ln\theta$ 之间的线性关系曲线。(a), (b) 金纳米星; (c), (d) 金纳米双锥。

Fig. 4 Heating/cooling curves and the linear relationship of time data (t) versus $-\ln\theta$ obtained from the cooling period. (a), (b) Gold nanostars. (c), (d) Gold nanobipyramids.

3.3 材料的细胞毒性及细胞光热治疗性能评价

材料的生物相容性评价是实现其体内应用的前提。在我们的实验中, 将不同浓度的金纳米星和金纳米双锥分别与人乳腺癌细胞 MCF-7 共孵育 24 h, 然后采用 MTT 方法对细胞存活率进行表征。如图 5(a) 所示, 当金纳米星和金纳米双锥的浓度从 0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 提高到 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时, 细胞存活率均在 90% 以上, 表明金纳米星和金纳米双锥均

具有良好的生物相容性。

采用 808 nm 激光, 研究了不同条件下金纳米星和金纳米双锥对 MCF-7 细胞的光热治疗性能。图 5(b) 是当 2.0 W/cm^2 的 808 nm 激光辐照 5 min 后, 不同浓度的金纳米星和金纳米双锥分别与 MCF-7 细胞共孵育后的细胞存活率。可以发现, 随着纳米粒子浓度的提高, 细胞存活率逐渐降低; 而且, 在相同条件下, 金纳米双锥的光热治疗

性能优于金纳米星。当不同功率 808 nm 激光辐照 5 min 后,浓度为 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的金纳米星和金纳米双锥分别与 MCF-7 细胞共孵育后的细胞存活率如图 5(c) 所示。可以看出,随着辐照功率的提高,细胞存活率逐渐降低;而且,在相同条件下,金

纳米双锥的光热治疗性能优于金纳米星。当 808 nm 激光功率密度为 $2.0 \text{ W}/\text{cm}^2$ 、纳米粒子浓度为 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,金纳米星和金纳米双锥孵育的 MCF-7 细胞存活率分别为 22.54% 和 13.73%,表明金纳米双锥具有更加优异的光热治疗性能。

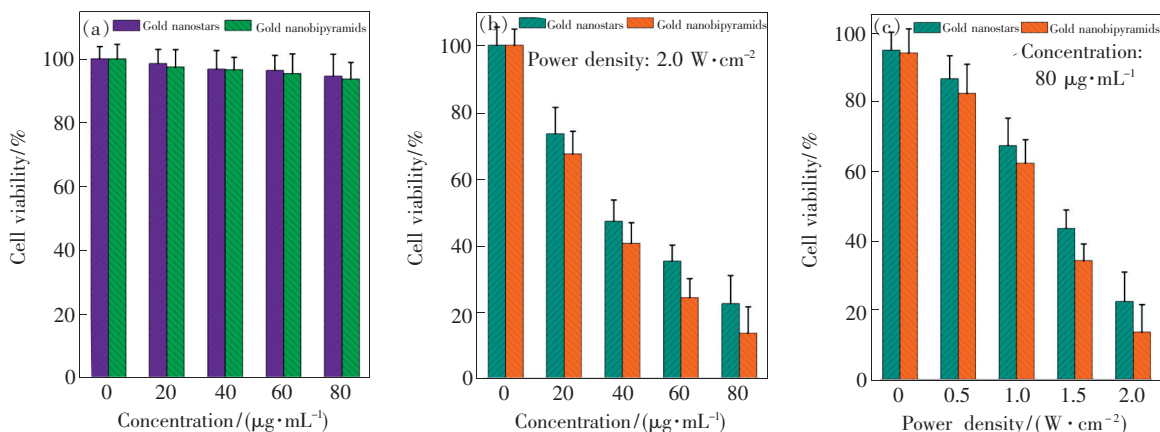


图5 金纳米星和金纳米双锥的细胞毒性以及体外光热治疗性能。(a)细胞毒性;(b)不同浓度条件下的光热治疗性能;(c)不同激光功率密度条件下的光热治疗性能。

Fig. 5 Cytotoxicity and *in vitro* PTT performance of gold nanostars and gold nanobipyramids. (a) Cytotoxicity. (b) PTT performance with different concentration of nanomaterials. (c) PTT performance with different power density of 808 nm laser.

4 结 论

本文采用种子生长法合成出了分散性好、尺寸均一、纯度高的金纳米星和金纳米双锥材料,金纳米星尺寸约为 100 ~ 150 nm,吸收峰位于 808 nm 左右;金纳米双锥的长径比约为 10:3,纵向长度约为 100 nm,纵向吸收峰位于 815 nm 左右。

当 $2.0 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的 808 nm 激光辐照 5 min 时,80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的金纳米星和金纳米双锥溶液的升温可达 $35.50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $42.88 \text{ }^\circ\text{C}$,光热转换效率分别为 48.43% 和 53.68%,与 MCF-7 细胞共孵育后细胞存活率分别降至 22.54% 和 13.73%。而且,在同等条件下,金纳米双锥的光热性能优于金纳米星,是一种优异的肿瘤 PTT 用纳米探针材料。

参 考 文 献:

- [1] CHENG L, WANG C, FENG L Z, *et al.* . Functional nanomaterials for phototherapies of cancer [J]. *Chem. Rev.* , 2014, 114:10869-10939.
- [2] SHANMUGAM V, SELVAKUMAR S, YEH C S. Near-infrared light-responsive nanomaterials in cancer therapeutics [J]. *Chem. Soc. Rev.* , 2014, 43:6254-6287.
- [3] ZOU L L, WANG H, HE B, *et al.* . Current approaches of photothermal therapy in treating cancer metastasis with nanotherapeutics [J]. *Theranostics* , 2016, 6:762-772.
- [4] WANG C, BLACK K C L, LUEHMANN H, *et al.* . Comparison study of gold nanohexapods, nanorods, and nanocages for photothermal cancer treatment [J]. *ACS Nano* , 2013, 7:2068-2077.
- [5] ZHOU M, LI J J, LIANG S, *et al.* . CuS nanodots with ultrahigh efficient renal clearance for positron emission tomography imaging and image-guided photothermal therapy [J]. *ACS Nano* , 2015, 9:7085-7096.
- [6] LI C, KWON W, BEACK S, *et al.* . Biodegradable nitrogen-doped carbon nanodots for non-invasive photoacoustic imaging and photothermal therapy [J]. *Theranostics* , 2016, 6:2196-2208.
- [7] 李奕杉, 钟年丙, 廖强, 等. 基于六硼化镧与壳聚糖的光热转换生物材料 [J]. *发光学报*, 2017, 38(8): 1021-1027.

- LI Y S, ZHONG B N, LIAO Q, *et al.*. Photo-thermal biomaterials based on lanthanum hexaboride (LaB_6) and chitosan [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(8):1021-1027. (in Chinese)
- [8] 李欣远, 纪穆为, 王虹智, 等. 近红外光热转换纳米晶研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(5):541-554.
- LI X Y, JI M W, WANG H Z, *et al.*. Research progress of near-infrared photothermal conversion nanocrystals [J]. *Chin. Opt.*, 2017, 10(5):541-554. (in Chinese)
- [9] ZHOU J, LU Z G, ZHU X J, *et al.*. NIR photothermal therapy using polyaniline nanoparticles [J]. *Biomaterials*, 2013, 34:9584-9592.
- [10] ZOU Q L, ABBAS M, ZHAO L Y, *et al.*. Biological photothermal nanodots based on self-assembly of peptide-porphyrin conjugates for antitumor therapy [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2017, 139:1921-1927.
- [11] YANG X, YANG M X, PANG B, *et al.*. Gold nanomaterials at work in biomedicine [J]. *Chem. Rev.*, 2015, 115:10410-10488.
- [12] DREADEN E C, ALKILANY A M, HUANG X H, *et al.*. The golden age: gold nanoparticles for biomedicine [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2012, 41:2740-2779.
- [13] WANG S J, HUANG P, NIE L M, *et al.*. Single continuous wave laser induced photodynamic/plasmonic photothermal therapy using photosensitizer-functionalized gold nanostars [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25:3055-3061.
- [14] FENG J, CHEN L M, XIA Y Z, *et al.*. Bioconjugation of gold nanobipyramids for simultaneous SERS detection and targeted photothermal therapy in breast cancer [J]. *ACS Biomater. Sci. Eng.*, 2017, 3:608-618.
- [15] LIU Y, AI K, LIU J, *et al.*. Dopamine-melanin colloidal nanospheres: an efficient near-infrared photothermal therapeutic agent for *in vivo* cancer therapy [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25:1353-1359.



吴頔(1984 -),女,辽宁抚顺人,硕士,实验师,2010年于东北林业大学获得硕士学位,主要从事纳米材料制备及生物医学应用的研究。
E-mail: wudi2137@163.com



曾乐勇(1981 -),男,河北新河人,博士,研究员,2010年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事无机纳米探针制备及肿瘤可视化诊疗的研究。
E-mail: zenglyhbu@163.com