

# 金纳米星在肿瘤诊疗一体化中的应用：从表面修饰到成像与治疗

祝孝栋

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年5月18日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月10日

## 摘要

金纳米星(Gold Nanostars, GNS)凭借其独特的星形结构、可调谐的局域表面等离子体共振(LSPR)特性、优异的光热转换效率以及多功能修饰能力, 已成为癌症诊疗一体化领域的研究热点。如何实现GNS的形貌可控合成、高效表面功能化修饰及安全高效的生物应用, 是当前该领域的核心研究重点。本文系统综述了GNS的典型合成方法, 总结了其生物功能化修饰策略与表面改性途径, 重点阐述了其在生物医学成像以及肿瘤靶向治疗等方面的研究进展, 以期为GNS的进一步生物应用与临床转化提供理论参考与研究思路。

## 关键词

金纳米星, 诊疗一体化, 光热治疗, 多模态成像

# Applications of Gold Nanostars in Integrated Cancer Diagnosis and Therapy: From Surface Modification to Imaging and Treatment

Xiaodong Zhu

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: May 18, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 10, 2026

## Abstract

Gold nanostars (Gold Nanostars, GNS) have emerged as a hot research topic in the field of integrated cancer diagnosis and therapy due to their unique star-shaped structure, tunable localized surface plasmon resonance (LSPR) properties, excellent photothermal conversion efficiency, and

versatile functionalization capabilities. Achieving controlled synthesis of GNS morphology, efficient surface functionalization, and safe and effective biomedical applications are currently the core research priorities in this field. This paper systematically reviews typical synthesis methods for GNS, summarizes strategies for their biofunctionalization and surface modification, and highlights research progress in biomedical imaging and tumor-targeted therapy. The aim is to provide theoretical references and research insights for the further biological applications and clinical translation of GNS.

## Keywords

Gold Nanostars, Diagnosis and Treatment Integration, Photothermal Therapy, Multimodal Imaging

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

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

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



Open Access

## 1. 引言

癌症作为全球主要的卫生安全问题,其发病率和死亡率持续攀升,对人类生命构成了严重威胁[1]-[6]。传统的肿瘤治疗方法主要包括手术切除、化学治疗和放射治疗,但这些方法存在创伤大、毒副作用强、易复发等局限性[7][8]。纳米技术的快速发展,使得基于纳米材料的肿瘤诊疗一体化策略应运而生,为突破传统治疗的局限提供了新思路[9]-[11]。

在众多纳米材料中,金纳米颗粒因其良好的生物相容性、可调的光学性质和易于表面修饰的特点,成为研究的热点[12][13]。其中,金纳米星作为一种各向异性的金纳米结构,具有独特的星形形貌和尖锐的分支末端,展现出区别于金纳米球、金纳米棒等常规结构的优异光学特性。GNS的LSPR峰可通过调控其尺寸形貌精确调节至近红外(NIR)区域,该波段的光具有较深的组织穿透深度和较低的组织吸收,是理想的生物光学窗口[14]。更重要的是,GNS的分支末端能够产生显著的电磁场“热点”[15],使其在表面增强拉曼散射成像和光热转换方面具有独特优势[16][17]。

基于上述特点,GNS已成为肿瘤诊疗一体化领域的研究热点。近年来,研究者们发展了多种GNS基多功能纳米平台,通过介孔二氧化硅包覆、聚合物修饰、靶向配体偶联等策略,实现了CT/PAI/SERS/FL等多模态成像引导下的PTT/PDT/化疗/放疗协同治疗。本文将从GNS的制备与功能化、多模态成像应用、协同治疗策略等方面对该领域的研究进展进行系统综述。

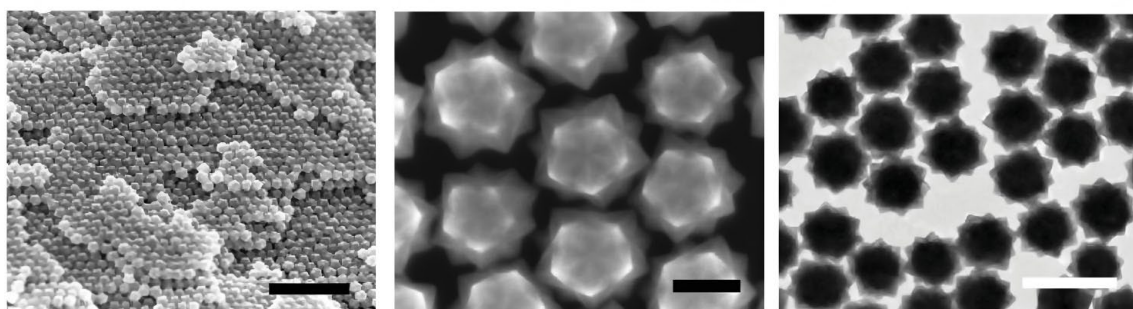
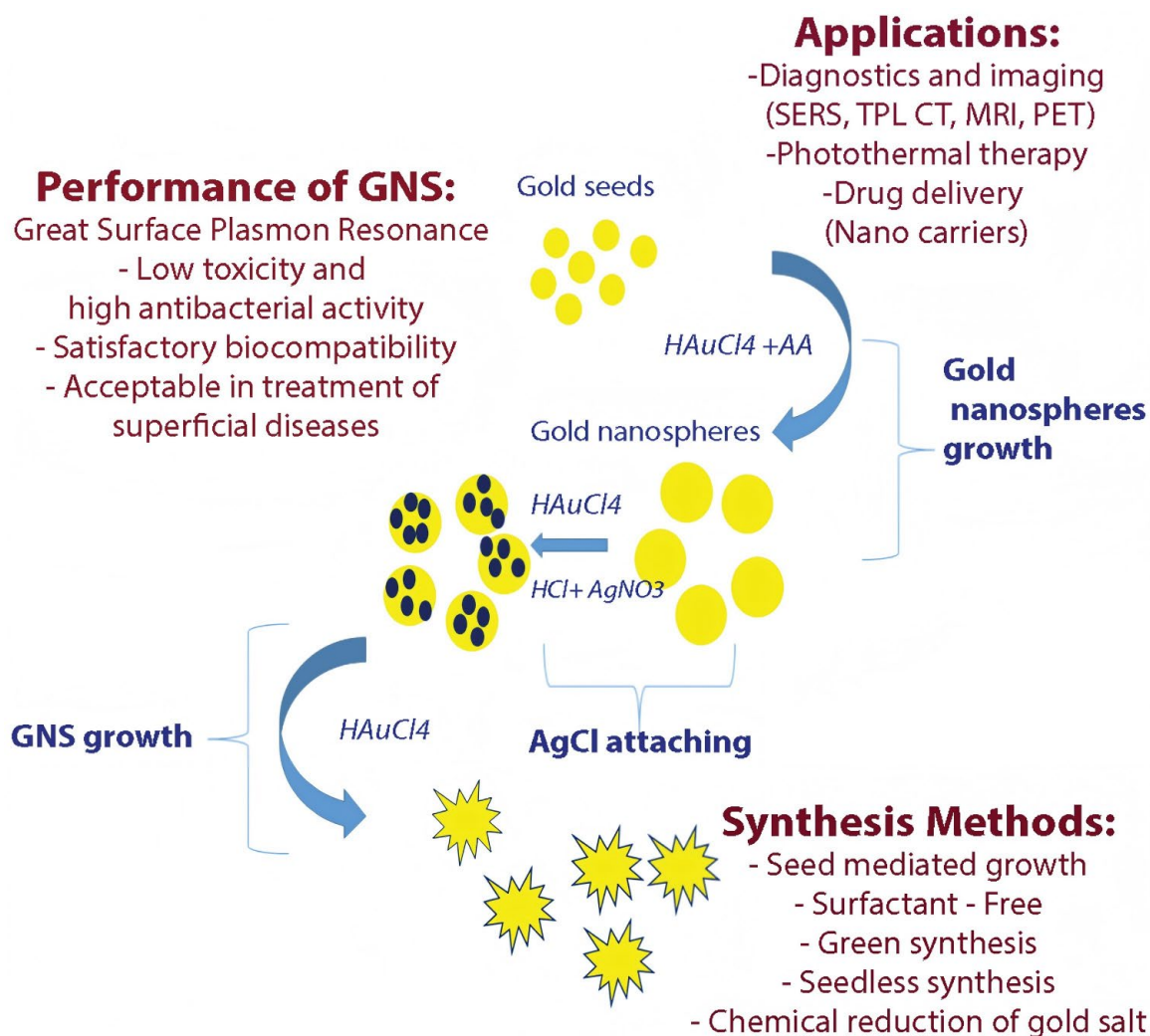
## 2. 金纳米星的制备与表面功能化

### 2.1. 金纳米星的合成方法

目前,最常用且最成熟的合成方法是种子介导生长法。该方法首先通过经典的Turkevich法合成尺寸均一的金种子,然后在含有金种子、氯金酸( $\text{HAuCl}_4$ )、还原剂(如抗坏血酸)和形貌导向剂(如 $\text{Ag}^+$ )的生长溶液中,使金原子在金种子表面各向异性沉积,最终形成星形结构[18],见图1。在此过程中, $\text{Ag}^+$ 的选择性钝化作用是诱导分支生长的关键,通过调节 $\text{Ag}^+$ 浓度、种子与金盐的摩尔比以及反应pH值,可以精确调控GNS分支的长度、数量和LSPR峰位[19][20]。例如,Charles等人通过优化15 nm金种子与 $\text{HAuCl}_4$ 的摩尔比为0.004,成功制备了LSPR峰位于807 nm的GNS,适用于808 nm激光激发的光热治疗。

除了种子介导法,无表面活性剂的合成策略也备受关注。例如,使用HEPES缓冲液一步还原 $\text{HAuCl}_4$ ,无需添加任何表面活性剂即可获得形貌良好的GNS。所得GNS表面洁净,不含十六烷基三甲基溴化铵

(CTAB)等毒性分子，无需复杂的配体交换即可用于生物偶联，显著降低了细胞毒性风险[21]。此外，还有研究者利用抗坏血酸还原法、电化学法等制备 GNS。



**Figure 1.** Schematic illustration of the seed-mediated synthesis of gold nanostars [18]

**图 1.** 种子介导法制备金纳米星示意图[18]

## 2.2. 表面功能化修饰策略

提升胶体稳定性、生物相容性、靶向性和诊疗多功能性，以适配肿瘤成像与协同治疗的不同需求，

正是表面功能化改性作为金纳米星实现生物医学应用之核心的主要目标。

聚乙二醇化是提高 GNS 生理稳定性和延长体内循环时间最常用的策略[22]，通过将硫醇化聚乙二醇(HS-PEG)组装到 GNS 表面(形成 Au-S 键)，可有效屏蔽非特异性蛋白吸附，减少单核吞噬细胞系统的摄取，从而延长血液循环半衰期[23]。

在靶向功能化方面，通过偶联叶酸(FA)、RGD 肽、透明质酸(HA)或适配体，可实现 GNS 对肿瘤细胞的主动靶向。例如，Pan 等人将透明质酸修饰到 GNS 表面，利用 HA 与 CD44 受体的特异性识别，实现了对乳腺癌干细胞的高效靶向和选择性摄取[24]。叶酸受体在多种癌细胞表面过表达，因此叶酸修饰也是常用的靶向策略[25]。此外，介孔二氧化硅包覆是另一类重要的修饰方法[26]，在 GNS 表面包覆一层介孔二氧化硅，不仅可以保护 GNS 的尖锐形貌防止其在激光照射下发生熔融，还可以作为药物储库装载化疗药物或光敏剂[27]。热敏脂质双层或者相变材料(比如 1-十四醇)，可以作为“门控”分子堵住介孔的孔道；在近红外激光照射时，GNS 的光热效应会让局部温度上升，触发门控分子发生相变，最终释放药物。除了外源性近红外光热响应以外，在肿瘤微环境中具有内在特征的设计也是一类重要的 GNS 功能化的方法。例如，在 pH 响应中，由于肿瘤组织弱酸性的微环境可以引起酸敏化学键断裂或者 pH 敏感聚合物结构的变化而达到对药物的选择性释放；在还原响应中，由于肿瘤细胞内谷胱甘肽(GSH)的含量远大于细胞外液中的含量，用二硫键将药物或者开关分子连接到被介孔二氧化硅所包裹的 GNS 上，在细胞内的高 GSH 条件下就可以实现药物的大量释放[6]；而在酶响应中，肿瘤区域特异地存在着一些酶能够降解相应的底物分子从而起到开关的作用来实现对肿瘤区域的选择性给药[7]。这些修饰方法，为 GNS 在复杂生物环境中的应用打下了坚实基础。

### 2.3. 合成与修饰方法的比较

目前，GNS 的制备主要有两种方法：一种是种子介导生长法制备，另一种是无表面活性剂法制备。种子介导生长法利用  $Ag^+$  实现对分支数目、大小以及 LSPR 位置的有效调控，适合大批量生产且具有良好的重复性的样品；但是由于其表面存在大量有毒性的十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)，需要经过复杂的表面改性过程(例如 PEG 修饰等)才能用于生物学实验中。而另一种无表面活性剂法(如 HEPES 还原法)可以得到表面较为干净的 GNS，不需要进一步处理就可以进行生物分子连接操作，生物相容性更好；但是对形貌可控性差并且价格昂贵，难以实现大规模的应用。

在表面功能化方面，被动靶向主要是通过 PEG 修饰延长其在血液中的循环时间，进而依靠 EPR 效应实现肿瘤内的被动聚集，操作简单易行，但是受肿瘤间异质性的影响大；而主动靶向则是通过连接叶酸、RGD 肽或者透明质酸等配体，与其过表达的受体进行特异性的结合，可以明显地提高细胞摄取率，但是由于配体本身的不稳定性和免疫原性以及受体表达谱的变化导致其应用受限。介孔二氧化硅包覆不仅可以防止 GNS 被激光融化，还可以作为药物载体用于化疗和光热联合治疗，但是会增大粒径并且增加制备过程。因此，在选择不同的制备与修饰方法时需要具体问题具体分析：如果需要精确调控光学性质则采用种子介导法，如果对生物安全性要求很高则使用无表面活性剂法；主动靶向和被动靶向，单功能和多功能的设计都需要考虑各自的优缺点在靶向效率、毒性和复杂程度之间的平衡。

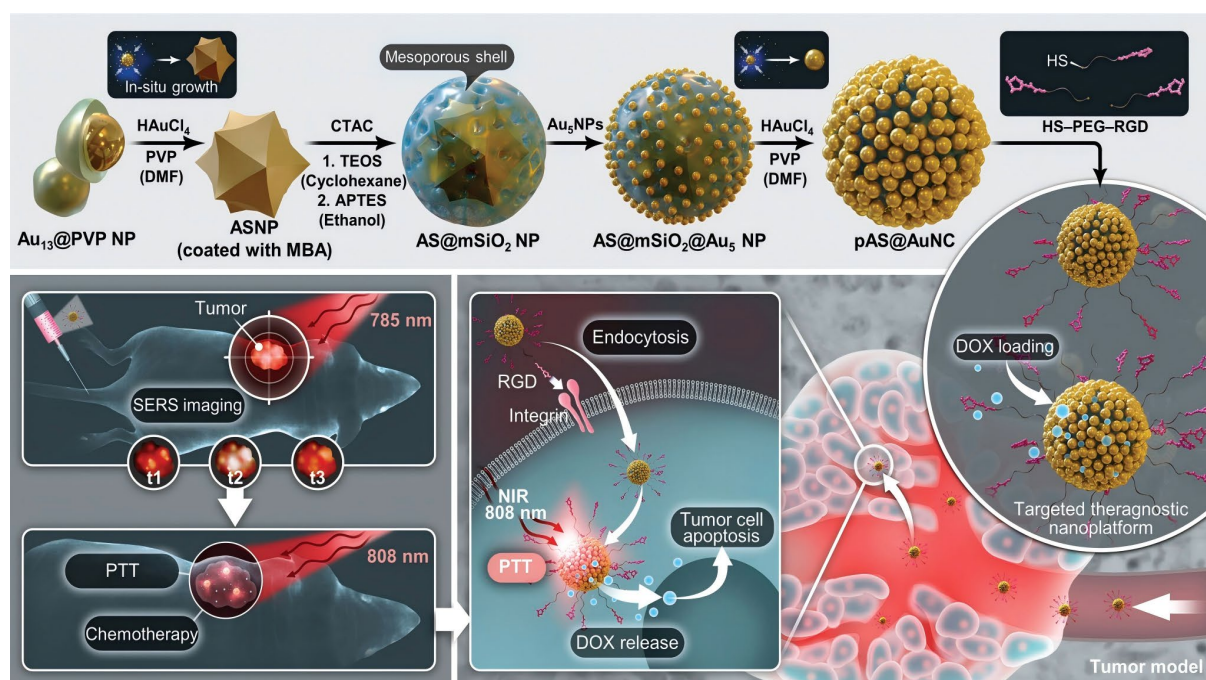
## 3. 金纳米星的生物应用

近些年来，GNS 其凭借近红外吸收、高光热转换效率及表面可功能化等优势，在生物成像、肿瘤治疗等方面表现突出，已成为近年来生物医学纳米材料领域的研究热点。

### 3.1. 金纳米星在生物成像中的应用

生物成像是 GNS 的核心应用领域之一。金元素具有高原子序数( $Z = 79$ )和强 X 射线衰减能力，使其

成为理想的 CT 成像造影剂, 与临床常用的碘造影剂相比, 金纳米颗粒的 X 射线衰减系数更高, 且不易被肾脏快速清除, 有利于肿瘤部位的长期成像。Hu 等人制备的叶酸靶向 GNS, 在静脉注射 72 小时后肿瘤部位仍可检测到明显的 CT 信号增强, 显示了 GNS 作为长效靶向 CT 造影剂的潜力[28]。Sasidharan 等人利用牛血清白蛋白介导合成的 GNS, 其 CT 信号强度是临床碘造影剂的两倍, 且白蛋白外壳赋予了 GNS 良好的生物相容性和胶体稳定性[29]。CT 成像能够提供全身骨骼和软组织的三维解剖结构信息, 与 GNS 的主动靶向能力结合后, 可用于肿瘤的早期定位和疗效评估。在光声成像领域, GNS 依靠近红外区的强吸收特性, 能够高效地把光能转化成热能, 引发局部出现热弹性膨胀, 进而产生可以被超声探头检测到的声波信号。光声成像结合了光学成像的高对比度和超声成像的高空间分辨率, 在深层组织成像中具有独特优势[30]。Ning 等人将 GNS 负载间充质干细胞, 利用三维光声成像实时追踪细胞在肿瘤部位的分布, 确定了最佳治疗时间窗口[31]。他们还发现, 介孔二氧化硅壳层有效保护了 GNS 的星形形貌, 使其在多次脉冲激光照射后仍能维持稳定的光声信号, 这对于长期、定量化的活体成像追踪至关重要。在 SERS 成像方面, GNS 多分支结构产生的电磁“热点”可极大增强吸附在其表面拉曼报告分子的信号, 增强因子可达  $10^6\sim 10^9$ , 远超金纳米球和金纳米棒, 这种高灵敏度使得 SERS 成像能够检测极低浓度的生物标志物。Yin 等人构建的多层介孔金纳米结构(pAS@AuNC), 见图 2。通过星形金核与金纳米簇壳层之间的等离子体耦合效应, 在纳米间隙中形成了更密集的“热点”, SERS 信号进一步增强达 49 倍。该探针成功用于荷瘤小鼠肿瘤边界的精准识别, 并通过 SERS 信号强度变化确定了最佳的激光治疗时间点[32]。在荧光成像领域, GNS 可以作为高效的荧光猝灭剂搭建“开关式”探针, Xu 等人设计出 GNS-TAT-Cy5 探针, 该结构里细胞穿透肽 TAT 可促进细胞摄入, Cy5 荧光染料会借助纳米表面能量转移(NSET)效应被 GNS 猝灭。当 GNS 介导的光热疗法激活细胞内的 caspase-3 后, caspase-3 会特异性切割底物肽(DEVD), 让 Cy5 被释放出来, 荧光也随之恢复, 做到了对细胞凋亡过程的实时成像监测[33]。这种设计避免了传统探针存在的背景干扰, 提高了成像的信噪比。



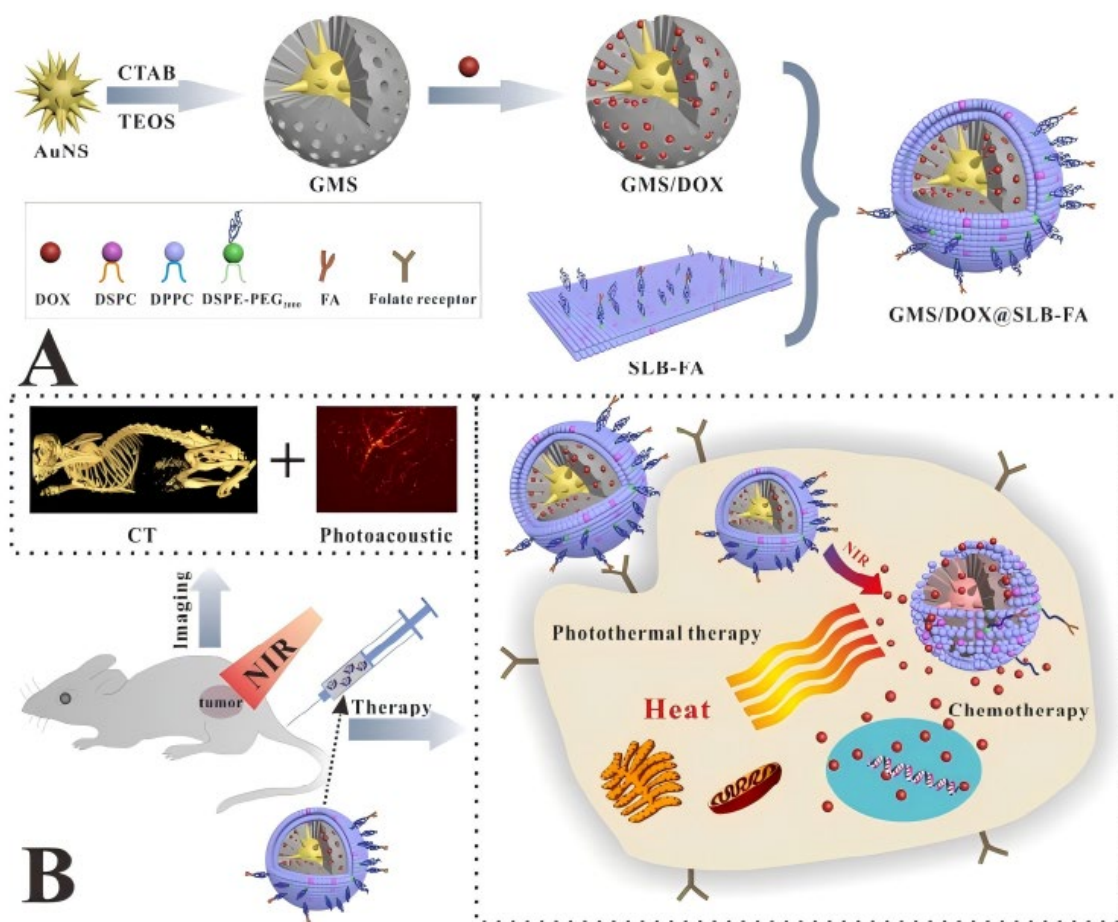
**Figure 2.** A multilayer mesoporous gold nanostructure: A highly efficient near-infrared light-controlled cancer chemo- and photothermal therapy system based on SERS imaging [32]

**图 2.** 一种多层介孔金纳米结构: 基于 SERS 成像的超高效近红外光控癌症化学/光热治疗系统[32]

### 3.2. 金纳米星在癌症治疗中的应用

利用光热转换、药物递送及治疗效应等多功能协同特性, GNS 可构建集早期诊断、精准治疗和实时疗效监测于一体的纳米诊疗系统, 有效促进肿瘤精准医疗的创新发展。

在癌症治疗中, GNS 凭借其极高的光热转换效率, 可作为高效的光热治疗剂。Zhang 等人制备的 GNS@mSiO<sub>2</sub>/Ce6@Catalase 探针, 在 808 nm 激光照射下光热转换效率约为 28%, 同时通过过氧化氢酶催化肿瘤内源性 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 产生氧气, 缓解肿瘤缺氧, 增强光动力治疗效果[34]。Charles 等人优化合成的 GNS 在 808 nm 激光照射下可产生约 4℃ 的温和升温, 实现了温和光热治疗, 避免了高温对周围正常组织的热损伤[20]。Li 等人制备的聚多巴胺包覆 GNS, 在激光照射下使 HeLa 细胞存活率降至 10.02%, 并通过线粒体膜电位下降、溶酶体膜通透性增加和自噬激活等多条途径诱导细胞死亡[23]。在化疗联合治疗方面, An 等人设计的 GMS/DOX@SLB-FA 探针, 利用热敏脂质双层(相变温度约 42℃)封堵介孔二氧化硅的孔道。在 808 nm 激光照射下, GNS 的光热效应使局部温度迅速升高至相变温度以上, 脂质双层发生相变从凝胶态转变为液晶态, 通透性增加, 从而触发 DOX 的快速释放, 累积释放率达 71.98%, 显著高于未照射组的 27.73%。体内实验表明, 该联合治疗策略有效抑制了肿瘤复发, 而单纯光热治疗组在治疗后 8 天即出现肿瘤再生[27], 见图 3。

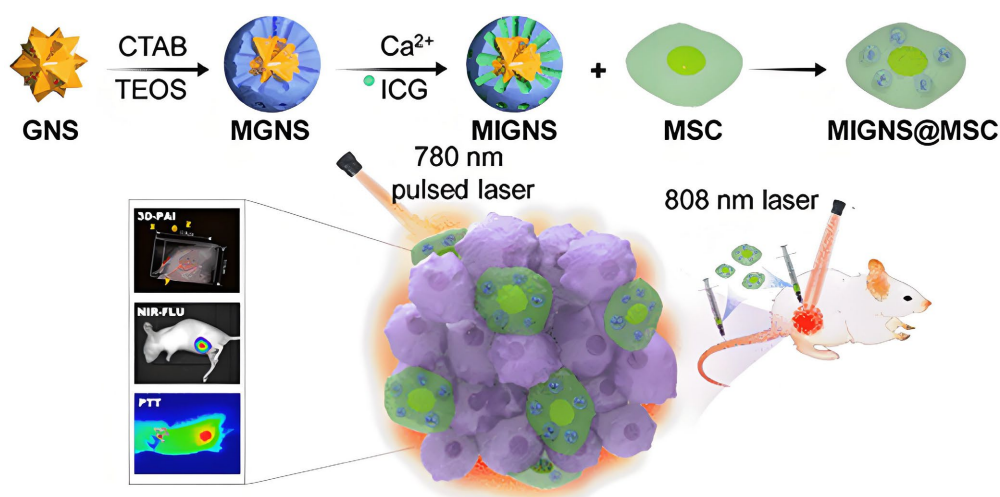


**Figure 3.** *In vivo* CT/photoacoustic imaging and NIR-triggered combined chemophotothermal therapy using composite nano-probes based on gold nanostars, mesoporous silica, and thermosensitive liposomes [27]

**图 3.** 基于金纳米星、介孔二氧化硅和热敏脂质体复合纳米探针的体内 CT/光声成像与 NIR 触发化学光热联合疗法[27]

在放疗增敏方面，高原子序数的金能够有效吸收 X 射线能量，通过光电效应和俄歇效应产生大量低能电子，增强辐射诱导的 DNA 损伤。Hu 等人制备的叶酸靶向 GNS 作为放疗增敏剂，在 6 Gy X 射线照射下，其放射增敏比(SER)达到 1.59，显著优于单纯放疗组。联合光热治疗后，肿瘤抑制效果进一步增强[35]。在免疫治疗方面，Liu 等人将 GNS@CaCO<sub>3</sub>/Ce6 负载到自然杀伤细胞中。NK 细胞具有天然的肿瘤归巢能力，无需额外修饰即可主动迁移至肿瘤部位。CaCO<sub>3</sub>壳层在中性 pH 下保护 Ce6，在肿瘤酸性微环境中降解，释放 Ce6。该平台集 NK 细胞的直接免疫杀伤、GNS 的光热效应和 Ce6 的光动力效应于一体，在小鼠肺癌模型中实现了三重协同治疗，肿瘤抑制率显著高于任何单一疗法[36]。除了使用免疫细胞作为载体外，GNS 介导的光热治疗自身还可以引起免疫原性细胞死亡(Immunogenic Cell Death, ICD)。ICD 的特征是肿瘤细胞在死亡时会释放或者暴露损伤相关分子模式，例如钙网蛋白(CRT)暴露、高迁移率族蛋白 B1 (HMGB1)释放以及 ATP 分泌等[37]。这些都会吸引并活化树突状细胞(DCs)，从而导致肿瘤抗原提呈，进一步刺激针对肿瘤的特异性 CD8<sup>+</sup>T 细胞反应，使原本无反应性的“冷”肿瘤转化为有反应性的“热”肿瘤。基于这一点，GNS 介导的 PTT 与免疫检查点抑制剂(如抗 PD-1/PD-L1 抗体)具有协同作用的能力：PTT 诱导的 ICD 可以提高肿瘤内部 T 细胞数量，而 ICIs 可以解除对 T 细胞的抑制作用，两者结合可能会产生更强更持久的抗肿瘤免疫记忆，防止肿瘤再次出现或者扩散。然而到现在为止，关于 GNS 与 ICIs 联合使用的报道很少，但是其他一些金纳米粒子已经证明这种方法是可行的，因此这无疑是在 GNS 领域极具前景的未来研究方向。

诊疗一体化研究中，GNS 可同步实现肿瘤成像、治疗及疗效动态监控。Yin 等人的多层介孔金纳米结构同时具备 SERS 成像、高载药(DOX 载药率 34.1%)和光热性能。通过 SERS 成像监测纳米探针在肿瘤部位的富集动力学，确定了注射后 2 h 为最佳治疗时间点，此时 SERS 信号最强，表明探针在肿瘤中富集最多。随后仅需 5 min 低功率(0.5 W/cm<sup>2</sup>)激光照射即可实现高效协同治疗，治疗后 30 天内未见肿瘤复发[32]。Ning 等人的干细胞负载 GNS 平台利用三维光声成像确定了最佳治疗窗口，实现了成像指导下的精准光热治疗，避免了过早或过晚照射导致的疗效下降[31]，见图 4。He 等人将 GNS 与上转换纳米颗粒(UCNPs)自组装形成簇，在单一 980 nm 激光激发下，UCNPs 将近红外光上转换为可见光激活光敏剂，同时 GNS 产生光热效应，实现了光热与光动力的协同治疗[38]。得益于金材料的良好生物相容性与可控降解特性，GNS 在有效治疗剂量下展现出可接受的生物安全性。



**Figure 4.** Application of spatiotemporal tracking technology for photosensitive stem cells guided by multimodal imaging in the treatment of breast cancer [31]

**图 4.** 基于多模态成像引导的光敏干细胞时空追踪技术在乳腺癌治疗中的应用[31]

## 4. 总结与展望

本文系统综述了金纳米星的合成方法、生物功能化修饰策略及其在生物成像与癌症治疗两大生物医学领域的研究进展。GNS 作为典型的多功能贵金属纳米材料, 凭借其可调的近红外 LSPR、极高的光热转换效率与优异的 SERS 增强性能, 有效弥补了球形金纳米颗粒在深层组织诊疗中的不足, 已成为纳米生物医学领域的重要研究对象。多种合成路径可实现其形貌与光学性能调控, 多样化表面修饰(如 PEG 化、靶向配体偶联、介孔二氧化硅包覆)显著提升了其水溶性、靶向性与胶体稳定性, 在 CT/光声/SERS/荧光多模态成像及 PTT/化疗/放疗/免疫治疗中展现出重要应用价值。

虽然金纳米星在肿瘤诊疗一体化方面具有巨大应用前景, 但是其临床应用还存在多个问题。例如, 在毒理学上, 目前大多数报道集中在短期毒性研究上, 对于 GNS 长期累积、器官蓄积以及慢性毒性了解甚少; 药代动力学上, 由于 GNS 呈星状, 其在体内的行为比较复杂, 不同尺寸大小、形状以及表面修饰都会极大地改变它们的半衰期、分布以及清除途径; 大规模生产中, 种子介导法等方法对于反应条件非常敏感, 难以保证批次间一致性; 质量控制上, 还没有针对 GNS 特有的结构(如分支数目、LSPR 稳定性)进行评价的方法; 科学监管方面, 现有的指南并不适合各向异性金属纳米粒子, 何谓“等效”, 如何评价风险收益比都是问题。因此解决这些问题需要开发生物可降解或者可由肾脏清除 GNS, 发展基于肿瘤微环境中内在刺激响应型多级智能响应体系, 开发符合 GMP 的大规模生产工艺, 提出包括重要质量属性的质量检测要求并加强与法规沟通交流来促进 GNS 的应用。

未来, 随着材料设计优化、生物医学研究深化与监管体系完善, GNS 有望突破临床转化瓶颈, 在精准医学与肿瘤诊疗一体化中发挥重要作用。

## 参考文献

- [1] Li, D., Huang, K., She, J., Cai, Y., Liu, B., Wei, Z., *et al.* (2024) Two-Photon Fluorescence-Guided Precise Photothermal Therapy Located in a Single Cancer Cell Utilizing Bifunctional N-Doped Carbon Quantum Dots. *Journal of Colloid and Interface Science*, **662**, 719-726. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.02.114>
- [2] Liu, X., Zhang, W., Shang, W., Du, X., Liu, H., Tang, B.Z., *et al.* (2026) A “Simple” Phototheranostic Agent for High-Performance Type I Photodynamic and Photothermal Synergistic Cancer Therapy. *Journal of Colloid and Interface Science*, **703**, Article ID: 139117. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.139117>
- [3] Xu, W., Zhao, D., Huang, X., Zhang, M., Zhu, W. and Xu, C. (2022) Significance of Monocyte Infiltration in Patients with Gastric Cancer: A Combined Study Based on Single Cell Sequencing and TCGA. *Frontiers in Oncology*, **12**, Article ID: 1001307. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.1001307>
- [4] Zhu, C., Preis, E., Bakowsky, U. and Xia, Y. (2025) Cancer Nanomedicine: Concepts, Promises, and Challenges. *Chem*, **11**, Article ID: 102706. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2025.102706>
- [5] Jassim, A., Rahrmann, E.P., Simons, B.D. and Gilbertson, R.J. (2023) Cancers Make Their Own Luck: Theories of Cancer Origins. *Nature Reviews Cancer*, **23**, 710-724. <https://doi.org/10.1038/s41568-023-00602-5>
- [6] Song, Z., Ding, G., Xia, A., Bai, L., Ma, W., Li, Q., *et al.* (2025) Abstract 936: HPV-Related Cancer Model Development and Its Application in the Efficacy Evaluation of a saRNA Cancer Vaccine. *Cancer Research*, **85**, 936-936. <https://doi.org/10.1158/1538-7445.am2025-936>
- [7] Li, S., Chen, X., Shi, H., Yi, M., Xiong, B. and Li, T. (2025) Tailoring Traditional Chinese Medicine in Cancer Therapy. *Molecular Cancer*, **24**, Article No. 27. <https://doi.org/10.1186/s12943-024-02213-6>
- [8] Fu, X., Zhang, Z., Dong, Q., Li, S., Wang, X., Zhang, H., *et al.* (2026) Recent Advances in Novel Drug Delivery Systems for the Management of Cutaneous Squamous Cell Carcinoma. *International Journal of Nanomedicine*, **21**, 1-21. <https://doi.org/10.2147/ijn.s592605>
- [9] Wu, C., Qiao, M., Ning, H., Gao, T., Xu, H., Xue, D., *et al.* (2026) Application Advances of Gold Nanoparticles in Cancer Theranostics: From Physicochemical Mechanisms to Multifunctional Nanoplatforms. *International Journal of Molecular Sciences*, **27**, Article No. 3454. <https://doi.org/10.3390/ijms27083454>
- [10] Wei, D., Sun, H., Zhang, M., Zhao, Y. and Yuan, H. (2024) Mapping the Technological Trajectory of Inorganic Nanomaterials in the Cancer Field. *Journal of Nanoparticle Research*, **26**, Article No. 66.

- <https://doi.org/10.1007/s11051-024-05975-8>
- [11] He, X., Liu, S., Hu, X., Huang, X., Zhang, H. and Mao, X. (2023) Precious Metal Clusters as Fundamental Agents in Bioimaging Usability. *Frontiers in Chemistry*, **11**, Article ID: 1296036. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1296036>
- [12] Jahangirian, H., Kalantari, K., Izadiyan, Z., Rafiee-Moghaddam, R., Shameli, K. and Webster, T.J. (2019) A Review of Small Molecules and Drug Delivery Applications Using Gold and Iron Nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, **14**, 1633-1657. <https://doi.org/10.2147/ijn.s184723>
- [13] Patil, T.P., Vibhute, A.A., Vinu, A. and Pandey-Tiwari, A. (2025) Nucleic Acid Conjugated Gold Nanoparticles for Biosensing Applications: A Review. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **41**, Article No. 219. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04454-z>
- [14] Pu, Y., Zhao, Y., Zheng, P. and Li, M. (2018) Elucidating the Growth Mechanism of Plasmonic Gold Nanostars with Tunable Optical and Photothermal Properties. *Inorganic Chemistry*, **57**, 8599-8607. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b01354>
- [15] Wang, X., Du, S., Qu, C., Yu, F., Zheng, L., Su, M., *et al.* (2024) Plasmonic Nanostar@metal Organic Frameworks as Strong Adsorber, Enricher, and Sensor for Trace Nanoplastics via Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *Chemical Engineering Journal*, **487**, Article ID: 150415. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2024.150415>
- [16] Hao, F., Nehl, C.L., Hafner, J.H. and Nordlander, P. (2007) Plasmon Resonances of a Gold Nanostar. *Nano Letters*, **7**, 729-732. <https://doi.org/10.1021/nl062969c>
- [17] Yuan, H., Khoury, C.G., Hwang, H., Wilson, C.M., Grant, G.A. and Vo-Dinh, T. (2012) Gold Nanostars: Surfactant-Free Synthesis, 3D Modelling, and Two-Photon Photoluminescence Imaging. *Nanotechnology*, **23**, Article ID: 075102. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/7/075102>
- [18] Mousavi, S.M., Zarei, M., Hashemi, S.A., Ramakrishna, S., Chiang, W., Lai, C.W., *et al.* (2020) Gold Nanostars-Diagnosis, Bioimaging and Biomedical Applications. *Drug Metabolism Reviews*, **52**, 299-318. <https://doi.org/10.1080/03602532.2020.1734021>
- [19] Atta, S., Beetz, M. and Fabris, L. (2019) Understanding the Role of AgNO<sub>3</sub> Concentration and Seed Morphology in the Achievement of Tunable Shape Control in Gold Nanostars. *Nanoscale*, **11**, 2946-2958. <https://doi.org/10.1039/c8nr07615d>
- [20] Charles, J., Munkhsaikhan, E., Bregigeon-Chanéac, P., Le Berre, T., Moulin, C., Franqueville, L., *et al.* (2026) Combined Photothermal and Chemotherapy to Induce Cancer Cell Damage in Spheroids Using Gold Nanostars and Gold Nanorods. *Particle & Particle Systems Characterization*, **43**, e00210. <https://doi.org/10.1002/ppsc.202500210>
- [21] Yuan, H., Fales, A.M. and Vo-Dinh, T. (2012) TAT Peptide-Functionalized Gold Nanostars: Enhanced Intracellular Delivery and Efficient NIR Photothermal Therapy Using Ultralow Irradiance. *Journal of the American Chemical Society*, **134**, 11358-11361. <https://doi.org/10.1021/ja304180y>
- [22] David, S., Patel, D.Y., Cardona, S.M., Kirby, N. and Mayer, K.M. (2022) Cellular Uptake and Cytotoxicity of PEGylated Gold Nanoparticles in C33A Cervical Cancer Cells. *Nano Express*, **3**, Article ID: 025006. <https://doi.org/10.1088/2632-959x/ac7738>
- [23] Li, Y., Wang, X., Yang, D., Hu, P., Gao, L., Chen, D., *et al.* (2019) Polydopamine-Coated Gold Nanostars for Near-Infrared Cancer Photothermal Therapy by Multiple Pathways. *Journal of Materials Science*, **54**, 12036-12048. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03774-4>
- [24] Pan, Y., Zhou, S., Liu, C., Ma, X., Xing, J., Parshad, B., *et al.* (2022) Dendritic Polyglycerol-Conjugated Gold Nanostars for Metabolism Inhibition and Targeted Photothermal Therapy in Breast Cancer Stem Cells. *Advanced Healthcare Materials*, **11**, Article ID: 2102272. <https://doi.org/10.1002/adhm.202102272>
- [25] Choudhury, H., Pandey, M., Wen, L.P., Cien, L.K., Xin, H., Yee, A.N.J., *et al.* (2020) Folic Acid Conjugated Nanocarriers for Efficient Targetability and Promising Anticancer Efficacy for Treatment of Breast Cancer: A Review of Recent Updates. *Current Pharmaceutical Design*, **26**, 5365-5379. <https://doi.org/10.2174/1381612826666200721000958>
- [26] Cui, M., Wiraja, C., Qi, L.W., Ting, S.C.W., Jana, D., Zheng, M., *et al.* (2020) One-Step Synthesis of Amine-Coated Ultra-Small Mesoporous Silica Nanoparticles. *Nano Research*, **13**, 1592-1596. <https://doi.org/10.1007/s12274-020-2775-z>
- [27] An, J., Yang, X., Cheng, K., Song, X., Zhang, L., Li, C., *et al.* (2017) *In Vivo* Computed Tomography/Photoacoustic Imaging and NIR-Triggered Chemo-Photothermal Combined Therapy Based on a Gold Nanostar-, Mesoporous Silica-, and Thermosensitive Liposome-Composited Nanoprobe. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 41748-41759. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b15296>
- [28] Hu, P., Hou, X., Yu, X., Wei, X., Li, Y., Yang, D., *et al.* (2021) Folic Acid-Conjugated Gold Nanostars for Computed Tomography Imaging and Photothermal/Radiation Combined Therapy. *ACS Applied Bio Materials*, **4**, 4862-4871. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00171>

- [29] Sasidharan, S., Bahadur, D. and Srivastava, R. (2017) Rapid, One-Pot, Protein-Mediated Green Synthesis of Gold Nanostars for Computed Tomographic Imaging and Photothermal Therapy of Cancer. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**, 10163-10175. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02169>
- [30] Borg, R.E. and Rochford, J. (2018) Molecular Photoacoustic Contrast Agents: Design Principles & Applications. *Photochemistry and Photobiology*, **94**, 1175-1209. <https://doi.org/10.1111/php.12967>
- [31] Ning, P., Chen, Y., Bai, Q., Xu, C., Deng, C., Cheng, Q., *et al.* (2022) Multimodal Imaging-Guided Spatiotemporal Tracking of Photosensitive Stem Cells for Breast Cancer Treatment. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 7551-7564. <https://doi.org/10.1021/acscami.1c13072>
- [32] Yin, B., Ho, W.K.H., Xia, X., Chan, C.K.W., Zhang, Q., Ng, Y.M., *et al.* (2023) A Multilayered Mesoporous Gold Nanoarchitecture for Ultraeffective Near-Infrared Light-Controlled Chemo/Photothermal Therapy for Cancer Guided by SERS Imaging. *Small*, **19**, Article ID: 2206762. <https://doi.org/10.1002/sml.202206762>
- [33] Xu, P., Ning, P., Wang, J., Qin, Y., Liang, F. and Cheng, Y. (2019) Precise Control of Apoptosis via Gold Nanostars for Dose Dependent Photothermal Therapy of Melanoma. *Journal of Materials Chemistry B*, **7**, 6934-6944. <https://doi.org/10.1039/c9tb01956a>
- [34] Zhang, L., Yang, X., Wei, J., Li, X., Wang, H. and Zhao, Y. (2019) Intelligent Gold Nanostars for *in Vivo* CT Imaging and Catalase-Enhanced Synergistic Photodynamic & Photothermal Tumor Therapy. *Theranostics*, **9**, 5424-5442. <https://doi.org/10.7150/thno.33015>
- [35] Hu, H., Yang, W., Liang, Z., Zhou, Z., Song, Q., Liu, W., *et al.* (2021) Amplification of Oxidative Stress with Lycorine and Gold-Based Nanocomposites for Synergistic Cascade Cancer Therapy. *Journal of Nanobiotechnology*, **19**, Article No. 221. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00933-1>
- [36] Liu, B., Cao, W., Cheng, J., Fan, S., Pan, S., Wang, L., *et al.* (2019) Human Natural Killer Cells for Targeting Delivery of Gold Nanostars and Bimodal Imaging Directed Photothermal/photodynamic Therapy and Immunotherapy. *Cancer Biology & Medicine*, **16**, 756-770. <https://doi.org/10.20892/j.issn.2095-3941.2019.0112>
- [37] Galluzzi, L., Buqué, A., Kepp, O., Zitvogel, L. and Kroemer, G. (2017) Immunogenic Cell Death in Cancer and Infectious Disease. *Nature Reviews Immunology*, **17**, 97-111. <https://doi.org/10.1038/nri.2016.107>
- [38] He, L., Dragavon, J., Cho, S., Mao, C., Yildirim, A., Ma, K., *et al.* (2016) Self-Assembled Gold Nanostar-NaYF<sub>4</sub>:Yb/Er Clusters for Multimodal Imaging, Photothermal and Photodynamic Therapy. *Journal of Materials Chemistry B*, **4**, 4455-4461. <https://doi.org/10.1039/c6tb00914j>