

# Ag基量子点生物应用研究进展

庞今祎

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月15日

## 摘要

Ag基量子点(Ag-based Quantum Dots)作为一类新型无镉量子点材料, 凭借其可调的光学性能、良好的生物相容性及优异的荧光特性, 在生物医学领域展现出巨大的应用潜力。如何实现Ag基量子点的可控合成、高效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Ag基量子点的典型合成方法, 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传感检测、活体生物成像以及肿瘤靶向诊疗等方面的研究进展, 并对Ag基量子点在生物医学应用中面临的挑战与发展前景进行了展望, 以期Ag基量子点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

Ag基量子点, 功能化修饰, 生物传感, 生物成像, 肿瘤诊疗

# Research Progress on the Biological Applications of Ag-Based Quantum Dots

Jinyi Pang

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

Received: March 31, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 15, 2026

## Abstract

Ag-based quantum dots, as a new type of cadmium-free quantum dot material, exhibit great potential in the biomedical field due to their tunable optical properties, good biocompatibility, and excellent fluorescence characteristics. The key research focus in this field currently is how to achieve controlled synthesis of silver-based quantum dots, efficient functional modification, and safe and effective biological applications. This article systematically reviews typical synthesis methods of silver-based quantum dots, summarizes their biological functionalization strategies and surface modification approaches,

and highlights research progress in biosensing detection, *in vivo* bioimaging, and tumor-targeted diagnosis and treatment. Furthermore, it discusses the challenges and development prospects of silver-based quantum dots in biomedical applications, aiming to provide theoretical references and research ideas for their further biological applications and clinical translation.

## Keywords

Ag-Based Quantum Dots, Functionalized Modification, Biosensing, Bioimaging, Tumor Diagnosis and Treatment

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

纳米技术与生物医学的深度融合,推动了新型纳米生物探针与诊疗平台的快速发展[1][2]。半导体量子点凭借尺寸依赖的光电特性、高荧光量子产率、窄发射峰宽及优异的抗光漂白性能,在生物分析、活体成像与疾病诊疗等领域展现出重要的应用价值[3]-[5]。传统镉基等重金属量子点虽光学性能优异,但其潜在的细胞毒性与生物安全性问题,严重制约了其在活体水平及临床场景中的应用[6]-[8]。因此,开发低毒、生物相容性优良、发光性能可调的新型量子点体系,已成为纳米生物学领域的重要研究方向。

随着新型无毒量子点研究的不断深入,Ag基量子点成为半导体纳米材料领域的研究热点,它是一类以银元素为核心组分的量子点材料,常见的Ag基量子点包括Ag<sub>2</sub>S、Ag<sub>2</sub>Se、AgInS<sub>2</sub>等[9][10]。其近红外荧光发射、低生物毒性、带隙可调及良好的光稳定性等突出优势,可有效规避传统重金属量子点的应用瓶颈,在生物医学领域展现出广阔前景[11]。目前,围绕Ag基量子点的可控合成、表面功能化修饰及生物应用已开展大量研究,但在合成工艺优化、靶向功能构建及体内代谢行为等方面仍存在诸多关键问题亟待解决。基于此,本文系统综述Ag基量子点的主要合成方法,总结其生物功能化修饰策略,重点阐述其在生物传感、生物成像及肿瘤诊疗领域的研究现状与应用进展,分析当前面临的挑战并对未来发展方向进行展望,为Ag基量子点的优化设计、功能拓展及临床转化提供理论依据与研究思路。

## 2. Ag基量子点的合成与生物功能化修饰

### 2.1. Ag基量子点的合成方法

Ag基量子点的合成方法直接决定其尺寸分布、光学性能、胶体稳定性和生物相容性,合理选择合成方法是实现其生物应用的前提。目前,Ag基量子点的合成方法主要包括有机相合成法、水相合成法、绿色生物合成法等,不同方法各有优势,适用于不同应用场景的需求。

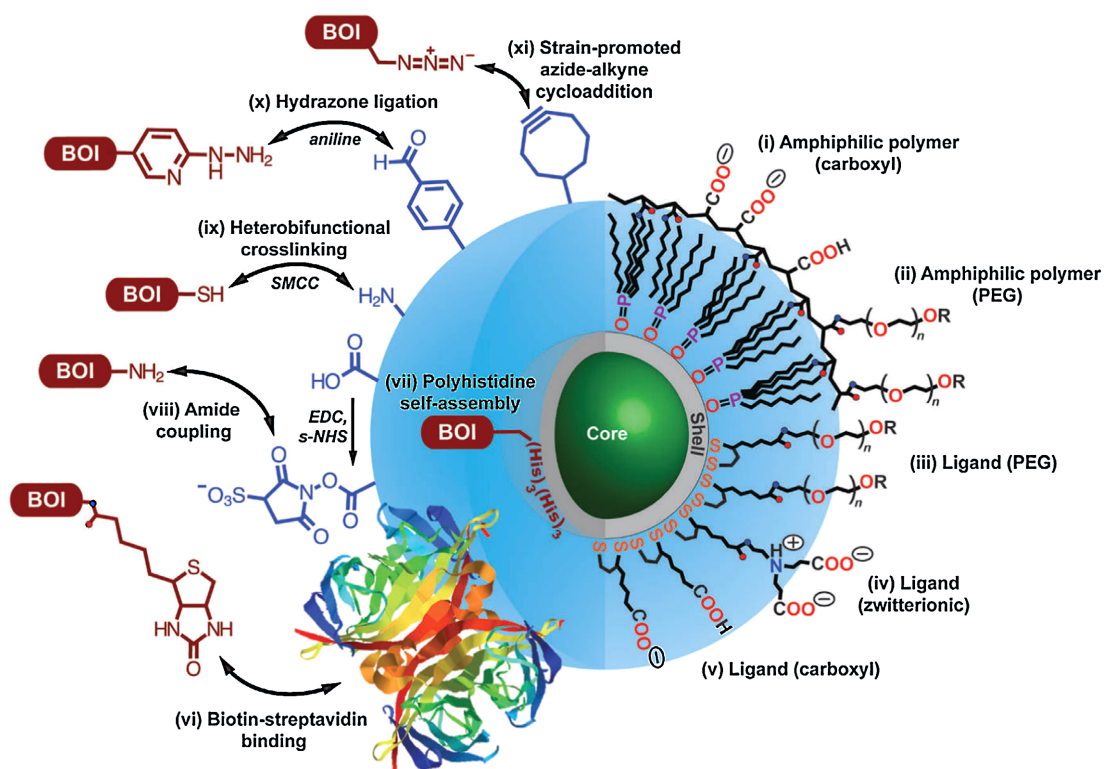
有机相合成法是制备高质量Ag基量子点的经典方法,通常采用热注入法或一锅法在高沸点有机溶剂中进行[12]。该方法的优点在于反应温度高、结晶性好、尺寸分布均匀、量子产率高。Du等人[13]采用单源前驱体[(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NCS<sub>2</sub>Ag]在200℃下分解,成功合成了单分散的Ag<sub>2</sub>S量子点,荧光发射峰位于1058 nm。有机相合成通常采用醋酸Ag、氯化铟和硫源在高温下反应合成AgInS<sub>2</sub>量子点。通过调控Ag/In摩尔比,可以获得从绿色到近红外发射的AgInS<sub>2</sub>量子点,量子产率可达60%以上[14]。然而,有机相合成的量子点表面被疏水配体包裹,需要通过配体交换或两亲性聚合物包覆进行水溶性修饰后才能用于生物应用,这一过程可能导致量子产率下降[15]。

水相合成法可以直接获得水溶性的 Ag 量子点,避免了繁琐的相转移过程,更有利于生物应用[12]。常用的水相合成方法包括直接加热法、水热法和微波辅助合成法。Jiang 等人[16]以谷胱甘肽为稳定剂,在水相中合成了  $\text{Ag}_2\text{S}$  量子点,荧光发射峰位于 624~727 nm。研究发现,谷胱甘肽不仅作为稳定剂,还可作为硫源参与反应。通过调控谷胱甘肽的用量,可以控制量子点的尺寸和荧光发射波长。Jiao 等人[17]以谷胱甘肽和聚乙烯亚胺为双配体,通过水热法合成了量子产率高达 37.2%的水溶性  $\text{AgInS}_2$  量子点。

绿色生物合成法是近年来发展起来的一种环境友好的量子点制备方法,利用细菌、真菌、植物或其提取物作为生物基质进行量子点的生物合成。这种方法无需使用有毒化学试剂,反应条件温和,成本低廉,合成的量子点具有良好的生物相容性。Borovaya 等人[18]利用真菌 *Pleurotus ostreatus* 成功合成了  $\text{Ag}_2\text{S}$  量子点,尺寸为 10~15 nm,荧光发射峰位于 520 nm,合成的  $\text{Ag}_2\text{S}$  量子点具有良好的抗菌活性,并可作为细胞内荧光探针。植物提取物也被广泛用于 Ag 量子点的绿色合成。Sibiya 等人[19]利用茶叶提取物合成了  $\text{Ag}_2\text{S}$  量子点,发现 pH 值对量子点的尺寸和形貌有显著影响,碱性条件下合成的量子点尺寸更小、分布更均匀。

## 2.2. Ag 量子点的生物功能化修饰

生物功能化改性是 Ag 量子点实现生物应用的关键,其核心目的是提升水溶性、生物相容性、靶向性和多功能性,适配不同生物应用场景。水溶性改性主要解决 Ag 量子点(尤其是油相合成产品)的疏水性问题,常用方法包括配体交换和表面包覆,见图 1。配体交换法通过将疏水性配体替换为水溶性配体,如 DHLA、巯基小分子、PEG 等,可快速实现量子点的水溶性改性。表面包覆法则通过在量子点表面包覆  $\text{SiO}_2$ 、壳聚糖、明胶等生物相容性材料,不仅能提升水溶性,还能增强量子点的稳定性,减少 Ag 离子



**Figure 1.** Schematic diagram of different biomolecule conjugation (left, BOI = target biomolecule) and quantum dot surface coating (right) strategies [23]

**图 1.** 不同生物偶联(左侧, BOI = 目标生物分子)和量子点表面涂层(右侧)策略示意图[23]

释放,降低毒性。靶向功能化修饰旨在实现 Ag 基量子点对特定生物组织或细胞的精准识别,减少对正常组织的损伤[20]。常用的靶向分子包括抗体、多肽、叶酸、适配体等。Zou 等人[21]使用树枝状介孔二氧化硅用作探针的载体,封装 Ag<sub>2</sub>S 量子点并偶联了 MRI 造影剂 Gd-DOTA 和西妥昔单抗,靶向肿瘤细胞膜表面的 EGFR,实现了肿瘤区域的双模态成像。此外,肿瘤微环境响应型修饰(如 pH、ROS、酶响应)也是近年来的研究热点,通过在量子点表面修饰响应性基团,可实现肿瘤部位的精准富集和功能激活,例如 pH 响应型 Ag<sub>2</sub>S 量子点[22],在肿瘤酸性微环境中可实现配体脱落,释放 Ag 离子和负载药物,提升治疗效果。多功能集成修饰则通过将成像、治疗、载药等功能整合到 Ag 基量子点表面,实现诊疗一体化应用,将 Ag 基量子点与化疗药物、光热试剂偶联,可实现“成像-治疗-疗效评估”的闭环管理。

### 3. Ag 基量子点的生物应用

随着 Ag 基量子点合成与修饰技术的不断成熟,其在生物医学领域的应用范围不断拓展,凭借低毒性、近红外发光、可功能化等优势,在生物成像、生物传感、肿瘤诊疗等方面展现出独特优势,成为近年来生物医学纳米材料领域的研究热点。

#### 3.1. Ag 基量子点在生物传感中的应用

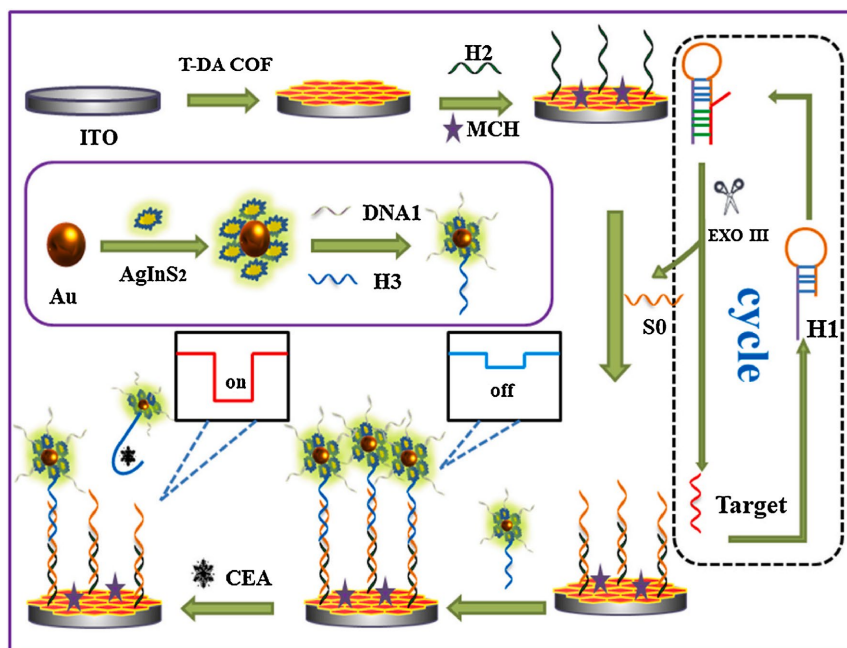
Ag 基量子点凭借优异的光学性能和表面可修饰性,在生物传感领域展现出高灵敏度、高选择性的优势,可用于离子、小分子、活性氧以及肿瘤标志物的快速检测。在离子和小分子检测方面,Ag 基量子点的荧光强度会随着目标物质的浓度变化而发生显著淬灭或增强,基于此可构建高灵敏传感平台。Cai 等人[24]构建 AgInS<sub>2</sub> 量子点-DNA 纳米线信号探针,耦合 NPC-ZnO 实现光电流极性翻转与信号放大,可同时高灵敏检测 Hg<sup>2+</sup>与黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>。Wei 等人[25]制备巯基乙酸修饰的 Ag<sub>2</sub>S 量子点对 Cu<sup>2+</sup>具有特异性识别能力,检测限为 21 nM,并成功应用于血清样品 Cu<sup>2+</sup>的精准检测,为铜代谢异常相关疾病的诊断提供依据。

在肿瘤标志物检测方面,Ag 基量子点通过靶向修饰可特异性识别肿瘤标志物(如蛋白、DNA、microRNA),结合荧光共振能量转移(FRET)、比色法等技术,可实现肿瘤标志物的高灵敏、高选择性检测。Jin 等人[27]使用适配体修饰的 Ag<sub>2</sub>S 量子点与肿瘤标志物 CA125 抗体偶联,构建特异性传感平台,检测限低至 5 pg/mL,能够实现血清中 CA125 的快速检测,为卵巢癌早期诊断提供支持。Yan 等人[26]将 AgInS<sub>2</sub> 量子点与金纳米颗粒-DNA 探针偶联,可用于 HIV 基因与 CEA 肿瘤标志物的双靶标检测,检测限分别低至 3.23 fM 与 3.25 fg/mL,可实现 HIV 感染与相关肿瘤的同时精准识别,为肿瘤早期筛查提供新方法,见图 2。

#### 3.2. Ag 基量子点在生物成像中的应用

生物荧光成像作为一种无创、实时、高灵敏度的成像技术,是 Ag 基量子点最核心的生物应用领域。Ag 基量子点凭借近红外发光特性,尤其是 NIR-II 发光优势,有效解决了传统荧光探针组织穿透浅、背景干扰大的问题,在细胞成像和活体成像中得到广泛应用。体外细胞成像方面,经谷胱甘肽、巯基丙酸、多肽等配体修饰后,Ag 基量子点具备良好的水溶性与生物相容性,可实现肿瘤细胞、干细胞的高效标记与靶向成像。Zhang 等人[28]将 RGD 多肽修饰于 Ag<sub>2</sub>S 量子点表面,实现对 U87-MG、MDA-MB-468 等肿瘤细胞的特异性荧光成像,荧光信号稳定且抗光漂白能力显著优于有机染料。Wang 等人[29]采用一步水相法合成 OVA 包覆的 Ag<sub>2</sub>S 量子点,直接实现小鼠乳腺癌细胞的荧光标记和光热治疗,适用于长时程体内免疫示踪,可实现 7 天以上的 NIR-II 荧光成像监测。

在活体深层组织成像中,NIR-II 区(1000~1700 nm) Ag 基量子点的优势尤为突出,该区域光线组织穿透深度可达数厘米,且生物组织自发荧光干扰极小,能够实现深层组织的高清晰成像。Dong 等人[30]



**Figure 2.** Photoelectrochemical biosensing platform based on *in situ* generated ultrathin covalent organic framework film and AgInS<sub>2</sub> QDs for dual target detection of HIV and CEA [26]

**图 2.** 基于原位生成的超薄共价有机框架薄膜和 AgInS<sub>2</sub> 量子点的光电化学生物传感平台，用于 HIV 和 CEA 的双靶检测[26]

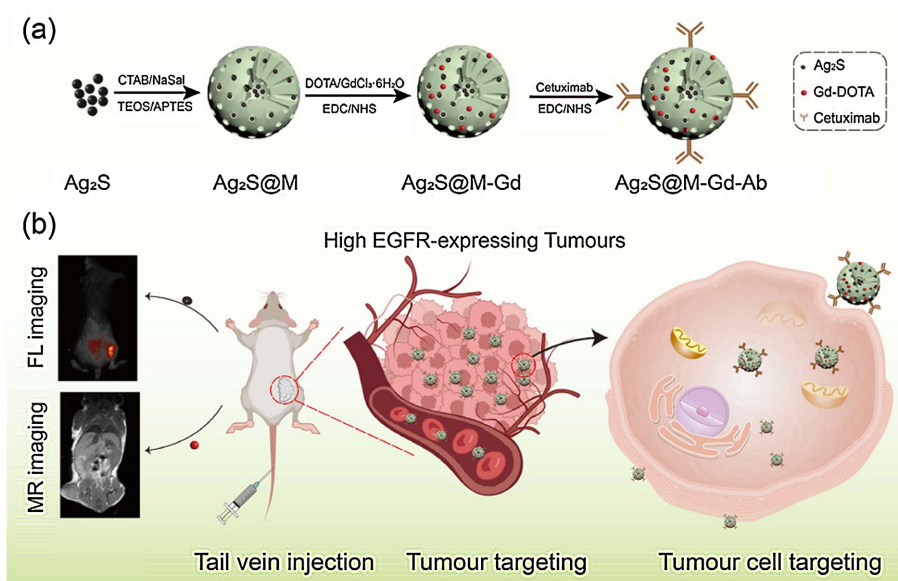
所制备的 Ag<sub>2</sub>Se 量子点用于小鼠活体成像，可清晰显示小鼠全身血管网络，甚至能够分辨直径小于 10 μm 的毛细血管，为血管疾病诊断提供了新工具。此外，Ag 基量子点还可用于肿瘤深层成像，通过靶向修饰实现肿瘤部位的特异性富集，清晰示踪肿瘤的大小、形态和转移情况，为肿瘤早期诊断提供支持。Korupalli 等人[31]将叶酸修饰的 Ag<sub>2</sub>S@ZnS 核壳量子点用于小鼠乳腺癌模型成像时，肿瘤部位荧光强度显著高于正常组织，成像信噪比提升 3 倍以上，可清晰区分原发肿瘤与微小转移灶。

多模态成像则是近年来的研究热点，将 Ag 基量子点与磁共振(MRI)、计算机断层扫描(CT)、光声成像等技术结合，可实现优势互补，提升成像的精准度。Zou 等人[21]所制备的 Ag<sub>2</sub>S@M-Gd-Ab (Ag<sub>2</sub>S@介孔 SiO<sub>2</sub>-Gd-DOTA-西妥昔单抗)复合量子点，既具有 Ag<sub>2</sub>S 的 NIR-II 近红外荧光成像功能，又具有 Gd-DOTA 的 T<sub>1</sub>-MRI 磁共振成像功能，可同时实现肿瘤的主动靶向富集、精准定位与深层组织成像，为肿瘤早期诊断与术中导航提供更全面的多模态信息，见图 3。

### 3.3. Ag 基量子点在肿瘤诊疗中的应用

Ag 基量子点可同时承担成像导航、药物递送、治疗效应发生器等多重功能，构建集诊断、治疗与实时监测于一体的诊疗一体化纳米平台，推动肿瘤精准治疗发展。

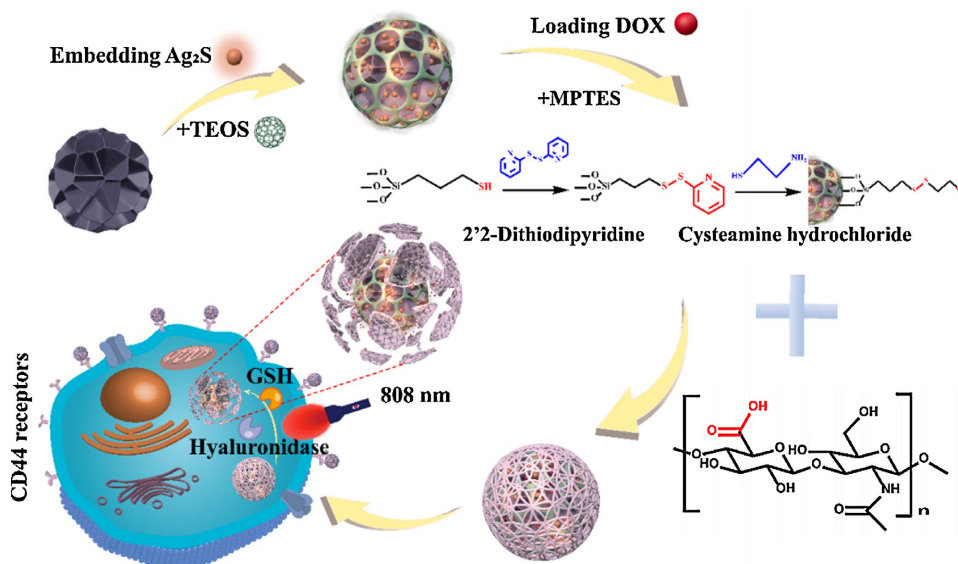
在肿瘤治疗中，Ag 基量子点可作为声敏剂、光敏剂或药物载体，实现声动力治疗(SDT)、光动力治疗(PDT)、化疗及联合治疗。Yang 等人[32]合成 AgAuSe 合金量子点，利用中性粒细胞介导的炎症靶向递送，超声触发活性氧产率提升 3 倍实现荷瘤小鼠抑瘤率可达 84%，实现高效肿瘤声动力治疗。Hashemkhani 等人[33]将 AgInS<sub>2</sub> 量子点静电负载 5-氨基乙酰丙酸(ALA)光敏剂前药，构建光动力治疗药物递送体系，ALA 在肿瘤细胞内转化为原卟啉 IX 后产生活性氧，AgInS<sub>2</sub> 量子点作为载体增强 ALA 细胞摄取与酸性环境响应释放，显著提升 ALA-PDT 肿瘤抑制效果。同时量子点实现诊断功能，其细胞成像信噪比为 18。同时，Ag<sub>2</sub>S 量子点可通过疏水作用、静电吸附负载阿霉素、顺铂等化疗药物，借助 EPR 效应实现肿瘤



**Figure 3.** Ag<sub>2</sub>S quantum dot-based magnetic resonance/fluorescence dual-mode imaging nanoprobes for tumor diagnosis [21]  
**图 3.** 基于 Ag<sub>2</sub>S 量子点的磁共振/荧光双模态成像纳米探针用于肿瘤诊断[21]

靶向递送，在荧光成像引导下实现可控药物释放[34]。

诊疗一体化研究中，Ag 基量子点可同步实现肿瘤成像、治疗及疗效动态监控。Zheng 等人[36]构建 H<sub>2</sub>S 响应型 Ag<sub>2</sub>S 诊疗探针，在肿瘤微环境中激活荧光成像与光热 - 气体协同治疗，实现闭环诊疗。Hou 等人[35]构建酶/GSH/pH 三重响应型 Ag<sub>2</sub>S 量子点复合透明质酸接枝多孔二氧化硅纳米诊疗探针，依托 CD44 主动靶向富集于肿瘤区域，在肿瘤微环境触发下逐级解封并精准释放阿霉素。三重响应(酶/GSH/pH)释放率达 91%，同步激活近红外荧光成像与光热效应，肿瘤 NIR-II信噪比高达 22.3，联合光热治疗抑瘤率 96%，实现荧光成像引导的化疗 - 光热联合闭环诊疗，见图 4。得益于极低的溶度积常数与可控降解特性，Ag 基量子点在有效治疗剂量下无显著细胞毒性与遗传毒性，具备良好的生物安全性[37]。



**Figure 4.** Schematic diagram of DOX-Ag<sub>2</sub>S/pSiO<sub>2</sub>/HA for integrated diagnosis and treatment [35]  
**图 4.** DOX-Ag<sub>2</sub>S/pSiO<sub>2</sub>/HA 用于诊疗一体化示意图[35]

## 4. 总结与展望

本文系统综述了 Ag 基量子点的合成方法、生物功能化修饰策略及其在生物传感、生物成像、肿瘤诊疗三大生物医学领域的研究进展。Ag 基量子点作为典型无镉量子点，凭借近红外可调发光、高荧光稳定性与优良生物相容性，有效弥补传统镉基量子点的毒性缺陷，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尺寸与光学性能调控，多样化表面修饰显著提升水溶性、靶向性与胶体稳定性，在高灵敏检测、深层组织成像及肿瘤精准诊疗中展现出重要的应用价值。

当前研究仍存在诸多关键科学问题亟待解决。长期体内毒性方面，Ag 基量子点降解释放的  $\text{Ag}^+$  易在肝肾富集，可能诱发氧化应激与慢性组织损伤，其长期蓄积效应与安全剂量边界仍缺乏系统数据。代谢途径尚不明确，多数量子点难以经肾脏快速清除，易滞留于单核吞噬细胞系统，限制其在活体中的重复应用。临床转化层面，生产、质控与法规监管挑战严峻。规模化合成难以保证粒径、荧光性能、表面配体密度的批次稳定性，缺乏统一的表征方法与质量控制标准。在监管层面，现有纳米药物法规体系对量子点类制剂的分类界定、评价指标、安全阈值尚未明确，临床前研究与审批要求存在衔接缺口。

未来研究应聚焦关键突破：建立标准化体内毒性与代谢评价体系，阐明降解、分布、排泄全链条机制；通过核壳结构、可降解配体与表面拓扑设计，降低蛋白冠吸附与免疫反应；开发绿色可规模化合成工艺，构建全流程质量控制体系；对接纳米药物监管科学，完善安全性评价指南。随着材料设计优化、生物医学研究深化与监管体系完善，Ag 基量子点有望突破临床转化瓶颈，在精准医学与疾病诊疗中发挥重要作用。

## 参考文献

- [1] Li, J., Yao, M., Shao, Y. and Yao, D. (2018) The Application of Bio-Nanotechnology in Tumor Diagnosis and Treatment: A View. *Nanotechnology Reviews*, **7**, 257-266. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2018-0011>
- [2] Luo, G., Jiang, X., Hu, C., Li, L., Yan, L., Xiao, G., *et al.* (2026) Artificial Intelligence-Powered Nanomedicine. *Chemical Society Reviews*, **55**, 2070-2119. <https://doi.org/10.1039/d5cs01406a>
- [3] Kairdolf, B.A., Smith, A.M., Stokes, T.H., Wang, M.D., Young, A.N. and Nie, S. (2013) Semiconductor Quantum Dots for Bioimaging and Biodiagnostic Applications. *Annual Review of Analytical Chemistry*, **6**, 143-162. <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-060908-155136>
- [4] McHugh, K.J., Jing, L., Behrens, A.M., Jayawardena, S., Tang, W., Gao, M., *et al.* (2018) Biocompatible Semiconductor Quantum Dots as Cancer Imaging Agents. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1706356. <https://doi.org/10.1002/adma.201706356>
- [5] Chen, X. (2025) From Quantum Dots to Cancer Nanotheranostics. *Nano Letters*, **25**, 13967-13969. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5c03619>
- [6] Chen, N., He, Y., Su, Y., Li, X., Huang, Q., Wang, H., *et al.* (2012) The Cytotoxicity of Cadmium-Based Quantum Dots. *Biomaterials*, **33**, 1238-1244. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.10.070>
- [7] Sharma, V.K., McDonald, T.J., Sohn, M., Anquandah, G.A.K., Pettine, M. and Zboril, R. (2017) Assessment of Toxicity of Selenium and Cadmium Selenium Quantum Dots: A Review. *Chemosphere*, **188**, 403-413. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.130>
- [8] Yousefi, H., Sagar, L.K., Geraili, A., Chang, D., García de Arquer, F.P., Flynn, C.D., *et al.* (2024) Highly Stable Bio-templated InP/ZnSe/ZnS Quantum Dots for *in Situ* Bacterial Monitoring. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 55086-55096. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c09968>
- [9] Borovaya, M., Horiunova, I., Plokhovska, S., Pushkarova, N., Blume, Y. and Yemets, A. (2021) Synthesis, Properties and Bioimaging Applications of Silver-Based Quantum Dots. *International Journal of Molecular Sciences*, **22**, Article No. 12202. <https://doi.org/10.3390/ijms222212202>
- [10] 杨玲. Ag 基量子点材料用于肿瘤相关标志物检测、成像和治疗的研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [11] Soheily, E., Ghaemi, B., Sahraei, R., Sabzevari, Z., Kharrazi, S. and Amani, A. (2020) Colloidal Synthesis of Tunably Luminescent AgInS-Based/ZnS Core/Shell Quantum Dots as Biocompatible Nano-Probe for High-Contrast Fluorescence

- Bioimaging. *Materials Science and Engineering: C*, **111**, Article ID: 110807. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110807>
- [12] Sun, Y., Zhang, S., Cai, H., Wang, J. and Tian, Z. (2025) Inorganic Quantum Dots: Synthetic Strategy and Environmental Applications. *ACS ES&T Engineering*, **5**, 1630-1654. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.5c00232>
- [13] Du, Y., Xu, B., Fu, T., Cai, M., Li, F., Zhang, Y., *et al.* (2010) Near-Infrared Photoluminescent Ag<sub>2</sub>S Quantum Dots from a Single Source Precursor. *Journal of the American Chemical Society*, **132**, 1470-1471. <https://doi.org/10.1021/ja909490r>
- [14] Hamanaka, Y., Ozawa, K. and Kuzuya, T. (2014) Enhancement of Donor-Acceptor Pair Emissions in Colloidal AgInS<sub>2</sub> Quantum Dots with High Concentrations of Defects. *The Journal of Physical Chemistry C*, **118**, 14562-14568. <https://doi.org/10.1021/jp501429f>
- [15] Zrazhevskiy, P., Sena, M. and Gao, X. (2010) Designing Multifunctional Quantum Dots for Bioimaging, Detection, and Drug Delivery. *Chemical Society Reviews*, **39**, 4326-4354. <https://doi.org/10.1039/b915139g>
- [16] Jiang, P., Zhu, C., Zhang, Z., Tian, Z. and Pang, D. (2012) Water-Soluble Ag<sub>2</sub>S Quantum Dots for Near-Infrared Fluorescence Imaging *in Vivo*. *Biomaterials*, **33**, 5130-5135. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.03.059>
- [17] Jiao, M., Li, Y., Jia, Y., Li, C., Bian, H., Gao, L., *et al.* (2020) Strongly Emitting and Long-Lived Silver Indium Sulfide Quantum Dots for Bioimaging: Insight into Co-Ligand Effect on Enhanced Photoluminescence. *Journal of Colloid and Interface Science*, **565**, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.01.006>
- [18] Borovaya, M., Naumenko, A., Horiunova, I., Plokhovska, S., Blume, Y. and Yemets, A. (2020) "Green" Synthesis of Ag<sub>2</sub>S Nanoparticles, Study of Their Properties and Bioimaging Applications. *Applied Nanoscience*, **10**, 4931-4940. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01365-3>
- [19] Sibiya, P.N. and Moloto, M.J. (2018) Green Synthesis of Ag<sub>2</sub>S Nanoparticles: Effect of pH and Capping Agent on Size and Shape of NPs and Their Antibacterial Activity. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, **13**, 411-418.
- [20] Hong, L., Li, W., Li, Y. and Yin, S. (2023) Nanoparticle-Based Drug Delivery Systems Targeting Cancer Cell Surfaces. *RSC Advances*, **13**, 21365-21382. <https://doi.org/10.1039/d3ra02969g>
- [21] Zou, J., Chen, L., Hu, Y., Zhou, D., Li, Y., Zhang, B., *et al.* (2024) Ag<sub>2</sub>S Quantum Dot-Based Magnetic Resonance/Fluorescence Dual-Mode Imaging Nanoprobes for Tumor Diagnosis. *Biomaterials Science*, **12**, 5274-5282. <https://doi.org/10.1039/d4bm01014k>
- [22] Zhong, Y., Zou, Y., Liu, L., Li, R., Xue, F. and Yi, T. (2020) pH-Responsive Ag<sub>2</sub>S Nanodots Loaded with Heat Shock Protein 70 Inhibitor for Photoacoustic Imaging-Guided Photothermal Cancer Therapy. *Acta Biomaterialia*, **115**, 358-370. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.08.007>
- [23] Wegner, K.D. and Hildebrandt, N. (2015) Quantum Dots: Bright and Versatile *in Vitro* and *in Vivo* Fluorescence Imaging Biosensors. *Chemical Society Reviews*, **44**, 4792-4834. <https://doi.org/10.1039/c4cs00532e>
- [24] Cai, Q., Yin, T., Ye, Y., Jie, G. and Zhou, H. (2022) Versatile Photoelectrochemical Biosensing for Hg<sup>2+</sup> and Aflatoxin B1 Based on Enhanced Photocurrent of AgInS<sub>2</sub> Quantum dot-DNA Nanowires Sensitizing NPC-ZnO Nanopolyhedra. *Analytical Chemistry*, **94**, 5814-5822. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c05250>
- [25] Wei, M., Liu, J., Liu, R., Liu, J., Chen, H., Yao, Q., *et al.* (2026) Construction of a Platform Based on Biocompatible Near-Infrared Ag<sub>2</sub>S Quantum Dots for Detection of Copper Ions in Real Samples and Cellular Environments. *Arabian Journal of Chemistry*, **19**, Article ID: 3962025. [https://doi.org/10.25259/ajc\\_396\\_2025](https://doi.org/10.25259/ajc_396_2025)
- [26] Yan, X., Li, H., Yin, T., Jie, G. and Zhou, H. (2022) Photoelectrochemical Biosensing Platform Based on *in Situ* Generated Ultrathin Covalent Organic Framework Film and AgInS<sub>2</sub> QDs for Dual Target Detection of HIV and CEA. *Biosensors and Bioelectronics*, **217**, Article ID: 114694. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114694>
- [27] Jin, H., Gui, R., Gong, J. and Huang, W. (2017) Aptamer and 5-Fluorouracil Dual-Loading Ag<sub>2</sub>S Quantum Dots Used as a Sensitive Label-Free Probe for Near-Infrared Photoluminescence Turn-On Detection of CA125 Antigen. *Biosensors and Bioelectronics*, **92**, 378-384. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.10.093>
- [28] Zhang, Y., Hong, G., Zhang, Y., Chen, G., Li, F., Dai, H., *et al.* (2012) Ag<sub>2</sub>S Quantum Dot: A Bright and Biocompatible Fluorescent Nanoprobe in the Second Near-Infrared Window. *ACS Nano*, **6**, 3695-3702. <https://doi.org/10.1021/nn301218z>
- [29] Wang, J., Huang, Z., Wu, Y., Jiang, X., Ji, Y., Braeckmans, K., *et al.* (2025) Long-Term *in Vivo* Immune Tracking Nano-platform Based on Ag<sub>2</sub>S Quantum Dots for the Photothermal Immunotherapy of Breast Cancer. *BMC Biology*, **23**, Article No. 111. <https://doi.org/10.1186/s12915-025-02215-w>
- [30] Dong, B., Li, C., Chen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Deng, M., *et al.* (2013) Facile Synthesis of Highly Photoluminescent Ag<sub>2</sub>Se Quantum Dots as a New Fluorescent Probe in the Second Near-Infrared Window for *in Vivo* Imaging. *Chemistry of Materials*, **25**, 2503-2509. <https://doi.org/10.1021/cm400812v>
- [31] Korupalli, C., Pan, W., Yeh, C., Chen, P., Mi, F., Tsai, H., *et al.* (2019) Single-Injecting, Bioinspired Nanocomposite Hydrogel That Can Recruit Host Immune Cells *in Situ* to Elicit Potent and Long-Lasting Humoral Immune Responses.

- 
- Biomaterials*, **216**, Article ID: 119268. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2019.119268>
- [32] Yang, L., Yuan, M., Ma, P., Chen, X., Cheng, Z. and Lin, J. (2023) Assembling AgAuSe Quantum Dots with Peptidoglycan and Neutrophils to Realize Enhanced Tumor Targeting, NIR(II) Imaging, and Sonodynamic Therapy. *Small Methods*, **7**, Article ID: 2201706. <https://doi.org/10.1002/smt.202201706>
- [33] Hashemkhani, M., Loizidou, M., MacRobert, A.J. and Yagci Acar, H. (2022) One-Step Aqueous Synthesis of Anionic and Cationic AgInS<sub>2</sub> Quantum Dots and Their Utility in Improving the Efficacy of ALA-Based Photodynamic Therapy. *Inorganic Chemistry*, **61**, 2846-2863. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c03298>
- [34] Hu, F., Li, C., Zhang, Y., Wang, M., Wu, D. and Wang, Q. (2015) Real-Time *in Vivo* Visualization of Tumor Therapy by a Near-Infrared-II Ag<sub>2</sub>S Quantum Dot-Based Theranostic Nanoplatform. *Nano Research*, **8**, 1637-1647. <https://doi.org/10.1007/s12274-014-0653-2>
- [35] Hou, J., Zhao, Y., Sun, L. and Zou, X. (2023) Enzyme/GSH/pH-Responsive Hyaluronic Acid Grafted Porous Silica Nanocarriers Bearing Ag<sub>2</sub>S QDs for Fluorescence Imaging and Combined Therapy. *Carbohydrate Polymers*, **305**, Article ID: 120547. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120547>
- [36] Zheng, Z., Chen, Q., Dai, R., Jia, Z., Yang, C., Peng, X., *et al.* (2020) A Continuous Stimuli-Responsive System for NIR-II Fluorescence/Photoacoustic Imaging Guided Photothermal/Gas Synergistic Therapy. *Nanoscale*, **12**, 11562-11572. <https://doi.org/10.1039/d0nr02543g>
- [37] Hocaoglu, I., Demir, F., Birer, O., Kiraz, A., Sevrin, C., Grandfils, C., *et al.* (2014) Emission Tunable, Cyto/Hemocompatible, Near-IR-Emitting Ag<sub>2</sub>S Quantum Dots by Aqueous Decomposition of DMSA. *Nanoscale*, **6**, 11921-11931. <https://doi.org/10.1039/c4nr02935f>