·慢病专题：癌症·

# 量子点技术在乳腺癌精准诊疗中的研究进展*

朱文静，王　旭，胡　蝶△

（南京医科大学康达学院，江苏 连云港 222000）

［摘　要］ 乳腺癌发病率位居全球女性恶性肿瘤首位，对女性健康构成严重威胁。当前传统诊疗手段存在明显局限，诊断环节受限于灵敏度与特异度不足，难以精准识别病灶；治疗阶段则因不良反应明显，在杀灭癌细胞同时易损伤正常组织，制约了诊疗效果与患者生活质量。量子点（QD）作为新型纳米材料，具备荧光量子产率高、光稳定性好、发射波长可调、表面易功能化等独特优势，在乳腺癌诊疗领域表现突出。其不仅可用于分子影像学诊断与多靶标精准检测，还能实现靶向药物递送，并在光热、光动力联合治疗中发挥关键作用。该文围绕生物相容性、诊断应用、治疗实践、联合策略四大维度系统剖析了 QD 技术在乳腺癌精准医学中的研究现状，深入梳理了技术应用中的关键挑战，明确了未来发展方向，旨在为该技术后续临床转化提供清晰可行的路线图，推动乳腺癌精准诊疗水平的提升。

［关键词］ 乳腺癌；　量子点；　诊断；　治疗；　综述

**DOI**：10.3969/j.issn.1009-5519.2026.07.003　　**中图法分类号**：R737.9；R318.08

**文章编号**：1009-5519(2026)07-1452-06　　**文献标识码**：A

**Research progress of quantum dot technology in accurate diagnosis and treatment of breast cancer***

*Zhu Wenjing*, *Wang Xu*, *Hu Die*△

(*Kangda College of Nanjing Medical University*, *Lianyungang*, *Jiangsu* 222000, *China*)

［**Abstract**］ Breast cancer has the highest incidence rate among female malignant tumors worldwide, posing a serious threat to women's health. At present, the traditional diagnosis and treatment methods have obvious limitations, and the diagnosis link is limited by the lack of sensitivity and specificity, so it is difficult to accurately identify the lesions; in the treatment stage, because of obvious adverse reactions, it is easy to damage normal tissues while killing cancer cells, which restricts the diagnosis and treatment effect and the quality of life of patients. Quantum dots (QD), as a new type of nanomaterial, possess unique advantages such as high fluorescence quantum yield, good photostability, tunable emission wavelength, and easy surface functionalization. They have shown outstanding performance in the field of breast cancer diagnosis and treatment. It can not only be used for molecular imaging diagnosis and multi-target accurate detection, but also realize targeted drug delivery, and play a key role in photothermal and photodynamic combined therapy. This paper systematically analyzed the research status of QD technology in precision medicine of breast cancer from four dimensions: biocompatibility, diagnostic application, treatment practice and joint strategy, deeply combed the key challenges in the application of technology, and defined the future development direction, aiming at providing a clear and feasible roadmap for the subsequent clinical transformation of this technology and promoting the improvement of the level of precision diagnosis and treatment of breast cancer.

［**Key words**］ Breast cancer;　Quantum dots;　Diagnosis;　Treatment;　Review

在全球范围内乳腺癌已成为威胁女性生命健康的首要恶性肿瘤，其发病率持续攀升，并给社会医疗体系和患者家庭带来沉重负担[1-2]。尽管医学技术不断发展，但传统的乳腺癌诊疗手段在临床应用中仍面临诸多难以突破的瓶颈：在诊断环节常用的影像学检查和肿瘤标志物检测方法要么灵敏度不足，难以发现早期微小病灶；要么特异度欠佳，易出现假阳性或假阴性结果，导致误、漏诊现象时有发生。在治疗阶段方面，手术、放化疗等常规疗法往往存在“无差别攻击”的问题，在杀灭癌细胞的同时也会对正常组织细

*　**基金项目**：江苏省大学生创新训练计划立项项目（202413980027Y）；南京医科大学科技发展基金项目（NMUB20230270）。

△　**通信作者**，E-mail：hudie4560@163.com。

**网络首发**　https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20260523.1330.002(2026-05-25)

**引用格式**：朱文静，王旭，胡蝶. 量子点技术在乳腺癌精准诊疗中的研究进展[J]. 现代医药卫生，2026，42(7)：1452-1457.

胞造成严重损伤，引发一系列不良反应，如免疫功能下降、器官损伤等，极大地影响了疗效和患者生活质量[3-5]。因此，寻找兼具高灵敏度诊断、高特异度靶向、低不良反应治疗能力的新型技术成为当前乳腺癌精准医学领域亟待解决的关键课题。

量子点（QD）作为一种新型纳米材料，凭借其独特的光学和物理化学性质，为突破乳腺癌诊疗困境带来了新的希望。与传统荧光探针比较，QD 具有荧光量子产率高、光稳定性强、发射波长可通过调控粒径大小精准调节等优势，能实现对肿瘤细胞的精准定位和动态追踪；同时，其表面易于进行功能化修饰，可搭载靶向分子、药物分子等多种活性物质，为构建“诊疗一体化”纳米平台奠定了坚实基础[6-8]。近年来，随着纳米医学和材料科学的深度融合，QD 在乳腺癌分子影像学诊断、多靶标精准检测、靶向药物递送。以及光动力治疗（PDT）、光热治疗（PTT）等新型治疗方式中展现出了卓越的应用潜力，逐渐成为推动乳腺癌诊疗模式向精准化、一体化转变的核心技术之一。现将系统梳理 QD 技术在乳腺癌精准医学中的研究进展，从生物相容性、诊断应用、治疗应用、联合治疗策略 4 个关键维度全面剖析该技术在实际应用中面临的关键挑战，并结合当前学科发展趋势，对其未来的研究方向和临床转化路径进行展望。

## 1　QD 的生物相容性

生物相容性是纳米材料能否用于生物医学领域的首要前提，也是 QD 技术实现临床转化的关键瓶颈之一。QD 的毒性主要来自 2 个方面：（1）镉、铅等重金属离子的释放；（2）尺寸、表面电荷等物理性质的影响。不过通过表面修饰和涂层可大幅提升其生物相容性[9-11]。

除单一 QD 的表面修饰外复合材料构建也是调控 QD 生物相容性与功能活性的重要策略。以镉系 QD 为例，为解决其毒性问题科研人员开发了新型棒状聚多巴胺-碲化镉 QD 复合材料（CdTe/MPA-PDA）。对该复合材料的生物相容性进行评估发现，在短期暴露（2、4 h）条件下即使在最高测试质量浓度（100 μg/mL）下 CdTe/MPA QDs 与 CdTe/MPA-PDA 复合材料均表现出优异的生物相容性，MDA-MB-231 乳腺癌细胞存活率均保持在 95% 以上，证明了其短期应用的安全性；而在长期暴露（24 h）条件下 2 种材料的生物相容性呈现明显差异——单独的 CdTe/MPA QDs 仍保持较好的生物相容性，而 CdTe/MPA-PDA 复合材料则表现出剂量依赖的细胞毒性：当浓度达到 100 μg/mL 时 MDA-MB-231 细胞存活率降至约 51%，且对正常乳腺上皮细胞的影响远低于对癌细胞的杀伤效应[12]。有研究表明，这种选择性杀伤作用是通过诱导癌细胞凋亡实现的，PDA 壳层不仅有效降低了 CdTe QD 的非特异性毒性，还通过其自身的 pH 敏感性与生物相容性赋予复合材料长期作用下精准诱导癌细胞凋亡的功能，为镉系 QD 的安全应用提供了新的解决方案。

体外细胞实验便捷，能初步评估 QD 毒性、提供基础数据，但体系简化难以反映体内真实情况；体内研究可还原生理环境，却难精准解析毒性机制。二者结合能优势互补，是全面评估其生物安全性的关键。

石墨烯 QD（GQDs）作为碳 QD（CQDs）家族的重要成员，在治疗剂量下表现出良好的体外生物相容性，这一特性使其相较于碳纳米管等其他碳纳米材料具备明显优势。Tabish 等[13]通过细胞水平实验及体内大鼠模型实验表明，其所使用的 GQDs 在浓度高达 100 μg/mL 时未表现出明显的细胞毒性，即使在长期静脉注射后也仅在部分器官（如肝、肺）中引起轻微、可逆的炎症反应，而未导致严重的器官功能障碍。这项研究奠定了此类 GQDs 具有良好的生物相容性。有学者使用移植有人类乳腺癌的裸鼠作为疾病模型，通过静脉注射将 GQDs 导入荷瘤小鼠体内，GQDs 自身具有荧光特性，使用小动物活体成像系统进行追踪，实时监测其体内分布与肿瘤靶向能力，实验通过体重监测、血液学分析、最重要的组织病理学检查表明，GQDs 不会引起实验动物的急性或全身性毒性，可通过肾脏被快速有效地清除出体外并且不会引起明显的组织损伤反应，表明 GQDs 在乳腺癌小鼠模型中表现出良好的系统性生物相容性与安全性[14]。值得关注的是通过表面功能化修饰可进一步优化 GQDs 的生物相容性与靶向毒性，如有研究表明，有机锡涂层修饰的 GQDs 对 MDA-MB-231 乳腺癌细胞表现出强烈的细胞毒性，而对非恶性的 HEK293T 淋巴细胞（人胚肾细胞）的活性影响甚微，这种“对癌细胞强效杀伤、对正常细胞低毒”的选择性毒性特征为其实现精准抗肿瘤治疗提供了关键支撑[14]。

## 2　QD 在乳腺癌诊断中的应用

在乳腺癌诊断领域 QD 凭借独特的光学特性与功能可调控性推动多种成像技术突破了传统局限，为精准诊断提供了新路径，其应用主要集中于增强 CT 成像、光声成像（PAI）、荧光成像（FI）等方面[15]。

**2.1　CT**　QD 作为一种重要的无机纳米颗粒在增强乳腺癌 CT 成像方面显示出巨大潜力。碲化银 QD（$Ag_2Te$ QDs）作为新型 CT 造影剂，纳米尺寸效应和高原子序数元素组成，能提供更强的 X 射线衰减，从而明显提升影像的对比度和信噪比。有研究表明，其 CT 值高达 99 HUL/g，是传统造影剂碘海醇（39 HUL/g）的 2 倍以上。在三阴性乳腺癌细胞素（4T1）小鼠乳腺癌模型中注射后肿瘤 CT 信号增强超 1 倍，表明该 QD 能成功在肿瘤区域富集并发挥功能。证明 $Ag_2Te$ QDs 能通过提供更强的信号，为实现更早期、更准确的乳腺癌 CT 诊断带来潜力，对早期发现微小肿瘤病灶、精确界定肿瘤边界具有重要的临床意

义[16]。

**2.2** PAI　作为一种新兴的混合模态成像技术通过结合光学成像的高对比度与超声成像的深穿透性优势为乳腺癌的精准诊疗提供了强有力的工具。黑磷QD(BPQDs)具备强烈的近红外Ⅱ区光吸收能力,在此波段下组织散射与自发荧光明显减弱,可实现数厘米深度的高信噪比成像。将构建好的Cypate@BP-透明质酸纳米平台通过尾静脉注射到携带乳腺癌(如4T1)的小鼠体内,静脉注射的BPQDs促进肿瘤增强渗透与滞留效应在病灶部位富集,经PAI扫描能非侵入性清晰勾勒肿瘤边界、大小及内部异常血管网络,为乳腺癌早期诊断与精确分期提供了关键的影像学依据[17]。

**2.3** FI　在乳腺癌诊断研究中,QD凭借高亮度、光稳定性、可调荧光发射特性成为FI领域的优势纳米探针,其应用已从细胞水平精准识别拓展至组织水平分子分型[18]。CdTe/CdS QD(FA-Cys-CdTe/CdS QDs)发射强烈的红色荧光(662 nm)。将QD与乳腺癌细胞(T47D)和正常乳腺上皮细胞(MCF-10A)共孵育后只有T47D癌细胞中显示出强烈的红色荧光,在正常MCF-10A乳腺上皮细胞中则无明显荧光信号[19]。表明QD通过叶酸受体介导的内化作用被特异性摄取,证明其可作为靶向探针用于乳腺癌细胞定性诊断,为体内应用奠定了基础。另外QD介导的多重荧光免疫组织化学则代表了FI技术朝向临床实用化诊断的进一步发展。利用QD不同颜色的发射光谱,在同一张乳腺癌组织切片上同时检测多个生物标志物,如雌激素受体、孕激素受体、人表皮生长因子受体2(HER2)、细胞增殖核抗原Ki-67等。这种技术一次性即可提供完整的分子分型信息,如管腔A型(Luminal A)、Luminal B、$HER2^+$、三阴性乳腺癌等,避免了传统连续切片带来的组织结构和细胞定位信息错位,极大地提升了病理诊断的准确性和效率,为乳腺癌的精准分型和个性化治疗策略制定提供了强有力工具[20]。

## 3　QD在乳腺癌治疗中的应用

**3.1** 药物递送系统　QD的主要应用前景在于诊断领域,但其功能化的多样性和高潜力使其能连接药物、靶向配体或其他生物分子从而成为特定药物递送应用中的多功能载体。Tiwari等[21]开发的一种基于外泌体和CQDs的智能递送系统(Ex-DC@CQDs)为乳腺癌的靶向治疗提供了创新策略,其首先合成了基于岩藻糖的CQDs,然后将化疗药物达卡巴嗪(DC)负载到这些CQDs上,形成无外泌体涂层的简单纳米制剂(DC@CQDs)。最后利用从乳腺癌细胞(MDA-MB-468)中分离出的外泌体对DC@CQDs进行包裹,最终得到Ex-DC@CQDs;该系统融合了CQDs的载药能力与外泌体介导的主动靶向作用,在治疗效率和毒性减弱两方面均取得了明显成效;表明该体系能明显提高药物递送效率;外泌体表面的硫酸乙酰肝素蛋白聚糖(HSPG)与癌细胞的特异性结合,Ex-DC@CQDs在MDA-MB-231乳腺癌细胞中的摄取率在6 h内达到75%,相较于未包裹外泌体的对照组(60%)效率提升了25%;MTT实验结果显示,Ex-DC@CQDs对多种乳腺癌细胞系均表现出更强的杀伤力,其对MDA-MB-231、4T1、MCF-7细胞的半数抑制浓度依次为20、34、47.7 μM,表明该递送系统对高转移性、通常高表达HSPG受体的三阴性乳腺癌细胞系具有更强的靶向杀伤优势,其中MDA-MB-231的杀伤效率是游离DC的2.02倍,体外抗癌活性明显增强;在4T1细胞诱导的Balb/c小鼠原位移植乳腺癌模型中该递送系统能通过主动靶向和增强通透性和滞留效应高效富集于肿瘤组织,最终使治疗组肿瘤体积和重量相较于游离药物组分别减少了约79.17%、84.00%;该递送体系在有效抑制肿瘤生长的同时还明显降低了药物的系统性毒性;接受游离DC化疗的小鼠体重明显下降等全身性不良反应;然而使用Ex-DC@CQDs治疗的小鼠体重保持稳定,与健康对照组无异,表明通过QD和外泌体系统的精准递送,药物可更多地富集于肿瘤部位,而减少了对正常组织的损伤,从而明显减弱了化疗的毒性。

**3.2** PDT　PDT产生活性氧(ROS)杀伤肿瘤细胞,结合靶向策略(如叶酸受体、线粒体靶向),提高ROS生成和疗效[22-23]。叶酸修饰的锰掺杂的硫化锌包覆铜铟硒核壳结构QD(CISe@ZnS:Mn QD-FA)可作为高效光敏剂作用于PDT。该探针在吸收光能后能通过三重态能量转移过程直接将能量传递给周围环境中的氧分子,将其激发生成具有高度细胞毒性的单线态氧。关键的体外实验证据表明,在激光照射下与叶酸修饰的QD(QD-FA)共孵育的4T1乳腺癌细胞内出现了强烈的绿色荧光(DCFH-DA探针检测),证实了ROS的大量爆发;而对照组则无此现象,直接证明了该QD探针无需耦联任何传统光敏剂,自身即可作为高效光动力武器,引发乳腺癌细胞的氧化损伤和凋亡[24]。将氮掺杂GQDs(N-GQDs)与二氧化钛纳米颗粒($TiO_2$)复合,可成功构建一种新型近红外响应的纳米光敏剂复合材料(N-GQDs/$TiO_2$ NCs),PDT处理后MDA-MB-231三阴性乳腺癌细胞半胱天冬酶-3/7(Caspase-3/7)活性明显增强,说明细胞死于凋亡。并且线粒体膜电位明显降低,表明凋亡是通过线粒体功能障碍触发的。所以在MDA-MB-231三阴性乳腺癌模型上经近红外激发的PDT,该系统被证实能高效产生以单线态氧为主的ROS,进而通过激活线粒体凋亡通路,最终导致乳腺癌细胞凋亡[25]。

**3.3** PTT　在乳腺癌治疗领域PTT作为一种新兴的局部物理治疗策略,因其非侵入性和高时空可控性

而备受关注。许多 QD 材料在近红外光照射下能高效地将光能转化为热能，直接热消融肿瘤细胞。PTT 可靶向原发肿瘤和早期转移瘤，激活自噬或抑制影响细胞周期诱导细胞死亡，破坏乳腺癌细胞的细胞信号传导而抑制肿瘤[26-27]。仿生 BPQDs 具有很强的近红外光吸收能力，能在 800 nm 激光照射下将光能高效地转化为热能。将 BBPQDs 与小鼠 4T1 细胞共孵育后用近红外激光照射 5 min，BBPQDs 能被癌细胞高效摄取，并产生足以诱导大量癌细胞凋亡的热量；给携带 4T1 皮下瘤的小鼠静脉注射 BBPQDs，24 h 后用近红外激光照射肿瘤区域，肿瘤局部温度在 5 min 内升至 58.1 ℃，有效消融了肿瘤组织[28]。接下来，学者建立了小鼠双侧肿瘤模型，先将 4T1 细胞接种于小鼠左侧（模拟原发瘤），几天后再将 4T1 细胞接种于右侧（模拟远端转移瘤），仅对原发瘤进行“BBPQDs-PTT＋αPD-L1”联合治疗，结果显示，未被照射的远端瘤生长也受到明显抑制，分析发现，远端瘤内充满了被激活的杀伤性 T 淋巴细胞，证明了全身性抗肿瘤免疫的成功激活；先用联合疗法治愈小鼠，待其康复后通过尾静脉注射 4T1 细胞，模拟肿瘤复发，经联合治疗的小鼠在再次接触到肿瘤细胞时肺部几乎不形成转移灶，发现小鼠体内产生了大量的记忆 T 淋巴细胞，说明该治疗能建立长期的免疫记忆，全面地模拟了乳腺癌的局部生长、远端转移和复发的临床过程，有力地证明了 BBPQDs 介导的 PTT 在抑制乳腺癌进展中具有巨大潜力[28]。聚多巴胺包覆并负载了经巯基丙酸修饰的碲化镉 QD（CdTe@MPA QDs）在 640 nm 低功率激光（0.28 W/cm$^2$）照射下光热转换效率高达 37.7%，能有效升温杀死乳腺癌细胞。在人乳腺癌细胞系 MDA-MB-231 中经 24 h 孵育，CdTe@MPA-PDA 颗粒能有效被癌细胞摄取，并主要富集在溶酶体中；被癌细胞摄入 24 h 后 CdTe@MPA-PDA 颗粒在酸性溶酶体环境中降解，释放出的 CdTe QDs 能高效催化细胞内物质产生大量 ROS，通过氧化应激和线粒体功能障碍触发乳腺癌细胞凋亡[13]。该体系可同步实现 PTT 的高温杀伤与 PDT 的 ROS 诱导凋亡，二者协同作用明显提升了对乳腺癌细胞的杀伤效果，展现出优异的 PTT/PDT 联合治疗潜力。

**3.4**　联合疗法　在乳腺癌治疗中光疗与化疗的联合是常用策略，前者可通过光热效应或 ROS 精准作用于病灶，后者能借助药物全身性抑制癌细胞增殖，二者可形成协同作用。这种联合疗法不仅能发挥光疗的局部靶向优势以降低化疗药物对正常组织的不良反应，还能通过化疗弥补光疗对深层病灶覆盖不足的问题，为治疗不同分期、分型乳腺癌提供了更灵活的方案。Won 等[29]在 MDA-MB-231 乳腺癌细胞研究中合成的过渡金属碳/氮化物（Mxene）QD（MQDs）尺寸约为 3 nm，是通过对碳化钛铝相前体进行选择性蚀刻、分层，最后通过水热法处理得到的，该 QD 具有优异导电性、良好水溶性和生物相容性，以特定波长（365 nm）光照射时能发出巨大荧光，细胞内摄取的 MQDs 可作为光敏剂发挥作用，使用化疗药物——阿霉素（DOX）与一个 pH 敏感的连接键（顺乌头酸酐）结合，构建前药复合物顺式乌头酸酐-多柔比星前药复合物，再与 QD 等组件连接，证明叶酸标记的 pH 响应型 MXene 量子点纳米杂化物纳米平台可通过协同作用，一方面结合化疗药物——DOX 的功效，另一方面依托 PDT 产生 ROS，双重作用下主要攻击并破坏乳腺癌细胞的线粒体功能，进而启动细胞内在凋亡途径，最终实现对乳腺癌细胞的高效清除。克服放疗抵抗性是提高乳腺癌治疗效果的关键难点之一，因此，光疗与放疗的联合应用具有重要意义。在该联合策略中含有高原子序数元素的 QD 及其复合材料可作为高效放疗增敏剂，辅助增强放疗效果；同时，光疗过程中产生的热效应能有效改善肿瘤部位缺氧微环境，而这一微环境的优化可进一步提升肿瘤细胞对辐射的敏感性，从而协同突破放疗抵抗瓶颈，为提高乳腺癌疗效提供助力。Esgandari 等[30]将银 GQDs（SQD）、靶向抗肿瘤药物（17-AAG）与 X 射线放疗联合应用时对乳腺癌细胞（MCF-7）展现出潜在抗癌作用；其中 SQD 本身可作为放射增敏剂，三者能产生强效协同效应，具体表现为促进 MCF-7 凋亡，加剧其氧化应激反应，同时，抑制表皮生长因子受体信号通路，说明 SQD、放疗与 17-AAG 三联疗法在乳腺癌治疗中展示了强大的抗癌效果[31-34]。

总之，依托 QD 纳米平台，光疗与放疗、化疗的联合已突破“效果叠加”的传统模式，形成更具协同性的治疗体系[35-39]。这一创新策略不仅为提升乳腺癌疗效、降低治疗毒性提供了关键技术支撑，更集中体现了当前乳腺癌治疗向高效化、低毒化、精准化迈进的前沿发展趋势[40-41]。乳腺癌治疗中 QD 多应用模式的核心优势见表 1。

**表 1**　**乳腺癌治疗中 QD 多应用模式的核心优势**

| 应用类型 | 核心功能 | 能量/药物利用方式 | 杀伤肿瘤的直接手段 |
|---|---|---|---|
| 药物递送系统 | 纳米载体 | 不依赖 QD 自身能量，仅作为“药物运输车”，通过表面修饰（如靶向抗体）精准定位肿瘤 | 释放负载的化疗药、基因药物等，直接破坏肿瘤细胞 DNA 或阻断增殖通路 |
| PDT | 光敏剂载体＋能量转换器 | QD 吸收特定波长激光后，将能量传递给周围氧气，生成高毒性的 ROS | ROS 氧化肿瘤细胞膜、蛋白质和 DNA，导致细胞凋亡（氧化杀伤） |

续表 1　乳腺癌治疗中 QD 多应用模式的核心优势

| 应用类型 | 核心功能 | 能量/药物利用方式 | 杀伤肿瘤的直接手段 |
|---|---|---|---|
| PTT | 光热转换剂 | QD 吸收激光能量后，不传递给氧气，而是直接将光能转化为热能（局部温度升至 42～48 ℃） | 高温破坏肿瘤细胞结构、凝固蛋白质，同时损伤肿瘤血管（高温杀伤） |
| 联合疗法 | 基于 QD 的共性优势形成互补：三者共享的精准靶向与诊疗一体化能力，使其可灵活组合为“定位-治疗-监测-补杀”的完整抗癌方案，是未来精准肿瘤治疗的重要方向 | | |

## 4　小结与展望

QD 在乳腺癌诊疗研究初期便展现出明显优势，其强荧光亮度、抗漂白性、可调发射光谱等卓越光学特性在超高灵敏度成像、多重生物标志物检测、肿瘤细胞精准靶向方面均优于传统技术，为乳腺癌早期诊断与精准分子分型提供了有力工具。同时，QD 作为多功能纳米平台，完美融合了诊断与治疗功能，在药物靶向递送、PTT/PDT 及其联合疗法中表现出卓越的协同增效潜力，表现出诊疗一体化的精准医学新范式。然而，必须清醒地认识到将这些卓越的实验室成果转化为临床实践仍面临艰巨挑战。生物相容性与长期毒性问题，尤其是含镉 QD 的潜在风险、复杂的体内环境对靶向效率的影响、复杂的临床转化路径，以及高昂的成本可能带来的可及性问题均是必须正视和解决的现实瓶颈。

尽管前路艰辛，但对其未来在乳腺癌治疗中的应用依然充满期待。这种期待建立在清晰的研发路径之上，如通过开发更安全的新型无镉 QD 和可生物降解材料从根本上解决毒性顾虑；通过设计智能响应型递送系统来应对复杂肿瘤微环境的挑战；推动临床转化与个性化医疗。

## 参考文献


[1] Bray F, Laversanne M, Sung H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2024, 74(3): 229-263.

[2] Arnold M, Morgan E, Rumgay H, et al. Current and future burden of breast cancer: Global statistics for 2020 and 2040[J]. Breast, 2022, 66(1): 15-23.

[3] Dvir K, Giordano S, Leone J P. Immunotherapy in breast cancer[J]. Int J Mol Sci, 2024, 25(14): 7517.

[4] Xiong X, Zheng L W, Ding Y, et al. Breast cancer: pathogenesis and treatments[J]. Signal Transduct Target Ther, 2025, 10(1): 49.

[5] Clarke R B, Sorlie T. A guide to breast cancer research: an introduction[J]. Adv Exp Med Biol, 2025, 1464: 1-5.

[6] Yemets A, Plokhovska S, Pushkarova N, et al. Quantum dot-antibody conjugates for immunofluorescence studies of biomolecules and subcellular structures[J]. J Fluoresc, 2022, 32(5): 1713-1723.

[7] Henrique R B L, Lima J V A, Santos A L F, et al. Quantum dot-based conjugates: luminous nanotools for cancer research[J]. Biochem Biophys Res Commun, 2024, 741(1): 151052.

[8] Priya L, Mehta S, Gevariya D, et al. Quantum dot-based bio-conjugates as an emerging bioimaging tool for cancer theranostic-a review[J]. Curr Drug Targets, 2024, 25(4): 241-260.

[9] Naylor-Adamson L, Price T W, Booth Z, et al. Quantum dot imaging agents: haematopoietic cell interactions and biocompatibility[J]. Cells, 2024, 13(4): 354.

[10] Fatima I, Rahdar A, Sargazi S, et al. Quantum Dots: synthesis, antibody conjugation, and HER2-Receptor targeting for breast cancer therapy[J]. J Funct Biomater, 2021, 12(4): 75.

[11] Omidian H, Wilson R L, Cubeddu L X. Quantum dot research in breast cancer: challenges and prospects[J]. Materials (Basel), 2024, 17(9): 2152.

[12] Ortega G A, Del S, Portilla Y, et al. Rodlike particles of polydopamine-CdTe quantum dots: an actuator as a photothermal agent and reactive oxygen species-generating nanoplatform for cancer therapy[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(36): 42357-42369.

[13] Tabish T A, Scotton C J, Ferguson D, et al. Biocompatibility and toxicity of graphene quantum dots for potential application in photodynamic therapy[J]. Nanomedicine (Lond), 2018, 13(15): 1923-1937.

[14] Unidirwade D S, Lade S N, Umekar M J, et al. Innovative theranostic potential of graphene quantum dot nanocomposites in breast cancer[J]. Med Oncol, 2025, 42(9): 404.

[15] Diaz-Garcia D, Diaz-Sanchez M, Alvarez-Conde J, et al. Emergence of quantum Dots as innovative tools for early diagnosis and advanced treatment of breast cancer[J]. Chem Med Chem, 2024, 19(16): 38724442.

[16] Wu L X, He C, Zhao T T, et al. Diagnosis and treatment status of inoperable locally advanced breast cancer and the application value of inorganic nanomaterials[J]. J Nanobiotechnol, 2024, 22(1): 366.

[17] Cao Y Q, Tang L, Fu C, et al. Black Phosphorus quantum dot loaded bioinspired nanoplatform synergized with aPD-L1 for multimode cancer immunotherapy[J]. Nano Lett, 2024, 24(22): 6767-6777.

[18] Liu J, Huang B, Rao Y, et al. Intraductal photothermal ablation: a noninvasive approach for early breast cancer treatment and prevention[J]. Theranostics, 2024, 14(10): 3997-4013.

[19] Li G M, Zhang X H, Fei X N, et al. Chiral FA conjugated

CdTe/CdS quantum Dots for selective cancer ablation [J]. ACS Nano, 2022, 16(8): 12991-13001.

[20] Sokolov P, Nifontova G, Samokhvalov P, et al. Nontoxic fluorescent nanoprobes for multiplexed detection and 3D imaging of tumor markers in breast cancer[J]. Pharmaceutics, 2023, 15(3): 946.

[21] Tiwari P, Shukla R P, Yadav K, et al. Dacarbazine-primed Carbon quantum dots coated with breast cancer cell-derived exosomes for improved breast cancer therapy[J]. J Controll Release, 2024, 365(1): 43-59.

[22] Ostanska E, Aebisher D, Bartusik-Aebisher D. The potential of photodynamic therapy in current breast cancer treatment methodologies [J]. Biomed Pharmacother, 2021, 137(1): 111302.

[23] Jovanovic S, Markovic Z, Budimir M, et al. Lights and dots toward therapy-carbon-based quantum dots as new agents for photodynamic therapy [J]. Pharmaceutics, 2023, 15(4): 1170.

[24] Li Y Y, Zhang P S, Tang W, et al. Bright, magnetic NIR-II quantum dot probe for sensitive dual-modality imaging and intensive combination therapy of cancer [J]. ACS Nano, 2022, 16(5): 8076-8094.

[25] Ramachandran P, Khor B K, Lee C Y, et al. N-Doped graphene quantum Dots/Titanium dioxide nanocomposites: a study of ROS-Forming mechanisms, cytotoxicity and photodynamic therapy [J]. Biomedicines, 2022, 10(2): 421.

[26] Kadkhoda J, Tarighatnia A, Tohidkia M R, et al. Photothermal therapy-mediated autophagy in breast cancer treatment: progress and trends [J]. Life Sci, 2022, 298(1): 120499.

[27] Dar M S, Tabish T A, Thorat N D, et al. Photothermal therapy using graphene quantum dots[J]. APL Bioeng, 2023, 7(3): 031502.

[28] Zhao P Q, Xu Y L, Ji W, et al. Biomimetic black Phosphorus quantum dots-based photothermal therapy combined with anti-PD-L1 treatment inhibits recurrence and metastasis in triple-negative breast cancer[J]. J Nanobiotechnol, 2021, 19(1): 181.

[29] Won S Y, Singhmar R, Sahoo S, et al. Fabrication of albumin-Ti3C2 MXene quantum dots-based nanohybrids for breast cancer imaging and synergistic photo/chemotherapeutics [J]. Coll Surf B Biointerfaces, 2025, 245(1): 114207.

[30] Esgandari K, Mohammadian M, Zohdiaghdam R, et al. Combined treatment with silver graphene quantum dot, radiation, and 17-AAG induces anticancer effects in breast cancer cells[J]. J Cell Physiol, 2021, 236(4): 2817-2828.

[31] Dong L L, Li W J, Yu L D, et al. Ultrasmall Ag2Te quantum dots with rapid clearance for amplified computed tomography imaging and augmented photonic tumor hyperthermia [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(38): 42558-42566.

[32] Hu P, Shang L, Chen J C, et al. A nanometer-sized protease inhibitor for precise cancer diagnosis and treatment [J]. J Mater Chem B, 2020, 8(3): 504-514.

[33] Nieves L M, Hsu J C, Lau K C, et al. Silver telluride nanoparticles as biocompatible and enhanced contrast agents for X-ray imaging: an in vivo breast cancer screening study[J]. Nanoscale, 2021, 13(1): 163-174.

[34] Han R X, Xiao Y, Yang Q, et al. Ag2S nanoparticle-mediated multiple ablations reinvigorates the immune response for enhanced cancer photo-immunotherapy [J]. Biomaterials, 2021, 264(1): 120451.

[35] Hu H, Zheng S, Hou M, et al. Functionalized Au@ Cu-Sb-S nanoparticles for spectral CT/photoacoustic imaging-guided synergetic photo-radiotherapy in breast cancer[J]. Int J Nanomed, 2022, 17: 395-407.

[36] Saharkhiz S, Zarepour A, Zarrabi A. A new theranostic pH-responsive niosome formulation for doxorubicin delivery and bio-imaging against breast cancer [J]. Int J Pharm, 2023, 637(1): 122845.

[37] Rahmandoust M, Abdolrahimi S. lntroducing carbon quantum dot-Capivasertib drug carrier complex for enhanced treatment of breast cancer[J]. March, 2025, 12(2): 210-213.

[38] Taghizadeh-Tabarsi R, Akbari-Birgani S, Amjadi M, et al. Aptamer-guided graphene oxide quantum dots for targeted suicide gene therapy in an organoid model of luminal breast cancer[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 24104.

[39] Yao F D, Wang Z G, Liu S L, et al. Purified fluorescent nanohybrids based on quantum dot-HER2-antibody for breast tumor target imaging[J]. Talanta, 2023, 260(1): 124560.

[40] Panda A K, Murugan K, Sakthivel R, et al. A non-enzymatic, biocompatible electrochemical sensor based on N-doped graphene quantum dot-incorporated SnS2 nanosheets for in situ monitoring of hydrogen peroxide in breast cancer cells[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2023, 222(1): 113033.

[41] Jennifer G, Karina O P, Jose M M, et al. Organotin(IV)-decorated graphene quantum dots as dual platform for molecular imaging and treatment of triple negative breast cancer[J]. August, 2023, 23(2): 210-214.

（收稿日期：2025-10-12　修回日期：2026-03-03）