

DNA功能化金纳米探针及其在食品安全检测的应用研究

鲁爽, 刘彦, 胡杰

沈阳职业技术学院, 辽宁 沈阳 110045

DOI: 10.61369/SSSD.2025060043

摘要 : 食品安全是关乎人类健康的全球性重大议题, 其影响通过人类活动广泛传递至生态链中的动植物群体。因此, 发展现代食品安全监测技术至关重要。近年来, 以DNA功能化金纳米粒子(DNA-AuNPs)为核心的新型检测手段因其独特优势而备受关注。本文聚焦于DNA功能化金纳米探针的形成机制, 深入分析其独特理化性质, 并系统概述了该技术在食品安全检测中的应用方向与潜力。最后, 对当前研究进展进行总结, 并展望未来发展趋势。本研究旨在为DNA功能化金纳米探针在食品安全检测领域的深入研究和应用创新提供理论基础与参考, 进而推动生物与食品科技的进步, 更好地保障人类健康。

关键词 : DNA功能化; 金纳米探针; 食品安全检测

Research on DNA-Functionalized Gold Nanoparticles and Their Application in Food Safety Detection

Lu Shuang, Liu Yan, Hu Jie

Shenyang Vocational and Technical College, Shenyang, Liaoning 110045

Abstract : Food safety is a major global issue related to human health, and its impact is widely transmitted to animal and plant groups in the ecological chain through human activities. Therefore, it is crucial to develop modern food safety monitoring technologies. In recent years, new detection methods centered on DNA-functionalized gold nanoparticles (DNA-AuNPs) have attracted much attention due to their unique advantages. This paper focuses on the formation mechanism of DNA-functionalized gold nanoparticle probes, deeply analyzes their unique physical and chemical properties, and systematically summarizes the application directions and potential of this technology in food safety detection. Finally, it summarizes the current research progress and looks forward to future development trends. This study aims to provide a theoretical basis and reference for in-depth research and application innovation of DNA-functionalized gold nanoparticle probes in the field of food safety detection, thereby promoting the progress of biological and food science and technology and better protecting human health.

Keywords : DNA functionalization; gold nanoprobes; food safety detection

引言

食品安全是人类健康与发展的根本保障, 直接关乎公众生命健康与社会稳定, 并对经济发展、国家形象乃至全球治理产生深远影响。当前, 食品安全已被置于与医疗卫生同等重要的战略地位, 相关科研投入持续加大, 创新技术不断涌现^[1-3]。其中, DNA功能化金纳米探针(DNA-AuNPs)等前沿检测技术在过去几年取得了显著进展^[4]。凭借其高灵敏度、高特异性和优异的抗干扰能力, 此类高精尖技术为食品安全检测提供了全新的技术路径和强大工具。深入探索与实践DNA功能化金纳米探针等先进方法, 必将显著提升我国食品安全监管水平, 为保障人民健康和促进社会可持续发展提供坚实支撑。

一、DNA功能化金纳米探针的形成机制

(一) 物理吸附介导的金纳米材料

在特定条件(如适宜的离子强度与pH值)下, DNA分子可通过静电吸附、范德华力等相互作用结合至金纳米粒子(AuNPs)表面, 显著改变其表面性质、聚集行为及光学特性^[5-7]。

一方面, 吸附的DNA分子在AuNPs表面形成空间位阻保护层, 有效阻隔粒子间的直接接触, 从而显著抑制其聚集倾向, 大幅提升复合体系的稳定性。更重要的是, DNA的吸附会改变AuNPs表面的局域介电环境, 直接影响其表面等离子体共振(SPR)特性, 进而诱导溶液产生显著且可测量的光学响应(如特征吸收峰位移或溶液颜色变化)。正是基于这种对聚集状态的有效

调控和灵敏的光学响应特性，DNA–AuNPs复合体系成为构建高灵敏度生物传感平台（特别是比色检测方法^[7]）的理想材料，为食品安全检测等应用提供了强大技术支撑。

（二）Au–S键介导的DNA功能化金纳米材料形成

金纳米粒子（AuNPs）表面可通过Au–S键连接功能分子。将DNA分子引入该体系主要采用两种硫相关修饰策略：（1）巯基修饰：在DNA分子的末端或特定碱基处连接一个巯基（–SH）。该巯基可直接通过Au–S键将DNA稳定锚定在AuNPs表面，形成牢固的DNA–AuNP复合物。（2）硫代修饰：在DNA分子的磷酸骨架上，用一个硫原子取代非桥接氧原子，形成硫代磷酸酯键。这种修饰本身并不直接提供与AuNPs结合的巯基（–SH）。然而，硫代磷酸酯键中的硫原子也能较弱地结合金，但这种结合通常不如Au–S键稳定。更重要的是，硫代修饰能显著改变DNA的理化性质（如增强核酸酶抗性、改变杂交特性），并可能诱导AuNPs发生特定的聚集或分散状态改变，形成具有独特稳定性的组装结构。

二、DNA功能化金纳米探针的特性

（一）稳定性

综上所述，无论是基于物理吸附，还是通过Au–S键结合，均能显著提升DNA功能化金纳米探针（DNA–AuNPs）的稳定性，充分印证了其固有的优异稳定性^[8]。得益于此，该探针可在宽温度、pH范围内维持结构稳定，从而确保其在复杂实际样品基质及多样化检测条件下性能可靠，稳定发挥检测功能，获取准确结果。

（二）识别特性

除具备高稳定性外，DNA功能化金纳米探针的另一显著特性是其高识别性。这一特性源于DNA独特的碱基互补配对原理。通过设计与目标分析物特异性结合的DNA序列（如适配体），可实现金纳米探针对目标物的特异性识别。以黄曲霉毒素B₁（AFB₁）检测为例：当样品中存在AFB₁时，其适配体与之发生特异性结合，导致金纳米探针的结构、光学特性或电化学信号等发生改变，从而实现实时检测。类似的应用实例众多，均能有效规避复杂基质干扰，显著提升检测结果的准确性。

（三）光学特性

由于金纳米材料的表面等离子体共振效应，其光学性质对外界环境变化高度敏感。当金纳米粒子表面的DNA与目标物结合后，可诱导金纳米粒子聚集状态发生改变，进而引起吸收光谱位移及溶液颜色变化^[9]。在基于聚集状态的检测体系中，未与目标物结合时，金纳米粒子因表面DNA提供的空间位阻效应而稳定分散，溶液呈现特征红色；而当目标物存在并与DNA结合时，DNA–目标物复合物的形成减弱了粒子间的静电排斥力，导致金纳米粒子发生聚集，溶液颜色随之变为蓝色，该显著的颜色变化可通过肉眼直接观察或利用分光光度计进行检测。此外，金纳米探针还可与荧光染料等功能分子结合，基于荧光共振能量转移（FRET）等原理实现荧光信号的转换，进一步应用于高灵敏度的

检测之中^[10]。

（四）催化特性

此类技术中，部分DNA功能化金纳米探针可表现出类酶催化活性^[11]。因其自身具备催化能力，可在特定化学反应中降低反应活化能，加速反应进程，从而对特定底物产生选择性催化作用。在食品安全检测领域，此类仿酶催化体系能够有效放大检测信号，显著提升检测灵敏度。

（五）生物相容性

DNA作为生物分子修饰剂，与金纳米粒子结合后显著增强了金纳米探针的生物相容性^[12]。该特性使其能够在生物样品中稳定存在，且对样品内源性生物分子不产生显著干扰或毒性效应。例如在食品致病菌检测中，探针与细菌细胞相互作用时不会破坏其生理状态，从而保障检测结果的真实性与可靠性。因此，优异的生物相容性为DNA功能化金纳米探针在食品安全检测中的实际应用提供了关键支撑。

三、DNA功能化金纳米探针在食品安全检测中的应用

（一）真菌毒素检测

黄曲霉毒素是由黄曲霉（Aspergillus flavus）和寄生曲霉（A. parasiticus）产生的剧毒次生代谢物，其中黄曲霉毒素B₁（AFB₁）因强致癌性与高毒性严重威胁人类健康。基于自组装DNA纳米花原位合成金纳米团簇（AuNCs）–锰金属有机框架（Mn-MOF）协同传感平台，开发了AFB₁高灵敏检测方法^[13]：通过设计双功能DNA纳米花（集成AuNCs合成的模板域与AFB₁结合的适配体域），原位制备高性能DNA–AuNCs荧光探针；结合Mn-MOF修饰的发夹DNA（HP-DNA）实现靶标特异性识别及催化发夹组装（CHA）信号放大。该体系对AFB₁检测限达7 pg/mL，日内/日间精密度（RSD）分别低于3.1%/4.7%，回收率98.2–102.4%，成功应用于谷物及食用油样本检测。

其他常见真菌毒素如赭曲霉毒素A（OTA）和玉米赤霉烯酮（ZEN）在食品中广泛分布，对人类健康构成严重威胁。基于具有分支状纳米花瓣结构的金纳米花（AuFLs）载体与特异性核酸适配体，通过整合AuFLs、适配体及双通道荧光标记DNA探针，制备出新型功能化纳米传感器。该传感器利用AuFLs（荧光猝灭剂）与探针上双荧光基团（供体）间的荧光共振能量转移（FRET），耦合靶标诱导的荧光恢复效应，构建双信号比率荧光检测平台，实现OTA和ZEN的同步分析。其对两种毒素的检测灵敏度达亚纳克/毫升级（OTA: 0.017 ng/mL；ZEN: 0.033 ng/mL），兼具高选择性与准确性，可通过比率荧光信号显著变化进行定量，并成功应用于红酒基质中OTA/ZEN的双重检测。

（三）致病菌检测

针对鼠伤寒沙门氏菌传统检测方法操作繁琐、耗时长且难以便携化的问题，研究人员通过指数富集配体系统进化（SELEX）技术筛选获得可被该菌核糖核酸酶H2（RNase H2）特异性切割的嵌合型DNA/RNA探针（SSR1-T4）^[14]。经结构解析确认其核

心茎环功能区，基于此构建金纳米–镀金枪头传感器（Au-on-Au Tip）。探针通过碱基互补配对将金纳米颗粒（AuNPs）固定于移液枪头内壁金膜。目标菌存在时，RNase H2切割探针释放AuNPs，经毛细作用富集于尼龙膜形成肉眼可视红色斑点。该传感器无需电子设备与细菌预培养，可在1小时内实现多种食品基质（碎牛肉/鸡肉等）中鼠伤寒沙门氏菌的现场检测，检测限达 3.2×10^3 CFU/mL，检测灵敏度比酶联免疫分析方法（ELISA）高30倍，且枪头可重复使用5次，为食源性疾病防控提供了“样本进–结果出”式快检方案。

（四）肉类掺假检测

肉类掺假的相关检测中，目前有研究一种基于金纳米颗粒–DNA生物共轭物的电化学DNA生物传感器^[15]，用于高灵敏度检测生肉及加工肉制品中的猪肉线粒体DNA（mtDNA）。该传感器通过将靶向猪细胞色素b基因的DNA探针固定于金纳米颗粒（AuNP）表面形成生物共轭物，并修饰于金涂层丝网印刷碳电极（SPCE–Gold）。目标DNA与探针杂交后，利用亚甲基蓝嵌入双链DNA产生的电化学信号进行检测。该传感器可特异性识别生

肉及加工肉丸中低至10%的猪肉含量，且与鸡肉、牛肉无交叉反应，其灵敏度优于传统金纳米比色法，为肉类真实性鉴定提供了一种快速、便携且经济的解决方案。

四、结论

综上所述，DNA功能化金纳米探针技术在我国食品安全领域已得到广泛应用，并发展出一系列具有高灵敏度、高特异性、快速便捷特点的检测方法。然而，作为相关领域的学者与从业人员，必须认识到复杂食品基质本身可能干扰纳米探针性能，进而影响检测结果的准确性。因此，需要持续深入研究该技术，着力提升其制备与检测效率，并推动其商业化应用。展望未来，材料科学与生物医学、分析化学等学科的交叉融合，将引领DNA功能化金纳米探针技术取得更大突破。尤其是与大数据、人工智能的结合，以及与集成化、智慧化食品安全检测平台的联动，必将推动该技术在食品安全领域发挥更深远的作用。

参考文献

- [1] 马小勇, 余丽萍, 姜颖, 等. 功能化 M13噬菌体在食品安全检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(19): 165–172.
- [2] 何艳艳, 沈靖淇, 刘泰戈, 等. CRISPR技术在食品安全检测中的应用、挑战及展望[J]. 生物加工过程, 2024, 22(05): 549–559.
- [3] 张忻娅, 胡沛杉, 宋利群, 等. 基于纳米纤维素的柔性SERS基底在食品安全检测中的应用[J]. 食品与药品, 2024, 26(04): 387–393.
- [4] 王诗睿, 李露婧, 罗童匀, 等. DNA调控金纳米探针及其在食品安全检测的应用[J]. 核农学报, 2023, 37(12): 2451–2459.
- [5] 李兰英, 陶晴, 闻艳丽, 等. 多聚腺嘌呤DNA探针及其生物传感应用[J]. 化学学报, 2023, 81(06): 681–690.
- [6] 欧丽娟, 李京, 张超群, 等. 氧化反应调控的金纳米簇“关一开”型荧光探针检测过氧化氢和葡萄糖[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(12): 3757–3761.
- [7] 邵卓麒, 刘彦泓, 朱金艳, 等. 基于贵金属纳米酶的比色传感技术在食品安全检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(12): 135–142.
- [8] Fang W, Wang J, Lu S, et al. Encoding Morphogenesis of Quasi-Triangular Gold Nanoprisms with DNA[J]. Angewandte Chemie–International Edition, 2022, 61(39): e202208688.
- [9] 吴诗文, 陆宏志, 李雅欣, 等. 基于纳米颗粒表面等离子共振的比色分析法[J]. 化学进展, 2025, 37(03): 351–382.
- [10] 邱兴普, 董骐玮, 朱麟菲, 等. 基于金纳米花的双信号适配体传感器检测红酒中真菌毒素[J]. 食品科学, 2024, 45(02): 308–314.
- [11] 张一平, 崔猛, 曲林姣, 等. DNA调节纳米金模拟酶活性的癌胚抗原比色检测[J]. 化学通报, 2022, 85(09): 1105–1112.
- [12] 韩爱玲, 李超然, 吉米, 等. 基于金属纳米团簇的荧光传感器在食品安全检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 56–64.
- [13] Niu X, Suo Z, Li J, et al. Self-assembled programmable DNA nanoflower for in situ synthesis of gold nanoclusters and integration with Mn-MOF to sensitively detect AF-B1[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 479: 147806.
- [14] Li J, Khan S, Gu J, et al. A Simple Colorimetric Au-on-Au Tip Sensor with a New Functional Nucleic Acid Probe for Food-borne Pathogen *Salmonella typhimurium*[J]. Angewandte Chemie–International Edition, 2023, 62(20): e202300828.
- [15] Hartati Y W, Suryani A A, Agustina M, et al. A Gold Nanoparticle – DNA Bioconjugate – Based Electrochemical Biosensor for Detection of *Sus scrofa* mtDNA in Raw and Processed Meat[J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(11): 2591–2600.