

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241013002

引用格式: 马婷婷, 唐璎, 王俊丽, 等. 量子点在食品真菌毒素检测中的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 46-53.

MA TT, TANG Y, WANG JL, *et al.* Research progress of quantum dots in the detection of food mycotoxins [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 46-53. (in Chinese with English abstract).

量子点在食品真菌毒素检测中的研究进展

马婷婷*, 唐璎, 王俊丽, 杨晓楠

(甘肃省产品质量监督检验研究院, 兰州 730050)

摘要: 食品真菌毒素(如黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、玉米赤霉烯酮、脱氧雪腐镰刀菌烯醇等)是严重威胁食品安全和公众健康的污染物。随着全球对食品需求的不断增加和供应链复杂化, 快速、灵敏地检测污染物对于维护公众健康至关重要。近年来, 纳米技术的快速发展为食品中真菌毒素的检测提供了新思路。其中, 量子点作为一种新型的荧光纳米材料, 以其优异的光学性质和高灵敏度, 在生物传感领域备受青睐。本文以量子点为出发点, 综述了量子点的基本特性、合成方式、修饰及功能化, 重点介绍其在食品真菌毒素检测中的应用研究, 并对量子点在真菌毒素检测中的优势与挑战进行阐述, 以为食品安全检测和现场实时检测提供新思路, 为食品安全和人类健康保驾护航。

关键词: 食品真菌毒素; 量子点; 快速检测技术; 生物传感器; 荧光免疫分析

Research progress of quantum dots in the detection of food mycotoxins

MA Ting-Ting*, TANG Ying, WANG Jun-Li, YANG Xiao-Nan

(Gansu Province Product Quality Supervision and Inspection Research Institute, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: Food mycotoxins (aflatoxin, ochratoxin, zearalenone, deoxynivalenol, *etc.*) are contaminants that pose a serious threat to food safety and public health. With the increasing global demand for food and the complexity of the supply chain, rapid and sensitive detection of contaminants is essential to maintain public health and well-being. In recent years, the rapid development of nanotechnology has provided new ideas for the detection of mycotoxins in food. Among them, quantum dots, as a new type of fluorescent nanomaterials, are favored in the field of biosensing due to their excellent optical properties and high sensitivity. Taking quantum dots as a starting point, this paper briefly reviewed the basic properties, synthesis, modification and functionalization of quantum dots, focused on their application in the detection of food mycotoxins, discussed the advantages and challenges of quantum dots in food mycotoxins detection, with the aim of providing new ideas for food safety detection and on-site real-time detection, and safeguarding food safety and human health.

KEY WORDS: food mycotoxins; quantum dots; rapid detection technology; biosensor; fluorescence immunoassay

收稿日期: 2024-10-13

基金项目: 国家市场监督管理总局科技项目(2023MK119); 陇原青年创新创业人才项目(2024QNTD15)

第一作者/*通信作者: 马婷婷(1997—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为食品营养与功能评价。E-mail: gsmqmtt@163.com

0 引言

随着全球经济的快速发展和人们生活质量的不断提高, 食品安全已成为一个严重的世界性问题。真菌毒素作为由霉菌产生的次级代谢产物, 具有较强的毒性和致癌性, 其广泛存在于粮食、坚果、香料等食品中。联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)估计, 全球约四分之一的粮食受到真菌毒素污染^[1]。食用受真菌毒素污染的食品, 可能会引起肝炎、免疫抑制、肝细胞癌和精神障碍等疾病, 在极端情况下可导致死亡, 对人类健康构成严重威胁^[2]。自 1960 年发现黄曲霉毒素(aflatoxin, AFT)以来, 研究人员在食品和饲料中已确认和鉴定了 400 多种真菌毒素, 但对经济意义和健康具有重要影响的真菌毒素主要包括 AFT、赭曲霉毒素(ochratoxins, OTs)、玉米赤霉烯酮(zearealenone, ZEN)、展青霉素(patulin, PAT)、伏马毒素 B₁ (fumonisin B₁, FB₁)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)等^[3]。国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将真菌毒素分为 5 大类: 1、2A、2B、4、5。第 1 组被认为是有足够证据证明其可导致人类癌症的毒素, 如 AFT, 其中黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁)具有极强的毒性和明显的致癌作用; 2B 组被定义为可能导致人类癌症的真菌毒素, 如 OTs 和伏马毒素, 其中 FB₁ 的含量最高, 其占伏马毒素污染总量的 70%^[4]。因此, 真菌毒素对人体健康、农业生产及商业贸易造成了巨大影响, 亟需科学的检测方法。

食品安全分析是保障食品安全的必要手段, 我国对真菌毒素的污染和防控非常重视。GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》中规定了各类食物中真菌毒素的限量。其中, AFB₁ 在各类食品中的限量是 0.5~20.0 μg/kg, OTsA 的限量指标为 5.0~10.0 μg/kg, 展青素在各类食品中的限量为 50 μg/kg, ZEN 在谷物及其制品中的限量指标为 60 μg/kg。各国和各组织对食品中常见真菌毒素的限量标准如表 1^[5]。检测真菌毒素的传统方法如高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、高效液相色谱-质谱法(high performance liquid chromatography-mass spectrometry, HPLC-MS)、薄层色谱法(thin layer chromatography, TLC)、酶联免疫吸附测定法(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)等。这些方法虽然结果准确, 但存在操作复杂、检测时间长、灵敏度有限等问题^[6]。因此, 开发高效、快速、灵敏的方法用于检测食品中真菌毒素对于维护公众健康和福祉至关重要。

在食品安全领域, 纳米材料因其优异的物化特性而表现出巨大的应用潜力。目前, 研究人员正积极将纳米材料应用于食品安全检测领域, 并取得了令人满意的成果^[7]。量子点(quantum dots, QDs)是一种尺寸在 1~10 nm 的半导

体纳米晶体, 具有独特的光学和电子特性, 如高亮度、宽激发光谱、窄而对称的发射带、良好的光稳定性和生物相容性等, 在生物检测和成像领域得到广泛应用^[8]。蒙吉·巴文迪、路易斯·布鲁斯和阿列克谢·伊基莫夫因“发现和合成 QDs”而被授予 2023 年诺贝尔化学奖^[9]。基于 QDs 的快检方法比传统检测技术成本低、耗时短、操作简单, 且无损伤, 为真菌毒素检测提供了新思路。本文以 QDs 为出发点, 综述了 QDs 的基本特性、合成方式、修饰及功能化, 重点介绍其在食品真菌毒素检测中的研究进展, 并对其应用前景进行了展望, 以期食品安全检测和现场实时检测提供新思路。

表 1 食品中常见真菌毒素限量标准(μg/kg)^[5]
Table 1 Limits of common mycotoxins in food (μg/kg)^[5]

真菌毒素	食品种类	国际食品法典委员会			
		中国	欧盟	美国	
AFB ₁	玉米、花生及其乳制品	20.0	15	2	15
DON	谷物及其制品	1000	1000	500	1000
OTA	谷物、谷类及其制品	5.0	5	3	-
ZEN	谷物及其制品	60.0	-	5	-
PAT	水果、饮料类、酒类	50.0	50	50	50

注: -表示未有此规定。赭曲霉毒素 A (ochratoxin A, OTA)。

1 量子点

1.1 量子点及其基本特性

QDs 是一种尺寸小于 10 nm 的胶体半导体纳米晶体, 在三维空间维度上小于等于自身的激子玻尔半径, 由元素周期表第 II-VI 族(如 CdSe、CdS)、III-V 族(如 InP)或 IV-VI 族(如 PbS、PbSe)元素组成^[10]。随着纳米材料研究领域的蓬勃发展, 碳 QDs、硫 QDs 和 II-III-VI 三元 QDs (CuInSe, AgInS₂ 和 CuInS₂)等新型纳米粒子也被引入到这个大家族中, 不断丰富 QDs 种类^[11]。根据激发方式的不同, QDs 的发光通常分为光致发光、电致发光和自辐射发光^[12]。如图 1 所示, 光致发光是当 QDs 被光照射时, 光子被吸收, 电子从价带跃迁到导带, 形成激发态电子-空穴对(激子)。随后, 受激发的电子又从导带跃迁到价带, 重新结合激子, 再次释放光子, 使 QDs 发射特征性荧光^[13]。QDs 的发射光谱可以通过改变其尺寸和成分来调控, 这使其在荧光标记和检测中具有独特优势^[14]。QDs 由于其极小的尺寸, 会产生量子限域效应, 因而表现出独特的光学性质, 如吸收光谱宽, 发射光谱大小可调, 量子产率高且不易发生漂白, 发射带窄而对称, 光稳定性高等特点^[12]。这些独特的光学特性增强了亮度和稳定性, 显著提高了食品安全中污染物检测的灵

敏度和准确性。此外, QDs 能够在不同波长发射光, 使得其能同时识别多种危害因素, 提高检测过程的高效性和全面性, 因此非常适合应用于食品安全领域^[15-16]。

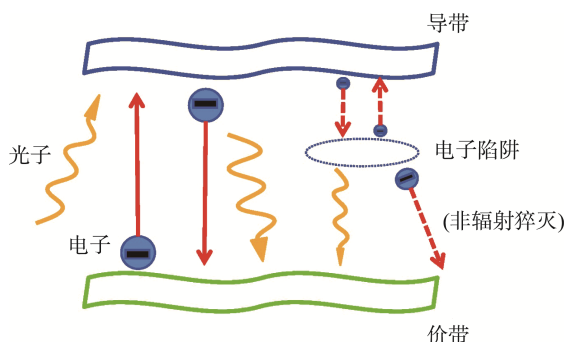


图 1 QDs 光致发电原理图^[13]

Fig.1 Schematic diagram of QDs photoluminescence^[13]

1.2 量子点的合成

构建 QDs 生物传感体系的前提是能制备出具备高荧光量子产率的 QDs。合成 QDs 的策略主要分“自上而下”和“自下而上”^[17]。

“自上而下”法主要针对尺寸较大的碳材料, 通过各种化学、物理或电化学途径将其制备成特定的纳米颗粒。这种方法能够在一定程度上维持原材料的结构和性质, 并且操作简单, 但存在 QDs 表面缺陷的问题, 不适用于 QDs 的大规模制备。常见的合成方式包括电化学氧化、激光烧蚀、电弧放电等^[18]。“自下而上”法是小分子物质经过成核、生长和聚合过程来制备 QDs。通过合理的选择骨架分子和配体, 严格控制化学进料比例、反应时间和温度, 以精准控制产物的尺寸。该方法具有实用性高、绿色无污染、成本效益高、方法简便等优点。研究中常见的合成路线包括溶剂热法、超声波热解和溶胶凝胶等^[19]。除了上述物理、化学合成方法外, QDs 还可以将细菌、真菌等作为微生物底物, 利用细胞表面的正负电荷吸附金属离子, 然后经培养后将小粒径 QDs 渗透到细胞外的方法来制备^[20-21]。

1.3 量子点的修饰及功能化

未修饰的 QDs 通常是疏水的, 不易溶于水, 不利于直接在生物环境中应用。为了增强 QDs 在检测中的特异性和生物相容性, 通常需要对其进行表面修饰和功能化^[22]。确保 QDs 被成功应用的一个关键参数是适当的表面修饰, 即纳米材料的表面用适当的官能团进行修饰以确保其在水溶液中的稳定性, 同时能稳定无机内核, 减少解离现象的发生^[23]。QDs 的功能化是指用生物分子修饰 QDs 表面, 这些生物分子修饰的 QDs 可以应用于生物传感器和成像分析。功能修饰有助于 QDs 与生物靶点的非特异性结合, 显著提高 QDs 的水溶性、生物相容性以及与目标分子的特异性结合能力, 从而提高检测效果^[24]。生物功能化表面修饰的方

法主要包括静电吸附、共价偶联和金属-配体相互作用, 功能分子包括抗体、蛋白酶、多肽、核酸等^[11]。

与传统的荧光材料(如半导体 QDs 和荧光染料)相比, QDs 具有更高的光稳定性和更窄的发射光谱, 并且亮度高, 水溶性好, 化学稳定性高, 抗光漂白能力强, 毒性低和生物相容性好等优点, 在化学、生物传感中, 特别是食品安全检测领域具有极大的应用潜力。此外, QDs 易与适配体/抗体结合形成功能 QDs, 而不影响其发射特性或适配体/抗体的特异性, 因此在实现高灵敏度定量检测方面具有明显优势^[25]。基于 QDs 的食品安全快速检测方法包括: QDs 免疫标记、免疫磁珠分离-QDs 多重荧光免疫分析、适配体-磁珠和 QDs 夹心分析、基于荧光 QDs 的“三明治”模式抗体阵列、QDs 免疫层析试纸条、QDs 生物传感、QDs 标记流式细胞术等^[26]。

2 量子点在食品真菌毒素中的应用

2.1 构建电化学发光传感器系统

生物传感器是一种对生物物质敏感并能迅速将目标物浓度转化为可测量信号以供检测的装置。它是由作为识别元件的固定化生物敏感材料(酶、抗体、抗原、核酸等)、合适的传感器、高效的信号放大装置等组成的协同集成分析系统, 其广泛应用于临床诊断、食品分析、环境监测等领域^[27]。随着纳米技术的蓬勃发展和完善, 生物传感器的装配策略也趋于多样化和多功能化。电化学发光(electrochemiluminescence, ECL)是通过电化学方法在电极表面产生新的物质, 然后发生高能级的电子转移反应, 产生激发态发光^[28]。基于电化学发光的生物传感器以其成本低、分析速度快、线性范围宽、灵敏度高、抗干扰能力强等优点在食品污染物中受到广泛关注^[29]。QDs 优越的光学性能和表面功能化特性使其成为生物传感器的理想材料。将适配体和 QDs 偶联作为信号探针, 使得基于 QDs 构建的 ECL 传感器具有电化学信号放大和荧光信号稳定等优点的同时, 具有发光度高、响应强且稳定、背景信号几乎为零、动态范围宽等特性, 从而显著提高检测准确性和灵敏度^[30]。

WANG 等^[31]构建了一种用于 AFB₁ 追踪的新型 ECL 传感器。利用封闭空腔结构, 将多个 MP QDs 结晶并嵌入 ZIF-8 中形成 MP QDs@ZIF-8, 在水环境中实现了稳定且强大的 ECL 响应。所构建的 ECL 传感器检出限为 3.5 fg/mL, 且 11.55 fg/mL~20 ng/mL 线性范围内可对玉米样品中的 AFB₁ 进行定量, 得到了令人满意的回收率。该 ECL 传感器实现了卓越的 AFB₁ 检测性能, 具有超高灵敏度、良好的选择性和稳健的重现性。该研究为设计高性能 ECL 食品安全传感平台提供了新的途径。LU 等^[32]设计了一种基于石墨烯 QDs (graphene quantum dot, GQDs)作为发光材料的

ECL 传感器, 用于超灵敏测定 AFB₁。所提出的 ECL 感应传感器在 0.01~100 ng/mL 内具有线性响应, 检出限低至 3.75 pg/mL。同时, 该传感器具有良好的稳定性、选择性和重现性, 在实际样品分析中也具有良好的准确性和可靠性。这些优点为其在食品安全检测提供了广阔的发展前景。JIA 等^[33]构建了一种基于 CdSe@CdS QDs 的无标记 ECL 适配体传感器, 用于 OTA 的特异性和敏感性检测。通过对百合和大黄样品中的 OTA 进行快速简便的分析, 验证了该方法的实用性和可行性, 回收率分别为 98.1%~105.6%和 99.3%~101.5%。新开发的基于 QDs 的 ECL 传感器为食品和饲料安全评价、环境监测和临床诊断中更多真菌毒素提供了一种新的通用分析工具。

近年来, 电化学发光免疫分析法(electrochemiluminescence immunoassay, ECLIA)将 ECL 的敏感性与免疫技术的特异性相结合, 使得 ECL 不需要外部光源进行激发, 有效避免了散射光的干扰, 降低了背景噪声^[27]。FENG 等^[34]首次合成了用二氧化锡 QDs 修饰的金-银合金来锚定 ZEN 抗体, 开发了一种基于钯修饰的氧化石墨烯(Pd-GO)的超灵敏 ECLIA 传感器, 用于检测 ZEN。其中, Pd-GO 和金-银合金都具有较大的比表面积, 能够负载大量的抗原和抗体。结果表明, 该电化学发光免疫传感器在 ZEN 的高灵敏度检测中具有较宽的线性范围(0.0005~500.0000 ng/mL)和较低的检出限(0.16 pg/mL)。通过对实际样品中真菌毒素的检测, 表明证实了该传感器的可行性和实用性。该研究为 ZEN 等小分子毒素的检测提供了一种新颖、灵敏的方法, 还阐明了开发高性能 ECLIA 传感器用于食品安全检测的可能性。

2.2 荧光免疫分析

近年来, 各种免疫分析方法被用来检测食品中的真菌毒素, 如传统的 ELISA 因其简便、实用和灵敏度高而成为最广泛的商业化真菌毒素快速检测方法之一。但它仍需要数小时的抗体孵育和洗涤步骤, 而且酶标记信号的使用使其缺乏稳定性。此外, ELISA 一次检测只能分析一种被分析物, 无法满足在一个样品中进行多重真菌毒素检测的迫切需要^[35]。因此, 亟需探索操作步骤简化、筛查方法效率高效、快速精准的免疫分析检测方法。此外, QDs 纳米吸附珠(quantum dot nanobeads, QBs)是嵌入大量 QDs 的聚合物纳米吸附珠, 其亮度是同类 QDs 的数千倍^[36]。与传统的荧光染料相比, QBs 具有发光强、光稳定性高、光致发光光谱窄等优异的光学特性, 大大提高了光信号的稳定性和强度, 其与单克隆抗体等结合形成的荧光探针, 能增强结构稳定性和荧光强度, 从而提高抗基质干扰能力^[37]。

范雅靓等^[38]报道了一种简便快速的检测谷物中 AFB₁ 的荧光定量免疫层析检测方法。该方法采用 QDs 荧光微球作为荧光标记物, 与 AFB₁ 的单克隆抗体偶联, 构建 QDs 荧光微球探针, 从而制备 QDs 荧光免疫层析检测卡。

该检测卡对小麦样本的检出限为 0.02 μg/kg, 定量限为 0.05 μg/kg。与高效液相色谱-串联质谱法检测结果相比其具有良好的 consistency。研究结果证明该方法具有较好的重复性、特异性、稳定性, 能够在低浓度范围内迅速、准确地检测微量的 AFB₁。YUAN 等^[39]利用生物素-链霉亲和素间的高亲和力和 QDs 的荧光稳定性, 设计一种用于检测花生中 AFB₁ 的信号放大荧光免疫层析试纸条, 可以有效保护抗体活性, 减少探针数量并实现信号放大, 该方法为实际样品中真菌毒素的快速检测提供了新思路。

由于真菌毒素的存在具有多样性和多重性, 食品往往受到多种真菌毒素的同时污染。真菌毒素的共同污染可能导致累积作用和协同作用, 对人类的健康构成更大的威胁^[40]。因此, 建立多种真菌毒素同时检测的方法具有较好的应用价值和现实意义。近年来, 不少学者开始尝试在样品基质中同时检测多种真菌毒素的研究。LI 等^[35]设计了一种采用双 QDs 纳米珠-荧光酶联免疫吸附试验(fluorescence-linked immunosorbent assay, FLISA)的方法, 用于同时检测饲料中的 AFB₁ 和 ZEN。在这项研究中, 发红色和绿色荧光的 CdSe/ZnS QDs 微球分别与 AFB₁ 和 ZEN 单克隆抗体偶联, 使用 QBs-mAbs 为结合和检测探针, 用于开发一个 FLISA 平台。与传统 ELISA 相比, 双 QBs-FLISA 法对 AFB₁ 和 ZEN 的检测灵敏度分别提高了 20 倍和 5 倍, 且该方法和液相色谱-串联质谱法分析饲料样品的结果显示良好的一致性($r^2=0.99$)。这是 FLISA 中首次应用双 QBs 同时检测两种目标真菌毒素, 这也为复杂样品基质中多重分析物的测定提供了一个通用平台。LU 等^[41]设计了一种利用荧光强度高、信噪比高的 QDs 微球免疫层析试纸条, 在 0.01、0.2 和 0.032 ng/mL 的较低检出限下, 对 AFB₁、OTA 和 ZEN 进行了灵敏的检测, 并在 0.01~1.00 ng/mL、0.2~200.0 ng/mL 和 0.032 ng/mL 范围内定量测定其质量浓度, 准确度高, 选择性好。更重要的是, 这些真菌毒素的检测只需简单的人工操作和便携式手持式试纸仪即可在 45 min 内完成现场检测。因此, 该方法是一种有望支持多种真菌毒素现场灵敏定量检测的解决方案。荧光免疫系统实现了高通量、高效的检测, 提高了实验的自动化程度, 在食品安全、环境监测等领域得到了广泛应用。

2.3 开发表面增强拉曼散射传感器

表面增强拉曼光谱(surface enhanced Raman spectroscopy, SERS)效应是指分子被吸附在粗糙金属表面时的拉曼信号增强。当分析物分子在或接近表面的粗糙贵金属(如金、银)纳米结构, 诱导偶极子的数量增加, 导致表面增强拉曼效应的形成, 导致原本微弱的拉曼信号探测增强^[42]。SERS 作为一种强大的振动光谱技术, 具有单分子水平的灵敏度和高分析速度^[43]。SERS 作为一种检测痕量样品

的快速、灵敏和非破坏性分析技术, 广泛用于分子鉴定和结构表征方面, 近年来在真菌毒素检测中也得到了广泛的应用^[44]。基于 SERS 的真菌毒素传感系统通过结合适配体修饰的磁珠和互补 DNA (cDNA) 功能化的 SERS 探针来设计^[45]。

MA 等^[46] 将信号探针和捕获探针相结合, 开发了一种稳定、有效、选择性高的 SERS 和荧光双信号适配体传感器, 用于 AFB₁ 检测。QDs 被包埋在 SiO₂ 纳米颗粒中, 这种方法可以有效防止 QDs 在与外界环境接触过程中氧化, 以保证 QDs 荧光信号的稳定性。然后将经 DTNB 和 cDNA 修饰的金纳米粒子(gold nanoparticles, AuNPs)与 QD@SiO₂ 连接, 提供稳定的荧光和 SERS 信号。该传感器的检出限低至 0.087 pg/mL, 适用于花生和花生油样品的实际检测。试验结果与 HPLC 法相比, 回收率为 92.75%~104.73%。所建立的双信号适配体传感器稳定、易于操作, 可为真菌毒素检测提供新的研究思路。同样, WEI 等^[47]也建立了一种 SERS 和荧光双信号适配体传感器, 用于 AFB₁ 的检测。将荧光信号源 CdTe QDs 修饰在 SiO₂ 纳米颗粒的外层, 并用 AFB₁ 适配体进一步功能化。用大米、花生和玉米等实际样品对 AFB₁ 检测得到的回收率准确度在 92.75%~105.24%之间, 检出限 0.094 pg/mL, 线性范围为 10⁻⁴~10³ ng/mL, 有

效证实了所建立的 SERS 适配体传感器可以应用于真实样品中检测 AFB₁。该方法既提高了灵敏度, 又保证了检测的稳定性和可靠性, 有望在食品生产中实现快速检测。

2.4 基于量子点检测的其他应用

表 2 总结了 QDs 在食品真菌毒素检测的最新进展。如今, 随着智能手机的普及, 基于智能手机的传感平台成为最具前景的便携式现场监测装置, 并在食品污染物检测中得到应用和验证^[50]。目前集成在智能手机中的高质量摄像头具有同时收集和多个数据的强大能力^[51]。因此, 许多基于智能手机的传感、成像和诊断平台应运而生^[52]。SALARI 等^[48]搭建了一种智能手机辅助的 OTA 的荧光检测平台, 该方法使用嵌入在介孔 SiO₂ 包封的锰掺杂卤化铅钙钛矿 QDs (Mn-CsPbBr₃ QDs@SiO₂), 并将其用作 OTA 的比例荧光探针。该传感器具有出色的选择性和低检出限(4.1 ng/mL), 而且 OTA 线性范围很宽, 从 5.0 到 250.0 ng/mL 不等。当 OTA 浓度不同时, 在紫外灯下会出现从粉红色到蓝色的多色过渡, 因此可以通过使用颜色分析应用程序来实现简单的视觉和智能手机辅助 OTA 检测。在红茶、咖啡、发霉无花果和面粉样品中的回收率令人满意, 证实了该检

表 2 QDs 在食品真菌毒素中的应用
Table 2 Application of QDs in the detection of food mycotoxins

方法	真菌毒素	QDs	检出限	线性范围	样品类型	检测时间	参考文献
ECL 传感器	AFB ₁	MP QDs	3.5 fg/mL	11.5 fg/mL~20 ng/mL	玉米	—	[31]
	AFB ₁	GQDs	3.75 pg/mL	0.01~100 ng/mL	花生、玉米、小麦	80 min	[32]
	OTA	CdSe@CdS QDs	0.89 ng/mL	1~100 ng/mL	百合和大黄	2 h	[33]
	ZEN	SnO ₂ QDs	0.16 pg/mL	0.0005~500 ng/mL	玉米	—	[34]
荧光免疫技术	AFB ₁	SAQDMS	0.02 μg/kg	0.05~25.00 μg/kg	小麦	8 min	[38]
	AFB ₁	QDs-SA	5 ng/kg	1~10 μg/kg	花生	30 min	[39]
	AFB ₁	CdSe/ZnS QBs	9.3 pg/mL	15~500 pg/mL	饲料	20 min	[35]
	ZEN		102.1 pg/mL	0.15~5 ng/mL			
	AFB ₁	QDMS	0.01 ng/mL	0.01~1 ng/mL	玉米	45 min	[41]
	OTA		0.2 ng/mL	0.2~200 ng/mL			
	ZEN		0.032 ng/mL	0.032~32 ng/mL			
SERS 传感器	AFB ₁	QD-SiO ₂	0.087 pg/mL	10 ⁻⁴ ~10 ³ ng/mL	花生、花生油	—	[46]
	AFB ₁	CdTe QDs	0.100 pg/mL	10 ⁻⁴ ~10 ³ ng/mL	花生、大米	—	[47]
			0.094 pg/mL	10 ⁻⁴ ~10 ³ ng/mL	玉米	—	
其他应用	OTA	Mn-CsPbBr ₃ QDs@SiO ₂	4.1 ng/mL	5.0~250 ng/mL	小麦粉、玉米粉, 红茶、咖啡、发霉无花果	—	[48]
	ZEN	CdTe QDs	13.87 pg/mL	0.05~80 ng/mL	玉米、小麦、大豆	5 min	[49]

注: —表示文中未提及。

测方法的可靠性。SONG 等^[49]成功研发了一种智能手机辅助比率 FRET 光电传感器, 用于谷物中 ZEN 的即时检测。该技术以合体修饰的碲镉(CdTe) QDs 为供体, AuNPs 为受体, CdTe QDs 的荧光被 AuNPs 基于 FRET 猝灭, SiQDs 的荧光作为参考。在 ZEN 存在的情况下, 适配体修饰的 CdTe QDs 被吸附在 ZEN 上, 能量受体与供体之间的距离增加, 阻止了 FRET, 从而使 CdTe QDs 的荧光恢复。在便携式检测设备和智能手机的辅助下, 该传感器实现了谷物中 ZEN 的视觉即时检测。根据 R/B 值与 ZEN 浓度的线性关系, ZEN 的检出限为 13.87 pg/mL, 实现了 ZEN 的现场定性定量检测。该方法的建立在食品安全领域具有普遍适用的潜力。

3 结束语

QDs 由于其发射波长可调、吸收宽、荧光发射强度高、量子产率高、可忽略光漂白等独特性质, 在真菌毒素的检测中展现出巨大的应用潜力。本文综述了 QDs 的性能特点、合成方法、修饰及功能化及其在食品真菌毒素中的应用等方面的最新进展。从 ECL 传感器、荧光免疫技术、SERS 传感器到智能手机辅助的检测平台, QDs 都能提供高灵敏度与低检出限、快速响应和高选择性的检测结果, 在食品安全检测方面显示出巨大的应用价值和广阔的应用前景。

尽管 QDs 在真菌毒素检测中展现了诸多优点, 但在实际应用中仍面临一些挑战: (1) 由于 QDs 的表面通常需要修饰以增强其生物相容性, 过多的表面修饰可能会影响 QDs 的光学性质和生物分子结合能力。未来的研究重点可以放在 QDs 表面改性上, 通过引入生物相容性强、环境友好的表面修饰剂, 解决 QDs 在样品中的应用问题。(2) QDs 在复杂生物样本中的稳定性和干扰问题仍需进一步研究。如在复杂的食物基质中, 消除基质干扰和提高靶标选择性是迫切需要解决的问题。食品样品固有的高复杂性, 其中含有多种基质成分, 可能会干扰分析结果, 直接影响分析结果的准确性。应进一步挖掘特异性强、连接方式紧密的 QDs, 选择出能够与 QDs 高特异性结合的物质分子, 同时保持 QDs 的性能, 实现超灵敏快速检测。(3) 此外, QDs 的合成和功能化过程较为复杂, 限制了其大规模应用的推广。

综上, 随着荧光纳米和分析技术的快速发展, QDs 有望在食品真菌毒素检测中达到更灵敏、精确、高效的水平, 如结合 QDs 与其他纳米材料(如碳纳米管、石墨烯等), 开发多功能、高灵敏度的复合传感平台, 以实现多种真菌毒素的同步检测。此外, 未来可以结合 QDs 传感技术与便捷的便携式检测设备, 着眼于食品链系统的各个环节, 进行实时的在线监测, 以实现食品安全检测的智能化和自动化, 从而为食品安全领域创造更好的、更广泛的实际应用价值。

参考文献

- [1] SUO Z, NIU X, WEI M, *et al.* Latest strategies for rapid and point of care detection of mycotoxins in food: A review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2023, 1246: 340888.
- [2] NUNES VMR, MOOSAVI M, MOUSAVI-KHANEGHAH A, *et al.* Innovative modifications in food processing to reduce the levels of mycotoxins [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 38: 155–161.
- [3] ADEBIYI JA, KAYITESI E, ADEBO OA, *et al.* Food fermentation and mycotoxin detoxification: An African perspective [J]. *Food Control*, 2019, 106: 106731.
- [4] CLAEYS L, ROMANO C, DE RUYCK K, *et al.* Mycotoxin exposure and human cancer risk: A systematic review of epidemiological studies [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 1449–1464.
- [5] 朱效东, 谢新华, 贺阳春, 等. 适配体-纳米酶联用检测真菌毒素研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(17): 211–221.
ZHU XD, XIE XH, HE YC, *et al.* Research progress in the detection of mycotoxins by the marriage of aptamer-nanozyme [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(17): 211–221.
- [6] SHIGUTE T, WASHE AP. Reduction of aflatoxin M1 levels during ethiopian traditional fermented milk (Ergo) production [J]. *Journal of Food Quality*, 2018(1): 4570238.
- [7] CHEN L, LU J, LUO M, *et al.* A ratiometric fluorescent sensing system for the selective and ultrasensitive detection of pesticide residues via the synergistic effects of copper nanoclusters and carbon quantum dots [J]. *Food Chemistry*, 2022, 379: 132139.
- [8] SIVASELVAM S, ANJANA RS, DHUJANA NS, *et al.* Nitrogen-doped carbon dots: A novel biosensing platform for selective norfloxacin detection and bioimaging [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2024, 12(31): 7635–7645.
- [9] 陈彪, 王春秀, 朱玥玮, 等. 元素周期表“获得了第三个维度”——2023 年诺贝尔化学奖“量子点的发现与合成”[J]. *化学通报*, 2024, 87: 888–895.
CHEN B, WANG CX, ZHU YW, *et al.* The periodic table “gained a third dimension” nobel prize in chemistry 2023 “discovery and synthesis of quantum dots” [J]. *Huaxue Tongbao*, 2024, 87: 888–895.
- [10] CASTRO RC, RIBEIRO DSM, SANTOS JLM. Visual detection using quantum dots sensing platforms [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, 429: 213637.
- [11] KRISHNA-SARASWAT S, AHMED-MUSTAFA M, KAMIL-GHADIR G, *et al.* Carbon quantum dots: A comprehensive review of green synthesis, characterization and investigation their applications in bioimaging [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2024, 162: 112279.
- [12] 李宁. 基于量子点构建的荧光纳米生物传感器及其在生物传感中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
LI N. Construction of fluorescent nano-biosensors based on quantum dots and its application in biosensing [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [13] 史范平. 基于半导体量子点和石墨烯量子点的功能性荧光纳米生物传感器的构建及在生物医学分析中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2017.

- SHI FP. Functionalized fluorescence nano-biosensors based on semiconductor quantum dots and graphene quantum dots and their application in biomedical and analytical field [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [14] KHAN ME, MOHAMMAD A, YOON T. State-of-the-art developments in carbon quantum dots (CQDs): Photo-catalysis, bio-imaging, and bio-sensing applications [J]. *Chemosphere*, 2022, 302: 134815.
- [15] WANG D, WANG Z, WANG X, *et al.* Functionalized copper nanoclusters-based fluorescent probe with aggregation-induced emission property for selective detection of sulfide ions in food additives [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(40): 11301–11308.
- [16] 谷鑫, 胡金庆, 胡钰梅, 等. 基于量子点可视技术快速检测鲜食农产品中食源性致病菌的应用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49: 320–327.
- GU X, HU JQ, HU YM, *et al.* Research progress in the application of quantum dots-based visualization technology for rapid detection of foodborne pathogens in fresh agricultural produces [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49: 320–327.
- [17] YANG W, LI X, FEI L, *et al.* A review on sustainable synthetic approaches toward photoluminescent quantum dots [J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(2): 675–700.
- [18] 余涛. 基于量子点荧光探针的黄曲霉毒素产毒基因检测研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
- YU T. Research on the detection of aflatoxin-producing genes based on quantum dots fluorescence probes [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [19] 李成飞. 量子点纳米材料的合成及其在流感病毒检测和治疗中的应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- LI CF. Synthesis of quantum dot nanomaterials and their application in the detection and treatment of influenza viruses [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [20] SAYHI M, OUEGHY O, BELGACEM K, *et al.* Electrochemical detection of influenza virus H9N₂ based on both immunomagnetic extraction and gold catalysis using an immobilization-free screen printed carbon microelectrode [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2018, 107: 170–177.
- [21] LI J, GONG X. The emerging development of multicolor carbon dots [J]. *Small*, 2022, 18(51): 2205099.
- [22] MA P, JIA X, HE Y, *et al.* Recent progress of quantum dots for food safety assessment: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 143: 104310.
- [23] WHEELER LM, SANEHIRA EM, MARSHALL AR, *et al.* Targeted ligand-exchange chemistry on cesium lead halide perovskite quantum dots for high-efficiency photovoltaics [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(33): 10504–10513.
- [24] DÍAZ-GONZÁLEZ M, DELA-ESCOSURA-MUÑOZ A, FERNÁNDEZ-ARGÜELLES MT, *et al.* Quantum dot bioconjugates for diagnostic applications, in surface-modified nanobiomaterials for electrochemical and biomedicine applications [Z]. 2020.
- [25] BONILLA JC, BOZKURT F, ANSARI S, *et al.* Applications of quantum dots in food science and biology [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 53: 75–89.
- [26] DU H, WANG X, YANG Q, *et al.* Quantum dot: Lightning invisible foodborne pathogens [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 1–12.
- [27] PENG L, LI P, CHEN J, *et al.* Recent progress in assembly strategies of nanomaterials-based ultrasensitive electrochemiluminescence biosensors for food safety and disease diagnosis [J]. *Talanta*, 2023, 253: 123906.
- [28] YANG E, ZHANG Y, SHEN Y. Quantum dots for electrochemiluminescence bioanalysis-A review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, 1209: 339140.
- [29] 张甜, 龚金博, 杨锡东. 基于量子点的电化学发光核酸分析传感器研究进展[J]. *分析科学学报*, 2021, 37: 691–698.
- ZHANG T, GONG JB, YANG XD. Research progress of electrochemiluminescence nucleic acid analysis sensor based on quantum dots [J]. *Journal of Analytical Science*, 2021, 37: 691–698.
- [30] 彭双凤, 孙青月, 孙丹妮, 等. 基于核壳型量子点的生物传感器在真菌毒素检测中的应用进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(6): 71–80.
- PENG SF, SUN QY, SUN DN, *et al.* Research progress of biosensor based on core-shell quantum dots in mycotoxins detection [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 2023, 14(6): 71–80.
- [31] WANG Q, XIONG C, LI J, *et al.* High-performance electrochemiluminescence sensors based on ultra-stable perovskite quantum dots@ZIF-8 composites for aflatoxin B₁ monitoring in corn samples [J]. *Food Chemistry*, 2023, 410: 135325.
- [32] LU Y, ZHAO X, TIAN Y, *et al.* An electrochemiluminescence aptasensor for the ultrasensitive detection of aflatoxin B₁ based on gold nanorods/graphene quantum dots-modified poly(indole-6-carboxylic acid)/flower-gold nanocomposite [J]. *Microchemical Journal*, 2020, 157: 104959.
- [33] JIA M, JIA B, LIAO X, *et al.* A CdSe@CdS quantum dots based electrochemiluminescence aptasensor for sensitive detection of ochratoxin A [J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 131994.
- [34] FENG Y, CHENG G, WANG Z, *et al.* Electrochemiluminescence immunosensor based on tin dioxide quantum dots and palladium-modified graphene oxide for the detection of zearalenone [J]. *Talanta*, 2024, 271: 125740.
- [35] LI R, WEN Y, YANG L, *et al.* Dual quantum dot nanobeads-based fluorescence-linked immunosorbent assay for simultaneous detection of aflatoxin B₁ and zearalenone in feedstuffs [J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130527.
- [36] RONG Z, BAI Z, LI J, *et al.* Dual-color magnetic-quantum dot nanobeads as versatile fluorescent probes in test strip for simultaneous point-of-care detection of free and complexed prostate-specific antigen [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, 145: 111719.
- [37] WU W, LIU X, SHEN M, *et al.* Multicolor quantum dot nanobeads based fluorescence-linked immunosorbent assay for highly sensitive multiplexed detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 338: 129827.

- [38] 范雅靓, 吴才章, 赵志科. 量子点荧光微球免疫法定量检测小麦中黄曲霉毒素 B₁[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15: 208–216.
FAN YL, WU CZ, ZHAO ZK. Quantitative determination of aflatoxin B₁ in wheat by quantum dot fluorescence microsphere immunoassay [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(10): 208–216.
- [39] YUAN B, LIU Q, YANG Q, *et al.* An immediate and antibody protected carboxyl quantum dot immunochromatographic analysis hierarchical signal amplification test strip based on biotin-streptavidin system for the detection of aflatoxin B₁ in peanuts [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 125: 105759.
- [40] SMITH MC, MADEC S, COTON E, *et al.* Natural co-occurrence of mycotoxins in foods and feeds and their *in vitro* combined toxicological effects [J]. Toxins, 2016, 8(4): 94.
- [41] LU YN, SHAN Y, HUANG H, *et al.* Quantum dot microsphere-based immunochromatography test strip enabled sensitive and quantitative on-site detections for multiple mycotoxins in grains [J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131868.
- [42] SONG L, LI J, LI H, *et al.* Highly sensitive SERS detection for aflatoxin B₁ and ochratoxin A based on aptamer-functionalized photonic crystal microsphere array [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 364: 131778.
- [43] ZHANG D, HUANG L, LIU B, *et al.* Quantitative and ultrasensitive detection of multiplex cardiac biomarkers in lateral flow assay with core-shell SERS nanotags [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 106: 204–211.
- [44] SUN J, LI W, ZHU X, *et al.* A Novel multiplex mycotoxin surface-enhanced raman spectroscopy immunoassay using functional gold nanotags on a silica photonic crystal microsphere biochip [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(38): 11494–11501.
- [45] ZHAI W, WEI D, CAO M, *et al.* Biosensors based on core-shell nanoparticles for detecting mycotoxins in food: A review [J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136944.
- [46] MA X, WEI J, JIANG C, *et al.* A SERS and fluorescence dual-signal aptasensor for aflatoxin B₁ detection based on DTNB labeled AuNPs and CdTe quantum dots [J]. Food Analytical Methods, 2024, 18(2): 293–304.
- [47] WEI J, HE Y, SONG Z, *et al.* Satellite nanostructures composed of CdTe quantum dots and DTNB-labeled AuNPs used for SERS-fluorescence dual-signal detection of AFB₁ [J]. Food Control, 2024, 156: 110112.
- [48] SALARI R, AMJADI M, HALLAJ T. A smartphone-assisted fluorescent sensing platform for ochratoxin A using Mn-doped CsPbBr₃ perovskite quantum dots embedded in the mesoporous silica as a ratiometric probe [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024, 312: 124083.
- [49] SONG L, LU M, LIANG P, *et al.* Smartphone-assisted ratiometric FRET aptasensor based on quantum dots and gold nanoparticles for point-of-care testing of zearalenone in cereals [J]. Food Control, 2024, 165: 110666.
- [50] 吴婷婷. 基于功能化量子点构建食品危害物快速分析新方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
WU TT. A novel method for fast analysis of food hazards based on functional quantum dots [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [51] WU X, TANG K, CHEN Y, *et al.* Smartphone-assisted colorimetric dual-mode sensing system based on europium-doped metal-organic frameworks for rapid on-site visual detection of Fe³⁺ and doxycycline [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024, 308: 123705.
- [52] TANG K, CHEN Y, TANG S, *et al.* A smartphone-assisted down/up-conversion dual-mode ratiometric fluorescence sensor for visual detection of mercury ions and l-penicillamine [J]. Science of The Total Environment, 2023, 856: 159073.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)