DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251111004
引用格式: 马婷婷, 唐瓔, 王俊丽, 等. 量子点在食品中瘦肉精残留检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 217–224.
MA TT, TANG Y, WANG JL, *et al*. Research progress on the application of quantum dots in the detection of lean meat powder residues in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 217–224. (in Chinese with English abstract).

量子点在食品中瘦肉精残留检测中的应用研究进展

马婷婷*, 唐　瓔, 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: 食品安全问题是当前我国社会关注的焦点之一。瘦肉精是一类能够促进动物瘦肉生长、提高肉料比的药物。瘦肉精在动物性食品中的残留严重威胁消费者健康, 因此发展快速、灵敏的检测技术至关重要。量子点作为一种新型纳米材料, 凭借其独特的光学与电学性能, 在食品分析领域展现出广阔的应用前景。本文从量子点与检测手段两方面梳理量子点快速检测技术在瘦肉精残留检测方面的最新应用进展, 综述了量子点的基本结构与显著特性, 重点聚焦于量子点在瘦肉精残留检测中的具体应用, 系统阐述了三大主流分析技术的研究现状(基于量子点荧光特性的荧光分析技术、结合抗原抗体特异性反应的免疫分析技术以及利用量子点修饰电极提升灵敏度的电化学分析技术), 总结了量子点传感技术在当前研究中面临的挑战, 并展望其未来发展方向。本文旨在为开发高灵敏、快速、便携的瘦肉精检测新技术提供有价值的参考。

关键词: 量子点; 瘦肉精; 荧光特性; 免疫分析; 电化学发光

Research progress on the application of quantum dots in the detection of lean meat powder residues in food

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 safety issues are one of the current focuses of social concern in China. Lean meat powder is a type of drug that can promote lean meat growth in animals and improve the meat-to-feed ratio. The residue of lean meat powder in animal-derived foods poses a serious threat to consumer health, so the development of rapid and sensitive detection technologies is vital importance. Quantum dots, as a new type of nanomaterial, have shown broad application prospects in the field of food analysis due to their unique optical and electrical properties. This paper reviewed the latest application progress of rapid detection technologies in the detection of lean meat powder residues from 2 aspects: Quantum dots and detection methods. It mainly introduced the basic structure and significant characteristics of quantum dots, focused on the specific application of quantum dots in the detection of ractopamine

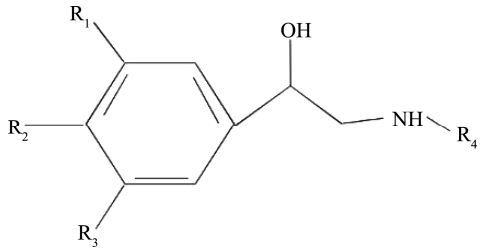
收稿日期: 2025-11-11
基金项目: 国家市场监督管理总局科技项目(2023MK119); 陇原青年创新创业人才项目(2024QNTD15)
第一作者/*通信作者: 马婷婷(1997—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为食品营养与功能评价。E-mail: gsmqmtt@163.com

residues, systematically elaborated on the research status of 3 mainstream analytical techniques (fluorescence analysis technology based on the fluorescence characteristics of quantum dots, immunoassay technology combining the specificity of antigen-antibody reactions and electrochemical analysis technology that enhanced sensitivity by modifying electrodes with quantum dots), summarized the challenges faced by quantum dot sensing technology in current research and looked forward to its future development directions. This article aims to provide valuable references for the development of new, highly sensitive, rapid and portable detection technology for lean meat powder.

KEY WORDS: quantum dots; lean meat powder; fluorescence characteristics; immunoassay; electrochemiluminescence

0 引 言

β-受体激动剂(简称 *β*-激动剂)是一类典型的食品安全危害因子, 这类药物在化学结构上属于苯乙醇胺类, 其特征是芳香环与末端氨基上带有不同的取代基。同时, 它们也是肾上腺素受体激动剂(adrenergic receptor agonists, AA), 能够与肾上腺素能受体(adrenergic receptor, AR)特异性结合, 从而产生与肾上腺素和去甲肾上腺素相似的药理效应[1]。在医学上, *β*-激动剂常用于治疗哮喘或心跳过缓[2]。然而, 由于其具有促进蛋白质合成、促进肌肉生长、减少脂肪组织沉积等功能, 它们也被称为“瘦肉精”。如图 1 所示, 根据苯环上取代官能团不同, *β*-激动剂大致分为 3 类: 苯胺型、苯酚型和二酚型。苯胺型的苯环上为氨基取代基, 常见药物有溴布特罗(brombuterol, Bro)和盐酸克伦特罗(clenbuterol, CLE); 苯酚型的苯环上为酚羟基取代基, 常见的有莱克多巴胺(ractopamine, RAC); 二酚型是指苯环上含有邻位或间位二苯羟基的结构, 此类化合物包括特布他林(terbutaline, Ter)和沙丁胺醇(salbutamol, SAL)。*β*-激动剂毒性较强且化学性质较为稳定, 进入动物体内后分解缓慢, 代谢速率较低, 容易在机体组织, 特别是肝脏、肾脏等内脏器官中大量蓄积, 并且普通的加热烹调无法破坏其结构[3]。因此, *β*-激动剂在动物源性食品中的残留会对人类健康构成严重威胁。残留药物一旦被人体吸收, 易引起头晕、心悸、恶心、呕吐, 有时还会导致中毒, 甚至死亡[4]。此外, 瘦肉精对生态环境的污染不可小觑。集中动物饲养作业的废水蓄水是兽药污染浅层地下水的潜在来源[5]。自 1990 年西班牙首次发生 CLE 中毒事件以来, 世界各地不断有动物源性食品中 *β*-激动剂残留导致的食品安全事件被报道。鉴于瘦肉精对人类健康造成的严重危害, 中国、俄罗斯和欧盟均禁止使用瘦肉精。我国一直严禁瘦肉精非法添加使用, 农业农村部第 250 号《食品动物中禁止使用的药品及其他化合物清单》公告明确将 *β*-激动剂及其盐类、酯类衍生物(瘦肉精)列入禁用清单名录, 全面禁止其在食用动物养殖中的应用[6]。国际和国内对瘦肉精监管标准不同, 如 CLE 在中国、美国、欧盟等国家和地区均被禁止用作生长促进剂, RAC 在美国、加拿大、巴西等国被批准使用, 但在中国、日本和欧盟等大多数国家和地区被禁用[7]。食品法典委员会推荐 CLE 在脂肪和肌肉的最大残留量(maximum residue limit, MRL)为 0.2 μg/kg; RAC 在猪、牛肉中 MRL 为 10 μg/kg。虽然在中国以及大多数欧洲国家, *β*-激动剂被禁止作为饲料添加剂, 但在许多地方仍在非法使用, 同时一些肉制品加工企业由于缺乏质量控制意识, 原料把关不严, 使用存在 *β*-激动剂残留的动物源食品加工, 导致市场上一些加工肉制品也存在药物残留。因此, 为确保食品安全和人类健康, 建立快速、准确、灵敏的方法来检测动物源性食品中瘦肉精的残留极为重要。



注: R_1、R_2 和 R_3 为苯环上的取代基(如 H、OH、Cl 等), R_4 为氨基上的取代基(如 H、烷基等), 不同取代基可形成不同种类的 *β*-激动剂代表苯环上的取代基。

图 1 *β*-激动剂的基本结构

Fig.1 Basic structure of *β*-agonists

在过去几十年里, 针对 *β*-激动剂残留检测已开发出多种分析方法, 包括仪器分析法、微生物分析法、免疫测定法等。高灵敏度的仪器分析技术高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)[8]、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)[9]、液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)[10]等。尽管这些方法具有高度的特异性、选择性和灵敏度, 但它们也存在一些局限性, 比如需要复杂的实验室设备和专业训练的技术人员、仪器昂贵等。此外, 由于瘦肉精极性较强, 需要进行烦琐的样品制备、衍生化等步骤, 增加了操作复杂性。同时, 高昂的仪器价格和维护成本限制了其在大规模筛查中的应用[11]。微生物检测方法成本较低, 但检测时间长且特异性差[12]。许多免疫分析方法利用抗体来识别抗原, 具有高灵敏度, 包括酶联免疫吸

附测定(enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)[13]、微芯片法[14]等。这些方法或多或少都存在一些缺陷, 比如需要烦琐的孵育、清洗和冲洗程序, 在定性、定量方面还需要色谱法来做最终确定。这些内在的局限性使得这些技术不适用于对瘦肉精进行现场或即时筛查。

近年来, 纳米材料在材料科学、分析科学和生物医学应用领域引起了越来越多的关注。量子点是一种具有潜在应用价值的纳米材料。量子点纳米材料的优势在于其纳米颗粒表面能够与多种生物分子共轭且具有可调节的光物理性能, 并具有优异的荧光稳定性, 使其能实现可定制化和多重检测功能[15]。量子点纳米微球(quantum dot nanobeads, QBs)是由大量量子点嵌入形成的聚合物纳米微球, 其发光强度远强于量子点, 且具有更高的光稳定性和更强的抗环境变化(如 pH 和离子强度)能力[16]。这些特性极大地提高了检测方法的稳定性和灵敏度。同时, 通过将量子点进行装载, 可以实现对其自身的保护, 并有效阻隔其对其他生物大分子的毒性影响[17]。此外, 较大的粒子尺寸(100~200 nm)使得量子点纳米微球更易于进行离心分离和纯化, 从而便于进行抗体标记[18]。

量子点因其独特的电子、光学和结构特性而备受关注。本文对量子点的结构、显著特点和在瘦肉精残留检测应用的最新进展进行了批判性分析。最后对量子点传感技术在当前研究中面临的挑战进行了总结, 并对其未来发展方向进行了展望, 旨在为开发高灵敏、快速、便携的瘦肉精检测新方法提供有价值的参考。

1　量子点

1.1　量子点的结构

量子点是一种具有半导体特性的纳米材料, 其尺寸范围常分布在 2~10 nm, 呈球形, 具有晶体结构[19]。量子点的基本结构由核心和外壳组成, 如图 2 所示。其核心主要由镉-硒(CdSe)、镉-碲(CdTe)、铟-磷酸盐(InP)和铟-砷酸盐(InAs)等组成。外壳主要由重金属或无机材料构成, 例如镉(Cd)、硒(Se)、氧化锌(ZnO)、二氧化硅(SiO_2)、ZnS(硫化锌)等, 这些外壳材料被涂覆在量子点表面, 为共轭反应提供了特定的场所, 并降低了其毒性。涂层或覆盖层由生物相容性材料制成[20]。量子点的电学和光学特性由其核心决定, 而其稳定性和相互作用则由其外壳控制。量子点的结构决定了其在特定应用中所需的电学和光学特性。根据应用类型及其独特的特性, 人们会使用不同种类的量子点。例如, I-III-VI 元素组合的量子点中, 如铜铟硫化物($CuInS_2$)和 ZnS, 因其毒性更低而被认为是替代基于镉的量子点的绝佳选择, 适用于生物医学应用[21]。此外, CdSe 在光电子和生物成像领域是理想的选择, 而 CdTe 和 InAs 则用于太阳能电池和红外探测器。

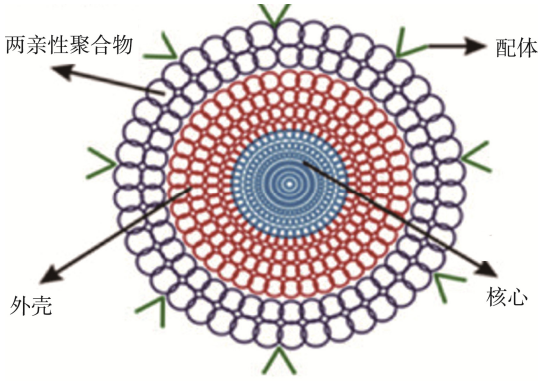


图 2　半导体量子点[20]

Fig.2　Semiconductor quantum dots[20]

1.2　量子点的显著特点

荧光量子产率高: 量子产率(quantum yields, QY)表示物质将吸收的光能量转化为荧光的本领, 是评价物质发射荧光能力的关键因素。量子点的摩尔吸光率可高达 10^6 L/(mol cm), 导致其荧光量子产率高(40%~90%), 因此可以发射强烈的荧光, 这大大提高了量子点的检测灵敏度, 使其成为非常灵敏的探测器, 能够检测到低浓度的病原体或污染物[22]。相关研究表明, 使用量子点能够检测出浓度低至每亿分之几的农药残留, 从而显著提高了食品安全检测的灵敏度[15]。

光稳定性好: 量子点具有优异的光稳定性, 相比传统有机荧光染料, 量子点的亮度要高出 10 到 20 倍, 量子点在长时间激发下的荧光强度衰减较慢, 荧光寿命长, 确保了信号长时间的观察和追踪性能[23]。它们能够抵抗光漂白, 能在广泛的 pH 和温度范围内发挥作用, 并能长时间保持其功能。量子点的高光稳定性使得其在食品安全检测中能够进行长时间且重复性的测量。事实证明, 量子点在较长时间内保持了稳定的信号强度, 从而能够在复杂的环境条件下可靠地检测出微量污染物[24]。

较宽的激发光谱和窄而对称的发射光谱: 如图 3 所示, 量子点能够被广泛的光谱范围激发, 但会以非常特定的波长发光。这一特性使得通过使用不同尺寸的量子点(每个量子点发出一种独特的颜色光)发射出不同波长的荧光进行同时检测, 即能够在同一样本中同时检测多个目标, 亦可构建多种模式比率荧光探针[25]。这为多重检测和成像提供了强大的工具, 适用于复杂的样本分析。此外, 量子点有比较大的斯托克斯位移, 能明显避免激发光与发射光之间的光谱峰值重叠[26]。

由于其纳米尺寸, 量子点具有较大的表面积, 易于进行表面修饰, 从而提高其与目标分子的结合能力[27]。修饰后的量子点具有很好的生物相容性, 标记技术简单[28]。此外, 与其他成像探针相比, 量子点具有更强的抗降解

能力，这一特性使其能够更长时间地追踪细胞过程。这些优势使量子点成为提高食品安全性的一种有前景的技术。

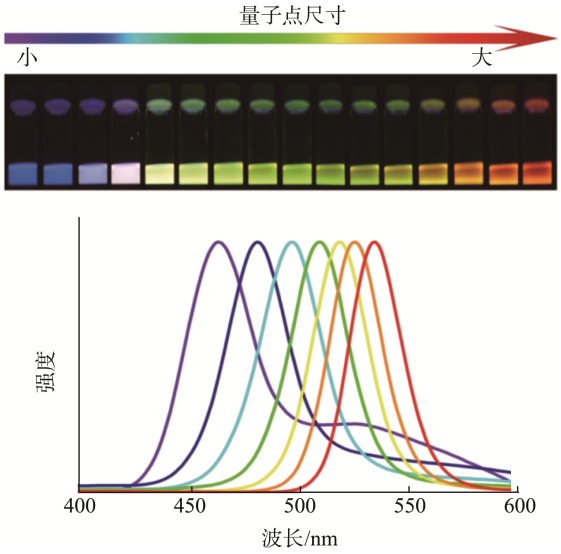


图 3 CdSe 量子点的光致发光发射颜色随尺寸的变化[25]

Fig.3 Size-dependent photoluminescence color variation of CdSe quantum dots[25]

2 量子点在瘦肉精中的残留检测研究进展

2.1 荧光分析技术

荧光分析技术凭借操作简单、响应迅速、高灵敏度和低成本的优势，作为一种强大的分析方法得到了广泛应用。荧光微球(fluorescent microspheres, FMs)、量子点和 QBs 等在内的各种荧光信号标记物标记瘦肉精识别分子是常用的检测方式[29]。该技术主要利用量子点的荧光“开关”效应。当瘦肉精分子通过氢键或静电作用与量子点表面结合时，会改变量子点表面缺陷态，导致荧光猝灭或增强。这种无标记的直接检测模式，依赖于量子点与分析物之间的光诱导电子转移(photoinduced electron transfer, PET)或荧光共振能量转移(fluorescence resonance energy transfer, FRET)[30–31]。

XIE 等[32]制备了氮掺杂的石墨烯量子点(nitrogen-doped graphene quantum dots, N-GQDs)，并基于 CLE 与 N-GQDs 之间的静态猝灭机制，设计了一种用于检测 CLE 的荧光探针，其在浓度范围 5×10^{-10}~5×10^{-7} mol/L 内表现出宽的线性范围(r^2=0.9879)，检出限为 2.083×10^{-13} mol/L。N-GQDs 荧光探针具有令人满意的高选择性，同时它可用于检测鸡肉和牛肉中的 CLE，并且获得了良好的回收率。荧光比色检测方法在紫外灯照射下通过肉眼观察即可对样品进行定性以及初步的定量检测。张曦文等[33]发展了一种基于 CdTe 量子点和 Ag^+之间离子交换反应和无酶催化发夹组装放大的低成本、高灵敏的 RAC 荧光比色定量方法。该方案通过信号放大的无酶催化发夹组装，使与 RAC 适配关联的 P1 DNA 序列可在重复循环中多次释放 Ag+，促使离子交换反应高效多重进行，诱导 CdTe 量子点荧光淬灭，实现对 RAC 的荧光比色检测。该方法对目标 RAC 的检出限低至 2.3 pmol/L，远低于食品法典委员会建议的最大残留量。

传统单波长荧光探针在实际应用中面临显著局限性，其信号易受激发波长、环境与浓度等因素影响，常导致信号波动或检测误差。但基于量子点作为荧光探针的检测方法能够有效减少干扰，并具有灵敏度高、稳定性好、不受样本颜色干扰等优点，适用于无背景荧光的食品样品检测[34]。但在荧光分析法中，检测中易受背景荧光信号干扰也是我们需要关注的问题。其主要源于两个层面：(1)食品基质自身荧光(如肉类中的胶原蛋白、脂肪氧化产物、部分维生素等经激发光照射后产生的自发荧光)；(2)传感体系中未结合探针的非特异性吸附导致的信号残留。针对这一问题，现有研究开发出基于量子点的比率荧光传感器。比率荧光检测通过测定两个不同波长荧光强度的比值而非单一波长的绝对强度进行定量。由于背景干扰(如仪器波动、样品浊度、基质荧光)通常对两个波长的影响程度相近，通过比值计算可实现自校准，有效扣除背景噪声，从而能显著提高检测的准确性和重现性[35]。

LIU 等[36]构建了一种基于石墨烯量子点(graphene quantum dots, GQDs)@$[Ru(bpy)_3]^{2+}$的新型比率型荧光探针用于 CLE 的检测。在该探针中，GQDs 起到响应信号的作用，而它们的荧光会通过重氮化-偶联反应被 CLE 显著抑制，而作为参考信号的$[Ru(bpy)_3]^{2+}$荧光几乎不受影响。两种荧光团的强度比在 0.05~40.00 μmol/L 的 CLE 质量浓度范围内显示出良好的线性关系，并伴随着从黄色到红色的荧光变化的可视化，这种颜色变化在紫外灯下可通过肉眼轻松识别。更重要的是，该探针在新鲜猪肉和牛肉样本中 CLE 的检测中也提供了令人满意的回收率，检出限低至 0.029 μmol/L。因此，这项研究不仅为 CLE 的检测提供了一个高效且可靠的检测平台，而且该探针的设计策略也为其他食品安全危害的检测提供了新的思路。此外，荧光免疫层析领域已广泛应用时间分辨荧光微球作为标记材料，其长荧光寿命特性结合时间分辨检测模式，可有效排除食品基质的自发荧光干扰，实现对兽药残留、真菌毒素等的高灵敏检测[37]。

2.2 免疫分析技术

在我国，针对瘦肉精的免疫法检测已发布多项标准，包括 NY/T 1460—2007《饲料中盐酸克仑特罗的测定 酶联免疫吸附法》，适用于配合饲料、浓缩饲料和预混合饲料中盐酸克仑特罗的检测；以及《农业部 1025 号公告-6—2008 动物性食品中莱克多巴胺残留检测 酶联免疫吸附法》，适

用于猪肉、猪肝和猪尿液中莱克多巴胺残留量的测定。基于免疫学原理的快速筛查技术凭借其高通量、快速检测和低成本等特点, 近年来已获得广泛应用与推广[38]。

量子点在免疫分析中主要作为标记物。基于竞争法或夹心法, 将抗体或抗原固定于酶标板, 目标瘦肉精与量子点标记的抗原/抗体竞争结合, 通过测定结合位点的荧光强度或电化学溶出信号, 实现定量分析[39]。量子点的高亮度标记作用, 使得传统免疫分析灵敏度大幅提升。依赖抗原-抗体反应的免疫分析技术特异性强, 利用不同发射波长的量子点可同时检测多种瘦肉精。但也存在抗体批次间差异大, 且易受温度影响失活, 且量子点与抗体的偶联步骤复杂, 可能影响抗体活性, 以及检测时间相对较长(通常需温育步骤)等痛点。现有研究已发展出多维度的解决方案。

侧向流动免疫测定法(lateral flow immunoassay, LFIA)作为一种成熟且具有成本效益高、操作简便、节省时间、现场检测适应性好等优点的即时检测方法, 已被广泛应用于食品安全监测领域。目前, 基于量子点的多重独立成分分析条带也已开发出来, 可用于同时监测多个感兴趣的指标。与传统免疫层析技术多个指标需要对应多个 T 线不同的是, 基于量子点的多重检测可在仅设置一条 T 线和一条 C 线的前提下实现[40]。XIONG 等[41]提出了一种利用二氧化硅(SiO_2)和量子点纳米组装体作为先进信号探针的多重荧光侧向流动免疫测定法, 该方法能够同时检测猪尿和猪肉样本中 RAC 和 SAL。具有强发光性、高稳定性和丰富表面羧基的核壳型 SiO_2 量子点纳米复合物与抗体结合形成高性能的 SiO_2 量子点免疫探针, 从而提高了检测方法的灵敏度和可靠性。RAC 和 SAL 的最低检出限分别为 0.007 ng/mL 和 0.032 ng/mL, 这与目前先进的荧光标记微流控芯片具有相当的灵敏度, 同时克服了量子点容易聚集和难以离心收集的缺点。所提出方法的特异性、准确性、精密度、重复性、稳定性和适用性得到了全面验证。总体而言, 该方法为动物源性食品的快速现场筛查提供了一种有前景的筛选工具, 以确保从源头到终端的食品安全。LI 等[42]成功开发了一种基于 CdSe/ZnS 量子点的新型双色荧光侧流免疫平台, 该平台能够对 RAC 和 CLE 进行定量分析。该法将双色 QBs-单克隆抗体探针被引入到免疫层析试纸上, 从而形成两条检测线和一条对照线。发射红色和绿色荧光的 CdSe/ZnS QBs 分别与抗 RAC 和抗 CLE 单克隆抗体偶联, 使得在试纸上能够清晰区分两种目标物。量子点提供了强而稳定的荧光信号, 极大地提高了层析免疫分析的检测灵敏度。检出限分别为 15.7 μg/mL 和 36.3 μg/mL, 用于 RAC 和 CLE 的检测。该技术被用于灵敏地检测牛尿液和牛肉中的 RAC 和 CLE, 其中尿液样本的结果与液质联用/质谱的结果具有高度相关性。在试纸条制备过程中, QBs 探针用量及 T 线上检测抗原喷涂浓度是影响试纸条检测灵敏度的两大关键参数。

2.3　电化学发光分析技术

电化学发光(electrochemiluminescence, ECL)由发光体在电极表面经历电化学与化学反应后, 从高能激发态经能量驰豫产生光信号的一种现象。ECL 保留了化学发光方法所具有的高灵敏度、宽线性范围、低背景、易于直接观察和仪器简单等优点; 同时具有许多化学发光方法所没有的优点, 如重现性与稳定性好、容易控制以及一些试剂可以重复使用等优点, 广泛应用于临床诊断、药物和食品分析以及环境监测等领域[43]。

随着先进功能纳米材料的不断发展, 研究者利用量子点具有尺寸依赖的量子限域效应和大的比表面积, 可作为优异的电子传递媒介或电催化材料, 能够显著放大电化学信号, 实现对痕量瘦肉精分子的超灵敏检测[44]。量子点的高导电性加速了电极与溶液中瘦肉精分子之间的电子传递, 同时其催化活性降低了瘦肉精(如 CLE)的氧化过电位, 从而在微分脉冲或方波伏安扫描中获得显著增强的氧化峰电流。HU 等[45]开发了一种基于锌基金属-有机框架-还原氧化石墨烯-CdTe 量子点作为信号探针、过氧化氢作为反应物的电化学发光传感器, 并证明其能检测 CLE。实验结果表明, 所制备的传感器具有出色的化学发光信号检测性能, 包括较低的检出限、宽广的线性范围以及高灵敏度和准确性。该检测方法已应用于实际样本分析, 包括猪肉样本。唐璎等[46]研究开发了一种基于碲化镉量子点标记技术的电化学传感平台, 构建了量子点标记免疫复合物(QDs-mAb)检测体系, 检测到的猪肉、牛肉样品中 RAC 回收率在 95.71%~105.82%, 与现行国家标准方法(高效液相色谱质谱法)相比较具有良好的一致性, 该方法可用于实际样本中 RAC 快速定量筛查检测。

由于其在空间和时间上的可控性良好, ECL 分析法被认为非常适合用于免疫传感器的制造。ZHU 等[47]报道了制备了金纳米粒子和修饰有 CdSe 量子点的聚二烷基二甲基氯化铵(poly diallyldimethylammonium chloride, PDDA)石墨烯材料, 并将其用作探针, 首次将其用于检测 RAC 的 ECL 免疫传感器。由于采用了修饰有金纳米粒子的电极以及作为探针的 CdSe 量子点-PDDA-金纳米粒子, 传感器实现了双重放大效果。因此, 所制备的 ECL 免疫传感器具有极高的灵敏度、良好的稳定性、可重复性和特异性, 已被用于真实样本的检测, 并取得了令人满意的结果, 表明这是一种用于追踪 RAC 及其他小分子化合物的极具前景的方法。YAN 等[48]设计了一种基于量子点作为 ECL 探针、金纳米粒子作为基底的超灵敏 ECL 免疫传感器, 用于检测 CLE。在最佳条件下, ECL 信号与 CLE 质量浓度的对数呈线性关系, 范围为 0.02~50 ng/mL, 检出限为 0.0084 ng/mL, 远低于已报道文献中的数值。该免疫传感器表现出良好的稳定性、特异性和制造重现性, 已被应用于实际样品的检测, 并取得了令人满意的结果。ECL 免疫分析法因

所用标记分子体积较小，可在实现多标记与多目标物检测的同时，获得极低的检出限，并能在电解池中支持反复使用与循环反应。然而，当待测物数量过多时，其性能将难以满足需求，且电解池不易彻底清洗，可能干扰后续检测结果[49]。

基于量子点的电化学技术检测灵敏度极高(检出限可达 pmol/L 级别)，仪器设备简单、成本低，响应速度快，易于微型化，适合现场筛查的需求。但是，由于电极修饰过程烦琐，其重现性受制于修饰膜的稳定性，对于复杂肉制品中蛋白质等非电活性干扰物的抗干扰能力还需进一步完善。但目前已有报道研究将魔尺寸量子点(magic-sized quantum dots, MSQDs) 修饰于纸基电化学器件，用于人体血清样本中多巴胺的检测。该修饰电极表现出良好的稳定性、重复性和重现性(峰电流相对标准偏差≤7.2%)，且成功应用于复杂血清样本的检测，回收率达 95.2%~102.6%[50]。后续可开发基于量子点修饰的纸基电极，用于猪肉、猪肝等样品的现场快速筛查，每次检测使用独立电极，以彻底规避电极再生和膜稳定性问题。

对基于量子点的 3 大检测技术在瘦肉精残留分析的研究进行总结，如表 1 所示。

表 1 基于量子点的 3 大检测技术在瘦肉精残留分析中的性能对比

Table 1 Performance comparison of the 3 major detection techniques based on quantum dots in the analysis of residues of lean meat powder

技术类型	基本原理核心	主要优势	主要挑战	适用场景
荧光分析技术	荧光淬灭/增强效应	操作简便、适合高通量筛选	选择性较差，环境干扰大	大批量样品的快速筛选
免疫分析技术	抗原-抗体特异性结合标记	特异性强、适合多残留分析	抗体稳定性、偶联工艺复杂	特定瘦肉精品种的确证检测
ECL 分析技术	电极优势/催化/电子传递	超高灵敏度、响应快读、仪器易于便携化	电极重现性、抗污染能力	痕量残留的超灵敏检测及现场快速检测

3 结束语

近年来，量子点凭借其独特的光学、电学性质及良好的生物相容性，在食品中瘦肉精类物质残留检测领域展现出巨大潜力。无论是在电化学分析、免疫分析还是荧光分析中，量子点的引入均显著提升了检测体系的灵敏度、稳定性与可视化效果，为实现食品中瘦肉精的快速、准确检测提供了新的思路与技术支撑。

然而，目前量子点在实际检测应用中仍面临一些挑战，如制备过程复杂、表面修饰的生物安全性及环境友好性不足、信号放大与抗干扰能力有待进一步优化等问题。未来的研究可从以下几个方面展开：(1)开发绿色合成工艺与低毒性、高量子产率的新型量子点材料；(2)探索量子点与纳米酶、金属有机框架、微流控芯片等新兴技术的耦合策略，以实现多组分同时检测与现场快速筛查；(3)推动量子点检测平台的标准化与商品化进程，促进其在食品安全监管与现场检测中的广泛应用。

量子点作为新一代功能纳米材料，在肉与肉制品中瘦肉精残留检测领域具有广阔的应用前景。随着纳米技术与分析检测技术的持续发展，量子点检测体系有望实现从实验室研究向实际应用的跨越，为保障食品安全提供更加高效、可靠的技术支撑。

参考文献

[1] LUO L, PAN Y, LI Q, *et al.* Current progress in the detection of adrenergic receptor agonist residues in animal-derived foods [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2023, 158: 116875.

[2] JIGYASA, KAUR RJ. Nanosensors: A smart remedy for early detection of clenbuterol contamination in food [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136569.

[3] 刘思杰. 动物源性食品中 *β*-受体激动剂的增强型免疫层析检测及增敏机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
LIU SJ. Detection of *β*-agonists in animal-derived foods by enhancement-type lateral flow immunoassay and sensitization mechanisms analysis [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2025.

[4] YANG K, YAN X, TANG M, *et al.* Rapid detection of clenbuterol and ractopamine in pork: Sulfonate functionalized ion exchangemagnetic solid phase extraction combined with visual protein microarray chip [J]. Talanta, 2026, 296: 128459.

[5] JAIMES-CORREA JC, SNOW DD, BARTELT-HUNT SL. Seasonal occurrence of antibiotics and a beta agonist in an agriculturally-intensive watershed [J]. Environmental Pollution, 2015, 205: 87–96.

[6] 牛志乔. 全链条视角下“瘦肉精”监管模式及典型案例探讨[J]. 养殖与饲料, 2025, 24(6): 122–125.
NIU ZQ. Discussion on the regulatory model and typical cases of “clenbuterol” from a full-chain perspective [J]. Animal Breeding and Feed, 2025, 24(6): 122–125.

[7] 张燕, 江迎春, 李浩天, 等. 莱克多巴胺胶体金免疫层析试纸条的研制及性能测试[J]. 广州化工, 2023, 51(11): 83–85.
ZHANG Y, JIANG YC, LI HT, *et al.* Preparation and performance test of ractopamine colloidal gold immunochromatographic strip [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51(11): 83–85.

[8] MAZHAR SHRA, CHRYSTYN H. New HPLC assay for urinary salbutamol concentrations in samples collected post-inhalation [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2009, 50(2): 175–182.

[9] KARAMOLEGOU F, DASENAKI M, BELESSI V, *et al.* Multi-residue determination of 7 *β*-agonists in liver and meat using gas

chromatography-mass spectrometry [J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(10): 2925–2942.

[10] WANG CJ, LIU HJ, CHOU TC, *et al.* Simultaneous determination of eight *β*-adrenergic agonists in human urine by an isotope dilution-online clean-up system coupled with liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chemosphere, 2022, 301: 134778.

[11] 贾石. 浅析猪肉中瘦肉精的检测与监管策略[J]. 猪业观察, 2024(5): 41–43.
JIA S. A brief analysis of detection and regulatory strategies for clenbuterol in pork [J]. Swine Industry Outlook, 2024(5): 41–43.

[12] 朱炫. 氯霉素及盐酸克伦特罗残留 ELISA 检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
ZHU X. Study on enzyme link immunoassay for group-specific determination of chloramphenicol and clenbuterol hydrochloride [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[13] REN Z, CHEN Y, WANG J, *et al.* A highly specific and sensitive indirect competitive monoclonal ELISA for the detection of brombuterol in animal feed, swine urine, pork and liver samples [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 38(4): 586–593.

[14] KONG J, JIANG L, SU X, *et al.* Integrated microfluidic immunoassay for the rapid determination of clenbuterol [J]. Lab on a Chip, 2009, 9(11): 1541–1547.

[15] 张北龙. 量子点/自由基复合物光学性质及癌细胞检测性能研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2024.
ZHANG BL. Research on the optical properties and cancer cell detection performance of quantum dot/free radical composite [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024.

[16] SHAO Y, DUAN H, GUO L, *et al.* Quantum dot nanobead-based multiplexed immunochromatographic assay for simultaneous detection of aflatoxin B_1 and zearalenone [J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1025: 163–171.

[17] 章钢刚. 基于新型信号输出的四种免疫层析法的研究与应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
ZHANG GG. Novel labels and heterologous competitive systems for improving sensitivity of immunoassay [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.

[18] LI R, WEN Y, YANG L, *et al.* Dual quantum dot nanobeads-based fluorescence-linked immunosorbent assay for simultaneous detection of aflatoxin B_1 and zearalenone in feedstuffs [J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130527.

[19] AGARWAL K, RAI H, MONDAL S. Quantum dots: An overview of synthesis, properties, and applications [J]. Materials Research Express, 2023, 10(6): 062001.

[20] GIDWANI B, SAHU V, SHUKLA SS, *et al.* Quantum dots: Prospectives, toxicity, advances and applications [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2021, 61: 102308.

[21] SOHEYLI E, GHAEMI B, SAHRAEI R, *et al.* Colloidal synthesis of tunably luminescent AgInS-based/ZnS core/shell quantum dots as biocompatible nano-probe for high-contrast fluorescence bioimaging [J]. Materials Science and Engineering: C, 2020, 111: 110807.

[22] 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.

[23] SUWATTHANARAK T, TANAKA M, MINAMIDE T, *et al.* Screening and characterisation of CdTe/CdS quantum dot-binding peptides for material surface functionalisation [J]. RSC Advances, 2020, 10(14): 8218–8223.

[24] 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.

[25] BERA D, QIAN L, TSENG TK, *et al.* Quantum dots and their multimodal applications: A review [J]. Materials, 2010, 3(4): 2260–2345.

[26] 白冰. 基于免疫纳米磁珠和量子点快速检测两种食源性致病菌方法的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
BAI B. Research of rapid detection method of two foodbrone pathogens based on immunomagetic nanobeads and quantum dots [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.

[27] MARIN R, JAQUE D. Doping lanthanide ions in colloidal semiconductor nanocrystals for brighter photoluminescence [J]. Chemical Reviews, 2021, 121(3): 1425–1462.

[28] 刘坤峰. 基于碳量子点构建荧光探针及在真菌毒素和重金属检测中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
LIU KF. Construction of fluorescent probes based on carbon quantum dots and their applications in the detection of heavy metal and mycotoxin [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.

[29] 舒蕊. 基于单/双信号放大策略的瘦肉精免疫层析分析方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
SHU L. Research on the lateral flowimmunoassay ofclenbuterol detection based on single/doublesignal amplification strategy [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.

[30] WEI X, CHEN H. Ratiometric fluorescence molecularly imprinted sensor based on dual-emission quantum dots hybrid for determination of tetracycline [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2019, 411(22): 5809–5816.

[31] XIA X, ZHAO P, ZHENG J, *et al.* A novel quantum dot-based ratiometric fluorescence sensor array: For reducing substances detection and Baijiu quality discrimination [J]. Analytica Chimica Acta, 2025, 1347: 343785.

[32] XIE H, CHEN C, LIE J, *et al.* Sensitive and selective detection of clenbuterol in meat samples by a graphene quantum dot fluorescent probe based on cationic-etherified starch [J]. Nanomaterials, 2022, 12(4): 691.

[33] 张曦文, 史永鑫, 季学涛, 等. 阳离子交换碲化镉量子点对莱克多巴胺的荧光可视化分析[J]. 分析测试学报, 2025, 44(4): 682–688.
ZHANG XW, SHI YX, JI XT, et al. Fluorescence visualized analysis of ractopamine by cationic exchange cadmium telluride quantum dots [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(4): 682–688.

[34] 黄小林, 李倩影, 吴雨豪, 等. 多重免疫层析试纸辅助食品安全快速检测的研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(11): 12–21.
HUANG XL, LI QY, WU YH, et al. Research progress of multiplex immuochromatographic test strips for rapid food safety detection [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(11): 12–21.

[35] 郑欣瑶, 沈央红, 赵秀玲, 等 荧光免疫层析法结合智能手机在食品危害物质快速检测中的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(19): 376–383.
ZHENG XY, SHEN YH, ZHAO XL, et al. Research progress on rapid detection of hazardous substances in food using fluorescence

immunochromatography combined with samrtphones [J]. Food Scinece, 2024, 45(19): 376–383.

[36] LIU Y, XIAO Y, YU M, *et al.* Ratiometric fluorescent probe based on diazotization-coupling reaction for determination of clenbuterol [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(41): 11578–11585.

[37] LI Y, ZHANG H, CUI Z, *et al.* Chemical staining enhanced enzyme-linked immunosorbent assay for sensitive determination of clenbuterol in food [J]. Food Chemistry, 2023, 400: 134012.

[38] 胡松. 基于新型标记物及异源竞争系统提高免疫学分析方法灵敏度的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
HU S. Novel labels and heterologous competitive systemsfor improving sensitivity ofimmunoassay [D]. Nanchang: Nanchang Univesity, 2020.

[39] 李慧琴, 易云婷, 彭程. 纳米标记免疫层析技术在食品快速检测中的应用进展[J]. 食品安全导刊, 2019(15): 160–162.
LI HQ, YI YT, PENG C. The application progress of nano-labeling immunochromatography technology in rapid food detection [J]. China Food Safety Magazine, 2019(15): 160–162.

[40] WANG S, SHEN W, ZHENG S, *et al.* Dual-signal lateral flow assay using vancomycin-modified nanotags for rapid and sensitive detection of *Staphylococcus aureus* [J]. RSC Advances, 2021, 11(22): 13297–13303.

[41] XIONG J, QIN L, ZHANG H, *et al.* Sensitive and simultaneous detection of ractopamine and salbutamol using multiplex lateral flow immunoassay based on polyethyleneimine-mediated SiO_2@QDs nanocomposites: Comparison and application [J]. Microchemical Journal, 2022, 181: 107730.

[42] LI R, SUO D, YU Z, *et al.* A traffic light-fluorescent lateral flow immunoassay with dual-color quantum dot nanobeads for the simultaneous detection of ractopamine and clenbuterol [J]. Microchemical Journal, 2025, 214: 114042.

[43] 徐高标. 基于纳米材料组装的电化学发光免疫传感器用于检测氟苯尼考和玉米赤霉烯酮[D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
XU GB. Electrochemiluminescence immunosensor assembled by nano-materials for flrfenicol and zearalenone detection [D]. Suzhou: Suzhou University, 2023.

[44] 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

[45] HU X, ZHANG H, CHEN S, *et al.* A signal-on electrochemiluminescence sensor for clenbuterol detection based on zinc-based metal-organic framework-reduced graphene oxide-CdTe quantum dot hybrids [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2018, 410(30): 7881–7890.

[46] 唐璎, 马婷婷. 量子点单克隆抗体检测莱克多巴胺方法研究[J]. 现代食品, 2025(14): 105–108.
TAN Y, MA TT. Development of a quantum dot-monoclonal antibody based electrochemiluminescence method for ractopamine [J]. Modern Food, 2025(14): 105–108.

[47] ZHU Q, LIU H, ZHANG J, *et al.* Ultrasensitive QDs based electrochemiluminescent immunosensor for detecting ractopamine using AuNPs and Au nanoparticles@PDDA-graphene as amplifier [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 243: 121–129.

[48] YAN P, TANG Q, DENG A, *et al.* Ultrasensitive detection of clenbuterol by quantum dots based electrochemiluminescent immunosensor using gold nanoparticles as substrate and electron transport accelerator [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 191: 508–515.

[49] 白江峰. 畜产品中 17 种受体激动剂类药物残留检测方法的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
BAI JF. A method for the detection of 17 receptor agonist drugresidues in livestock products [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.

[50] DE-FRANÇA CCL, MENESES D, SILVA ACA, *et al.* Development of novel paper-based electrochemical device modified with CdSe/CdS magic-sized quantum dots and application for the sensing of dopamine [J]. Electrochimica Acta, 2021, 367: 137486.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)