

量子点荧光探针用于环境水样多污染物检测的策略

刘繁¹ 张润雅^{2*} (通讯作者)

1. 河北华清环境科技集团股份有限公司, 河北 石家庄 050000

2. 碳为科技(河北)有限公司, 河北 石家庄 050000

摘要: 工业化和城市化进程的加快, 导致各类污染物在水环境中的聚集, 这不仅破坏了生态系统的稳定, 也对公众健康安全构成了严峻挑战。在水质监测领域, 传统方法的精确度和操作简便性常受诟病, 相比之下, 量子点荧光探针凭借其独特的光学属性、卓越的灵敏度及广泛的适用性, 正迅速崛起, 成为探索水环境中各类污染物高效检测的新兴利器, 展现出广阔的研究前景。文章围绕量子点荧光探针的核心理论, 细致阐述了其光学特性和功能设计原理, 创造性地开发了一种多污染物集成检测策略, 借助具体案例, 全面考察了这一前沿技术在现实环境监测中的效能与潜力。调查表明, 利用量子点荧光探针进行污染物探测, 能极大增强检测的敏感性和准确性, 这一突破为环境监控技术的革新奠定了稳固的基础, 预示着更高效监测手段的来临。

关键词: 量子点荧光探针; 环境水样; 多污染物检测; 光学特性; 策略

DOI: 10.63887/fns.2025.1.3.10

当前, 全球环保议题中, 水体污染尤为引人注目, 工业活动排放的废水和农业领域产生的径流共同作用, 导致自然水体遭受污染, 其中污染物种类繁多, 浓度变化莫测, 构成了复杂的环境问题。据调查, 水污染问题日益严峻, 重金属、有机物与微生物污染尤为普遍, 它们在环境中的长期积累, 对生态平衡与公众健康造成了深远且难以挽回的影响, 凸显了水质保护的紧迫性。当前, 实现对多种污染物的高精度与高效率检测, 正成为环境科学及分析化学研究中一个迫切需要解决的关键议题。这不仅要求技术上的创新, 还涉及对复杂环境样本中痕量物质的准确识别与量化, 是推动学科发展的重要动力。

1. 基础理论

1.1 量子点的光学特性

量子点展现出的光学特性, 根源在于量子限制现象, 这使得它们在光的吸收与发射行为上, 呈现出对尺寸极为敏感的特性, 这一发现为纳米科技领域带来了新的研究视角。在纳米尺度下, 量子点的独特大小限制了电子和空穴的活动范围, 这种约束效应显著改变了它们的能级结构, 与较大尺寸材料中的连续能带形成鲜明对比。量子点的光学特性引人注目, 它们能

广泛吸收不同波长的光, 同时, 其发射光谱却异常狭窄, 精确的颗粒大小调控即可实现对发射波长的微调。CdSe 量子点的光发射特性与尺寸紧密相关, 小尺寸的量子点倾向于发出蓝光, 而随着量子点尺寸的增加, 光发射的波长逐渐红移, 覆盖了从绿光到红光的范围。在复杂环境下的多污染物甄别中, 量子点凭借其光学特性, 能有效识别特定分子, 减少信号重叠, 确保检测结果的准确性, 这主要得益于其对不同目标分子响应的高特异性^[1]。量子点在光学领域表现优异, 特性包括稳定的荧光、高效的量子产率以及较强的抗光漂白能力, 这些特质使其光学性能尤为突出。在环境监测领域, 尤其针对水质污染的分析, 量子点相较于传统有机荧光染料, 于复杂条件下展现出更佳的光学稳定性, 这一特性极大增强了检测结果的精确度与可信度。

1.2 量子点的功能化修饰

在运用量子点于实践场景时, 通过定制化的表面改性, 旨在精进其对特定标的物的辨识与监控能力, 核心目标是强化量子点与目标分子间的亲和性, 从而实现效能的显著提升。此策略关键在于微调相互作用, 确保量子点在特定应用中的表现更佳。通过在量子点表面引入特定的化学基团、生物分子或配体, 功能化

修饰能够优化其性能, 拓宽应用领域, 这一策略对提升量子点的特性和适用性至关重要。在量子点的表面修饰上, 巯基的引入有效提升了对特定重金属离子的识别效能; 而抗体或核酸适配体的结合, 则是显著精进了对特定生物标志物及微生物检测的准确性与灵敏度, 这一策略为生物传感领域带来了革新。经过功能化处理的量子点探针, 对特定分子的捕捉能力明显增强, 同时, 这种修饰还改善了量子点的稳定性和分散性, 使得它们在分子检测应用中表现更为出色, 性能更加稳定。以 CdTe 量子点为例, 经过功能化改性后用作传感器, 对 Hg^{2+} 离子的识别能力大幅提升, 灵敏度可达纳摩尔级, 明显超越了未经修饰的量子点检测效果。这种增强的敏感性对于痕量重金属离子的精准测定至关重要。通过功能化设计的量子点探针, 在多污染物检测中展现了广泛应用, 这一策略极大地促进了环境监测技术的创新, 成为该领域进步的重要推手^[2]。

1.3 量子点荧光探针的工作机制

在量子点荧光探针的领域, 其功能表现主要由荧光信号的增强与猝灭机制调控, 这两种现象对确保探针效能及拓宽其应用范围至关重要。量子点与目标污染物的结合影响了荧光信号的强度, 这种变化可依据静态或动态猝灭理论进行阐述, 揭示了污染物检测背后的光物理机制。当 Hg^{2+} 离子与量子点表面的巯基相互作用时, 会引发电子的转移过程, 这一过程直接造成了量子点荧光强度的显著下降。当污染物与量子点相结合, 量子点的荧光性能得到增强, 其中, 有机物与量子点间建立的配位作用是关键, 这种相互作用显著促进了量子点的荧光量子产率, 进而提高了其发光效率。通过这一机制, 量子点在检测环境污染物时展现出更优异的性能。目标污染物浓度与荧光信号变化常呈线性关系, 利用这一特性, 荧光检测技术能实现对污染物的精准定量分析, 展现出其在环境监测领域的应用潜力。量子点荧光探针因反应快速、灵敏度高, 在环境监测与污染控制中对各类污染物的检测扮演着核心角色, 其广泛应用凸显了在确保环境质量和安全方面的技术优势。

2. 检测策略与路径

2.1 重金属离子检测策略

在重金属离子检测中, 量子点荧光探针的应用极大地增强了分析的准确性和速度, 其独特的敏感性和选择性, 为环境监测和食品安全等领域提供了更为精细的检测手段。CdTe 量子点通过巯基表面修饰后, 对 Hg^{2+} 显示出特定的辨识效能。这种处理方式增强了量子点对目标离子的选择性反应, 使其在环境监测和生物传感领域具有潜在应用^[3]。当汞离子 (Hg^{2+}) 介入时, 与巯基的交互引发电子迁移, 这一过程直接关联着量子点的荧光强度显著下降。该技术在灵敏度上实现了重大突破, 检测限低至 10 纳摩尔, 这比常规的光谱分析和电化学检测手段要灵敏得多, 凸显了其在微量物质识别上的卓越性能。在广东省受污染河流的案例研究中, 采用 CdTe 量子点技术检测 Hg^{2+} 浓度, 实验数据表明, 此方法的灵敏度和精确度均符合国家水质监测标准, 展现出良好的应用前景。于重金属监测之域, 量子点因能迅速反应及探测极限之低, 于繁复环境如水质实时监察中, 显现出非凡效能; 尤其在重金属含量超限警报之环节, 其实践意义不可小觑, 堪称关键利器。考虑到环境监测的紧迫性与复杂性, 量子点技术的集成与优化, 对于构建高效、灵敏的重金属监控体系至关重要^[4]。

2.2 有机污染物的检测方法

利用量子点荧光探针检测有机污染物, 其精准度和灵敏度尤为突出, 在环境监测领域应用前景广阔。对于复杂有机分子, 譬如多环芳烃, 量子点经化学改性后, 能精准辨识目标物, 展现其独特的选择性。这种特性在环境监测和生物医学领域尤为关键, 有助于提升检测的准确性和灵敏度。具体来说, 当 CdSe 量子点的表面被氨基修饰后, 它们能与水样里的苯并[a]芘特异性结合, 这一过程显著增强了荧光信号的强度。这种现象为环境监测中的污染物检测提供了一种灵敏的方法。实验数据表明, 新方法的灵敏度极佳, 检测限低至 5 纳摩尔, 显著优于常规色谱技术, 这使其在饮用水及工业废水的高效、快捷检测中展现出独特优势, 特别利于环境监测与水质安全评估。该技术简化了检测程序, 省去了复杂的样品预处理, 利用便携装

置即时读取荧光信号，这为有机污染物的现场高效筛查提供了一种便捷工具，尤其适用于大范围监测场景^[5]。

2.3 基于微生物的检测策略

通过特异性修饰以生物受体为媒介，量子点探针能够精准锁定并迅速甄别微生物，展现出高效检测能力。利用抗体修饰 CdTe 量子点作为检测工具，能够实现水样中大肠杆菌的快速定量分析，这一技术革新极大地提升了检测速度与效率。应用这一创新方法，检测灵敏度可达 1CFU/mL，对比之下，传统培养手段在时效性上明显逊色，新型方法仅需 1 小时即可完成原本耗时 24 小时的检测，效率提升显著。通过运用色彩各异的量子点作为标签，该方案能准确捕捉并分辨特定微生物的荧光信号，有效执行多目标检测任务。在水处理行业中，此技术为加快微生物污染识别开辟了新路径，显著提升了检测速度，为该领域的问题解决提供了有力支持。

3. 数据实验与案例分析

3.1 重金属离子检测实验

水体污染问题中，重金属离子因其显著的毒性和稳定性，成为了焦点，这些特性让它们在环境中不易降解，对生态系统构成持续威胁。本工作以 CdTe 量子点为探针，聚焦于工业废水样本中 Hg^{2+} 离子的定量分析，特别关注了荧光强度与 Hg^{2+} 浓度间的线性关系，以期建立准确的检测方法。当 Hg^{2+} 浓度升高，观察到 CdTe 量子点的荧光强度显著下降，这主要是由于 Hg^{2+} 与量子点表面的巯基发生结合，触发了静态荧光猝灭机制。这一发现揭示了重金属离子对量子点光学性质的影响，为环境监测和生物传感应用提供了理论依据。以下是实验数据：

表 1: CdTe 量子点探针检测 Hg^{2+} 实验数据

样品	Hg^{2+} 浓度 (nM)	荧光强度 (相对单位)	检测限 (nM)
样品 A	25	0.92	10
样品 B	50	0.85	10
样品 C	100	0.72	10

实验结果揭示，量子点探针对 Hg^{2+} 的荧光反应与浓度间存在显著的线性关联，其决定系数 R^2 接近 0.998，这有力证明了探针检测 Hg^{2+} 时的精确度与稳定性。于广东一工业废水排放现场，运用 CdTe 量子点实施在线监控，准确捕捉到 Hg^{2+} 的浓度变化，所得数据与 ICP-MS 检测结果相吻合，有力地证明了量子点传感器在环境监测中具备出色的检测能力和准确性。

3.2 有机污染物检测实验

水环境中多环芳烃的污染问题日益凸显，这类有机物不仅扰乱了生态系统的平衡，长期暴露下还可能对人类健康造成潜在风险。实验中，采用氨基功能化的 CdSe 量子点作为传感元件，目标是监测水体样本里低浓度的苯并[a]芘，具体方法是记录荧光信号的变动，以此判断荧光增强现象的显著性。当苯并[a]芘的浓度从 1nM 逐步增加到 50nM 时，实验观察到 CdSe 量子点的荧光强度呈现出显著的上升趋势。苯并[a]芘与量子点表面氨基的结合，增强了量子点的光学性能，这一效果主要得益于它们之间的配位作用。以下为实验数据：

表 2: CdSe 量子点探针检测苯并[a]芘实验数据

样品	苯并[a]芘浓度 (nM)	荧光强度 (相对单位)	检测限 (nM)
样品 A	5	1.1	5
样品 B	25	2.5	5
样品 C	50	3.8	5

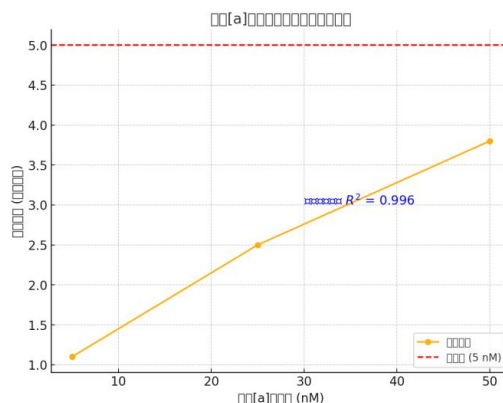


图 1: 苯并[a]芘浓度与荧光强度的关系图

于江西一工业园区废水分析案例，研究确认苯并[a]芘的含量为 20nM，此结果显著处于我国饮用水质标准对污染物限值之下。量子点探针在即时侦测有机污染物方面显现出了实用价值，尤其在水质监控与污染源头定位上，这强调了其对环保工作的重要贡献，为生态安全提供了一种高效的技术手段。

3.3 微生物检测实验

水体中微生物超标，尤其是大肠杆菌等病原体的存在，对公共健康构成了显著威胁，增加了疾病传播的风险，严重影响社区的卫生安全。本工作以抗体改性的 CdTe 量子点为识别元件，聚焦于水环境中大肠杆菌的监测，旨在考察量子点与细菌相互作用引发的荧光信号特异性响应特征。通过这一策略，期望揭示抗体修饰量子点在细菌检测中的应用潜力，特别是在信号变化的灵敏度和特异性方面。实验中，把抗体改性的量子点加到有大肠杆菌的水溶液里，结果发现，随着细菌数量增多，量子点的发光强度也跟着增强，显示出了正相关性。以下为检测数据：

表 3：抗体修饰量子点探针检测大肠杆菌实验数据

样品	大肠杆菌浓度 (CFU/mL)	荧光强度 (相对单位)	检测限 (CFU/mL)

样品 A	10	0.85	1
样品 B	100	1.5	1
样品 C	1000	2.3	1

实验结果显示，运用的方法，检测灵敏度可达 1CFU/mL 的水平，这比常规培养技术的灵敏度要高，后者往往只能达到大约 100CFU/mL。这一改进显著提升了微生物检测的精度。以往耗时一整天的水体微生物检测，如今仅用一个小时便能完成，极大地提高了污染检测的效率，为环保工作注入了科技动力，助力环境监测更加迅速响应。

4. 结论

在环境水样检测领域，量子点荧光探针因优异的光学性能和集成多功能性，已成为监测多种污染物的高效、可信工具，展现出广阔的应用前景。文章细致阐述了量子点探针于环境监测中多污染物同时检测的创新应用，结合理论分析、策略设计与实验验证，有力证明了其在提升检测精度与效率，以及促进污染控制技术进步上的独特优势。今后，研究焦点应转向深化功能化修饰技术的创新及拓宽其实践领域，目标是为环境保育和污染控制提供更完备、效能更高的技术途径，以科技之力守护绿色地球。

参考文献

- [1] 毛亚宁, 王军, 高宇环, 等. 生物质基碳量子点的合成及传感成像研究进展[J]. 分析化学, 2021, 49(7): 13.
- [2] 毛惠会, 湛志华, 周国华, 等. 荧光碳量子点在药物分析中的应用研究进展[J]. 发光学报, 2021, 42(8): 12.
- [3] 傅应强, 史文文, 李志文, 张霁月. 掺杂型碳量子点的制备及应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(S1).
- [4] 肖秀婵, 秦淼, 李强林, 等. 碳量子点荧光材料的制备及其对金属离子检测的应用研究进展[J]. 功能材料, 2019, 50(9): 6.
- [5] 孙永岭, 李娇, 李亚宁, 等. 基于电化学传感器检测过氧化氢的研究进展[J]. 凯里学院学报, 2021, 39(6): 7.