

面向环境与安全检测的薄膜基荧光传感器研究进展

贺雲钊

兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年3月20日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月6日

摘要

近数十年来, 用于爆炸物、非法药物、化学战剂与危险挥发性有机化学品检测的高性能薄膜荧光传感器研究获得了显著突破。一些FFS已经从实验室研究过渡到现实世界的应用, 证明了它们的实际相关性。FFS技术的核心是传感膜, 它在确定分析物和产生的信号方面起着至关重要的作用。薄膜基荧光传感器兼具灵敏度高、响应速度快、便于集成及适用于原位实时检测等优势, 在环境监测、公共安全、食品药品安全及生物学分析等领域展现出广阔的应用前景。本文针对其在不同应用场景下的研究进展进行了系统梳理与综述。最后, 针对当前应用中存在的复杂基质干扰等问题进行了分析, 并对智能化传感、柔性可穿戴器件及实用化检测装备的未来发展趋势进行了展望。

关键词

薄膜荧光传感器, 环境监测, 食品与药品安全, 传感器阵列, 智能化检测

Research Progress on Thin-Film Based Fluorescence Sensors for Environmental and Safety Detection

Yunzhao He

College of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: March 20, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 6, 2026

Abstract

The development of high-performance thin-film fluorescence sensors (FFSs) for the detection of explosives, illicit drugs, chemical warfare agents, and hazardous volatile organic chemicals, among

others, has made encouraging progress over the past few decades. Some FFS have transitioned from laboratory research to real-world applications, demonstrating their practical relevance. At the heart of FFS technology is the sensing membrane, which plays a crucial role in determining analytes and generated signals. Because of its high sensitivity, fast response speed, easy integration and suitability for in-situ real-time detection, thin film-based fluorescence sensors have shown wide application potential in environmental monitoring, public safety, food and drug safety and biomedical analysis. This paper systematically reviews its research progress in different application scenarios. Finally, the problems of complex matrix interference in current applications are analyzed, and the future development trend of intelligent sensing, flexible wearable devices and practical detection equipment is prospected.

Keywords

Thin Film Fluorescence Sensor, Environmental Monitoring, Food and Drug Safety, A Sensor Array, Intelligent Detection

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

薄膜荧光传感器的发展与优势

薄膜基荧光传感器作为一类重要的光学传感平台, 经过二十余年的发展, 已在分子设计、薄膜工程和器件集成等方面取得显著进展, 并被国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)评为 2022 年化学领域十大新兴技术之一[1]。该类传感器通过将荧光活性物质固定在固体载体表面形成传感薄膜, 不仅克服了传统液相荧光探针易聚集猝灭、难以回收和不易器件化等固有局限, 还赋予了系统高灵敏度、良好选择性、可逆响应、快速检测及便携性等突出优势。尤其适用于气相检测的特性, 使其在爆炸物蒸气、化学战剂等公共安全监测场景中展现出液相探针无法比拟的应用潜力[2]。图 1 系统梳理了影响薄膜基荧光传感器传感性能的关键因素(传感薄膜、硬件结构、电子学、数据采集与处理等)及其潜在应用方向。

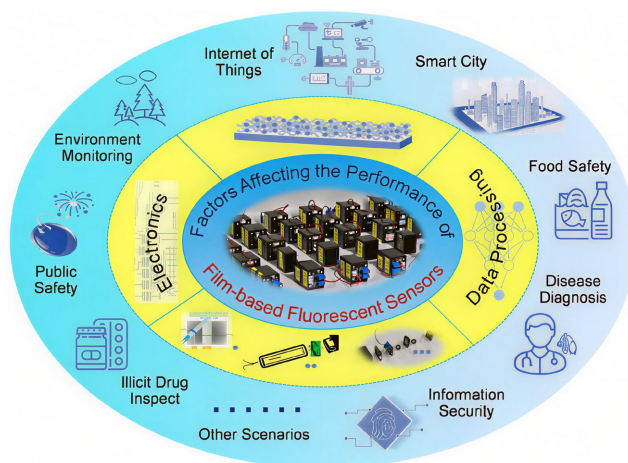


Figure 1. Key factors affecting the sensing performance of thin film-based fluorescence sensors (sensing film, hardware structure, electronics, data acquisition, processing, etc.) and their potential applications [1]

图 1. 影响薄膜基荧光传感器传感性能的关键因素(传感薄膜、硬件结构、电子学、数据采集、处理等)及其潜在应用[1]

荧光传感的本质在于利用荧光物质与目标分析物之间的特异性相互作用，引发光物理性质变化，从而实现识别与检测。对光诱导电子转移、荧光共振能量转移、聚集诱导发光、激发态分子内质子转移及分子内电荷转移等机理的深入理解与协同运用，为高性能荧光材料的设计构筑了坚实的理论基础。在材料体系方面，有机小分子、共轭聚合物、金属配合物、金属有机框架/共价有机框架以及各类纳米材料的快速发展，为薄膜传感器提供了丰富多样的荧光单元[3]-[5]。

在成膜技术方面，滴涂/浸涂、旋涂/刮涂、静电纺丝、LB/LS 技术、自组装单层膜、分子凝胶策略及界面限域动态聚合等制备方法的不断创新，在薄膜微观结构的精确调控方面开发了多种有效手段。基于上述材料设计与制备技术，薄膜基荧光传感器已在多个应用领域取得令人瞩目的研究进展[6]-[10]。本文将在简要阐述传感机理和材料设计的基础上，系统综述薄膜基荧光传感器在环境监测、公共安全、食品与药品安全、生物医学分析以及传感器阵列与智能化检测系统等方面的最新应用研究成果，为相关研究领域的学者提供必要的参考。

2. 荧光传感机理与材料设计概述

荧光传感的实现依赖于荧光探针与目标分析物之间的特异性相互作用所引发的光物理性质变化，其机理基础与材料体系共同决定了传感器的性能表现。

2.1. 主要荧光传感机理

薄膜基荧光传感器对金属离子的识别与检测，本质上是通过敏感材料与目标离子之间的特异性相互作用，引发荧光信号变化的过程。其性能由光物理机理、敏感材料体系及薄膜制备技术共同决定[11]。

光诱导电子转移(PET)是荧光传感领域中应用最为广泛的经典机理之一，其本质在于光激发引发的分子内或分子间电子迁移过程。在 PET 体系中，荧光团与识别基团通过连接臂相连，当识别基团与目标分析物结合后，其给电子或受电子能力发生改变，进而调控 PET 过程是否发生，实现荧光信号的“开-关”切换[12]。

分子内电荷迁移(ICT)机理：在基于 ICT 原理的探针体系中，目标物与识别模块的结合可动态调控发光单元的分子轨道能级差，进而改变电子云分布，调节供体-受体间的电荷迁移程度，引发特征光谱位移。通过监测双波长荧光强度比值的变化，可构建具备自校正功能的比率型传感器，显著提升检测可靠性[13]。

荧光共振能量转移(FRET)是一种非辐射能量传递过程，指处于激发态的供体荧光团通过偶极-偶极耦合作用，将其激发态能量转移至基态受体荧光团，进而激发受体发射荧光。该过程的发生需满足光谱重叠、距离适宜及取向匹配三个关键条件。通过监测两个不同波长处荧光强度的比值变化，可实现比率型检测，有效消除环境因素的干扰[14]。

激发态分子内质子转移(ESIPT)机理属于特殊的四能级光物理过程，其大斯托克斯位移和双发射特性使其在比率型荧光传感器构建中具有显著优势。分子内电荷转移机理适用于具有“推-拉”电子结构的荧光分子，其光谱对环境极性极为敏感，通过监测光谱位移即可实现对分析物的检测。在实际传感体系中，多种机理之间常常存在协同或竞争关系，共同决定着传感器的最终性能[15]。

聚集诱导发光(AIE)是唐本忠院士课题组首次报道的光物理概念，与传统的聚集诱导荧光猝灭效应形成鲜明对比。AIE 分子在孤立态时荧光较弱，而在聚集态下分子内运动受到限制，激发态能量主要通过辐射跃迁耗散，呈现出强荧光发射。该机理有效解决了传统荧光材料在薄膜制备中易发生聚集猝灭的难题，同时其非平面结构有助于在薄膜中构筑多孔形貌，提升分析物的扩散与传输效率[16] [17]。

2.2. 荧光材料体系

如图 2 所示，开发荧光感测膜涉及多种不同的技术或策略。在荧光材料体系方面，有机小分子因其

结构明确、易于修饰而成为应用最广泛的材料。多环芳烃类化合物如芘、茈等具有大的 π 电子离域体系，但需通过引入大体积取代基抑制分子间堆积。四配位有机硼配合物如 BODIPY 具有优异的光物理性质，但需通过修饰增大斯托克斯位移以优化薄膜态性能。邻-碳硼烷类荧光材料以其三维结构特征有效抑制聚集猝灭，其位阻效应有助于形成多孔活性层结构。四苯乙烯衍生物作为 AIE 分子的典型代表，其非平面几何构型使其成为构建均匀柔性纳米薄膜的理想构筑单元[18]。

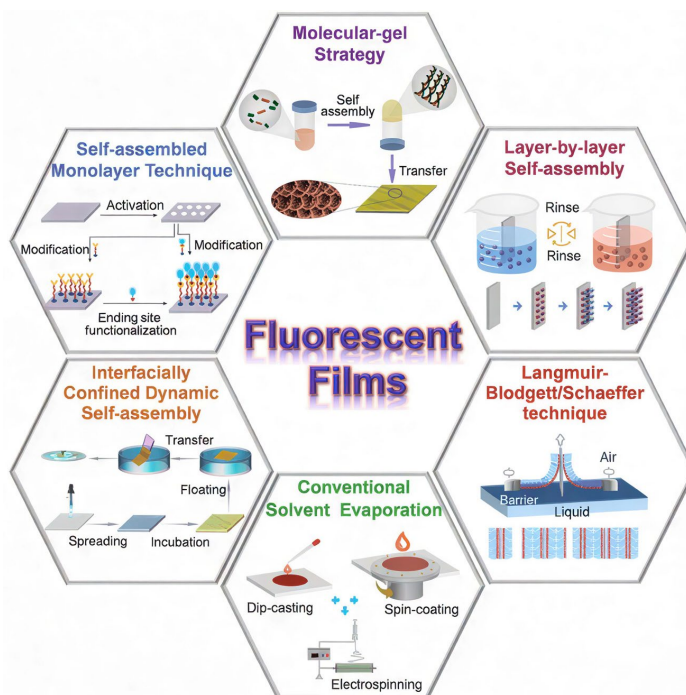


Figure 2. Different techniques or strategies to develop fluorescent sensing films [1]
图 2. 开发荧光感测膜的不同技术或策略[1]

过渡金属配合物因其金属到配体电荷转移激发态具有长寿命特性，在氧气传感及温度传感方面展现出广阔的应用前景[19]。金属有机框架和共价有机框架材料具有高度有序的孔道结构和可调控的孔径，其固有孔隙率为目标分析物提供了快速的传质通道，近年来在荧光传感领域展现出独特优势[20]。

3. 环境监测应用

环境监测是薄膜基荧光传感器应用最为广泛的领域之一，主要涵盖重金属离子检测、挥发性有机物识别、持久性有机污染物分析以及环境基本物理量测定等方向[21]。

3.1. 重金属离子检测

重金属离子如 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cr(VI) [22]等即使在痕量水平也会对生态系统和人类健康造成严重威胁[23]。量子点基传感器因量子产率高、尺寸可调、表面易功能化而备受关注[24]。Sun [25]等报道了一种用于汞离子检测的高灵敏度固态传感器。研究团队利用原子力显微镜、透射电子显微镜及紫外-可见/荧光光谱等方法，对传感体系的主要形貌与光学特征进行了系统表征。该混合薄膜外观为灰白色且高度透明，在紫外激发下呈现出显著的光致发光现象。后者被分配给 AuNC，这也增加了发射薄膜的延展性，这已被证明可用于高灵敏度 Hg^{2+} 检测。但量子点体系在薄膜态下易发生聚集诱导猝灭，且量子点本身的重金属毒性(如 CdSe、PbS 等)可能带来环境二次污染问题，限制了其在食品与生物样品检测中的应用。

镧系发光薄膜凭借其特征窄带发射、大斯托克斯位移及长荧光寿命,在抗背景干扰和时间分辨检测方面具有天然优势。He [26]等人基于阴离子交换策略,以层状铈氢氧化物(LEuH)薄膜作为前驱体,制备了钠铈钨酸盐和钠铈钼酸盐的发光薄膜。通过改变阴离子源(Na_2WO_4 和 Na_2MoO_4)的浓度,阐明了在制备过程中层间和主体层中的结构演变、形貌转变和化学组成变化,并揭示了LEuH向铈钨酸盐薄膜的“溶解-再结晶”转变机制。在 Fe^{3+} 发光检测中表现出比LEuH更高的综合潜力。 $\text{NaEu}(\text{WO}_4)_2/\text{NaEu}(\text{MoO}_4)_2$ 薄膜由于其优异的发光特性,包括在~617nm处的 Eu^{3+} 特征红光发射,作为荧光探针具有固有的优势。当应用于 Fe^{3+} 检测时, Fe^{3+} 离子与 Eu^{3+} 发射中心竞争能量吸收。这种特定的猝灭效应使薄膜能够通过发光强度的变化实现 Fe^{3+} 的快速原位检测。

相比之下,Lu [27]等报道的Tb-bppCOO@PVDF复合薄膜通过简单负载工艺制备,该材料在pH 4~10范围内兼具优异的化学稳定性与光致发光稳定性。研究利用 Tb^{3+} 的本征发光特性,通过发光猝灭机制实现了对 CrO_4^{2-} 和 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 的检测,在0~80 μM 浓度区间内呈现良好的Stern-Volmer线性响应($I_0/I = 1 + K_{SV}[Q]$)。猝灭机制主要归因于Tb-bppCOO的吸收峰与Cr(VI)在365 nm处的吸收带发生部分重叠,铈氧阴离子吸附后与激发光产生竞争吸收,从而实现对 CrO_4^{2-} 和 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 的选择性识别,检测限分别达148 nM和58 nM。进一步将Tb-bppCOO负载于PVDF薄膜中,展示了其在水溶液中实现Cr(VI)氧阴离子现场快速与半定量检测的应用前景。然而,该体系仅对Cr(VI)氧阴离子具有选择性,难以拓展至其他重金属离子检测。量子点基传感器虽具有高发光效率与表面易功能化的优势,但在薄膜态下常面临聚集猝灭风险,且其长期稳定性与重金属离子毒性仍是制约其实际应用的重要因素。

综合来看,当前重金属离子检测领域尚未形成“一统天下”的技术方案:镧系薄膜适合高选择性、低背景干扰的场景但制备复杂;量子点体系灵敏度高但存在生物安全风险;有机小分子灵活可调但稳定性欠佳。研究者需根据目标应用场在灵敏度、稳定性、成本与环境友好性之间做出权衡。

3.2. 挥发性有机物识别

挥发性有机物不仅是大气的污染源,而且对人体健康具有潜在危害。除此之外,挥发性有机物检测因目标分子结构多样、化学性质迥异,不同技术路线也各具适用边界。基于内滤效应的碳点基薄通过光谱重叠实现信号响应,其突出优势在于可通过调控碳点的激发/发射光谱实现对不同多环芳烃的差异化响应。Chen等[28]利用聚乙烯醇(PVA)复合碳量子点(CD),构建了基于荧光内滤效应(IFE)的薄膜传感器阵列,用于多环芳烃检测。该CD/PVA薄膜具有宽且可调的光激发范围,能够与多种多环芳烃的光谱充分重叠,实现有效IFE。在不同紫外光激发下,各多环芳烃的差异化吸收特性使传感器阵列呈现不同的光谱响应。结合多元模式识别,该阵列实现了对16种多环芳烃(如萘、蒽、二苯并呋喃等)的高通量鉴定与灵敏定量分析,分类精度达100%,检出限低至57 nM。该传感器阵列成功用于环境样品的快速检测,结果与高效液相色谱一致。但其局限性同样明显:单一传感器的选择性较差,必须依赖阵列组合与算法辅助才能实现区分;此外,内滤效应依赖于分析物与荧光团的光谱重叠,对于吸收带位于紫外区以外的目标物适用性受限。

烷烃分子因其固有的光电惰性,在实现其快速、高选择性、灵敏的在线实时检测仍是当前气体传感领域的一项挑战。在传感薄膜设计中,采用非平面分子结构填充修饰层可有效形成孔隙通道,不仅有利于气体分子的传质扩散,还能为目标分析物提供充足的容纳空间,从而实现快速可逆的响应过程。这一策略为开发适用于烷烃检测的高性能荧光传感器提供了新思路。基于此,Duan等[29]首次报道了一种用于正戊烷监测的高性能荧光薄膜传感器。该研究以邻碳硼烷为分子支架,连接电子供体蒽与受体花二酰亚胺,构建了具有空间电荷转移特征的分子体系。该荧光膜传感器对正戊烷的检测限低至10 ppm,线性响应范围为10~280 ppm,响应时间小于5秒,并展现出优异的抗干扰能力与稳定性。此外,传感器体积

仅为 3.7 cm^3 ，可在室温下正常工作，便于集成于便携式检测设备，为正戊烷的在线实时监测提供了可行方案。

综上，VOCs 检测领域呈现“不同目标分子需不同策略”的格局，对于具有紫外吸收的多环芳烃，内滤效应结合阵列策略是高效选择；对于光电惰性的烷烃，分子结构导向的传质优化是关键突破口；而对极性有机物，共轭聚合物的电荷转移机制仍具优势。未来发展趋势在于发展普适性更强的分子设计策略，或构建多模式融合传感平台。

3.3. 持久性有机污染物分析

持久性有机污染物的检测长期面临“痕量浓度、复杂基质、结构相似”三重挑战。对比现有技术路线，可明确不同策略的适用边界。

多氯联苯是典型的持久性有机污染物，在环境中难以降解，具有强毒性、诱变性及致癌性，对生态环境和人体健康构成严重威胁。Chen 等[30]以侧向流动试纸为传感平台，提出了一种多氯联苯(PCBs)的视觉检测方法。该平台利用适配体识别目标物 3,3',4,4'-四氯联苯(PCB77)，并结合 Zn^{2+} 依赖型 DNA 酶与趾持物介导的链置换反应放大信号，以金纳米粒子为信号示踪剂，实现肉眼直接判读。在最优条件下，该试纸对 PCB77 的目视检测限低至 10 pM ，无需额外仪器，并表现出良好的选择性。该方法已成功用于牛奶样品中 PCB77 的检测，回收率令人满意。进一步以 PCB77 和 PCB72 为输入，构建了 OR 和 AND 逻辑门，为多氯联苯智能检测提供了新思路。该试纸具备便携、低成本、逻辑运算及直观输出等优势，在资源有限地区的现场筛查中具有良好应用前景。

3.4. 环境基本物理量测定

Lin 等[31]制备了一种新型多重刺激响应荧光传感材料 TPE-Sp-CN，可用于 pH 值、亚硫酸根离子及压力的定量检测。实验表明，该传感器能有效分辨 0~4 范围内的水相 pH 值，对亚硫酸盐的检出限达 1.04 ppm ，压力检测范围覆盖 1 atm 至 6 GPa 。与基于玻璃电极的传统 pH 计相比，该荧光传感器响应速度更快、安全性更高，且无需参比电极。传感器的 pH 传感范围可以通过选择合适基底荧光材料有效调整[32][33]。Min 等[34]将含有三乙氧基硅烷悬垂基团的荧光染料(DPMS)共价固定于多孔膜，制备了溶胶-凝胶衍生薄膜基荧光传感器。该传感薄膜的最大吸收波长约为 374 nm ，最大发射波长约为 564 nm ，其荧光强度与吸光度均随 pH 升高呈正相关变化，在酸性 0.3~6.5 的 pH 范围内荧光强度增强 2.1 倍。该传感器在酸性溶液中重复使用时表现出良好的重复性、可逆性与稳定性，且使用寿命长，使用超过 1 个月未见荧光染料浸出。

4. 公共安全应用

针对公共安全领域爆炸物、化学战剂及危险化学品[35]快速灵敏检测的需求，薄膜基荧光传感器因其便携性好、可实时检测等优势，展现出广阔的应用前景。

苦味酸(PA)是一种常见的强力炸药的主要成分。Roy 等[36]合成了两种新型荧光蒽功能化三咪唑盐，并分别制备成荧光传感器。苦味酸在脱质子后以阴离子形式存在，与两种传感器分子之间发生基态电子转移，导致荧光薄膜出现显著的荧光猝灭现象。该传感器对苦味酸阴离子高度敏感，两种薄膜的检出限分别为 467 ppb 和 354 ppb 。量子点具有光致发光量子产率高、表面易于通过不同配体实现功能化修饰、尺寸可调、溶液加工性能良好以及光稳定性优异等特点[37]-[39]，目前，已被广泛研究并应用于荧光爆炸物传感器的制备。Han 等[40]以聚乙烯亚胺封端的量子点(QDs-PEI)为荧光传感材料，以静电纺丝膜为基质，构建了一种用于快速直观检测 2,4,6-三硝基苯酚(TNP)的荧光传感薄膜。该传感机制主要基于 PEI 的氨基与 TNP 中硝基及酚羟基之间的有效相互作用。聚酰胺 6(PA6)纳米纤维膜因具有强亲水性和高孔隙

率,能够快速吸收水溶液中的 TNP,从而促进传质过程并增强传感反应效率。当 TNP 浓度高于 100 ng/mL 时,可实现视觉检测,响应时间低至 30 秒。

食品与药品安全事关公众健康,对农药残留、抗生素、添加剂等有害物质的快速检测需求日益迫切[41][42]。薄膜基荧光传感器因操作简便、成本低廉、可实现现场检测等优势,在该领域受到广泛关注。Feng 团队[43]报道了一种基于多功能 4-MU@ZIF-8@PLA-PEG 复合薄膜的比率荧光柔性传感器,采用低毒环保的自组装方法制备。该传感器结合了 ZIF 基复合材料的发光特性与聚合物的柔韧加工性,实现对四环素、土霉素、金霉素及多西环素四种四环素类抗生素的双发射比率荧光检测。该传感器对自来水和牛奶中四环素的检测呈现良好线性,并对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有抑制作用。其兼具视觉检测、高灵敏度、快速响应及抗菌活性等优势,在水环境抗生素监测及食品安全领域具有广阔应用前景。Yue 团队[21]开发了一种阴离子 s-f 金属有机框 $(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2[\text{SrTb}(\text{CAM})_2(\text{H}_2\text{O})_2]\cdot 4\text{H}_2\text{O}(\text{SrTbCAM})$,用于两种结构相似的农药百草枯与敌草快的检测。SrTbCAM 作为双发射发光传感器,在水溶液中实现对二者的可视化超灵敏检测,检测限分别为 5.95 nM 和 34.7 nM。结合密度泛函理论计算,系统揭示了传感机制。进一步将 SrTbCAM 负载于 PMMA 薄膜中,显著增强了便携性与检测效率。该传感器成功用于果蔬表面残留农药的快速可视化检测,展现出良好的实际应用潜力。

综上,薄膜基荧光传感器的技术路线选择深刻受制于应用场景的核心诉求差异:公共安全领域优先响应速度与现场便携性,食品/药品安全领域则更强调复杂基质中的选择性与生物相容性。在材料体系层面,量子点基传感器凭借高发光效率与表面易功能化优势在两领域均有应用,但其重金属毒性在食品检测中构成安全红线,且在薄膜态下易聚集猝灭、长期稳定性不足;有机小分子薄膜结构明确、可设计性强,适用于爆炸物特异性识别,但光稳定性普遍较差,在食品检测中灵敏度常逊于 MOF 体系;MOF 基复合薄凭借有序孔道富集效应与比率检测抗干扰能力,在农药/抗生素痕量检测中灵敏度优势突出,且可集成抗菌功能,但其水相稳定性、潜在金属离子残留风险及规模化制备成本仍是共性瓶颈。在制备技术层面,静电纺丝薄膜因高比表面积与多孔结构在公共安全领域实现秒级响应,但其大面积均匀性控制困难;共价固定策略在稳定性上表现优异,适合长期监测场景,但制备周期与成本较高。两大领域共同面临“高灵敏度与生物安全/稳定性”的深刻矛盾,以及实验室验证与真实场景应用之间的鸿沟,未来需通过跨领域技术迁移与智能化系统集成,实现灵敏度、稳定性、安全性与便携性的协同突破。

5. 生物医学分析应用

单一传感器往往难以实现对复杂样品中多种组分的准确识别。借鉴哺乳动物嗅觉或味觉系统的工作原理,传感器阵列通过构建交叉响应模式并结合模式识别算法,能够实现对多种分析物的区分与定量分析。

生物标志物的高灵敏、高选择性检测对于疾病研究及早期诊断具有重要意义。[44]在生物医学领域,实现伤口感染的实时监测与同步治疗尤为关键。基于此,Singh Hardev 团队[45]成功开发了一种兼具监测与治疗功能的治疗性伤口敷料(TH-WD)。该敷料以聚氨酯(PU)为支架,负载环丙沙星基前药(Pro-Cip)和生色探针(H-Cy)为核心功能组分。体外研究表明,TH-WD 可在 4 小时内有效灭活铜绿假单胞菌(杀菌率达 100%),同时通过肉眼可见的颜色变化(黄→绿→红)直观反映伤口感染状态。该响应机制源于细菌分泌的脂肪酶催化酯键水解,从而同时激活探针显色和前药释放活性抗菌成分环丙沙星。该系统不仅为伤口状态监测提供了一种可视化、非侵入性的技术手段,还能够实现对感染部位的及时抗菌干预,展现出良好的临床应用前景。

多巴胺(DA)和乳酸(LA)作为神经递质代谢与组织氧化应激的关键生化指标,其联合监测对于综合评估人体的神经功能与代谢状态具有重要意义。荧光传感技术与人工智能的深度融合,为实现此类生物标

志物的高精度量化分析提供了新思路。Maimaiti [46]等通过配位后改性策略,成功合成了一种 Tb^{3+} 功能化的氢键有机骨架材料($Tb@ME-TPA$),并结合实验表征与理论计算,系统揭示了其对 DA 和 LA 的荧光传感机理。为实现复杂环境下的可视化检测,研究者将该材料进一步制备为 PVA 荧光薄膜及微针贴片,赋予传感器以高效、灵敏和抗干扰等优良性能。该研究不仅推动了荧光材料、智能终端与深度学习技术的交叉融合,也为疾病的早期预测和实时健康监测开辟了新的技术路径。

淋巴引流的监测非常重要,特别是在几种疾病的早期检测和诊断中。现有的成像和监测淋巴引流的方法可能是昂贵的,并且需要训练有素的人员,这给家庭或护理点监测带来了问题。最近,已经提出了一种替代方法,包括使用微针将近红外(NIR)荧光纹身递送到皮肤,其可以用传统的基于实验室的荧光检测器来监测。Babity [47]团队提出了这种方法的进一步发展,使用专门设计的近红外荧光探针和合理的微针性质和近红外染料在微针内的空间位置的优化。同时他们证明了该方法与定制的便携式荧光测量设备兼容,并且能够在大鼠体内区分引流和不引流。

综合比较,治疗性敷料适合“创面感染监测-治疗一体化”的应用场景,但定量能力有限;微针贴片适合“皮下标志物连续监测”,但需解决体内稳定性与生物安全性问题;HOF 基传感器在生物相容性方面具有潜力,但稳定性仍是制约因素。未来发展方向在于:(1) 发展可降解或可吸收的传感器基底材料,避免二次取出;(2) 建立体内传感性能评估的标准化动物模型;(3) 探索多模态集成(如荧光-电化学联用)以提升信息获取维度。

6. 挑战与展望

薄膜基荧光传感器在走向实际应用的过程中,面临三大核心挑战。其一,存在复杂基质对传感器干扰强烈与传感器选择性不足问题。实际环境与生物样品中常共存多种干扰物,易产生交叉响应,而现有研究多停留在实验室加标验证阶段,对真实复杂基质的系统性评估不足。虽有研究通过引入适配体、分子印迹等特异性识别单元或构建传感器阵列来提升选择性,但面向污水、血液等真实样本的抗干扰能力仍需验证。其二,薄膜基荧光传感器的稳定性提升与实现优秀可重复仍是挑战。传感器在存储与使用中面临荧光分子光漂白、活性组分浸出等问题,共价固定策略虽能有效提升稳定性,但物理掺杂型薄膜的活性流失仍是常见难题。此外,批次间一致性、操作者可重复性等工程化问题鲜有系统研究。其三,当前传感器的成本较高以及难以规模化制备。高性能荧光材料合成路线复杂、成本高昂,现有成膜工艺难以实现大面积、低成本连续生产,喷墨打印等溶液加工技术虽具潜力,但薄膜均一性与性能一致性仍是瓶颈。

针对上述挑战,薄膜基荧光传感器的未来发展呈现出从“单一功能突破”向“系统集成创新”递进的逻辑脉络。首先,在数据智能层面,人工智能与机器学习的深度融合将赋予传感器阵列强大的数据处理能力,通过挖掘复杂响应模式中的内在规律,实现对多种分析物的自适应识别与精准定量。在此基础上,硬件形态向柔性可穿戴方向演进,借助柔性基底与微加工技术,传感器正从“实验室仪器”转型为可贴合人体或环境的“随身设备”,从而实现从静态检测到动态连续监测的跨越。进一步地,功能集成从单一检测向多模式协同拓展,将荧光传感与电化学、比色、拉曼等模式融合,构建多模态传感平台以突破单模式信息局限,同时将检测与治疗功能一体,在应对复杂基质干扰的同时拓展应用边界。这几个方向层层递进、互为支撑,共同构成从“算法赋能-硬件升级-功能拓展-绿色基底”的完整技术演进路径,为薄膜基荧光传感器最终实现从实验室研究到实际应用的跨越提供了系统性的解决方案。

7. 结语

薄膜基荧光传感器作为新兴的光学传感技术,已在环境监测、公共安全、食品与药品安全、生物医

学分析等领域取得显著研究进展，并在应对人类可持续发展重大挑战中展现出独特价值。该技术在重金属离子、挥发性有机物、持久性污染物检测，爆炸物、化学战剂、危险化学品识别，农药残留、抗生素、添加剂筛查，以及生物小分子、生物大分子及细胞监测等方面均取得了丰硕成果。尽管在复杂基质抗干扰、定量准确性、器件集成等方面仍面临挑战，但随着智能化传感系统构建、柔性可穿戴器件开发、实用化检测装备研发以及多模式传感与多功能集成的持续推进，薄膜基荧光传感器有望在人工智能、物联网、大数据等新一代信息技术的深度融合下，为环境监测、公共安全、食品安全、临床诊断等领域提供现场、实时、可靠的微痕量物质检测解决方案。

致谢

本研究的顺利完成，得益于师长、同学及同仁的支持与帮助。谨向悉心指导的导师和提出宝贵建议的老师们致以诚挚谢意。同时感谢所引文献的作者们，他们的成果为本文提供了理论基础与思想启迪。对在资料收集提供帮助的朋友们，一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Huang, R., Liu, T., Peng, H., Liu, J., Liu, X., Ding, L., *et al.* (2024) Molecular Design and Architectonics Towards Film-Based Fluorescent Sensing. *Chemical Society Reviews*, **53**, 6960-6991. <https://doi.org/10.1039/d4cs00347k>
- [2] Li, M., Liu, J., Shang, C., Liu, K., Qi, Y., Miao, R., *et al.* (2019) Porous Particle-Based Inkjet Printing of Flexible Fluorescent Films: Enhanced Sensing Performance and Advanced Encryption. *Advanced Materials Technologies*, **4**, Article 1900109. <https://doi.org/10.1002/admt.201900109>
- [3] Chen, W., Guo, C., He, Q., Chi, X., Lynch, V.M., Zhang, Z., *et al.* (2019) Molecular Cursor Caliper: A Fluorescent Sensor for Dicarboxylate Dianions. *Journal of the American Chemical Society*, **141**, 14798-14806. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b07170>
- [4] McShane, M.J., Brown, J.Q., Guice, K.B. and Lvov, Y.M. (2002) Polyelectrolyte Microshells as Carriers for Fluorescent Sensors: Loading and Sensing Properties of a Ruthenium-Based Oxygen Indicator. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **2**, 411-416. <https://doi.org/10.1166/jnn.2002.118>
- [5] Alfaro, M., Paez, G. and Strojnik, M. (2012) Bidimensional Fluorescence Analysis and Thermal Design of Europium Thenoyltrifluoroacetate Based Thermal-to-Visible Converter. *Applied Optics*, **51**, 780-788. <https://doi.org/10.1364/ao.51.000780>
- [6] Ding, L. and Fang, Y. (2010) Chemically Assembled Monolayers of Fluorophores as Chemical Sensing Materials. *Chemical Society Reviews*, **39**, 4258-4273. <https://doi.org/10.1039/c003028g>
- [7] He, G., Yan, N., Kong, H., Yin, S., Ding, L., Qu, S., *et al.* (2011) A New Strategy for Designing Conjugated Polymer-Based Fluorescence Sensing Films via Introduction of Conformation Controllable Side Chains. *Macromolecules*, **44**, 703-710. <https://doi.org/10.1021/ma102769b>
- [8] Esser, B. and Swager, T.M. (2010) Detection of Ethylene Gas by Fluorescence Turn-on of a Conjugated Polymer. *Angewandte Chemie International Edition*, **49**, 8872-8875. <https://doi.org/10.1002/anie.201003899>
- [9] He, G., Yan, N., Yang, J., Wang, H., Ding, L., Yin, S., *et al.* (2011) Pyrene-Containing Conjugated Polymer-Based Fluorescent Films for Highly Sensitive and Selective Sensing of TNT in Aqueous Medium. *Macromolecules*, **44**, 4759-4766. <https://doi.org/10.1021/ma200953s>
- [10] Debnath, P., Chakraborty, S., Deb, S., Nath, J., Bhattacharjee, D. and Hussain, S.A. (2015) Reversible Transition between Excimer and J-Aggregate of Indocarbocyanine Dye in Langmuir-Blodgett (LB) Films. *The Journal of Physical Chemistry C*, **119**, 9429-9441. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b02111>
- [11] Liu, K., Zhang, J., Shi, Q., Ding, L., Liu, T. and Fang, Y. (2023) Precise Manipulation of Excited-State Intramolecular Proton Transfer via Incorporating Charge Transfer toward High-Performance Film-Based Fluorescence Sensing. *Journal of the American Chemical Society*, **145**, 7408-7415. <https://doi.org/10.1021/jacs.2c13843>
- [12] Pal, A., Karmakar, M., Bhatta, S.R. and Thakur, A. (2021) A Detailed Insight into Anion Sensing Based on Intramolecular Charge Transfer (ICT) Mechanism: A Comprehensive Review of the Years 2016 to 2021. *Coordination Chemistry Reviews*, **448**, Article 214167. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214167>
- [13] Lin, J., Li, S., Liu, Z., Chen, D., Huang, C., Wei, Y., *et al.* (2019) Bending-Type Electron Donor-Donor-Acceptor Triad: Dual Excited-State Charge-Transfer Coupled Structural Relaxation. *Chemistry of Materials*, **31**, 5981-5992. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b02712>

- [14] Dong, B., Song, W., Lu, Y., Kong, X., Mehmood, A.H. and Lin, W. (2019) An Ultrasensitive Ratiometric Fluorescent Probe Based on the ICT-PET-FRET Mechanism for the Quantitative Measurement of pH Values in the Endoplasmic Reticulum (ER). *Chemical Communications*, **55**, 10776-10779. <https://doi.org/10.1039/c9cc03114f>
- [15] Wang, R., Lai, X., Qiu, G. and Liu, J. (2019) Recent Advances in Reaction-Based Excited State Intramolecular Proton Transfer (ESIPT) Fluorescence Probe. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, **39**, Article 952. <https://doi.org/10.6023/cjoc201811006>
- [16] Luo, J., Xie, Z., Lam, J.W.Y., Cheng, L., Tang, B.Z., Chen, H., *et al.* (2001) Aggregation-Induced Emission of 1-Methyl-1,2,3,4,5-Pentaphenylsilole. *Chemical Communications*, No. 18, 1740-1741. <https://doi.org/10.1039/b105159h>
- [17] Hong, Y., Lam, J.W.Y. and Tang, B.Z. (2011) Aggregation-Induced Emission. *Chemical Society Reviews*, **40**, 5361-5388. <https://doi.org/10.1039/c1cs15113d>
- [18] Chen, Y., Lam, J.W.Y., Kwok, R.T.K., Liu, B. and Tang, B.Z. (2019) Aggregation-Induced Emission: Fundamental Understanding and Future Developments. *Materials Horizons*, **6**, 428-433. <https://doi.org/10.1039/c8mh01331d>
- [19] Li, Y., Zhang, S., Tang, Y., Zhou, W., Zhang, G., Xu, J., *et al.* (2025) Eco-Friendly and Sustainable Fluorescent Film Sensors Based on Dual Design Strategy for Rapid Trace Cu²⁺ Detection in Agriculture. *Microchemical Journal*, **209**, Article 112820. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.112820>
- [20] Nan, X., Huyan, Y., Li, H., Sun, S. and Xu, Y. (2021) Reaction-based Fluorescent Probes for Hg²⁺, Cu²⁺ and Fe³⁺/Fe²⁺. *Coordination Chemistry Reviews*, **426**, Article 213580. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213580>
- [21] Yue, Y., Zhao, P., Liu, A. and Song, X. (2025) A Sustainable, Eco-Friendly Anionic S-F Heterometallic Framework and Its Composite Thin Films for Rapid Detection of Paraquat and Diquat Residues in Pear and Tomato. *Microchemical Journal*, **215**, Article 114506. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.114506>
- [22] Li, Y., Xiong, Z., Zhang, S., Zhang, L., Sheng, L., Ding, X., *et al.* (2024) Development of Fluorescent Sensing Platform with Degradable Hydrogel for Rapid and Ultratrace Detection of Cr(vi) in Vegetables. *Microchemical Journal*, **201**, Article 110604. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110604>
- [23] Hu, J., Su, M., Yuan, H., Jing, C., Li, B. and Wang, B. (2025) Fluorescent Responsive Film Based on Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots Embedded in Mesoporous Silica for Visual Detection of Cr(vi). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article 115656. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115656>
- [24] Vyas, T. and Joshi, A. (2024) Chemical Sensor Thin Film-Based Carbon Quantum Dots (CQDs) for the Detection of Heavy Metal Count in Various Water Matrices. *The Analyst*, **149**, 1297-1309. <https://doi.org/10.1039/d3an01571h>
- [25] Sun, J., Fang, W., Liza, A.A., Gao, R., Song, J., Guo, J., *et al.* (2024) Photoluminescent Nanocellulosic Film for Selective Hg²⁺ Ion Detection. *Polymers*, **16**, 1583. <https://doi.org/10.3390/polym16111583>
- [26] He, L., Qin, S., Zeng, H., Li, Z., Liang, Q., Hu, X., *et al.* (2025) Synthesis of Europium-Based Fluorescent Films for High-Sensitivity Detection of Iron Ions via Layered Precursor Anion Exchange. *Dalton Transactions*, **54**, 15424-15431. <https://doi.org/10.1039/d5dt01750e>
- [27] Lu, H., Wang, Y., Ma, J., Hou, H., He, M., Chen, Q., *et al.* (2026) A Cationic Lanthanide-Based Fluorescent Sensor for Highly Selective and *On-Site* Detection of Chromium Oxyanions. *Dyes and Pigments*, **246**, Article 113414. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2025.113414>
- [28] Chen, L., Tian, X., Li, Y., Yang, C., Huang, Y. and Nie, Y. (2022) Rapid and Sensitive Screening of Multiple Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by a Reusable Fluorescent Sensor Array. *Journal of Hazardous Materials*, **424**, Article 127694. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127694>
- [29] Duan, Y., Liu, Y., Han, H., Zhang, X., Zhang, M., Liao, Y., *et al.* (2021) A Donor- π -Acceptor Aggregation-Induced Emission Compound Serving as a Portable Fluorescent Sensor for Detection and Differentiation of Methanol and Ethanol in the Gas Phase. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **252**, Article 119515. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119515>
- [30] Chen, J., Shi, G. and Yan, C. (2021) Visual Test Paper for On-Site Polychlorinated Biphenyls Detection and Its Logic Gate Applications. *Analytical Chemistry*, **93**, 15438-15444. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.1c03309>
- [31] Lin, T., Su, X., Wang, K., Li, M., Guo, H., Liu, L., *et al.* (2019) An AIE Fluorescent Switch with Multi-Stimuli Responsive Properties and Applications for Quantitatively Detecting Ph Value, Sulfite Anion and Hydrostatic Pressure. *Materials Chemistry Frontiers*, **3**, 1052-1061. <https://doi.org/10.1039/c8qm00544c>
- [32] Qi, J., Liu, D., Liu, X., Guan, S., Shi, F., Chang, H., *et al.* (2015) Fluorescent Ph Sensors for Broad-Range pH Measurement Based on a Single Fluorophore. *Analytical Chemistry*, **87**, 5897-5904. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b00053>
- [33] Zhou, X., Ji, L., Ran, X., Su, B., Ji, Q., Pan, C., *et al.* (2016) Prevalence of Obesity and Its Influence on Achievement of Cardiometabolic Therapeutic Goals in Chinese Type 2 Diabetes Patients: An Analysis of the Nationwide, Cross-Sectional 3B Study. *PLOS ONE*, **11**, e0144179. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144179>

- [34] Min, J.Y. and Kim, H.J. (2020) Sol-Gel-Based Fluorescent Sensor for Measuring pH Values in Acidic Environments. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, **41**, 691-696. <https://doi.org/10.1002/bkcs.12055>
- [35] Loch, A.S., Burn, P.L. and Shaw, P.E. (2023) Fluorescent Sensors for the Detection of Free-Base Illicit Drug—Effect of Tuning the Electronic Properties. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **387**, Article 133766. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133766>
- [36] Roy, B., Bar, A.K., Gole, B. and Mukherjee, P.S. (2013) Fluorescent Tris-Imidazolium Sensors for Picric Acid Explosive. *The Journal of Organic Chemistry*, **78**, 1306-1310. <https://doi.org/10.1021/jo302585a>
- [37] Algarra, M., Campos, B.B., Miranda, M.S. and da Silva, J.C.G.E. (2011) CdSe Quantum Dots Capped PAMAM Dendrimer Nanocomposites for Sensing Nitroaromatic Compounds. *Talanta*, **83**, 1335-1340. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.10.056>
- [38] Lu, H., Carroll, G.M., Neale, N.R. and Beard, M.C. (2019) Infrared Quantum Dots: Progress, Challenges, and Opportunities. *ACS Nano*, **13**, 939-953. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09815>
- [39] Aznar-Gadea, E., Rodriguez-Canto, P.J., Sánchez, S.A., Martínez-Pastor, J.P. and Abarques, R. (2022) Luminescent CdSe Quantum Dot Arrays for Rapid Sensing of Explosive Taggants. *ACS Applied Nano Materials*, **5**, 6717-6725. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00743>
- [40] Han, T., Kang, H., Yuan, Y., Zhang, Y. and Dong, L. (2020) Highly Sensitive and Ultrafast Film Sensor Based on Polyethyleneimine-Capped Quantum Dots for Trinitrophenol Visual Detection. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **234**, Article 118243. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118243>
- [41] Yu, X., Gong, Y., Ji, H., Cheng, C., Lv, C., Zhang, Y., *et al.* (2022) Rapid Assessment of Meat Freshness by the Differential Sensing of Organic Sulfides Emitted during Spoilage. *ACS Sensors*, **7**, 1395-1402. <https://doi.org/10.1021/acssensors.2c00079>
- [42] Marimuthu, M., Xu, K., Song, W., Chen, Q. and Wen, H. (2025) Safeguarding Food Safety: Nanomaterials-Based Fluorescent Sensors for Pesticide Tracing. *Food Chemistry*, **463**, Article 141288. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141288>
- [43] Feng, L., Tang, Z., Xu, N., Huang, J., Jiang, Y., Tang, X., *et al.* (2025) Highly Sensitive Ratiometric Fluorescent Flexible Sensor Based on Multifunctional 4-MU@ZIF-8@PLA-PEG for Broad-Spectrum Antibiotics Detection in Food Safety. *Microchemical Journal*, **216**, Article 114638. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.114638>
- [44] Fakayode, S.O., Lisse, C., Medawala, W., Brady, P.N., Bwambok, D.K., Anum, D., *et al.* (2023) Fluorescent Chemical Sensors: Applications in Analytical, Environmental, Forensic, Pharmaceutical, Biological, and Biomedical Sample Measurement, and Clinical Diagnosis. *Applied Spectroscopy Reviews*, **59**, 1-89. <https://doi.org/10.1080/05704928.2023.2177666>
- [45] Singh, H., Li, W., Kazemian, M.R., Yang, R., Yang, C., Logsetty, S., *et al.* (2019) Lipase-Responsive Electrospun Theranostic Wound Dressing for Simultaneous Recognition and Treatment of Wound Infection. *ACS Applied Bio Materials*, **2**, 2028-2036. <https://doi.org/10.1021/acsbm.9b00076>
- [46] Maimaiti, A., Zhu, K. and Yan, B. (2024) Intelligent Luminescent Microneedle and Hydrogel Patches for Visual Monitoring of Lactic Acid and Dopamine. *Chemical Engineering Journal*, **498**, Article 155715. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155715>
- [47] Babity, S., Polomska, A.K., Couture, F., Bonmarin, M., Fehr, D., Detmar, M., *et al.* (2020) Rational Design of a Fluorescent Microneedle Tattoo for Minimally Invasive Monitoring of Lymphatic Function. *Journal of Controlled Release*, **327**, 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.08.017>