

纸基传感器用于水产品安全快速检测研究进展

薛小燕, 夏凌*, 李攻科*

(中山大学 化学学院, 广东 广州 510006)

摘要: 纸基传感器具有成本低、操作易及便携等优势, 已广泛应用于水产品安全快速检测。该文阐述了浸渍纸芯片、侧流层析纸芯片、微流控纸芯片纸质传感器的制备方法, 介绍了裸眼判读、智能设备辅助传感、便携式传感设备的传感策略, 综述了纸基传感器在水产品中重金属离子、农兽药残留、非法添加剂、生物毒素、致病菌、生物胺和其他污染物检测方面的研究进展, 并针对当前存在的问题, 展望了未来发展方向。

关键词: 纸基传感器; 快速检测; 食品安全; 水产品

中图分类号: O646; F762.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)08-0001-11

Progress in Paper-based Sensors for Rapid Detection of Aquatic Products Safe

XUE Xiao-yan, XIA Ling*, LI Gong-ke*

(School of Chemistry, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Paper-based sensors have been widely used for rapid detection of aquatic products safety, attributing to their advantages of low cost, easy operation, and portability. This review describes the fabrication methods of three types of paper-based sensors, namely dipstick paper chips, lateral flow paper chips, and microfluidic paper chips, as well as briefly introduces three sensing strategies: naked-eye readout, smart device-assisted sensing, and portable sensing devices. The research progress of paper-based sensors for the detection of various targets in aquatic products is reviewed, including heavy metal ions, agricultural and veterinary drug residues, illegal additives, biotoxins, pathogenic bacteria, biogenic amines and other contaminants. Finally, an outlook on future development directions is given with respect to the existing problems.

Key words: paper-based sensor; rapid detection; food safety; aquatic product

水产品是人类食用的淡水或海洋生物, 包括鱼、虾、贝等^[1]。由于人口增长与人类生产活动的日益扩张, 在养殖水域产生了多样污染源^[2], 导致重金属离子、致病菌、农兽药残留及其他污染物富集于水产品中^[3], 赤潮产生的生物毒素可在贝类累积, 储运环节中的非法保鲜技术与生成的腐败物质等也会威胁水产品安全^[4]。水产品安全检测主要依赖实验室仪器分析, 如色谱-质谱联用、原子吸收光谱及聚合酶链反应等^[5-6]。这些方法耗时、成本高, 难以满足现场检测需求^[7]。

水产品安全快速检测技术已发展出多种形式, 包括电化学传感器、生物传感器及纸基传感器等。其中, 纸基传感器是基于纸张构建的快速检测方法, 具备传感速度快、成本低及便携等优势, 适用于水产品现场快速检测。传感器通常由识别元件与纸基平台集成, 借助纸张多孔结构及毛细作用实现流体自动输送^[8-9]。根据信号产生方式的不同, 纸基传感器可与光谱法和电化学法配合实现目标物的检测^[10], 通过裸眼判读、智能设备辅助、便携式传感设备等采集分析数据, 实现定性、半定量或定量分析^[11]。然而, 纸基传感器在水产品痕量污染物检测中的准确度与灵敏度仍存在局限^[12]。基质干扰、温湿度变化及光照等因素均可能影响检测性能, 制约了其应用^[13]。针对这些问题, 研究者们不断开拓新型功能材料及结合机器学习方法提升纸基传感器性能。本团队在水产品安全快速检测方向开展了系列

收稿日期: 2026-05-07; 修回日期: 2026-06-19

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515011077); 广东省重点领域研发计划项目(2026B0202150002, 2025B0202120004); 国家自然科学基金(22134007, 22576240)

* 通讯作者: 李攻科, 博士, 教授, 研究方向: 色谱及光谱分析、分析仪器研制、复杂样品快速分离分析, E-mail: cesgkl@mail.sysu.edu.cn

夏凌, 博士, 副研究员, 研究方向: 微纳分离分析、光谱分析, E-mail: xialing@mail.sysu.edu.cn

工作, 如 Lu^[14] 构建了 Tb³⁺ 功能化三嗪多孔有机框架比率荧光传感器用于水产品中环丙沙星的检测, Hu 等^[15] 制备了 Sep/CTs/AgNPs 类纸膜表面增强拉曼散射基底用于动物源食品中磺胺甲噁唑的富集与检测。纸基传感器因具备低成本、可现场操作及抗干扰等优势, 正成为该方向的研究热点, 但相关进展尚缺乏系统梳理。

鉴于此, 本文系统综述了纸基传感器在水产品安全快速检测中的研究进展, 阐述纸基传感器构建方法、传感策略及其在水产品安全检测中应用, 如图 1A 所示。近 5 年, 纸基传感器快速检测水产品的文献报道和引用逐年增加, 如图 1B 所示。本文以当前 3 种主流的纸基传感器—浸渍纸芯片、侧流层析纸芯片和微流控纸芯片为对象, 介绍了其光谱法和电化学法信号输出方式, 重点综述了裸眼判读、智能设备辅助、便携式传感设备等对水产品中重金属离子、农兽药残留、非法添加物、生物毒素、致病菌、生物胺和其他污染物实现定性、半定量或定量分析的相关内容。最后指出当前挑战与未来发展方向, 为水产品安全检测研究提供参考。

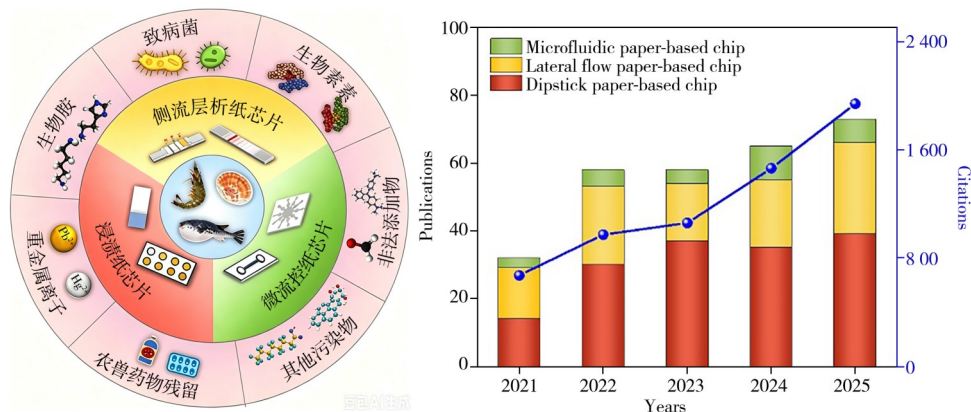


图 1 纸基传感器快速检测水产品的传感器类型、检测方法和应用领域概述 (A); 2021 年 1 月~2025 年 12 月纸基传感器快速检测水产品的出版物和引用显示整体趋势 (B)

Fig. 1 Summary of sensor types, detection methods, and application fields for rapid detection of aquatic products using paper-based sensors (A); the publications and citations of paper-based sensors for rapid detection of aquatic products from January 2021 to December 2025 (B)

the published and cited data comes from Web of Science, and the search keywords are “aquatic products, paper-based, detection, sensor”; the sensors are classified into impregnated paper chips, lateral flow paper chips, and microfluidic paper chips (发表和引用数据来源于 Web of Science, 检索关键词 aquatic products、paper-based、detection、sensor”; 传感器分类为浸渍纸芯片、侧流层析纸芯片和微流控纸芯片)

1 纸基传感器构建

纸基材料在分析化学中的应用由来已久, 早在公元 23 年就有利用纸莎草纸检测铁离子的记录, 而后从 17 世纪的石蕊试纸到 19 世纪的碘化物-淀粉试纸, 纸基传感技术持续演进^[16]。面对现场检测需求, 纸基传感器的材料选择、结构设计与功能性材料固载至关重要, 决定了其传感性能。当前主流的纸基传感器可分为浸渍纸芯片、侧向流动纸芯片和微流控纸芯片 3 种^[17], 如图 2 和表 1 所示。三者 in 检测通量、检测精度及集成度上呈现出递进趋势。

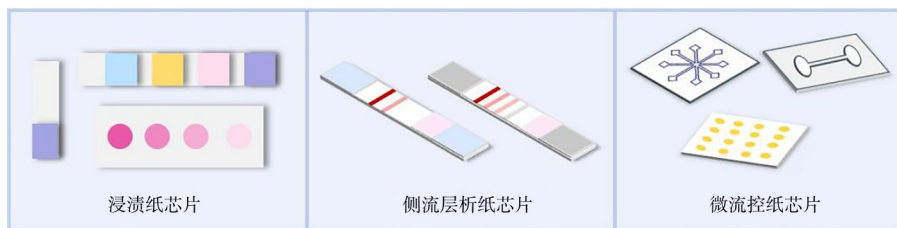


图 2 纸基传感器的类型

Fig. 2 Types of paper-based sensors

1.1 纸基传感器制备方法

1.1.1 浸渍纸芯片 浸渍纸芯片是最基础的纸基传感器类型, 是水产品安全快速检测领域的常用方法之一。其机制依赖于纸张中毛细扩散与固载显色试剂的相互作用^[18], 通常是将特定形状的纸张浸入

含有功能性材料的溶液中，干燥后制成。浸渍纸芯片常用定性滤纸、色谱层析纸及玻璃纤维纸制作，这些材料具备良好的吸附性与稳定性^[19]。根据信号输出方式的不同，浸渍纸芯片可设计为光学型传感器，通过显色反应或荧光标记产生可读信号；也可设计为电学型传感器，利用待测物引起的纸基电极的阻抗、电流或电位变化实现定量检测^[20-21]。因此浸渍纸芯片灵活性强、成本极低，适合开发为面向多样化应用的快速筛查工具^[22-23]。Zhao等^[24]采用浸渍法构建了一种pH响应型双pKa荧光传感器(HMB)，用于奶酪和虾等食品腐败过程中pH值的可视化检测。但浸渍纸芯片在多重检测和复杂样品的前处理需求方面仍存在局限，促使纸基传感器向更为结构化、区分功能化的方向发展。

表1 纸基传感器构建方法总结

Table1 Summary of construction methods for paper based sensors

Type of sensor	Paper substrate	Fabrication method	Advantage	Limitation	Reference
浸渍纸芯片	定性滤纸、色谱层析纸、玻璃纤维纸	试纸条浸渍于含功能材料溶液中，后进行烘干	成本极低、结构简单、灵活性强	通量低、灵敏度差、难以实现多步反应	[19]
侧流层析纸芯片	硝酸纤维素膜、玻璃纤维、纤维素滤纸及吸水纸	硝酸纤维素膜、玻璃纤维、纤维素滤纸及吸水纸依次组装于PVC板上	低成本、便捷、具备简单的前处理过程	灵敏度相对较低、受基质效应影响较大	[25]
微流控纸芯片	滤纸、硝酸纤维素膜及纤维素纳米纸	蜡印	成本低，操作/程序简单，材料安全易得	热稳定性不足，分辨率低，通道 $\geq 500\text{ }\mu\text{m}$	[26]
		丝网印刷	成本低廉，制版快速，印刷方便，适用性强	需制备模版，灵活性低，分辨率有限，通道 $\geq 200\text{ }\mu\text{m}$	[22]
		喷墨打印	灵活性高，分辨率高，通道大小 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$	需要油墨校准，耗时，要求纸张表面平整度高	[27]
		激光切割	自动化，快速原型制作，高精度，通道约 $150\text{ }\mu\text{m}$	成本高，切割过程中可能排放有害气体	[28]
		光刻	重复性好，分辨率高，通道大小 $< 50\text{ }\mu\text{m}$	设备成本高，工艺复杂，耗时	[29]

1.1.2 侧流层析纸芯片 侧流层析纸芯片(LFA)是纸基传感器中最具代表性的进阶形式之一，也是当前水产品安全快速检测领域的主流方法。LFA由硝酸纤维素膜、玻璃纤维、纤维素滤纸及吸水纸组成^[30-31]，通过定向毛细流道与分区层压设计，在保持便捷、低成本优势的同时，在样品前处理和信号读出方面更好控制^[32-33]。检测时，样品在毛细作用下依次流过各功能区。目标物与固定在结合垫上的标记物(如胶体金、荧光微球)结合形成复合物，随后在NC膜的检测线(T线)上被特异性捕获并显色。由质控线(C线)验证过程有效性^[34]。

近年来，为满足水产品安全检测中多靶标、痕量化、复杂基质等的现场快速检测需求，LFA在标记材料、识别元件方面的研究取得了显著进展。量子点、时间分辨荧光纳米粒子等新型探针逐步替代传统胶体金，显著提高了灵敏度和多重检测能力。如Huang等^[35]开发了一种基于量子点的荧光多重侧流免疫层析试纸条，将量子点标记的抗卵清蛋白、抗原肌球蛋白和抗肌浆钙结合蛋白混合喷涂于结合垫，并在硝酸纤维素膜上设置3条检测线，实现了对鸡蛋过敏原和甲壳类过敏原的同时检测。在识别元件方面，重组抗体、纳米抗体等新型识别分子的引入进一步提升了痕量目标物的特异性和稳定性。例如，Zhang等^[36]通过基因工程表达了抗2,2-双(4-氯苯基)醋酸(p,p'-DDA)的重组单克隆抗体(rAb-10B4D7)，并以此构建了胶体金免疫层析试纸条，15 min内即可实现海水和贝类中p,p'-DDA的可视化检测。尽管传统的LFA依赖沿单一方向的被动毛细流动，但随着LFA的不断发展，目前已能够克服这一特点带来的限制，成功用于需要多步顺序反应或复杂样品处理的场景。

1.1.3 微流控纸芯片 为克服上述限制，微流控纸芯片(μ PAD)应运而生，其由哈佛大学 Whitesides 团队于2007年首次提出^[37]，在纸基上预先设计并构建微流道网络，实现了流体路径、流速及反应时间的主动设计与程序化调控^[38]。 μ PAD通过将纸基的简易性与微流控技术的精准性相结合，实现了复杂样品的分离富集与净化，对比LFA， μ PAD可实现更加功能化的样品前处理^[39]。 μ PAD常用滤纸、硝酸纤维素膜及纤维素纳米纸制作，这些材料因纤维素富含羟基而亲水，可自驱液体且生物相容^[40]。

μ PAD 可集成光学或电化学传感机制, 光学型 μ PAD 借助显色反应或荧光标记在检测区产生可读信号, 电化学型 μ PAD 则通过在通道末端集成电极, 利用待测物引起的电化学响应实现定量分析^[41]。 μ PAD 具有试剂消耗量极低、易于集成多检测区和能够高通量分析等优势^[42]。如 Praofoon 等^[43]报道了一种基于纸基电化学发光器件(μ PAD-ECL)的传感器, 实现了鱼肉中三甲胺的超灵敏快速检测。 μ PAD 的制造依赖于多种图案化技术, 如蜡印、丝网印刷、喷墨打印、激光切割、光刻等, 这些技术在成本、分辨率上各有特点, 为满足不同性能需求和规模生产提供了多样化选择。

1.2 传感策略

纸基传感器在水产品检测中的应用依赖于对产生的信号进行有效判读与定量。根据检测原理不同, 纸基传感器可实现比色、荧光、化学发光、电流、光电流等多种信号读出方式^[44-45]。针对不同的检测场景对便携性、成本与准确度的要求, 主要采用裸眼直接判读、手机辅助传感和便携式传感设备读数 3 种策略。

裸眼直接判读是最简单、最快速的检测手段, 尤其适用于基于比色或荧光信号的纸基传感器。通过观察传感器产生的颜色变化或荧光强度, 与标准比色卡进行比对, 实现水产品中目标物的定性或半定量分析。其结果准确性与重现性相对有限, 适用于水产品现场的快速初步筛查。手机辅助传感是利用智能手机的高性能摄像头与数据处理能力, 通过内置或专用的应用程序对传感器的光学信号或电化学信号进行数字化提取和分析, 再结合预先建立的校准模型计算目标物浓度^[46-47]。其在便携性与客观定量能力之间取得了良好平衡, 尤其适合水产品现场监测。便携式传感设备检测采用专用的小型化读取设备, 如便携式色度计、荧光读数仪或电化学工作站等, 实现纸基传感器信号采集分析。这些仪器能提供更稳定、精确的检测数据, 结合专业的分析软件, 可获得接近实验室水平的检测结果^[17]。该方法便携性稍弱, 但适用于对数据可靠性要求更高的水产品质量控制或现场检测。

2 纸基传感器在水产品安全检测中的应用

水产品检测面临的关键挑战之一在于实验室方法难以适用于现场快速检测需求, 这源于其对大型仪器和较长分析周期的依赖^[48]。纸基传感器凭借低成本、便捷及响应快速等显著优势^[49], 成为水产品现场快速检测领域极具前景的技术。其中 LFA 是该领域的主流检测手段。为便于比较不同纸基传感器的分析性能, 本文整理了典型工作的检测性能, 如表 2 所示。

表 2 典型纸基传感器性能对比

Table 2 Performance comparison of typical paper-based sensors

Type of sensor	Detection method	Analyte	Detection time/min	Linear range/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	LOD/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Recovery/%	Reference
浸渍纸芯片	荧光法	Pb^{2+}	1	0.207~103.5	47.7	88.1~107	[50]
	荧光法	左氧氟沙星	1	3.61~1.8 $\times 10^4$	1.64	101.7~103	[51]
	表面增强拉曼光谱法	大田软海绵酸	60	1~2 500	0.31	94.2~106	[52]
	荧光法	组胺	100	22.2~2 223	4.00	86.8~108	[53]
	荧光法	尸胺	110	0~3.0 $\times 10^4$	34.7	—	[54]
	荧光法	孔雀石绿	0.17	18.2~730	4.01	98.0~103	[55]
侧向流动纸芯片	荧光法	Cd^{2+}	0.1	112~4 490	106	93.0~104	[56]
		Cu^{2+}		20.6~1 540	9.91		
	荧光法	喹乙醇	9	0~50	1.42	90.1~106	[57]
	比色法	新霉素	10	10~100	3.70	90.0~106	[58]
		青霉素		0.2~3.0	0.1	90.0~104	
		氯霉素		0.01~0.2	0.008	91.0~110	
	比色法	河豚毒素	8	0.8~10.6	0.5	70.5~110	[59]
	比色法	锦鲤疱疹病毒	10	—	10	—	[60]
	比色法	副溶血弧菌	3~10	—	3.2 $\times 10^5$ cfu/mL	—	[61]
	荧光法	变形假单胞菌	5	—	2.34 $\times 10^2$ cfu/mL	—	[62]
	荧光法	丁香酚类	10	4.49~48.4	12.3	88.4~110	[63]
	荧光法	呋喃酮代谢物	15	0.05~1.0	0.041	83.0~98.2	[64]
微流控纸芯片		硝基呋喃代谢物		0.01~1.0	0.019	85.0~94.2	
	荧光法	恩诺沙星	15	10~1 $\times 10^5$	1.84	82.7~101	[65]
		环丙沙星	15		2.22	85.8~101	
	电化学	NO_2^-	1	2.3 $\times 10^3$ ~4.6 $\times 10^4$	460	93.0~106	[66]
		NO_3^-		3.1 $\times 10^3$ ~6.2 $\times 10^4$	1 240	96.0~112	

2.1 重金属离子检测

污染水体中的汞、铅、镉等重金属离子具有高毒性和生物累积性，易在水产品中积累，严重威胁人体健康^[67-68]。重金属离子的纸基传感器主要聚焦于光学传感器，通过多类型探针、纳米材料等的功能化设计实现性能提升。如Luo等^[69]报道了一种用于 Hg^{2+} 超灵敏检测的双激活化学发光探针CL-Hg，在纸基上通过分子内化学诱导电子交换发光机制产生强烈信号，检测限低至 $0.104\text{ }\mu\text{g/L}$ 。Paisuwan等^[70]基于噻唑啉-酰胺基喹啉衍生物(QT2)开发了一种用于 Cu^{2+} 选择性检测的荧光纸片，QT2与 Cu^{2+} 形成1:1络合物后经配体-金属电荷转移(LMCT)导致荧光猝灭，在紫外灯下肉眼观察，检测限低至 $4.84\text{ }\mu\text{g/L}$ ，成功应用于水样和牡蛎的检测。

响应信号除了肉眼直接判读完成半定量分析，还可以结合智能手机分析实现现场定量检测。例如，Rasheed等^[71]基于4-氨基-3-(*D*-半乳糖戊醇-1-基)-5-巯基-1,2,4-三唑(AMTPP)功能化银纳米颗粒，开发了一种用于 As^{3+} 和 L -半胱氨酸选择性检测的便携式喷墨打印纸基比色传感器，如图3所示。该传感器通过与智能手机图像RGB分析结合，对 As^{3+} 的检测限为 $0.689\text{ }\mu\text{g/L}$ 、 L -半胱氨酸检测限为 $0.630\text{ }\mu\text{g/L}$ ，并成功应用于海鲜等样品的检测，实现了低成本喷墨打印制造与普及化智能终端的结合。重金属离子纸基检测仍以化学/荧光探针为主，未来，DNAzyme或核酸适配体功能化的LFA有望突破识别瓶颈，结合智能手机读色实现现场定量。

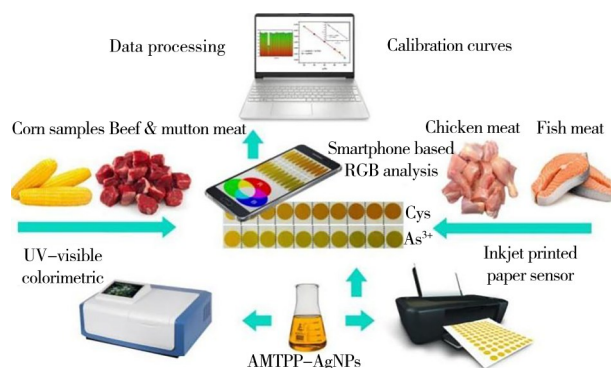


图3 基于AMTPP检测 As^{3+} 和 L -半胱氨酸的传感策略示意图^[71]

Fig. 3 Systematic illustration of AMTPP-based sensing strategies for detecting As^{3+} and L -Cysteine^[71]

2.2 农兽药残留检测

农兽药残留是水产品安全领域的重大隐患，不规范使用的抗生素、磺胺类、喹诺酮类、有机磷类、拟除虫菊酯类等药物将在水产品体内富集^[72-73]，长期摄入可能引起人体肠道菌群失调、过敏反应等^[74]。农兽药残留检测面临种类繁多、结构类似且需同时监测的需求，纸基传感器近年来向高选择性识别材料开发发展。如Zeng等^[75]将量子点表面包覆的分子印迹聚合物(MIP)作为荧光传感材料，利用MIP空腔对模板分子的形状记忆效应实现选择性结合，同时结合试纸条与智能手机颜色识别，检测限低至 0.156 ng/L ，并成功应用于鱼血清样品中酰胺类除草剂的筛查。多模式检测可有效避免单一信号的误判。Tong等^[76]研究了一种用于磺胺二甲氧嘧啶(SDM)检测的双模式3D纸基微流控适配体传感器，可同时输出荧光和比色信号，如图4所示，该传感器结合便携式双光检测设备和智能手机小程序，在15 min内实现了荧光和比色双模式定量检测，检测限低至 $0.13\text{ }\mu\text{g/L}$ (荧光)和 $0.21\text{ }\mu\text{g/L}$ (比色)。Pan等^[77]将表面增强拉曼散射(SERS)与侧流层析联用，以 Au@Ag 核壳纳米粒子为SERS标签，同时检测氯霉素、甲矾霉素和氟苯尼考3种抗生素，方法兼具肉眼辨别与SERS定量检测能力，仪器检出限低至 $0.20\sim 0.78\text{ }\mu\text{g/L}$ ，并在鲢鱼实际样品中获得了91.5%~106.4%的加标回收率。

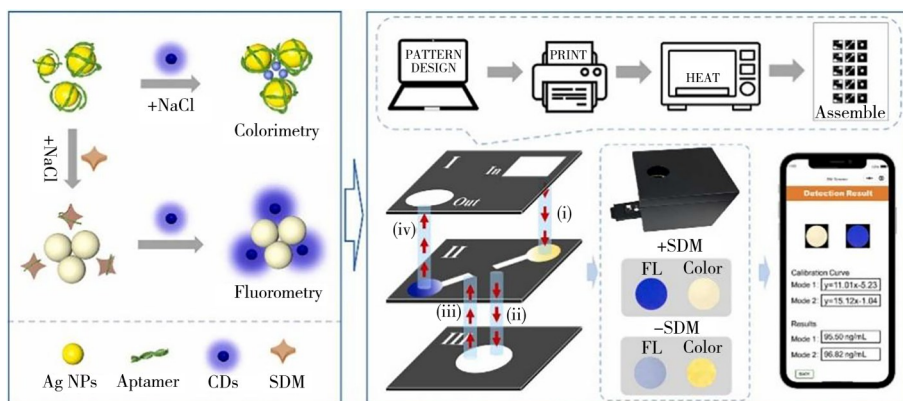


图4 用于即时检测磺胺二甲氧嘧啶的新型比色和荧光双模式3D纸基微流控适配体传感器示意图^[76]

Fig. 4 Schematic of the novel colorimetric and fluorescent dual-mode 3D paper-based microfluidic aptasensor for the point-of-care detection of sulfadimethoxine^[76]

2.3 非法添加物

在水产品养殖、运输及加工过程中,存在不法商贩违规使用甲醛、孔雀石绿、硝基呋喃类代谢物等非食用物质,以延长保质期或改善外观的现象,这些物质具有致畸、致癌和致突变风险^[78-79],严重威胁消费者健康。对于多种非法添加物可能同时存在、代谢物结构多样需同步检测的需求,纸基传感器发展出多靶标检测方法。双功能探针可在一份样品中检测两种不同物质,如 Pang 等^[80]设计了一种基于经 N 位和 4 位修饰的 1,8-萘酰亚胺多功能荧光探针(ANS)纸基传感器, Hg^{2+} 与探针中的羰基和醚氧原子以 1:1 配位,开启 402 nm 处紫色荧光;甲醛则与胍基团缩合形成脎衍生物,开启 550 nm 处黄色荧光。该方法对 Hg^{2+} 和甲醛的检测限分别为 9.09 $\mu\text{g/L}$ 和 8.56 $\mu\text{g/L}$,实现了市售虾中甲醛、松花江与饮用水中 Hg^{2+} 的加标回收测定。侧流层析技术具有简便性和多重检测能力,是现场多靶标检测的成熟平台,如 Mei 等^[81]构建了一种基于铕纳米粒子标记的侧流免疫层析试纸条,实现了水产品中 3-氨基-2-噁唑烷酮(AOZ)、3-氨基-5-吗啉甲基-2-噁唑烷酮(AMOZ)和硝呋替苯钠(NFS)的同时检测,检测限分别为 0.013、0.019 和 0.023 $\mu\text{g/L}$,并成功应用于鲫鱼、对虾、蛤蜊等的筛查。

2.4 生物毒素检测

水产品中的生物毒素对公共健康构成威胁,主要包括贝类毒素、冈田酸及河豚毒素等^[82-84],这类生物毒素具有热稳定性强、毒性剧烈的特点^[85]。其检测主要面临复杂基质中痕量识别和多重检测困难的问题,纸基传感器通过耦合先进的识别材料与信号放大策略,实现了水产品中痕量毒素的高灵敏分析。例如, Noirmain 等^[86]开发了一种基于毒素-受体亲和力的 NeuroTorp 侧流层析试纸条用于环亚胺毒素的快速检测。该工作首次将 GF/C 玻璃微纤维膜作为 LFA 固定相,将 Torpedo 电器官膜囊泡固定在检测线上,利用生物素- α -银环蛇毒素作为示踪剂,并结合中性亲和素-纳米金颗粒显色。该方法无需抗体,15 min 内即可通过肉眼或 LFA 读数器判断结果,已成功应用于贝类提取物中多种环亚胺毒素的检测。此外, Mills 等^[87]报道了一种可同时检测 3 种主要海洋毒素(冈田酸、石房蛤毒素、软骨藻酸)的多重 LFA。该传感器将 3 种毒素-卵清蛋白偶联物分别喷涂于硝酸纤维素膜的 3 条检测线上,采用金纳米颗粒标记对应抗体,并结合手持式 Cube Reader 进行定量读取,实现了对贻贝样品中 3 种毒素的同时检测。除上述 LFA 技术外,研究者还发展了其他高灵敏纸基传感平台。Zheng 等^[88]构建了一种基于近红外光响应的光电化学纸基传感平台(如图 5 所示),用于织纹螺中河豚毒素(TTX)和冈田酸(OA)的同时检测。该设计采用六通道金纳米颗粒功能化纸基丝网印刷电极, Ag_2S 量子点在 980 nm 近红外光激发下产生电子-空穴对,上转换纳米粒子(UCNPs)将 NIR 光转换为可见光匹配 BiOI 吸收,以此实现低光毒性、深穿透检测,对 TTX 和 OA 的检测限分别为 5.0 ng/L 和 7.0 ng/L。

2.5 致病菌检测

食品致病菌污染是引发食源性疾病的主要诱因^[89],水产品中的常见致病菌种类包括副溶血性弧菌、沙门氏菌、单增李斯特菌等^[90-91]。这些微生物通过养殖环境或储运环节污染水产品,严重威胁消费者健康^[92]。传统培养法耗时长、操作繁琐,难以实现快速预警^[93]。纸基传感器在该领域的应用主要结合侧流层析检测技术,目前研究多集中于结合信号放大策略实现对食品中致病菌的痕量检测。如 Zhu 等^[94]构建了一种基于竞争免疫层析原理的副溶血弧菌胶体金快速检测试纸,将副溶血弧菌的 4 种抗原(外膜蛋白、鞭毛蛋白、胞外产物、全菌蛋白)喷涂为 4 条检测线(T1~T4),全菌蛋白 T4 线可捕获共同抗原以避免其他弧菌导致假阳性。10 min 内即可肉眼判读结果,副溶血弧菌的检测限为 5×10^5 cfu/mL,与 ELISA 一致。Yang 等^[95]建立了一种重组酶聚合酶扩增结合侧流层析试纸条(RPA-LFS)的分析方法,用于生鲜水产品中创伤弧菌(*Vibrio vulnificus*)的快速检测。该方法以 *empV* 基因为靶标,设计荧光素异

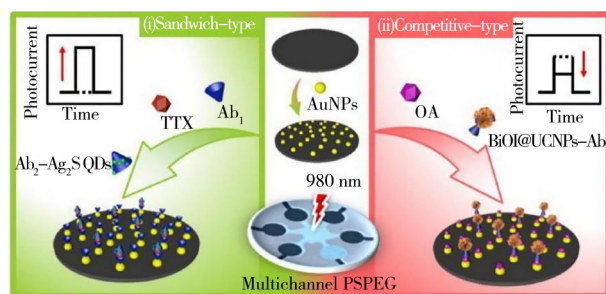


图 5 用于测定织纹螺中河豚毒素和冈田酸的近红外响应光电化学传感平台示意图^[88]

Fig. 5 Schematic of NIR-responsive photoelectrochemical sensing platform for the simultaneous determination of tetrodotoxin and okadaic acid in Nassariidae^[88]

硫氰酸酯(FITC)标记的探针和生物素标记的反向引物, 扩增产物经侧流试纸条上的抗FITC抗体和链霉亲和素捕获显色, 检测全程仅需35 min。该方法在加标虾、牡蛎、鱼肉样品中的检出限为1 cfu/10 g, 为水产品中创伤弧菌的现场监测提供了便捷工具。多重致病菌的同步快速检测, 在水产品安全现场检测也至关重要, 如Chen等^[96]构建了一种基于噬菌体的三线LFA生物传感器, 用于水产品中鼠伤寒沙门氏菌和志贺氏菌的同步检测, 如图6所示。该工作用两种特异性噬菌体(ZBSTP8和ZBSTP12)替代传统抗体, 采用萘酚-二胺-过氧化氢(DEPDA)替代传统TMB, 显色更快、稳定性更高。该传感器对鼠伤寒沙门氏菌和志贺氏菌的裸眼检出限均低至10 cfu/mL, 在鲑鱼肉、海带、牛蛙肉和蛤蜊肉等实际样品中的加标回收率为96.5%~107.7%。致病菌的纸基LFA检测正从单一靶标、单一抗体向联用信号放大策略、多重同步检测等方向快速发展, 为水产品安全的现场快速预警提供了多样化技术手段。

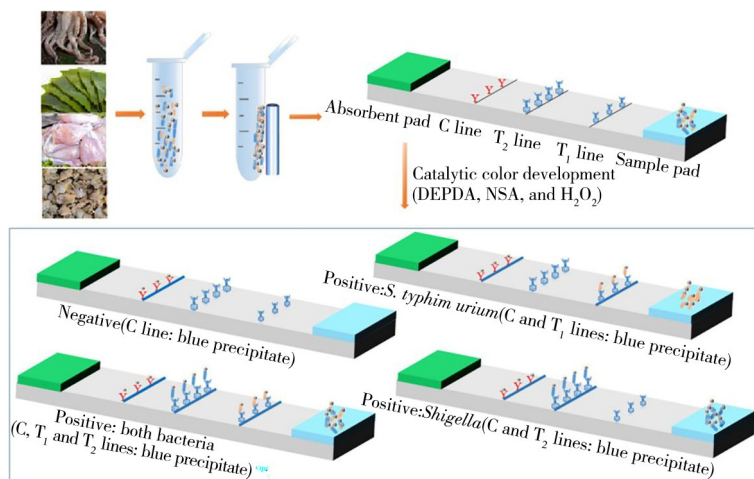


图6 用于视觉双重检测水产品中鼠伤寒沙门氏菌和志贺氏菌的噬菌体LFA生物传感器示意图^[96]

Fig. 6 Schematic of a phage-based LFA biosensor for visual dual detection of *Salmonella Typhimurium* and *Shigella* in aquatic products^[96]

2.6 生物胺

生物胺是水产品在腐败过程中由微生物产生的一类低分子量含氮化合物^[97], 包括组胺、腐胺、尸胺等^[98], 是评价水产品新鲜度和安全性的重要指标。这类物质对人体有毒害, 中毒症状包括恶心、头痛和肾中毒等^[99]。水产品中生物胺的检测要求快速、低成本、可现场操作, 纸基传感器在该领域检测中展现出独特潜力。研究者们开发了高性能功能材料用于对生物胺的快速响应, Mairal-Lerga等^[100]通过截短优化组胺适配体, 并结合部分互补的捕获探针, 构建了竞争型侧流层析试纸条。样品中存在组胺时, 适配体优先结合组胺, 导致检测线信号减弱。该试纸条对鱼肉提取液中组胺的视觉检测限为0.9 $\mu\text{g/L}$, 分析时间小于10 min, 且与腐胺、尸胺等其他生物胺无交叉反应, 已成功应用于金枪鱼、沙丁鱼等罐头样品的检测。Geng等^[101]研究了一种用于组胺检测的荧光检测试纸。其检测原理为: 组胺的氨基与醛基快速形成席夫碱($<1\text{ s}$), 同时咪唑与羟基形成氢键, 打开荧光素的内酯环, 荧光由淡蓝增强为亮绿。该纸基芯片在365 nm紫外灯下的裸眼检测限低至5.7 $\mu\text{g/L}$, 并成功应用于鲫鱼、对虾等样品的组胺快速检测。Dong等^[102]构建了一种基于智能手机辅助和双酶体系的智能比色纸基次黄嘌呤生物传感器, 用于虾类新鲜度的高效监测, 如图7所示。黄嘌呤氧化酶(XOD)催化次黄嘌呤(Hx)产生 H_2O_2 , NiPt纳米酶将 H_2O_2 转化为羟基自由基, 氧化无色TMB为蓝色产物, 结合壳聚糖修饰的滤纸和智能手机RGB分析即可实现次黄嘌呤的定量检测, 检测限为1.32 mg/L, 该法可实现虾样品的实时新鲜度评估, 结果与HPLC吻合。

2.7 其他污染物检测

水产品还可经由受污染水体、沉积物等环境介质被动富集多氯联苯、多环芳烃、全氟及多氟烷基物质、微塑料等有害化学物^[103]。这些污染物并非养殖过程直接投入, 而是具有难降解、高脂溶性和强生物富集性^[104-105], 并可通过食物链传递, 最终危及人体健康。目前该类物质的检测主要依赖气相/液相色谱-串联质谱法, 纸基传感器在水产品中此类污染物检测方面的研究尚处于起步阶段, 报道相对

较少。而针对上述不足,研究者已开始探索纸基传感器的可行方案,如 Adade 等^[106]在疏水纸基底上沉积金纳米颗粒,构建了柔性纸基表面增强拉曼散射传感器,并结合深度学习算法进行数据分析。该传感器对二苯并(a, h)蒽(DbA)和苯并(b)荧蒽(BbF)的检出限分别为 0.09 $\mu\text{g/L}$ 和 0.10 $\mu\text{g/L}$, 分析过程快速简便,且与乙酰甲胺磷、苯并(a)芘等常见干扰物无显著交叉反应,并成功应用于贻贝实际样品的检测。Khachornsakkul 等^[107]将碳点和分子印迹聚合物(MIP)集成于纸基微流控芯片,构建了光热纸基微流控分析装置,并结合近场通信系统实现温度信号的无线读取。该传感器利用 MIP 特异性捕获全氟辛酸磺酸(PFOS),通过 PFOS 结合后碳点的光热效应增强所引起的温度变化实现定量检测。该传感器对 PFOS 的检出限低至 7.0 ng/L,分析时间小于 15 min,且与其他全氟化合物(PFOA、PFHxS)及常见基质干扰物无交叉反应。尽管该研究目前主要应用于饮用水、果汁及牛奶等实际食品样品的检测,但其高灵敏度和抗蛋白干扰能力充分证明了其拓展至水产品检测的潜力。

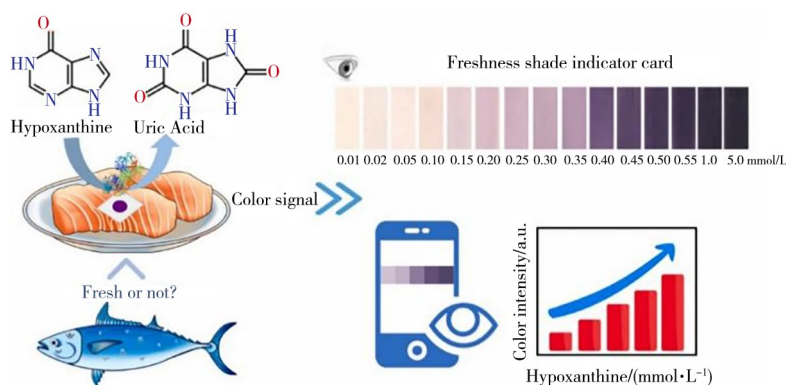


图 7 基于壳寡糖改性硝化纤维表面的次黄嘌呤酶传感器的绿色制造及其在鱼新鲜度检测中的应用示意图^[102]

Fig. 7 Schematic of green manufacturing of a hypoxanthine enzyme sensor for fish freshness based on modified nitrocellulose surface with chito-oligosaccharide^[102]

3 结论与展望

面对全球范围内日益凸显的水产品质量安全挑战,纸基传感器凭借其低成本、易操作、便携性强等突出优势,成为实验室分析方法的重要补充,尤其适用于水产品现场快速检测。本文综述了该技术在水产品检测中的最新进展。从最初简单的浸渍纸芯片,发展为具备预处理能力的侧流层析纸芯片,进一步演进为可实现复杂流体操控与多通道检测的微流控纸芯片。其主要基于光谱法和电化学法输出信号,配合肉眼判读、智能设备辅助、便携式传感设备等实现定性、定量或半定量分析。目前,纸基传感器已成功用于水产品中重金属离子、农兽药残留物、非法添加物、生物毒素、致病菌、生物胺及其他污染物的检测。但该技术仍面临灵敏度不足和样品基质干扰的严峻挑战,且纸基材料难以有效处理复杂样品(如富集、净化),对痕量污染物的检出限偏高。未来纸基传感器研究将集中于提升灵敏度和抗干扰能力,集成简易样品前处理单元,发展多通道或阵列式检测平台,支持多种目标物同时筛查,开发多样化的传感策略,推动现场快速、定量、智能化检测。通过材料科学、化学/生物识别技术、微流控芯片集成与人工智能等多学科协同创新,纸基传感器有望在水产品安全快速检测领域发挥更重要的作用。

参考文献:

- [1] Wang C, Sun S, Wang P, Zhao H, Li W. *Talanta*, **2024**, 269: 380.
- [2] Lai H S, Li G K, Zhang Z M. *J. Sep. Sci.*, **2021**, 44(6): 1174–1194.
- [3] Li Y R, Mi C X, Chen J, Jiao R W, Li X, Ren D D, He Y H, Wang Q K, Wu L, Zhou H. *Food Sci.* (李盈柔, 米春孝, 陈菊, 矫芮文, 李想, 任丹丹, 何云海, 汪秋宽, 武龙, 周慧. 食品科学), **2024**, 45(5): 314–323.
- [4] Wang X Y, Chen Y L, Xiao X H, Li G K. *Chin. J. Chromatogr.* (王兴益, 陈彦龙, 肖小华, 李攻科. 色谱), **2021**, 39(1): 34–45.
- [5] Xu M J, Lin H S, Huang H. *Food Mach.* (许美津, 林海生, 黄和. 食品与机械), **2025**, 41(8): 197–205.
- [6] Wang C K, Sun S Y, Wang P, Zhao H W, Li W L. *Talanta*, **2024**, 269: 125462.
- [7] Yin Z S, Dai Z T, Zhou Y, Chen S S, Zhang H C. *Food Ferment. Ind.* (殷泽生, 戴振庭, 周瑜, 陈舜胜, 张洪才. 食品与发酵工业), **2022**, 48(18): 329–336.

- [8] Pan Y, Mao K, Hui Q, Wang B, Cooper J, Yang Z. *Trends Anal. Chem.*, **2022**, 157: 116760.
- [9] Aghababae M, Sarrami Froushani E, Changani Z, Gounani Z, Salehi Mobarakeh M, Hadady H, Khedri M, Maleki R, Asadnia M, Razmjou A. *Biosens. Bioelectron.*, **2023**, 226: 115131.
- [10] Wang L, Zhou Z, Niu J, Peng J, Wang T, Hou X. *Talanta*, **2024**, 278: 126412.
- [11] Li W, Zhang X, Li T, Ji Y, Li R. *Anal. Chim. Acta*, **2021**, 1148: 238196.
- [12] Nghia N N. *Talanta*, **2026**, 297: 128816.
- [13] Dubourg G, Radović M, Vasić B. *Nanomaterials*, **2021**, 11: 80.
- [14] Lu Z Y, Li G K, Hu Y F. *New J. Chem.*, **2022**, 46: 19153–19160.
- [15] Hu W Y, Chen Y L, Xia L, Hu Y F, Li G K. *Microchim. Acta*, **2022**, 189: 199.
- [16] Rejeeth C, Pundir R K, Singhal P, Prakash D V S. *Chromatographia*, **2025**, 88: 531–554.
- [17] Wang K, Meng X, Yan X, Fan K. *Nano Today*, **2024**, 54: 102145.
- [18] Ding R, Cheong Y H, Ahamed A, Lisak G. *Anal. Chem.*, **2021**, 93(3): 1880–1888.
- [19] Alahmad W, Cetinkaya A, Kaya S I, Varanusupakul P, Ozkan S A. *Trends Anal. Chem.*, **2024**, 170: 117475.
- [20] Ataide V N, Pradela Filho L A, Guinati B G S, Moreira N S, Gonçalves J D, Ribeiro C M G, Grasseschi D, Coltro W K T, Salles M O, Paixão T R L C. *Trends Anal. Chem.*, **2023**, 164: 117091.
- [21] Wang Y, Rong Y, Ma T, Li L, Li X, Zhu P, Zhou S, Yu J, Zhang Y. *Biosens. Bioelectron.*, **2023**, 236: 115400.
- [22] Ghasemi F, Fahimi-Kashani N, Bigdeli A, Alshatteri A H, Abbasi-Moayed S, Al-Jaf S H, Merry M Y, Omer K M, Hormozi-Nezhad M R. *Anal. Chim. Acta*, **2023**, 1238: 340640.
- [23] Patel S, Jamunkar R, Sinha D, Monisha, Patle T K, Kant T, Dewangan K, Shrivastava K. *Trends Environ. Anal. Chem.*, **2021**, 31: e00136.
- [24] Zhao Y, Zhang S, Li N, Deng W, Li M, Qin T, Wang L, Xu Z, Liu B. *Spectrochim. Acta A*, **2024**, 313: 124157.
- [25] de la Jara M, Castro L A, Guimarães M C C, da Costa P B B, Tarley C R T, de Figueiredo E C. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **2022**, 29: 46487–46508.
- [26] Ma T, Ren S, Wang Y, Yu H, Li L, Li X, Zhang L, Yu J, Zhang Y. *Biosens. Bioelectron.*, **2023**, 235: 115384.
- [27] Selvakumar B, Kathiravan A. *Talanta*, **2021**, 235: 122733.
- [28] Gautam N, Kotkar A, Sarkar A, Dixit A, Singh G. *Cellulose*, **2025**, 32: 9529–9542.
- [29] Liu Y, Lu S, Zhang Z, Yang Z, Cui X, Liu G. *Lab Chip*, **2023**, 23: 3328–3352.
- [30] Cao Y, Li L, Suo Y P, Li Q Y, Wang Q L, Zhang S, Xing C, Song L P. *J. Instrum. Anal.* (曹悦, 李龙, 索一平, 李庆尧, 王青龙, 张爽, 邢超, 宋丽萍. 分析测试学报), **2025**, (11): 2223–2228.
- [31] Gao F, Ye S, Huang L, Gu Z. *J. Mater. Chem. B*, **2024**, 12: 6735–6756.
- [32] Hu J, Wang S, Wang L, Li F, Pingguan-Murphy B, Lu T J, Xu F. *Biosens. Bioelectron.*, **2014**, 54: 585–597.
- [33] Rink S, Baemner A J. *Anal. Chem.*, **2023**, 95: 1785–1793.
- [34] Nan X, Yao X, Yang L, Cui Y. *Analyst*, **2023**, 148: 4573–4590.
- [35] Huang Y, Li R, Zhu W, Zhao J, Wang H, Zhang Z, Lin H, Li W, Li Z. *Food Chem.*, **2024**, 440: 138275.
- [36] Zhang T, Xing Y, Yao J, Yang Z, Wang J, Chen L, Yao L. *Food Chem.*, **2025**, 492: 145510.
- [37] Martinez A W, Phillips S T, Butte M J, Whitesides G M P. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, 46: 1318–1320.
- [38] Zhang F, Zhao G, Ouyang Q, Chen S, Yan Z. *Lab Chip*, **2026**, 26: 1471–1488.
- [39] Modha S, Castro C, Tsutsui H. *Biosens. Bioelectron.*, **2021**, 178: 113026.
- [40] Rypar T, Bezdekova J, Pavelicova K, Vodova M, Adam V, Vaculovicova M, Macka M. *Talanta*, **2023**, 254: 124911.
- [41] Ray R, Prabhu A, Prasad D, Garlapati V K, Aminabhavi T M, Mani N K, Simal-Gandara J. *Food Chem.*, **2022**, 390: 133173.
- [42] Chen T, Sun C, Abbas S C, Alam N, Qiang S, Tian X, Fu C, Zhang H, Xia Y, Liu L, Ni Y, Jiang X. *Anal. Chim. Acta*, **2024**, 1321: 342877.
- [43] Praoboon N, Siriket S, Taokaenchan N, Kuimalee S, Phaisansuthichol S, Pookmanee P, Satienerperakul S. *Food Chem.*, **2022**, 366: 130590.
- [44] Cui Y, Cui K, Shi L, Yan H, Han D. *Trends Food Sci. Technol.*, **2025**, 164: 105259.
- [45] Laishram P, Hong G B. *J. Mol. Liq.*, **2025**, 439: 128813.
- [46] Mohan B, Sasaki Y, Minami T. *Anal. Chim. Acta*, **2024**, 1313: 342741.
- [47] Kant T, Shrivastava K, Tejwani A, Tandey K, Sharma A, Gupta S. *Nanoscale*, **2023**, 15: 19016–19038.
- [48] Tang X, Zuo J, Yang C, Jiang J, Zhang Q, Ping J, Li P. *Trends Anal. Chem.*, **2023**, 165: 117144.
- [49] Alahmad W, Sahragard A, Varanusupakul P. *Biosens. Bioelectron.*, **2021**, 194: 113574.
- [50] Li X, Yuan M, Li M, Li J, Zhang S, Xu F. *Talanta*, **2025**, 298: 128802.
- [51] Liu X, Zhao B, Liu X, Cheng Z, Yang X, Zhang X, Feng X. *Talanta*, **2025**, 285: 127391.
- [52] Zhao P, Liu H, Zhu P, Ge S, Zhang L, Zhang Y, Yu J. *Sens. Actuators B*, **2021**, 330: 130174.
- [53] Qin Y, Huang P, Wu F Y. *Sens. Actuators B*, **2022**, 365: 131911.
- [54] Li Y, Jiang X, Li Y, Yan X, Tang L, Sun X, Zhong K, Li X, Li J. *Food Chem.*, **2024**, 458: 140239.
- [55] Gu J, Han T, Peng X, Kang H, Dong L. *Talanta*, **2024**, 268: 125359.

- [56] Gao X, Ma Z, Sun M, Liu X, Zhong K, Tang L, Li X, Li J. *Food Chem.*, **2022**, 369: 130964.
- [57] Wen Z, Hu X, Yan R, Wang W, Meng H, Song Y, Wang S, Wang X, Tang Y. *Food Chem.*, **2023**, 406: 135081.
- [58] Arsawiset S, Cheubong C, Teepoo S. *Food Chem.*, **2025**, 464: 140910.
- [59] Han J Z, Li Y R, Luo L, Guan T, Lei H T, Cai W Y, Wang B Z, Xu Z L. *J. Instrum. Anal.* (韩金治, 李亚茹, 罗林, 关甜, 雷红涛, 蔡伟谊, 王炳志, 徐振林. 分析测试学报), **2023**, 42(12): 1598–1606.
- [60] Chu X, Feng Z Z, Jiang Y S, Wang H, Lü L Q, Xu D. *Acta Hydrobiol. Sin.* (楚馨, 冯梓钊, 姜有声, 王浩, 吕利群, 许丹. 水生生物学报), **2023**, 47(6): 866–873.
- [61] Wu M, Wu Y, Liu C, Tian Y, Fang S, Yang H, Li B, Liu Q. *Aquaculture*, **2021**, 539: 736563.
- [62] Jiang M, Xie J, Zhang C, Liu Y, Wang G, Wang W, Xu W. *Aquaculture*, **2025**, 608: 742704.
- [63] Lei X, Xu X, Wang L, Liu L, Kuang H, Xu L, Xu C. *Food Chem.*, **2023**, 411: 135475.
- [64] Liu X, Xia F, Zhang S, Cheng Y, Fan L, Kang S, Gao X, Sun X, Li J, Li X, Zhu L. *Food Chem.*, **2023**, 402: 134235.
- [65] Zhang M, Wang X, Liu S, Riaz T, Chen Q, Ouyang Q. *Biosens. Bioelectron.*, **2024**, 254: 116192.
- [66] Kusonpan P, Kunpatee K, Chailapakul O, Kalcher K, Ortner A, Chaiyo S, Samphao A. *Talanta*, **2025**, 292: 127919.
- [67] Ma Y Q, Han Y Y, Zhang W Y, Zhou Y R, Deng B, Yang X J. *China Food Saf. Mag.* (马颖清, 韩奕奕, 张维谊, 周雨瑞, 邓波, 杨晓君. 食品安全导刊), **2024**, 8: 179–181.
- [68] Huo B Y, Hu Y L, Gao Z X, Li G K. *Talanta*, **2021**, 222: 121565.
- [69] Luo T, Huang S, Bai S, Feng B, Huang W, Cheng X, Liu M, Yao H, Zeng W. *Food Chem.*, **2024**, 447: 138954.
- [70] Paisuwan W, Srithadindang K, Kodama T, Sukwattanasinit M, Tobisu M, Ajavakom A. *Spectrochim. Acta A*, **2024**, 322: 124706.
- [71] Rasheed S, Hussain K, Arif S, Umar A R, Anwar S B, Muhammad H, Yasmeen K, Tuzen M, Shah M R. *Food Chem.*, **2025**, 464: 141921.
- [72] Yu Z N, Huang L, Zhang Z M, Li G K. *Anal. Chem.*, **2021**, 93: 13072–13079.
- [73] Hu W Y, Xia L, Hu Y F, Li G K. *Sens. Actuators B*, **2024**, 402: 135131.
- [74] Chen B S, Tan R X, Zhong Y H, Hu Y F, Li G K. *Talanta*, **2024**, 267: 125217.
- [75] Zeng S, Chen Z, Huang L, Li C, Wang P, Qin D, Gao L. *Food Chem.*, **2024**, 449: 139215.
- [76] Tong X, Lin X, Duan N, Lv Z, Wang Z, Wu S. *Sens. Actuators B*, **2023**, 377: 134691.
- [77] Pan Y, Fei D, Liu P, Guo X, Peng L, Wang Y, Xu N, Wei X. *Food Anal. Methods*, **2021**, 14: 2616–2622.
- [78] Tang L, Dong J W, Xia L, Li G K. *Sens. Actuators B*, **2025**, 441: 137987.
- [79] Huang S M, Zhou P P, Hu Y F, Li G K, Xia L. *Anal. Chim. Acta*, **2022**, 1225: 340249.
- [80] Pang S, Yu Y, You J, Wu M, Wu W, Liang Y. *Spectrochim. Acta A*, **2025**, 343: 126565.
- [81] Mei Q, Ma B, Li J, Deng X, Shuai J, Zhou Y, Zhang M. *Food Chem.*, **2024**, 439: 138171.
- [82] Huang S M, Wang X Q, Zhang B, Xia L, Chen Y, Li G K. *J. Chromatogr. A*, **2024**, 1721: 464849.
- [83] Tian Y, Du L, Zhu P, Chen Y, Chen W, Wu C, Wang P. *Biosens. Bioelectron.*, **2021**, 176: 112899.
- [84] Bian Y, Zhang Y, Feng X S, Gao H Y. *Food Chem.*, **2024**, 438: 137995.
- [85] Abdurvakhidov A, Campàs M. *Talanta*, **2026**, 300: 129237.
- [86] Noirmain F, Dano J, Hue N, Gonzalez–Jartin J M, Botana L M, Servent D, Simon S, Aráoz R. *Anal. Chim. Acta*, **2022**, 1221: 339941.
- [87] Mills C, Dillon M J, Kulabhusan P K, Senovilla–Herrero D, Campbell K. *Environ. Sci. Technol.*, **2022**, 56: 12210–12217.
- [88] Zheng C, Ge R, Wei J, Jiao T, Chen Q, Chen Q, Chen X. *Food Chem.*, **2023**, 430: 136999.
- [89] Huo B Y, Xia L, Hu Y L, Li G K. *Biosens. Bioelectron.*, **2024**, 255: 116227.
- [90] Xu Z, Wu T, Wang B, Wang Q, Wang S, Wang C, Gu B. *Anal. Chem.*, **2026**, 98(9): 4191–4204.
- [91] Yu Q. *China Food Ind.* (余权. 中国食品工业), **2023**, (2): 55–58.
- [92] Li W, Xu Z, He Q, Pan J, Zhao Y, Liu W, Li D. *Aquaculture*, **2026**, 621: 744013.
- [93] Fan R, Wang W W, Liu X, Chen G T, Yu D J, Cao X Q. *Food Eng.* (范蕊, 王文文, 刘潇, 陈国通, 于丹瑾, 曹雪琴. 食品工程), **2024**, (3): 14–16, 33.
- [94] Zhu H, Li J W, Sheng X Z, Tang X Q, Xing J, Zhan W B. *J. Ocean Univ. China: Nat. Sci.* (朱慧, 李嘉文, 绳秀珍, 唐小千, 邢婧, 战文斌. 中国海洋大学学报: 自然科学版), **2021**, 51(3): 24–33.
- [95] Yang X, Zhao P, Dong Y, Chen S, Shen H, Jiang G, Zhu H, Dong J, Gao S. *Food Microbiol.*, **2021**, 98: 103664.
- [96] Chen K, Zhou L, Bowman J, Kocharunchitt C, Chen J, Zalán Z, Pan X, Shi H. *Microchem. J.*, **2025**, 215: 115088.
- [97] Hu W Y, Xia L, Hu Y F, Li G K. *Talanta*, **2024**, 266: 125057.
- [98] Fan L, Chen Y, Zeng Y, Yu Z, Dong Y, Li D, Zhang C, Ye C. *Food Chem.*, **2024**, 460: 140562.
- [99] Yang F, Xu L, Dias A C P, Zhang X. *Food Chem.*, **2021**, 358: 129196.

- [100] Mairal-Lerga T, Bermudo Redondo MC, Skouridou V, Jauset-Rubio M, O'Sullivan C K. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 494: 138540.
- [101] Geng J, Huang Z, Shen Q, Xu C, Zhang L, Wei C, Fu C, An W, Yu C. *Talanta*, **2024**, 272: 126941.
- [102] Dong W, Feng R, Pang J, Wei K, Li J, Sun J, Wang S, Mao X. *Food Chem.*, **2025**, 491: 145112.
- [103] Du J, Huang H, Gong X H, Zhang X Z. *Chin. Fish. Qual. Stand.* (杜静, 黄会, 宫向红, 张秀珍. 中国渔业质量与标准), **2019**, 9(2): 44-61.
- [104] Huang X J, Wei S L, Xie C S, Huang S W, Zhang Q Z. *J. Instrum. Anal.* (黄象金, 韦寿莲, 谢春生, 黄桑维, 张庆珍. 分析测试学报), **2025**, (7): 1331-1337.
- [105] Lou T T, Huang L, Su Y Z, Liu J, Li H T, Zhao P Y. *Chin. J. Chromatogr.* (娄婷婷, 黄琳, 栗有志, 刘俊, 李海涛, 赵品瑶. 色谱), **2025**, 43(8): 881-893.
- [106] Adade S Y-S S, Lin H, Nuneckpeu X, Johnson N A N, Agyekum A A, Zhao S G, Teye E, Sun Q Q, Kwadzokpui B A, Ekumah J-N, Li H H, Chen Q S. *Food Control*, **2025**, 168: 110966.
- [107] Khachornsakkul K, Trakoolwilaian T, Del-Rio-Ruiz R, Friesen E, Dungchai W, Leelasattarakul T. *ACS Sens.*, **2025**, 10: 5008-5018.

(责任编辑: 盛文彦)