DOI:10.12441/spyswjs.20251216001 [文章编号] 1673-1689(2026)02-0055-11

光电化学传感器在食品安全检测中的应用

张 涛[1] 孙 忠[2] 杨光绪[2] 聂树强[2] 袁京磊[3*]

(1. 平邑县行政审批服务局,山东 临沂 273300; 2. 蒙阴县检验检测中心,山东 临沂 276200; 3. 平邑县检验检测中心,山东 临沂 273300)

摘要:食品安全是关乎国计民生的全球性重大问题,快速、灵敏、准确地检测食品中的有害物质是保障食品安全的关键环节。光电化学传感器是将光电技术与生物传感技术相结合发展起来的一种新型光电分析传感器。该类传感器兼具光化学的灵敏性与电化学的简便性,凭借其灵敏度高、设备简单、易于微型化及成本低等优势,在食品安全检测领域得到了广泛应用。作者综述了光电化学传感器在食品安全检测中的应用实例,探讨了其在食品安全检测中面临的挑战,并展望了未来的研究方向。

关键词:光电化学传感器;食品安全;检测

Research Progress in the Application of Photoelectrochemical Sensors in Food Safety Detection

ZHANG Tao[1] *SUN Zhong*[2] *YANG Guangxu*[2] *NIE Shuqiang*[2] *YUAN Jinglei*[3*]

(1. Pingyi County Bureau of Administrative Examination and Approval Service, Linyi 273300, China; 2. Mengyin County Center for Inspection and Testing, Linyi 276200, China; 3. Pingyi County Center for Inspection and Testing, Linyi 273300, China)

Abstract: Food safety is a major global issue concerning the national economy and people's livelihood. Rapid, sensitive, and accurate detection of harmful substances in food is the key to ensuring food safety. As an emerging analytical technique, photoelectrochemical sensors combine photoelectric technology with biological sensing technology and have developed into a new type of photoelectric analysis sensors. They integrate the sensitivity of photochemistry and the simplicity of electrochemistry and have shown widespread applications in food safety detection due to their outstanding advantages such as high sensitivity, simple equipment, easy of miniaturization, and low costs. The author reviews the application examples and discusses the challenges of photoelectrochemical sensors in food safety detection, and makes an outlook on the future research directions.

Keywords: photoelectrochemical sensor; food safety; detection

食品安全是关乎国计民生、公共健康、经济发展和社会稳定的全球性重大问题。随着全球食品供应链日益复杂、工业化进程不断加快、消费者对食品品质与安全的关注持续提升,食品安全的重要性愈发凸显[1-2],同时也面临着前所未有的挑战。在从农田到餐桌的漫长过程中,食品原材料种植、食品生产、包装、运输、贮存、流通等环节均可能受到化学性、物理性、生物性等各种有害因素的污染。这些污染物不仅会引发急性中毒或食源性疾病,长期低剂量暴露还可能诱发癌症,对人民群众的生命健康构成了严重威胁。因此,食品安全检测技术对筛查食品中的各类有害物质至关重要。

目前,食品安全检测领域常用的分析技术主

通信作者:袁京磊(1988—),男,硕士,正高级工程师,主要从事食品安全检测研究。E-mail:jczx4217001@163.com

收稿日期:2025-12-16 **修回日期:**2026-01-13

要包括高效液相色谱法[3]、气相色谱法等。这些方法虽可实现对食品中有害物质的检测，但普遍存在操作烦琐、耗时长、对专业人员依赖度高、难以实现现场快速检测等局限性。因此，研发快速、灵敏、精准且易于操作的食品安全检测新技术与新方法，对保障食品安全具有重要意义。近年来，光电化学（PEC）传感器凭借操作简单、成本低、灵敏度高、响应快、选择性强及易于微型化[4]等优势，已被广泛应用于食品安全检测领域。

1 PEC 传感器

PEC 分析系统主要由光源（如氙灯、单色器等）、检测系统（PEC 电池、电化学工作站）及信号采集系统（计算机系统）组成。在光源激发下，PEC 传感器工作电极表面的光电活性材料会发生电荷和空穴的分离及电荷转移，电子从材料的价带跃迁至导带，形成光生电子-空穴对，该过程促使电极表面发生氧化还原反应，并在外电路中产生电流。当光活性材料与目标物发生相互作用时，PEC 响应信号与目标物浓度存在特定的函数关系，进而实现对目标物的检测[5]，见图 1。光生电流的产生主要通过 2 种机制实现：一是在还原剂存在时，光激发态材料在光照下被还原至基态，引发 PEC 反应并产生连续的光生电流；二是在电子供体或受体存在时，激发态分子与猝灭分子之间发生电子转移反应，反应产生的氧化态或还原态分子在电极表面获得或失去电子，使材料恢复至基态并产生连续光电流[6]。

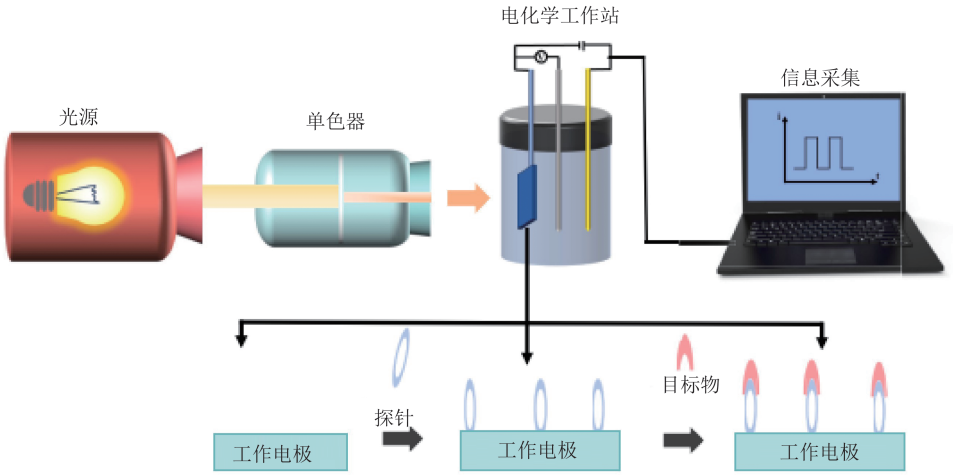
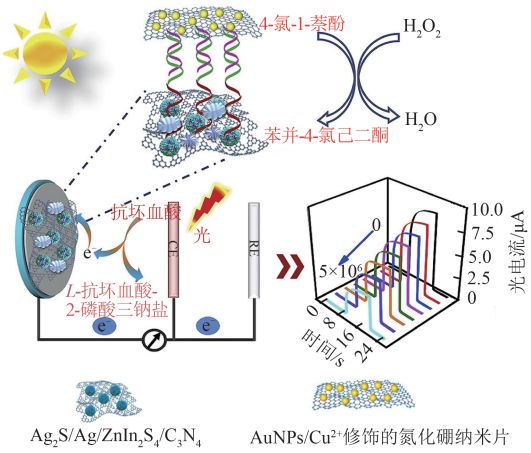


图 1 PEC 传感器的通用仪器和工作原理

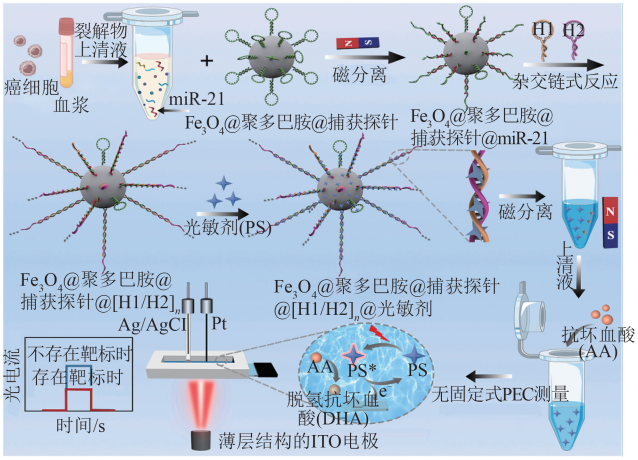
Fig. 1 General instrumentation and working principle of PEC sensor

与传统电化学技术相比，PEC 传感器以光为激发源、光电流为检测信号，这一特性可有效分离激发光源与检测信号，从而降低背景信号并提高检测灵敏度。PEC 传感器的传感原理主要分为信号关闭模式、信号开启模式、光电流极性切换模式[7]。其中，信号关闭模式是 PEC 传感器最常用的方法，目标物浓度的变化会引起光活性材料表面特性及电子供体或受体浓度发生改变，进而影响光电流信号的响应值。信号开启模式虽受背景信号干扰，但具有提高检测灵敏度与准确性的优势，其检测机制是通过识别目标物并利用光活性材料增强光电流信号，光电流信号的变化与目标物浓度呈正相关。光电流极性切换模式通过调节入射波长[8-9]、改变偏压[10-11]、引入靶标[12-13]实现，其中改变偏压是最常用策略，能显著提高 PEC 传感器的精准度、可靠性和抗干扰能力。

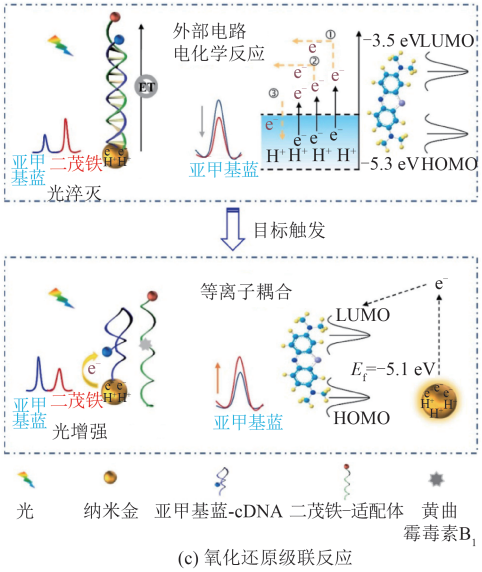
根据目标物浓度与 PEC 信号响应值的对应关系，PEC 传感器的传感模式可分为信号减弱型、信号增强型和光电流极性转换型。在实际检测中，靶标浓度通常较低，其产生的光电流信号强度不足以实现精准检测，且难以区分背景信号的干扰。因此，为大幅提高传感器的灵敏度、降低检测限，实现对低浓度靶标的有效检测，可在传感过程中通过酶催化反应[14]、核酸循环扩增[15]、氧化还原级联反应[16]、能量共振转移[17]、异质结复合材料[18]等方式实现信号放大，见图 2。



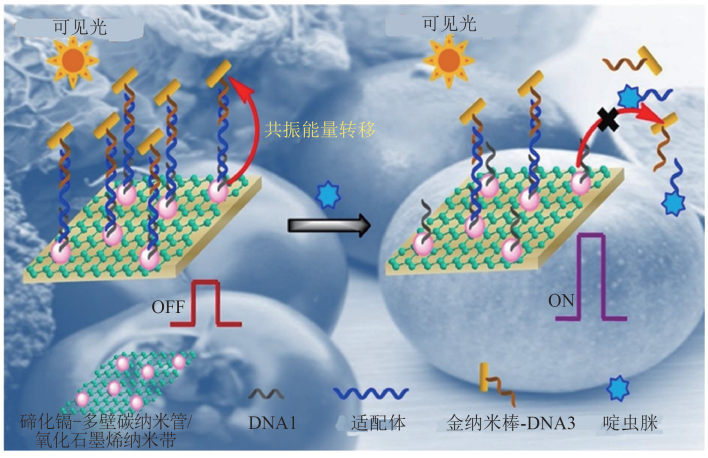
(a) 酶催化反应



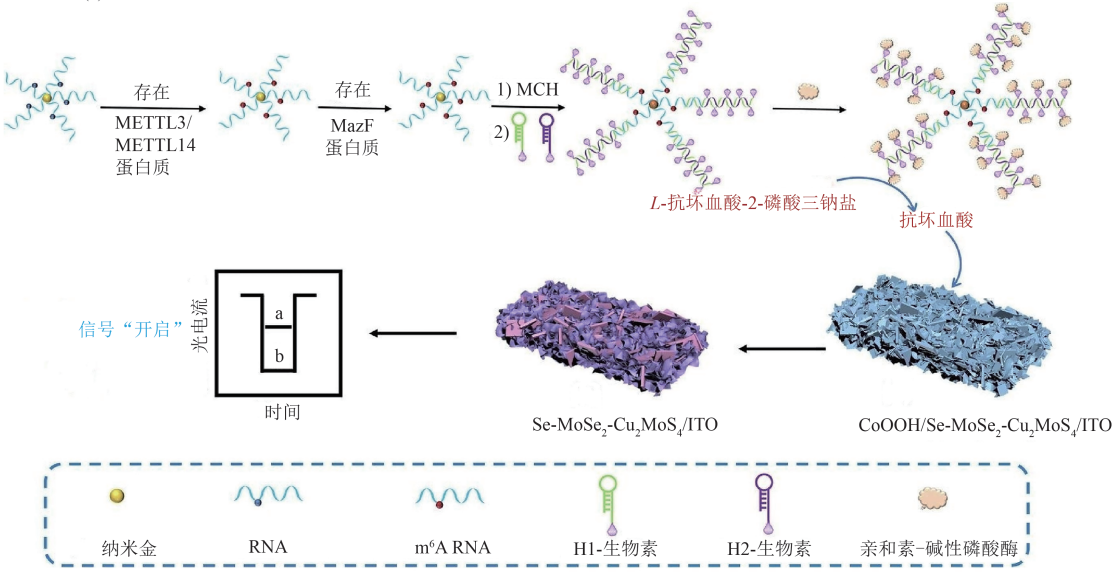
(b) 核酸循环扩增



(c) 氧化还原级联反应



(d) 能量共振转移



(e) 异质结复合材料

图 2　PEC 传感器信号放大策略工作原理图

Fig. 2　Working principle diagrams of signal amplification strategies of PEC sensors

异质结复合材料在PEC传感器中应用较为广泛，可对检测灵敏度产生一定的影响。异质结由2种不同的半导体材料组成，窄带隙与宽带隙光电活性材料耦合可显著提高光电转换效率[19]。将2种或2种以上的光电活性材料结合，使其能带值相互匹配，能够加速光生电子-空穴对的分离和转移。光生电子在光激发下可从窄带隙迁移到宽带隙，既加速了光生电子的传输速度，又提高了分离电子的概率，进而大幅提升光电转换效率与PEC性能[20-21]。此外，异质结可提供较大的接触面，缩短载流子传输距离。良好的能带对齐方式会产生大量内置电场，为载流子的有效分离和迁移提供重要的驱动力，从而进一步提高检测灵敏度。例如，Li等[22]设计了具有增强界面电荷转移能力的三维（3D）/二维（2D）$CuInS_2$/红磷纳米片（$CuInS_2$/RP NS）n-n异质结功能材料，用于构建PEC适配体传感器，实现了对环丙沙星的检测。其中，3D $CuInS_2$作为导电层，可提供优异的电子导电性及电子吸收、传输性能；超薄的RP NS充当传输层，能够增强载流子迁移率；而3D/2D异质结则保证了较大的接触面，缩短了载流子传输距离。当$CuInS_2$/RP NS被光照射时，$CuInS_2$和RP NS吸收光并产生光生电子-空穴对。在内置电场的影响下，光生电子可从RP NS的导带转移到$CuInS_2$的导带，同时这些空穴被移动到RP NS的价带，因此该PEC适配体传感器具有较高的灵敏度。

除对灵敏度产生影响外，异质结还会影响PEC传感器的选择性，主要体现在3个方面：一是异质结中的元素可与靶标中的元素形成特定的共价键[23]，或与靶标中的化学键相互作用形成配位化合物[24]，从而为靶标提供特异性结合位点，实现对靶标的特异性检测；二是异质结表面可为部分生物识别元件提供结合位点，便于识别探针的固定，进而完成对靶标的特异性识别与固定[25]；三是异质结的能带结构也会影响PEC传感器的选择性。例如，Qiao等[26]基于g-C_3N_4/$BiVO_4$异质结，构建了一种“信号开启”的PEC适配体传感器，用于检测四环素（TC）。TC可通过共价相互作用紧密组装在g-C_3N_4/$BiVO_4$异质结表面，以获得稳定可靠的信号响应。当检测体系中存在TC时，TC可被适配体特异性捕获，并被$BiVO_4$价带中的光生空穴直接氧化；随后，空穴被消耗，这一过程抑制了光生电子-空穴对的复合，导致更多自由电子在g-C_3N_4的导带上积累，这些电子被转移至电极后光电流信号增强，从而实现对TC的检测，该PEC适配体传感器对TC具有较高的选择性。此外，异质结通过内置电场作用能有效抑制光生载流子复合、促进电荷分离，并表现出更强的PEC响应，进而提升PEC传感器的选择性。如Feng等[27]合成了Co_3S_4/CdS异质结，用于TC的高效PEC检测与同步降解。异质结产生的内置电场能有效促进电荷分离，使Co_3S_4/CdS传感器展现出更强的PEC响应。当加入TC时，CdS组分中的空穴被TC直接消耗，特异性激活了Co_3S_4/CdS异质结的光电流信号，从而显著增强了电荷分离与传输效率。该PEC传感器在检测自来水和牛奶样品中的TC时展现出优异的选择性和稳定性。

2 PEC传感器在食品安全检测中的应用

2.1 PEC传感器在霉菌毒素检测中的应用

PEC传感器可实现对霉菌毒素的检测，且具有良好的重复性、稳定性和选择性。将适配体作为识别元件应用到PEC传感器中，可构建PEC适配体传感器。由于适配体能与靶标发生高亲和力、高特异性结合，因此PEC适配体传感器具有较强的特异性、较宽的线性范围和较低的检测限（LOD）。原位生长的异质结可显著提高PEC传感器对可见光的利用率，进而改变光电流强度；而适配体与靶标的结合，使光电流信号与靶标浓度呈线性关系，从而实现对靶标的精准检测。T-2毒素是食品中常见的霉菌毒素，也是公认的最具危害性的污染物之一，长期暴露于T-2毒素可对人体消化系统、生殖系统、神经系统、免疫系统等的多个器官组织造成损伤[28]。Shang等[29]以WO_3/$CdIn_2S_4$异质结作为光阳极，开发了一种基于“on-off-on”信号响应策略的PEC适配体传感器，实现了对T-2毒素的灵敏检测，该传感器的检测范围为1×10^0~1×10^9 fg/mL，LOD为0.434 fg/mL（S/N=3）。这种“on-off-on”信号响应策略有助于增强PEC传感器的信号强度，提高检测的灵敏度与准确性。

表面等离子体共振可促进电子转移，改变PEC传感器的光电流信号，进而实现对靶标的检测。此外，等离子体引发的金属与半导体之间的共振能量转移，可提高PEC传感器对光的利用效

率，从而提升其检测性能。Xue等[30]基于具有磁性和光电特性的Fe_3O_4@Cu@Cu_2O等离子体纳米复合材料，利用表面等离子体共振可促进电子转移和共振能量转移改变光电流的原理，设计了一种检测伏马菌素B_1的PEC传感器，该传感器的检测范围为1~10 000 pg/mL，LOD为0.28 pg/mL（*S*/*N*=3）。

2.2　PEC传感器在药物残留检测中的应用

液相色谱串联质谱法、高效液相色谱法等是检测抗生素及农药残留的传统方法，这些方法存在成本高、耗时长、操作复杂且依赖精密仪器等缺点。PEC传感器在药物残留检测方面具有较高的选择性、重现性和稳定性，且成本低、操作简单、无需借助精密复杂的仪器设备。

Yang等[31]构建了一种以$W_{18}O_{49}$/CdS异质结为光阳极、BiOCl为光阴极、Au@PANI为信号放大标记的自供电PEC传感器，实现了对啶虫脒（ACT）的检测，见图3。Au@PANI可通过Au—S键与p-DNA结合，当ACT存在时，p-DNA-Au@PANI会从光电阴极表面脱离，导致光电流显著降低，从而实现信号放大。基于上述多重信号放大策略，该传感器可实现对ACT的灵敏检测；在1×10^3~1×10^9 fmol/L范围内具有良好的线性关系，LOD为65.8 fmol/L（*S*/*N*=3）。在该研究中，由$W_{18}O_{49}$/CdS异质结构成的匹配带隙结构可有效加快电荷转移速度，为光阴极提供强大且稳定的光电流响应信号；而氧空位的引入能够在光敏材料表面诱导缺陷，促进光生载流子分离，从而实现PEC传感器的信号放大。

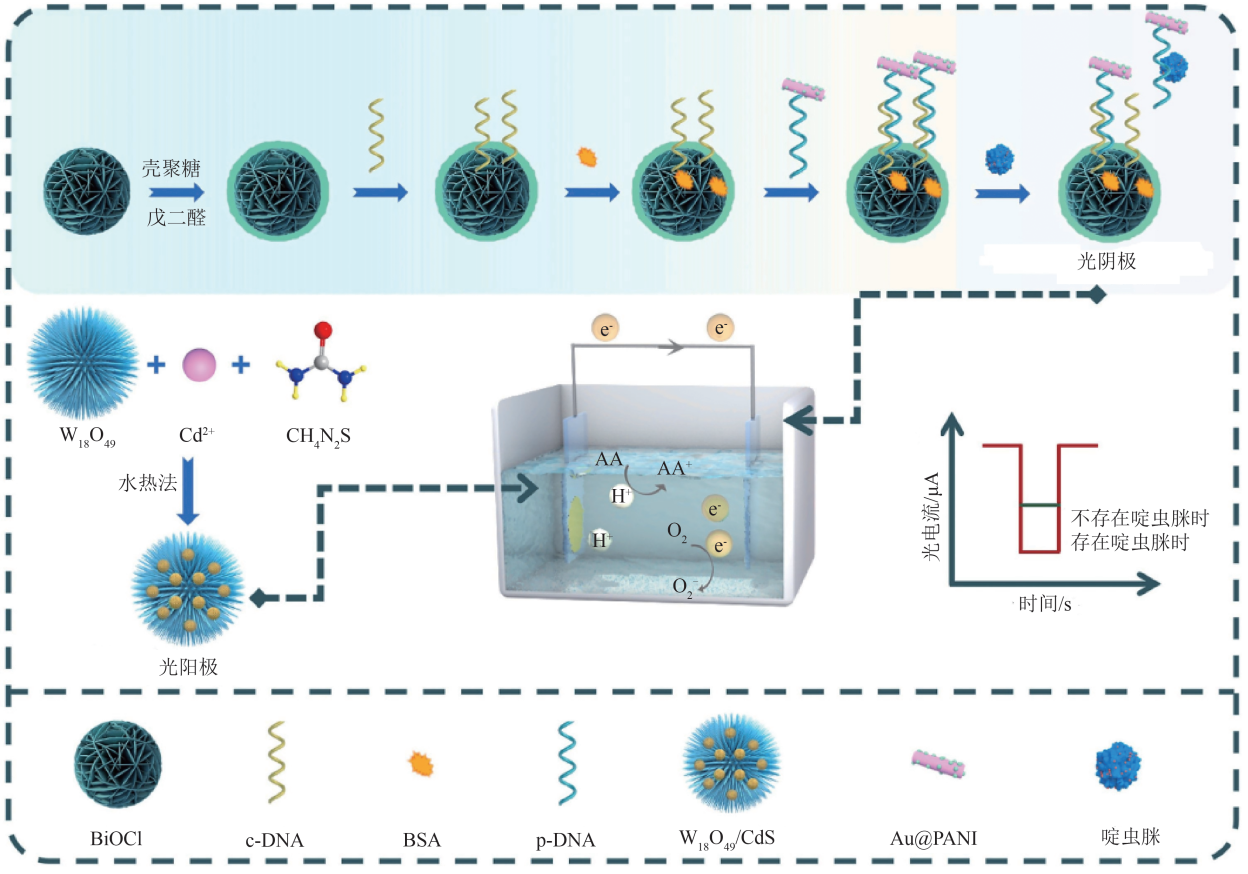


图3　检测ACT的PEC传感器构建示意图

Fig. 3　Schematic diagram of PEC sensor construction for ACT detection

食品中的抗生素残留会带来重大健康风险，因此，开发用于检测抗生素残留的PEC传感器至关重要。Huang等[32]基于还原氧化石墨烯/硒硫化钼异质结设计了检测金霉素的分子印迹聚合物PEC传感器，该传感器的检测范围为5×10^{-13}~5×10^{-9} mol/L，LOD为1.57×10^{-13} mol/L，且已应用于动物源性食品中金霉素的检测。还原氧化石墨烯可促进电子转移并有效抑制电子-空穴对的复

合，降低电子与空穴的复合概率，增强PEC传感器的光电效率，进而提高其检测灵敏度；同时，分子印迹技术可显著提高PEC传感器的选择性。PEC传感器在其他药物残留检测中的应用见表1。

表1 PEC传感器在药物残留检测中的应用

Table 1 Application of PEC sensors in drug residue detection

药物	检测范围	LOD	参考文献
磺胺嘧啶	2.0×10^{-1}~1.0×10^{3} ng/mL	0.026 ng/mL	[33]
毒死蜱	5~700 nmol/L	0.72 nmol/L	[34]
恩诺沙星	1×10^{-15}~1×10^{-9} mol/L	0.78 fmol/L	[35]
氧化乐果	2×10^{-4}~2×10^{2} nmol/L	23 fmol/L	[36]
草甘膦	1×10^{1}~1×10^{8} pmol/L	0.01 pmol/L	[37]
妥布霉素	1.0×10^{0}~1.0×10^{7} pg/mL	0.33 pg/mL	[38]
甲基对硫磷	1.0×10^{1}~1.0×10^{6} fmol/L	1.096 fmol/L	[39]
氨苄青霉素	0.5~200.0 ng/mL	0.09 pg/mL	[40]

2.3 PEC传感器在食源性致病菌检测中的应用

氧化石墨烯（GO）具有较大的表面积和良好的导电性，将其应用于PEC传感器中可提高检测灵敏度。Zhang等[41]采用法拉第笼式构建模式，设计了一种用于检测副溶血性弧菌（VP）的PEC适配体传感器；当样品中存在VP时，组装在Apt/Bi_2S_3/ITO电极上的VP适配体（Apt）会特异性捕获VP，进而将GO@Cu_2O-Apt结合到电极表面。GO@Cu_2O-Apt上的GO表面负载了大量可切换Bi_2S_3光电流极性的Cu_2O，从而实现了对VP的高选择性和高灵敏度检测，LOD为1.0 CFU/mL。此外，通过调整适配体的种类，该传感器还可用于其他食源性致病菌的检测，进一步扩大了PEC传感器在食源性致病菌检测领域的应用范围。

部分纳米酶具有优异的模拟过氧化物酶催化活性和光催化性能，可用于构建PEC-比色双模式传感器，实现对食源性致病菌的PEC与比色双模式检测。Li等[42]通过将氯化血红素沉积在TiO_2/g-C_3N_4上，成功合成了新型TiO_2-Fe-N-C纳米酶，并构建了基于纳米酶的PEC-比色双模式传感器，实现了对单核细胞增生李斯特菌的双模式检测。该双模式传感器具有线性范围（1×10^{1}~ 1×10^{7} CFU/mL）宽、LOD（PEC模式为1.33 CFU/mL，比色模式为3.20 CFU/mL）低的优势。双模式传感器的开发与应用不仅能对检测结果进行相互验证，还能为检测方法的选择提供更多参考。

2.4 PEC传感器在重金属离子检测中的应用

重金属离子可通过食物或水进入人体，进而危害人体健康。食品中重金属离子的传统检测方法主要是依据国家标准中的方法进行，需借助复杂的仪器设备，且操作烦琐、耗时较长；而PEC传感器无需复杂的仪器设备，且具有较好的分析检测性能，因此在重金属离子检测中应用广泛。Chen等[43]基于MoS_2量子点（MQDs）与TiO_2纳米棒（TNRs），设计了一种用于检测痕量Pb^{2+}的PEC传感器。MQDs与TNRs的结合有助于分离电荷载流子，并增强单相MQDs的PEC响应；Pb^{2+}的存在可改变MoS_2的能带位置，减小其带隙宽度，同时降低异质结界面区域的载流子复合率，从而有利于光电流的提升，随着Pb^{2+}浓度的增加，光电流密度也随之增大，进而实现对Pb^{2+}的检测。该传感器在1~1 000 μmol/L范围内具有良好的线性关系，LOD为48 nmol/L。

Ren等[44]设计了一种具有Fe_2O_3/CdS异质结和2条富含胸腺嘧啶DNA链的PEC传感器，实现了对Hg^{2+}的灵敏检测。在最佳条件下，该PEC传感器表现出优异的分析性能，检测范围为1×10^{0}~1×10^{5} pmol/L，LOD为0.20 pmol/L。Fe_2O_3/CdS异质结的光激发可加速Fe_2O_3、CdS和电极之间的电子转移，进而产生稳定的光电流响应信号，有效提升了PEC传感器的灵敏度、选择性和稳定性。

2.5 PEC传感器在其他有害物检测中的应用

PEC传感器在其他有害物检测中的应用也较为广泛。α-乳清蛋白（α-La）是牛奶中的主要致敏蛋白质，而PEC传感器能够实现对α-La的超灵敏检测，进而降低过敏风险。Li等[45]设计了一种新型无标记PEC适配体传感器，用于检测乳制品中的α-La；该传感器的线性检测范围为0.005~50.000 ng/mL，且具有0.106 pg/mL的超低LOD，性能优于现有检测方法。将适配体作为识别元件，能显著增强PEC传感器的线性范围、提高灵敏度并降低LOD，从而提升PEC传感器的整体检测性能。

17β-雌二醇（E2）是一种甾体雌激素，人体长期暴露于该物质会干扰内分泌系统，引起发育缺陷，且具有致癌性，对人类健康和公共卫生构成严重威胁[46]。Wu等[47]以Ag_2S敏化的BiOBr作为光阳极材料，设计了用于E2高灵敏度分析的PEC传感器，见图4。氟掺杂氧化锡（FTO）电极可分为传

感区和比色区。在传感区，Ag_2S纳米颗粒沉积在BiOBr纳米片表面，形成BiOBr/Ag_2S异质结，固定E2适配体后成功制备了PEC传感器，实现了对E2的高选择性和高灵敏度检测。可视化设备通过预先在电极比色区修饰普鲁士蓝（PB）构建而成。在传感区中，不同浓度的E2被孵育后，光照射下流入PB的光生电子导致比色区的PB发生变化，在光源照射下，PB转化为普鲁士白（PW）并呈现出明显的颜色变化。通过识别PB的颜色变化并收集平均RGB值，可实现E2的可视化检测。该PEC传感器具有0.001~100.000 nmol/L的宽线性范围和0.18 pmol/L的LOD。异质结优异的光电转换性能可显著增强PEC传感器的光电流，而BiOBr和Ag_2S之间形成的II型异质结，能够实现光生电荷的有效分离，使PEC传感器的光电流发生改变，进而实现对靶标的精准检测，赋予PEC传感器优异的检测性能。PEC传感器在其他有害物检测中的应用见表2。

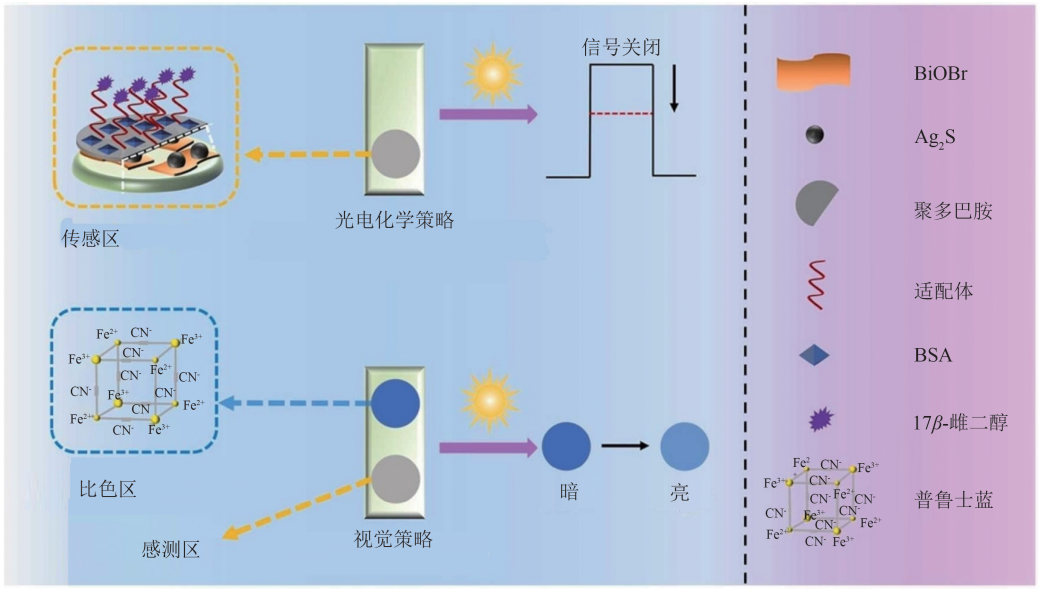


图4　PEC传感器及集成可视化装置的构造及检测示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the construction and detection of the PEC sensor and integrated visualization device

表2　PEC传感器在其他有害物检测中的应用

Table 2　Application of PEC sensors in detection of other food contaminants

有害物	检测范围	LOD	参考文献
微塑料	0.5~1 000.0 μg/mL	0.09 μg/mL	[48]
叔丁基对苯二酚	0.03~0.18 μmol/L	9 nmol/L	[49]
赤藓红B	1×10^{-6}~1×10^{2} μmol/L	0.107 pmol/L	[50]
微囊藻毒素-LR	1×10^{-1}~1×10^{4} fg/mL	0.079 fg/mL	[51]
2,4-二氯苯氧乙酸	3×10^{-12}~3×10^{-5} mol/L	1.13×10^{-12} mol/L	[52]
过氧化氢	0.03~8.00 mmol/L	0.003 mmol/L	[53]
Ara h1	1~200 ng/mL	0.28 ng/mL	[54]
β-乳球蛋白	1~1 000 ng/mL	0.5 ng/mL	[54]
亚硝酸盐	1~100 μmol/L	0.41 μmol/L	[55]
双酚A	1×10^{-4}~5×10^{1} μmol/L	0.63 nmol/L	[56]
丙烯酰胺	1×10^{-3}~1×10^{3} nmol/L	0.19 pmol/L	[57]

3　不同PEC传感器性能分析及比较

为比较不同策略的PEC传感器及其他检测方法在检测性能上的差异，本文以食品中氯霉素为检测对象，分别从检测范围、LOD、特异性、成本、适用场景、操作复杂度等方面进行系统性比较，全面评价PEC传感器在食品安全检测中的性能，见表3。

通过比较发现，在不同策略的PEC传感器中，基于适配体的PEC传感器LOD最低，这可能与适配体与靶标的高亲和力及特异性结合有关；而基

表 3 不同策略的 PEC 传感器及其他检测方法的性能比较

Table 3 Performance comparison of PEC sensors with different strategies and other detection methods

检测方法	检测范围/(ng/mL)	LOD/(ng/mL)	特异性	成本	适用场景	操作复杂度	参考文献
基于适配体的 PEC 传感器	0.001 6~32.300 0	0.000 39	较强	低	实验室检测	简单	[58]
基于分子印迹聚合物的 PEC 传感器	0.01~5 000.00	0.005 08	较强	低	实验室检测	简单	[59]
基于异质结的 PEC 传感器	0.001~5.000	0.000 57	强	低	实验室检测	简单	[60]
HPLC	0.5~10.0	0.2	强	较高	实验室检测	较复杂	[61]
ELISA	0.01~30.00	0.06	较强	较低	现场检测	较简单	[62]
侧流层析技术	0.1~0.9	0.3	较强	较低	现场检测	较简单	[63]

于分子印迹聚合物的 PEC 传感器检测范围更宽，这可能与分子印迹聚合物对目标分子的特异性识别能力有关，从而提高了检测灵敏度，获得了更宽的检测范围。此外，不同策略的 PEC 传感器在特异性、成本及操作复杂度方面无明显差别，且均适用于实验室检测，在现场检测方面的应用较少。与其他检测方法相比，不同策略的 PEC 传感器在检测范围及 LOD 方面优于其他方法，但在成本、操作复杂度方面均不及 ELISA 和侧流层析技术。ELISA 和侧流层析技术更适用于现场检测，且操作简便、成本更低；HPLC 虽在检测成本及操作复杂度上存在不足，但目前仍是实验室检测的常用方法。

不同策略的 PEC 传感器均适用于痕量靶标的特异性检测，但无法实现对所有食品有害物的检测，且其稳定性易受样品基质的温度、湿度、pH、离子强度等的影响。此外，适配体、分子印迹聚合物、异质结等可能会与复杂基质中的某些物质发生非特异性吸附，进而引起交叉反应。基于以上原因，目前不同策略的 PEC 传感器大多仍处于实验室研究阶段，在实际样品检测中的应用还较少，需进一步推动其在食品安全检测领域的商业化推广与应用。

4 展望

PEC 传感器作为一种新型分析工具，因其操作简单、成本低、灵敏度高、响应迅速、选择性好且易于微型化等优点，在食品安全检测领域应用广泛，具有良好的商业化推广价值和应用前景。PEC 传感器的检测对象十分广泛，主要包括霉菌毒素、食源性致病菌、重金属离子、药物残留、食品过敏原、食品非法添加剂等。此外，PEC 传感器拥有多种传感模式和作用原理，且可通过多种策略实现信号放大。然而，目前仍有诸多挑战阻碍着 PEC 传感器在食品安全检测领域的发展，如在实际样品检测中面临的基质干扰、稳定性不足、重现性差等问题，以及其与智能检测技术的融合不足，导致 PEC 传感器目前仍处于实验室研究阶段，在实际样品检测中的应用较少。未来需从以下几个方面寻求技术突破，以实现 PEC 传感器在食品安全检测领域的推广和应用。一是制备和开发性能更稳定、特异性更强的生物识别元件（如单克隆抗体、适配体等），以提升 PEC 传感器的特异性，增强其在复杂检测环境中的稳定性和可靠性；二是研发光电转换效率高、成本低、制备工艺简单、安全性和稳定性好的新型光活性材料，以满足 PEC 传感器在实际样品检测及商业化推广方面的需求；三是开发性能优异的样品前处理设备，简化样品前处理流程，提高前处理效率，减少复杂食品基质对检测结果的干扰；四是严格控制电极制备工艺，强化电极制备的标准化与规范化，稳定电解质及溶液环境，精准控制光照、温度和湿度等条件，同时规范工作人员的操作流程，以提升 PEC 传感器在实际样品检测中的稳定性和重现性；五是推动 PEC 传感器与智能检测技术（如微流控集成、机器学习等）的融合，实现对食品中多种有害物的同时检测和自动化分析。

参考文献

[1] WANG P L，XIE L H，JOSEPH E A，et al. Metal-organic frameworks for food safety[J]. Chemical Reviews，2019，119(18)：10638-10690.

[2] WANG X，LUO Y B，HUANG K L，et al. Biosensor for agriculture and food safety：recent advances and future perspectives[J]. Advanced Agrochem，2022，1(1)：3-6.

[3] 李倩，汤凯洁，冀坤霞，等. 固相萃取-高效液相色谱法同时测定水产品中 15 种磺胺类药物残留[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(1)：36-47.
LI Q，TANG K J，JI K X，et al. Simultaneous determination of 15 sulfonamides residues in aquatic products by solid phase extraction-high performance liquid

chromatography［J］. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43（1）：36-47.

［4］QIAN J，YANG H Y，CUI H N，et al. Integrating $CdIn_2S_4$ semiconductors with S-vacancy MoS_2 nanosheets to fabricate a multi-channel aptasensing chip for photoelectrochemical detection of multiple mycotoxins［J］. Analytica Chimica Acta，2024，1319：342982.

［5］SUO Z G，YU T F，XU Y W，et al. Research progress of photoelectrochemical sensors in food detection［J］. Food Research International，2025，206：116071.

［6］ZHAO W W，XU J J，CHEN H Y. Photoelectrochemical DNA biosensors［J］. Chemical Reviews，2014，114（15）：7421-7441.

［7］CHEN Y X，GU W L，ZHU C Z，et al. Recent advances in photoelectrochemical sensing for food safety［J］. Analytical Chemistry，2024，96（22）：8855-8867.

［8］OUYANG B S，ZHAO H Q，WANG Z L，et al. Dual-polarity response in self-powered ZnO NWs/Sb_2Se_3 film heterojunction photodetector array for optical communication［J］. Nano Energy，2020，68：104312.

［9］WANG D H，LIU X，KANG Y，et al. Bidirectional photocurrent in p-n heterojunction nanowires［J］. Nature Electronics，2021，4（9）：645-652.

［10］WANG C Y，ZHANG B H，CAO J P，et al. Organic-inorganic hybrid flower-shaped microspheres applied in photoelectrochemical sensing［J］. ACS Applied Materials & Interfaces，2022，14（20）：23743-23755.

［11］HAN J Y，WANG J，YANG M，et al. Graphene/organic semiconductor heterojunction phototransistors with broadband and bi-directional photoresponse［J］. Advanced Materials，2018，30（49）：e1804020.

［12］CHEN X M，YIN M M，GE R，et al. Insight into a target-induced photocurrent-polarity-switching photoelectrochemical immunoassay for ultrasensitive detection of *Escherichia coli* O157：H7［J］. Analytical Chemistry，2023，95（5）：2698-2705.

［13］CAI Q Q，YIN T Y，YE Y H，et al. Versatile photoelectrochemical biosensing for Hg^{2+} and aflatoxin B_1 based on enhanced photocurrent of $AgInS_2$ quantum dot-DNA nanowires sensitizing NPC-ZnO nanopolyhedra［J］. Analytical Chemistry，2022，94（15）：5814-5822.

［14］ZHU J H，GOU H W，ZHAO T J，et al. Ultrasensitive photoelectrochemical aptasensor for detecting telomerase activity based on Ag_2S/Ag decorated $ZnIn_2S_4/C_3N_4$ 3D/2D Z-scheme heterostructures and amplified by Au/Cu^{2+}-boron-nitride nanozyme［J］. Biosensors and Bioelectronics，2022，203：114048.

［15］JIN K F，XIE X Y，ZHU J，et al. Highly repeatable detection of miRNAs in complex biological mixtures mediated by magnetically separable spherical nucleic acids and homogeneous signal amplification［J］. Sensors and Actuators B：Chemical，2023，393：134191.

［16］LI Y Y，LIU D，MENG S Y，et al. Signal-enhanced strategy for ratiometric aptasensing of aflatoxin B_1：plasmon-modulated competition between photoelectrochemistry-driven and electrochemistry-driven redox of methylene blue［J］. Biosensors and Bioelectronics，2022，218：114759.

［17］LIU Q，HUAN J，DONG X Y，et al. Resonance energy transfer from CdTe quantum dots to gold nanorods using MWCNTs/rGO nanoribbons as efficient signal amplifier for fabricating visible-light-driven “on-off-on” photoelectrochemical acetamiprid aptasensor［J］. Sensors and Actuators B：Chemical，2016，235：647-654.

［18］ZHOU Y L，CUI X T，ZHENG Y L，et al. Construction of bifunctional Se-$MoSe_2$-Cu_2MoS_4 Z-scheme heterojunction：its application in photoelectrochemical biosensing and photocatalytic degradation［J］. Chemical Engineering Journal，2025，507：160549.

［19］ZHOU Y，SHI Y，WANG F B，et al. Oriented self-assembled monolayer of Zn（II）-tetraphenylporphyrin on TiO_2 electrode for photoelectrochemical analysis［J］. Analytical Chemistry，2019，91（4）：2759-2767.

［20］XIE Y Z，ZHANG M，BIN Q Y，et al. Photoelectrochemical immunosensor based on CdSe@BiVO4 co-sensitized TiO_2 for carcinoembryonic antigen［J］. Biosensors and Bioelectronics，2020，150：111949.

［21］AN Z Q，JIAN X Y，HONG W J，et al. An ultrasensitive free-of-electronic sacrificial agent photoelectrochemical aptasensor for the detection of dibutyl phthalate based on Z-scheme p-n Bi-doped BiOI/Bi_2S_3 heterojunction［J］. Talanta，2025，282：126997.

［22］LI Y P，ADILI G，LIANG G，et al. $CuInS_2$/red phosphorus nanosheet interleaved heterostructures with improved interfacial charge transfer for photoelectrochemical aptasensing［J］. Analytical Chemistry，2024，96（29）：11985-11996.

［23］HUANG L Z，LI J D，WANG Y L，et al. A light-driven enzyme-free photoelectrochemical sensor based on HKUST-1 derived Cu_2O/Cu@microporous carbon with g-C_3N_4 p-n heterojunction for ultra-sensitive detection of *L*-cysteine［J］. Carbon，2023，215：118466.

［24］YIN K，ZHANG J，XUE Y D，et al. Target-assisted self-powered photoelectrochemical sensor based on Ag_2S/BiOCl heterojunction for ultrasensitive chlorpyrifos detection［J］. Talanta，2025，286：127502.

［25］XU Y Y，CHEN L J，GUO X H，et al. Highly sensitive

label-free photoelectrochemical aptasensor based on Cu_2MoS_4@$Ti_3C_2T_x$ MXene heterojunction for tetracycline detection in milk[J]. Microcheimica Acta, 2025, 192(3):165.

[26] QIAO L, ZHAO Y, ZHANG Y Y, et al. Designing a stable g-C_3N_4/$BiVO_4$-based photoelectrochemical aptasensor for tetracycline determination[J]. Toxics, 2023, 11(1):17.

[27] FENG L P, WANG J H, ZHUANG X, et al. Bifunctional tubular step-scheme Co_3S_4/CdS heterostructure for highly efficient photoelectrochemical detection coupled with the degradation of tetracycline[J]. Food Chemistry, 2025, 478:143746.

[28] 叶永丽,高露,纪剑,等. 基于转录组学分析T-2毒素诱导细胞凋亡作用机制[J].食品与生物技术学报,2024,43(7):56-66.
YE Y L, GAO L, JI J, et al. Mechanism of T-2 toxin induction in promoting cell apoptosis based on transcriptomics [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(7):56-66.

[29] SHANG K S, SHAN M Z, WANG L, et al. An "on-off-on" photoelectrochemical aptasensor using CoO as a signal label for T-2 toxin detection[J]. Microchimica Acta, 2025, 192(6):338.

[30] XUE X D, LENG Y Q, LI Y M, et al. A magnetic plasma Fe_3O_4@Cu@Cu_2O photoelectrochemical sensor for the detection of fumonisin B_1[J]. Analytical Methods, 2024, 16(27):4534-4538.

[31] YANG X R, REN X, CHEN J G, et al. Oxygen vacancies-driven self-powered photoelectrochemical sensor for acetamiprid detection[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2025, 288:117814.

[32] HUANG W J, TANG S F, XIAO W, et al. A molecularly imprinted photoelectrochemical sensor based on an rGO/MoSSe heterojunction for the detection of chlortetracycline[J]. Analyst, 2024, 149(7):2023-2033.

[33] SONG P, ZHANG J, XUE Y D, et al. Synergizing MOF-derived In_2O_3/In_2S_3 S-scheme heterojunction with pH-switchable DNA hydrogel reconfiguration: toward ultrasensitive regenerable photoelectrochemical biosensing of sulfadiazine[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2026, 446:138752.

[34] DENG K X, WANG Y S, WANG Y L, et al. Chlorpyrifos detection in strawberry and soil samples using a direct Z-scheme heterojunction photoelectrochemical sensor based on Bi_2WO_6 nanosheets loaded with MOFs-derived In_2O_3 hollow nanotubes[J]. Food Chemistry, 2025, 495:146494.

[35] PAN B J, WANG S A, LI G P, et al. Ultrasensitive photoelectrochemical sensing of enrofloxacin based on $CuFe_2O_4$/$ZnIn_2S_4$-Z-type heterojunction[J]. Microchimica Acta, 2025, 192(11):730.

[36] WEI J, PENG W G, JI Y, et al. A bias-free photoelectrochemical aptasensor based on Ag_2CrO_4/g-C_3N_4/MoS_2 Z-scheme heterojunction for ultrasensitive detection of omethoate[J]. Talanta, 2026, 298(Pt B):129003.

[37] ZHAO Y L, JIAO W L, LI Y L, et al. Portable integrated sensor based on C_{60} encapsulated into Cu-based porphyrin-derived MOFs for the photoelectrochemical detection of glyphosate[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(10):11214-11224.

[38] WANG L Y, WEI Y P, CHEN J S, et al. Construction of a self-powered and polarity switched photoelectrochemical biosensor based on In_2S_3/WS_2 for the detection of tobramycin[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2026, 447:138810.

[39] YUAN M, CHEN X, HUANG L L, et al. Boosted photoelectrochemical sensor for methyl parathion detection in vegetables based on covalent organic frameworks@Bi_2WO_6 quantum dots nanocomposites grafted electron donor-acceptor molecularly imprinted polymers[J]. Food Chemistry, 2025, 492:145295.

[40] ZHANG J, ZHAO L, XUE Y D, et al. A split-type photoelectrochemical sensor based on In_2S_3/PCN-224 Z-scheme heterojunction for ultrasensitive detection of ampicillin[J]. Microchimica Acta, 2025, 192(3):144.

[41] ZHANG Q Q, ZHAI T T, GUO Y X, et al. Faraday cage-type photocurrent polarity switching photoelectrochemical sensing platform for highly selective and sensitive detection of *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Food Chemistry, 2025, 475:143275.

[42] LI M J, HAN T T, XIA C Y, et al. A nanozyme-based dual-mode sensor for photoelectrochemical and colorimetric assay of *Listeria monocytogenes*[J]. Food Chemistry, 2025, 495:146508.

[43] CHEN J W, WANG J, NI G H, et al. Highly selective detection of trace Lead(II) ions based on MoS_2 QDs/TiO_2 NRs photoelectrochemical sensing[J]. Talanta, 2025, 294:128167.

[44] REN X, CHEN J G, WANG C, et al. Photoelectrochemical sensor with a Z-scheme Fe_2O_3/CdS heterostructure for sensitive detection of mercury ions[J]. Analytical Chemistry, 2023, 95(46):16943-16949.

[45] LI S S, LI M X, ZHAO Z, et al. A photoelectrochemical aptasensor based on *in-situ* grown Ag_2S quantum dot-sensitized Bi_2MoO_6/BiOBr heterojunction for

α-lactalbumin detection[J]. Journal of Food Composition and Analysis，2025，148：108319.

[46] HE Y，XU A Y，GU Z F，et al. Computationally optimized molecularly imprinted electrochemical sensor for ultrasensitive detection of 17β-estradiol in complex matrices [J]. Journal of Hazardous Materials，2026，501：140705.

[47] WU L，DONG J Y，ZHAO L S. A photoelectrochemical sensor for detection of 17β-estradiol using high-response type II heterojunction：implementation of visualization strategy[J]. Sensors and Actuators B：Chemical，2023，378：133135.

[48] XIAO Z Z，CHEN Y X，ZHANG Y. Self-powered portable photoelectrochemical sensor based on dual-photoelectrode for microplastics detection [J]. Environmental Research，2025，271：121084.

[49] HUANG L Z，QIU Y H，SUN X Q，et al. Bi_2O_3/$MgIn_2S_4$ type-II heterojunction-driven photoelectrochemical sensor for selective detection of tert-butylhydroquinone in edible oils[J]. Talanta，2026，297：128787.

[50] BAKHNOOH F，ARVAND M. A self-powered photoelectrochemical sensor activated by Bi_2WO_6/TiO_2 nanotube arrays photoanode with anodic signal quenching for ultrasensitive erythrosine B （E127） detection in complex food matrices [J]. Microchemical Journal，2025，218：115353.

[51] CHEN J H，LV J X，LIU Y，et al. Organic photoelectrochemical transistor based on titanium dioxide nanorods for detection of microcystin-LR[J]. Talanta，2025，285：127401.

[52] JI Z H，HUANG W H，LIU T T，et al. A novel molecularly imprinted photoelectrochemical sensor utilizing Ag/SnO_2 for the highly sensitive and selective detection of 2，4-dichlorophenoxyacetic acid [J] . Microchemical Journal，2024，200：110278.

[53] SONG Y，WANG C T，SHA J C，et al. Photoelectrochemical sensor based on the sensitive interface of photosensitive electrode for the detection of hydrogen peroxide in dried bean curds[J]. Journal of Food Composition and Analysis，2023，119：105237.

[54] ZHANG S M，ZOU K X，WEI J，et al. Dual-wavelength polarity-switchable photoelectrochemical sensor for near-simultaneous and portable detection of Ara h1 and β-lactoglobulin[J]. Sensors and Actuators B：Chemical，2025，443：138172.

[55] WANG Z F，YANG D，TAN Y Z，et al. Photoelectrochemical sensor for nitrite determination based on the etching of BiOCl/$Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ [J]. Food Chemistry，2025，462：140693.

[56] PAN M F，XIE M J，HAN L，et al. Photoelectrochemical sensor incorporating AgNPs-integrated BiOBr/Ti_3C_2 layed composites for the efficient detection of bisphenol A detection in water and milk samples [J] . Food Chemistry，2025，488：144945.

[57] ZHU W Q，CAO W W，CHEN R，et al. A novel framework-targeted affinity-based sandwich photoelectrochemical sensor for trace acrylamide determination[J]. Food Chemistry，2025，485：144487.

[58] ZHANG Q，SUN Y，YU L，et al. A portable photoelectrochemical aptasensor based on voltage-resolved dual-signal output for the determination of chloramphenicol[J]. Journal of Hazardous Materials，2025，490：137748.

[59] ZHANG H F，KANG Z W，ZHU H，et al. ZnO/C nanocomposite grafted molecularly imprinted polymers as photoelectrochemical sensing interface for ultrasensitive and selective detection of chloramphenicol[J]. Science of the Total Environment，2023，859：160284.

[60] LI S H，HUANG S Y，HUANG J W，et al. Copper ions modulated growth of TiO_2/Bi_2S_3 heterojunction *in-situ*：an enhanced photoelectrochemical immunosensor coupled with headspace strategy for chloramphenicol determination[J]. Food Chemistry，2026，498：147074.

[61] CHU L L，DENG J J，KANG X J. Packed-nanofiber solid phase extraction coupled with HPLC for the determination of chloramphenicol in milk[J]. Analytical Methods，2017，9（46）：6499-6506.

[62] LIU C，DENG D D，XU D，et al. Development of a monoclonal antibody based-ELISA for the detection of chloramphenicol in shrimp，feed and milk samples and validation by LC-MS/MS coupled with immunoaffinity clean-up[J]. Analytical Methods，2019，11（4）：507-516.

[63] XU J K，ZHOU J，BU T，et al. Self-assembling antibody network simplified competitive multiplex lateral flow immunoassay for point-of-care tests [J] . Analytical Chemistry，2022，94（3）：1585-1593.