

特约评述

DOI: 10.12211/2096-8280.2026-033

基于合成生物学的环境污染物传感研究进展

侯爽¹, 康熙琪¹, 刘一东¹, 吕传娟¹, 许平², 马翠卿¹, 高超¹(¹ 山东大学, 微生物改造技术全国重点实验室, 山东 青岛 266237; ² 上海交通大学生命科学技术学院, 微生物代谢国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 当前全球环境污染呈现传统污染负荷居高不下与新污染风险持续凸显的复合特征。即时、原位、精准的环境污染物检测是评估生态风险、制定治理策略的关键。传统分析方法受设备昂贵、操作繁琐、分析周期长等限制, 难以满足现场监测与大规模环境筛查的需求。基于合成生物学的生物传感器通过基因回路设计、蛋白质工程、功能模块组装等手段, 可特异性识别污染物并将其浓度信息转化为可量化的理化信号, 兼具高效、便捷与低成本等优势, 为环境监测提供了创新手段。本文梳理了合成生物传感器的主要类型与工作原理, 着重阐述其在重金属、无机非金属、有机物及病原微生物检测中的研究进展。同时, 探讨了此类技术在追踪污染物的降解转化、空间分布、介质迁移、毒理效应等环境动态过程中的应用潜力, 总结了其在实际应用中的优势与挑战。最后, 本文展望了未来该领域需强化与人工智能、功能材料等多学科交叉, 着力突破识别谱系有限、元件稳定性不足等瓶颈, 为生态环境风险的精准预警与智能化管控提供关键技术支撑。

关键词: 合成生物学; 生物传感器; 传感机制; 环境污染物; 环境监测

中图分类号: Q816 文献标志码: A

Advances in environmental pollutant sensing based on synthetic biology

HOU Shuang¹, KANG Zhaoqi¹, LIU Yidong¹, LÜ Chuanjuan¹, XU Ping², MA Cuiqing¹, GAO Chao¹(¹ State Key Laboratory of Microbial Technology, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China; ² State Key Laboratory of Microbial Metabolism, School of Life Sciences and Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Global environmental pollution is currently a multifaceted challenge, exacerbated by the persistence of legacy pollutants and the growing threat of emerging contaminants. These substances originate primarily from anthropogenic activities and can accumulate in ecosystems through atmospheric deposition, aquatic transport, and biomagnification, ultimately leading to widespread systemic toxicity. Rapid, *in situ*, and precise pollution detection is essential for assessing ecological risks and formulating effective remediation strategies. However, traditional analytical methods, such as chromatography and mass spectrometry, remain challenging to apply to on-site testing and large-scale

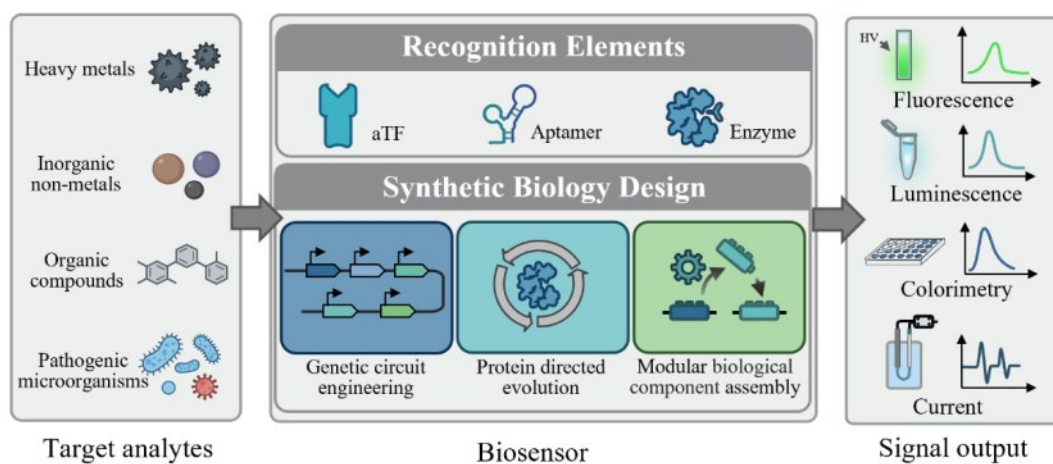
收稿日期: 2026-04-30 修回日期: 2026-06-20

基金项目: 国家重点研发计划“新污染物的环境过程与溯源技术”(2024YFA0918900)

引用本文: 侯爽, 康熙琪, 刘一东, 吕传娟, 许平, 马翠卿, 高超. 基于合成生物学的环境污染物传感研究进展[J]. 合成生物学, 2026, 7. DOI: 10.12211/2096-8280.2026-033

Citation: HOU Shuang, KANG Zhaoqi, LIU Yidong, LÜ Chuanjuan, XU Ping, MA Cuiqing, GAO Chao. Advances in environmental pollutant sensing based on synthetic biology[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7. DOI: 10.12211/2096-8280.2026-033

screening due to expensive equipment, labor-intensive sample preparation, and delayed readouts. Synthetic biology-enabled biosensors offer a reliable approach to environmental monitoring. These biosensors integrate genetic circuit design, protein engineering, and functional module assembly to specifically detect pollutants and convert concentration information into quantifiable physicochemical signals, providing improved detection efficiency, operational simplicity, and cost-effectiveness. By decoupling recognition, transduction, and output modules, these platforms can be tailored to different targets, sample matrices, and deployment scenarios while retaining a clear design logic. Crucially, these platforms are compatible with portable devices, supporting rapid field deployment, continuous *in situ* monitoring, and high-throughput analysis of environmental samples. In this review, we categorize the main types of synthetic biosensors and elucidate their core signal recognition and transduction mechanisms. We highlight recent advances in the use of these biosensors for detecting heavy metals, inorganic non-metal pollutants, organic compounds, and pathogenic microorganisms. Furthermore, we explore the application value of these platforms in tracking dynamic environmental pollution processes, including biodegradation kinetics, spatial distribution, cross-media migration, toxicological effects, and intelligent targeted bioremediation. We then discuss the advantages, challenges, and future directions of synthetic biosensors in environmental analysis, focusing on recognition element customization, process-level monitoring, field system integration, biosafety, and intelligent data interpretation. These advances may help synthetic biosensors move beyond single-target detection and support integrated environmental risk sensing, early warning, and remediation assessment.



Keywords: synthetic biology; biosensor; sensing mechanisms; environmental pollutants; environment monitoring

当前, 全球环境污染呈现多元化、复合化和跨介质特征, 以重金属、无机非金属及有机污染物为代表的污染问题日益凸显。这些污染物广泛源于工农业生产与人类活动, 兼具环境持久性、生物累积性与高毒性, 可通过大气沉降、水体迁移及食物链富集等途径在生态系统中长期滞留, 最终对生物体产生多重毒性效应^[1-4]。传统环境污染物的检测方法如高效液相色谱 (high-performance liquid chromatography, HPLC)^[5] 与质

谱 (mass spectrometry, MS)^[6] 虽具备较高的灵敏度与准确性, 但受设备昂贵、操作繁琐、分析周期长等限制, 难以满足现场实时监测与大规模环境筛查的需求。面对严峻的生态环境风险, 开发高效、便携、低成本的新型原位监测技术迫在眉睫。

合成生物学的发展为解决上述挑战提供了全新思路。生物传感器是一种可将生化信号转换为易检测的电、光等信号的分析装置, 已成为环境

监测领域的重要工具。近年来, 基因线路工程^[7]、蛋白质定向进化^[8]及模块化元件组装^[9]等合成生物学技术的引入, 赋予了生物传感器更高的设计自由度, 使污染物识别、信号转导与报告输出能够被拆分为可设计、可调控和可组合的功能模块。基于这一特点, 合成生物传感器可根据检测需求调节响应阈值、信号强度和输出方式, 从而提升检测灵敏度、特异性及场景适配性。相较于传统检测方法, 该技术不仅具备高效、高通量、低成本等优势, 还支持对污染物降解过程、空间迁移及毒理效应的动态追踪, 为生态环境风险的精准评估提供了关键技术支撑。目前, 基于合成生物学的生物传感器已在多类环境场景中成功部署, 实现了对重金属、有机污染物及病原微生物等多类污染物的特异性识别与原位定量分析^[10-15]。

基于此, 本综述梳理了合成生物学驱动的生物传感器在环境分析领域的前沿进展, 分类阐述了合成生物传感器的构建策略与工作原理, 探讨了其在污染物监测及生物过程追踪中的应用现状。同时, 本文剖析了该技术在环境评估中的优

势与挑战, 并对其未来发展趋势进行展望, 旨在为推进新型合成生物传感器在环境监测领域的理论创新与工程化应用提供参考。

1 合成生物传感器的主要类型及工作原理

合成生物传感器通常由信号识别元件与信号转导元件构成。其中, 信号识别元件多为天然或经工程化改造的生物分子, 如变构转录因子 (allosteric transcription factor, aTF)、核酸适配体和酶等, 可通过构象变化、分子组装或竞争结合等方式特异性识别目标污染物^[16-19]。在此基础上, 信号转导元件负责将分子识别事件转换为易于读取的理化信号 (如荧光、发光、显色或电信号等), 从而实现目标污染物的定性筛查与定量分析。围绕这一“识别-转导-输出”过程, 下文将从传感器构建原理和信号输出方式两个方面展开, 阐述合成生物传感器的主要类型及其工作机制。

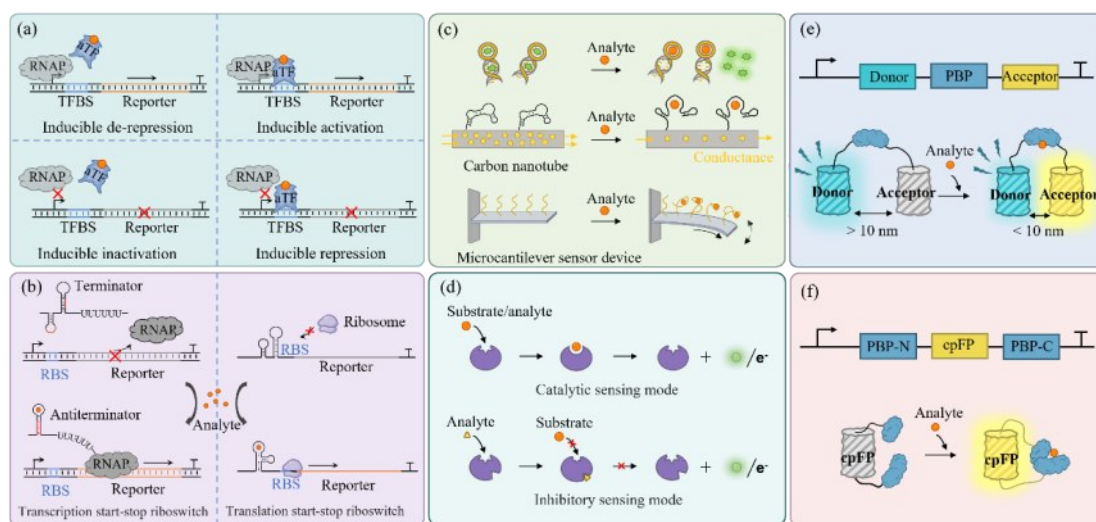


图1 合成生物传感器的检测原理示意图

(a) 基于变构转录因子的生物传感器; (b) 基于核糖开关的生物传感器; (c) 基于核酸适配体的生物传感器; (d) 基于酶促反应的生物传感器; (e) 基于荧光共振能量转移技术的蛋白质开关生物传感器; (f) 基于环状重排荧光蛋白的蛋白质开关生物传感器。aTF: 变构转录因子; RNAP: RNA 聚合酶; TFBS: 变构转录因子结合位点; RBS: 核糖体结合位点; PBP: 污染物结合蛋白; cpFP: 环状重排荧光蛋白

Fig.1 Schematic diagram of the detection principle of synthetic biosensors

(a) Allosteric transcription factor-based biosensors; (b) riboswitch-based biosensors; (c) aptamer-based biosensors; (d) enzyme reaction-based biosensors; (e) Förster resonance energy transfer (FRET)-based protein switch biosensors; (f) circularly permuted fluorescent protein (cpFP)-based protein switch biosensors. aTF: allosteric transcription factor; RNAP: RNA polymerase; TFBS: aTF binding site; RBS: ribosome binding site; PBP: pollutant binding protein; cpFP: circularly permuted fluorescent protein

1.1 合成生物传感器的主要类型与构建原理

1.1.1 全细胞生物传感器

全细胞生物传感器通常以大肠杆菌、枯草芽孢杆菌或酿酒酵母等遗传背景清晰的模式微生物为底盘。通过合成生物学手段整合人工设计的基因线路，使其具备特异性感知环境刺激并输出可检测理化信号的能力。得益于活细胞强大的自我增殖能力、高生化反应活性以及加工复杂信号网络的潜力，全细胞生物传感器目前在环境监测领域的应用最为成熟与广泛（表1）^[20, 21]。根据信号识别机制的不同，全细胞生物传感器主要可分为以下两类：

1.1.1.1 基于变构转录因子的全细胞生物传感器

微生物在长期进化过程中，形成了依赖aTF抵御重金属毒性或有机物胁迫的基因调控网络。aTF通常由DNA结合结构域与配体结合结构域组成。基于此类元件构建的全细胞生物传感器，其核心机制在于将污染物的生物识别过程与细胞基因表达网络相偶联（图1a）。具体而言，该体系通常由组成型启动子维持aTF的本底适度表达，同时由受该aTF严格调控的同源操纵序列控制下游报告基因（如荧光蛋白、荧光素酶Lux/Luc、 β -半乳糖苷酶LacZ或胞外电子传递[extracellular electron transfer, EET]途径中的关键蛋白等）的转

录^[22-26]。特定污染物与aTF配体结合结构域结合，可改变DNA结合结构域与操纵序列的亲和力，从而解除报告基因的转录阻遏或招募RNA聚合酶激活转录，最终将靶污染物的浓度信息转化为易检测的理化信号^[27]。此类生物传感器构建简单，但常受本底泄露、信噪比低及动态范围窄等制约。为此，近年研究逐渐由天然元件的简单拼接转向系统级的理性优化。通过启动子核心序列的理性突变、aTF结合位点强度的精细调控，可有效抑制报告基因的转录泄露^[25]。此外，通过引入正反馈回路与逻辑门控等复杂线路，并结合定向进化改造aTF结合口袋，可大幅改善传感器的灵敏度与检测范围^[23, 28-30]。

1.1.1.2 基于核糖开关的全细胞生物传感器

核糖开关（Riboswitch）是一类具有特定三维折叠结构的顺式调控非编码RNA元件，通常存在于mRNA的5'端非翻译区（5'-UTR）。基于该类元件的全细胞生物传感器通常由负责特异性结合污染物的识别区域与负责信号输出的表达平台串联融合而成^[31]。靶污染物与识别区域的结合可打破RNA的热力学平衡，导致其二级结构重排，进而通过形成转录终止发夹结构，或竞争性地掩蔽/暴露核糖体结合位点，从而在转录或翻译起始阶段实现对报告基因信号的高效开关控制（图1b）^[32, 33]。与基于aTF的全细胞生物传感器相比，核糖开关可直接

表1 不同类型环境污染分析方法的性能比较

Table 1 Performance comparison of different analytical methods for environmental pollutants

分析方法	现场适用性	多靶标检测能力	真实样品抗干扰能力	主要限制
HPLC	较差, 依赖实验室设备及专业操作	一般, 可通过梯度洗脱或多波长检测实现有限分析	中等, 复杂基质需繁琐预处理	设备体积大、成本高, 痕量检测常需富集
MS	差, 设备昂贵且维护要求高	强, 可同步检测多类污染物	较强, 但仍受基质效应影响	仪器成本高, 前处理复杂, 操作门槛高
基于aTF的全细胞生物传感器	较好, 可小型化, 操作较简便	一般, 通常针对特定aTF设计	较弱, 易受基质毒性和细胞状态干扰	响应速度较慢, 细胞稳定性和储存条件要求高
基于核糖开关的全细胞生物传感器	较好, 可小型化, 操作较简便	一般, 单个核糖开关通常对应单一靶标	较弱, 易受基质毒性和细胞状态干扰	靶标范围有限, 灵敏度和选择性需优化
基于aTF的无细胞生物传感器	良好, 无需活细胞培养, 便于储运	中等, 可组合多个aTF体系	中等, 复杂基质可能抑制反应体系	提取物稳定性有限, 部分体系依赖辅因子
基于核酸适配体的无细胞生物传感器	良好, 易集成至便携设备	中等, 可构建适配体阵列	中等, 复杂基质可能影响适配体结合	适配体筛选耗时, 亲和力或稳定性需优化
基于酶促反应的无细胞生物传感器	良好, 结构简单, 响应快速	较差, 通常针对单一底物或抑制剂	中等, 易受温度、pH和抑制剂影响	酶易失活, 寿命短, 检测范围较窄
遗传编码的蛋白质开关型生物传感器	良好, 可工程化设计并集成检测平台	中等, 可构建传感器阵列	中等, 复杂基质可能影响蛋白构象和荧光输出	蛋白质稳定性需优化, 开关设计和筛选难度较高

感知胞内配体浓度并调控基因表达,显著提升了信号响应的时效性。此外,该类非编码RNA元件大幅减轻了宿主细胞的代谢负荷,同时增强了生物传感器的模块化特性和跨体系适用性^[34, 35]。

1.1.2 无细胞生物传感器

全细胞生物传感器在实际应用中常受限于跨膜转运屏障、剧毒基质对细胞代谢的干扰以及活体微生物环境释放的潜在风险。相较之下,无细胞生物传感器作为独立的体外生化反应平台,有效突破了跨膜转运的限速步骤,实现了对非膜透性污染物的直接检测。同时,该体系显著提升了对剧毒环境的耐受性,且可有效规避生物安全隐患(表1)^[36]。因此,此类体外传感技术在环境监测领域日益受到广泛关注。根据信号识别机制不同,无细胞生物传感器主要可分为以下三类:

1.1.2.1 基于变构转录因子的无细胞生物传感器

基于aTF的无细胞生物传感器通常通过在体外环境重构底物识别与基因调控网络,实现目标污染物的高效分析。具体而言,该策略将受aTF调控的基因线路与无细胞转录-翻译体系相偶联;特定污染物与aTF特异性结合,诱导其发生构象改变,进而启动下游报告基因的体外转录和/或翻译过程,输出可量化的理化信号^[37]。此外,利用靶污染物与同源操纵序列竞争性结合aTF的特性,该类识别元件还可与多种其他信号转导策略灵活融合,以开发新型无细胞生物传感器。例如,在放大发光邻近均相分析(AlphaScreen)平台中,aTF与操纵序列分别锚定于受体与供体发光微珠;靶污染物的竞争性结合会打破两者间的相互作用,诱发微珠空间解离并导致体系化学发光信号衰减,进而实现靶污染物的高灵敏定量检测^[38]。同理,该机制亦可与CRISPR-Cas系统相偶联;靶污染物与aTF相互作用可促使aTF释放预结合的DNA激活链,进而触发Cas酶的旁系切割活性并输出级联放大的荧光信号^[39]。

1.1.2.2 基于核酸适配体的无细胞生物传感器

核酸适配体是一类具有特定序列的单链DNA或RNA分子(通常为30-100个核苷酸)。通过内部的碱基互补配对,其可自发折叠形成发夹、假结或G-四联体等复杂的三维空间结构^[40]。借助范德华力、氢键、静电作用及疏水堆积等非共价相互

作用,核酸适配体能以高亲和力与高特异性识别靶污染物,并诱导自身构象改变。基于核酸适配体的生物传感器,其核心机制在于将靶标识别诱发的构象变化转化为可量化的理化信号^[41]。根据信号转导策略不同,该类传感器具有丰富的检测模式(图1c)。例如,靶污染物可竞争性置换核酸适配体内预结合的荧光染料,产生显著的光学响应^[42];携带负电荷的核酸适配体经 π - π 相互作用贴合碳纳米管表面,通过电荷屏蔽增加器件电导;靶污染物的结合诱导适配体取向偏离碳纳米管,进而减少电荷屏蔽并降低电导率^[43]。借助指数富集配体系统进化技术(SELEX)与计算机辅助理性设计等合成生物学策略,核酸适配体可被定向改造或从头设计以识别各类新型污染物,为个性化环境监测生物传感器的研发提供了重要的分子工具库。

1.1.2.3 基于酶促反应的无细胞生物传感器

酶生物传感器以酶分子为信号识别元件,利用其高效的催化性能与底物特异性,通过动态监测酶促反应过程中的特征产物生成或催化速率变化,进而实现对目标污染物的定量检测。在环境分析领域,该类传感器的检测机制主要分为催化型和抑制型两类(图1d)。在催化型传感模式中,靶污染物直接作为底物发生酶促转化,该过程常与显色/发光反应或电化学界面相偶联,从而输出可量化的光学或电信号^[44, 45]。在抑制型传感模式中,特定污染物作为抑制剂与酶分子结合,阻断活性中心或改变其构象,导致酶催化活性降低;通过量化酶促反应速率的衰减程度,实现对该类污染物的间接检测^[46]。尽管传统酶生物传感器具备响应迅速、易于操作等优势,但在复杂环境介质中常面临酶易失活、纯化成本高等限制。借助蛋白质定向进化与理性设计等合成生物学技术,可提升酶的催化效率、底物亲和力及极端理化环境(温、酸、碱)耐受性,从而显著增强传感系统在真实环境样本中的抗干扰能力与检测灵敏度^[47-49]。

1.1.3 遗传编码的蛋白质开关型生物传感器

近年来,随着荧光蛋白工程、蛋白质结构设计与定向进化的发展,基于蛋白质构象变化直接调控荧光信号的遗传编码传感器逐渐成为合成生

物传感器的重要构建策略(表1)。遗传编码的蛋白质开关型生物传感器通常由污染物特异性结合蛋白(如aTF、周质结合蛋白、酶等)与荧光报告元件融合构成。与依赖报告基因表达变化的传感器不同,该类传感器通过靶标结合诱导蛋白质构象变化,并将其直接转化为荧光信号变化。由于具有基因编码特性,该类传感器既可经表达、纯化后用于体外污染物的定量检测,也可在活细胞、亚细胞区室及活体生物内原位表达,实现胞内污染物的实时动态监测^[50]。根据信号转导策略不同,该类传感器可分为基于荧光共振能量转移(Förster resonance energy transfer, FRET)技术的生物传感器与基于环状重排荧光蛋白(circularly permuted fluorescent protein, cpFP)的生物传感器两种类型。其中,FRET型生物传感器是由污染物特异性结合蛋白及位于其两侧的供、受体荧光蛋白对构成(图1e)。靶污染物结合诱导的构象变化可改变供、受体荧光蛋白间的空间距离或相对取向,最终引起体系FRET效率及荧光强度比值改变,实现对靶污染物浓度的定量检测^[51, 52]。cpFP型生物传感器通常是将cpFP嵌合至污染物特异性结合蛋白内部构建而成(图1f);靶污染物结合诱导的构象变化可导致cpFP插入位点处多肽主链和氨基酸侧链构象改变,影响cpFP发色团的质子化状态或量子产率等光物理特性,最终转化为可量化的荧光强度信号^[53]。

1.2 合成生物传感器的信号输出方式

合成生物传感器的信号输出方式是决定其检测性能和应用场景的关键因素。同一类识别元件,如aTF、核糖开关、核酸适配体或酶,均可与不同报告模块耦合,输出荧光、发光、显色或电信号。不同输出方式在灵敏度、响应速度、仪器依赖性、现场适用性及复杂环境基质抗干扰能力等方面各有特点。因此,下文重点对荧光、发光、显色及电信号四类主要输出方式的作用机制与应用特点进行梳理。

1.2.1 基于荧光的输出方式

荧光输出是合成生物传感器中应用较广的信号模式,其原理在于利用荧光蛋白或荧光染料的

光物理特性变化,将生物识别事件转化为可量化的荧光信号。例如基于aTF的全细胞生物传感器可将污染物响应型启动子与荧光蛋白偶联,使荧光强度随污染物浓度变化而改变^[23, 24];cpFP型和FRET型蛋白质开关生物传感器则可将污染物诱导的结合蛋白构象变化转化为荧光强度或比率信号^[51-53];在DNA适配体生物传感器中,目标污染物与适配体结合可引发荧光染料结合状态或空间位置变化,从而导致体系荧光信号改变^[42]。荧光输出具有灵敏度高、定量范围宽、易于多通道检测和实时成像等优势,但其也易受样品自发荧光、浊度、光散射和光漂白等因素影响,在土壤浸提液、富含有机质水体等复杂环境样品中,通常需要结合样品预处理或背景校正策略提高检测可靠性。

1.2.2 基于发光的输出方式

发光输出主要包括生物发光和化学发光两类。生物发光体系通常以Lux或Luc等荧光素酶为报告元件,将污染物诱导的基因表达变化转化为可检测的光信号;化学发光则多依赖发光底物或发光微珠体系,将靶标结合或反应过程转化为光信号。在全细胞传感器中,荧光素酶报告系统常用于重金属、有机污染物和毒性胁迫的快速筛查^[22, 54, 55];在无细胞体系中,AlphaScreen、酶促发光反应等化学发光平台也可与aTF、适配体或抗体识别模块耦合,实现污染物的灵敏检测^[37]。与荧光检测相比,发光检测无需外源激发光,背景信号较低,可降低复杂样品中自发荧光和激发光散射带来的干扰,因而具备较高的信噪比。然而,该类方法通常依赖底物与辅因子,信号强度易受反应体系组成和底物扩散过程的影响。

1.2.3 基于显色的输出方式

显色输出可通过酶促反应或纳米材料颜色变化实现可视化检测,适用于低成本、现场化和肉眼判读的检测场景。显色信号的产生通常依赖LacZ、辣根过氧化物酶(horseradish peroxidase, HRP)、漆酶等酶促反应,或适配体-染料复合物构象变化等过程,将污染物识别事件转化为颜色变化。在全细胞体系中,显色报告基因可置于污染物响应型启动子下游,靶标存在时诱导酶表达并催化底物显色^[25];在无细胞体系中,酶、核酸适

配体等可用于构建纸基、比色管等显色检测平台^[45, 46, 56]。显色输出方式的仪器依赖性低、操作简单、结果直观, 适合资源受限条件下的快速筛查和半定量检测。但相较于荧光和发光信号, 其灵敏度通常较低, 且易受样品颜色、浊度和悬浮颗粒的干扰。因此, 显色输出更适合初筛或现场预警。

1.2.4 基于电信号的输出方式

电信号输出是将生物识别事件转化为电流、电位或阻抗等可量化响应的读出方式, 其核心在于生物电活性组分与电极界面的电子传递。基于EET的电化学全细胞生物传感器最具代表性。该策略通常将污染物响应型遗传线路与EET通路耦合, 当aTF等感应元件识别目标污染物后, 调控关键电子传递蛋白或电子介体相关基因表达, 从而输出电信号^[57]。近期发展的电活性共培养体系进一步将感应与输出模块分离: 发送菌通过aTF响应靶污染物并诱导合成电子介体1,4-二羟基-2-萘甲酸; 接收菌则利用1,4-二羟基-2-萘甲酸介导的EET过程与电极传递电子, 产生可检测电流^[58]。在无细胞体系中, 酶、核酸适配体等识别元件也

可固定于电极表面, 通过酶促氧化还原反应、构象变化或界面电荷改变产生电信号^[43, 59]。电信号输出抗光学干扰能力强, 便于微型化和连续监测, 但易受电极污染、离子强度和氧化还原干扰物影响, 实际应用中需重点优化电极材料、固定化方式和校准策略。

2 合成生物传感器在污染物环境检测中的应用

基于合成生物学的生物传感器为复杂环境监测提供了创新手段。针对环境介质中理化性质各异的污染物, 研究人员通过识别元件筛选、基因回路优化与信号输出模块改造, 开发出一系列高性能传感体系。本节将重点梳理该类技术在重金属污染物、无机非金属污染物、有机污染物及生物性污染检测中的研究进展(表2), 并进一步讨论其靶标识别策略、检测性能优化及复杂环境样品中的应用表现。

表2 用于检测环境污染物的各种合成生物传感器的部分传感性能参数

Table 2 Partial sensing performance parameters of various synthetic biosensors for monitoring environmental pollutants					
检测靶标	生物传感元件	传感器类型	报告元件	检测限	参考文献
重金属					
Pb ²⁺	aTF PbrR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	GFP	0.22 nM	[8]
As ³⁺	aTF ArsR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	GFP	1.85 nM	[25]
	aTF ArsR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	CymA 通路	0.1 μM	[57]
Cd ²⁺	aTF CadC	基于 aTF 的全细胞生物传感器	Flavin 通路	0.045 μM	[57]
	Cd ²⁺ ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	FAM 标记 DNA	0.076 pM	[60]
Ni ²⁺	aTF RcnR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	LuxAB	80 nM	[61]
UO ₂ ²⁺	UzcR-UzcS TCS	基于 TCS 的全细胞生物传感器	GFP	1 μM	[62]
Au ³⁺	aTF CupR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	RFP	46.5 nM	[63]
Zn ²⁺	铜伴侣蛋白 Atox1, WD4	FRET 型蛋白质开关生物传感器	Cerulean, citrine	2 pM	[64]
Mn ²⁺	周质结合蛋白 LanM	FRET 型蛋白质开关生物传感器	ECFP, citrine	/	[65]
Hg ²⁺	周质结合蛋白 MerP	cpFP 型蛋白质开关生物传感器	cpmNeonGreen	/	[66]
	aTF MerR	基于核糖开关的全细胞生物传感器	mCherry	5 nM	[67]
Tl ⁺	Tl ⁺ ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	硫黄素 T	0.8 μM	[68]
Sc ³⁺	Sc ³⁺ ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	FAM 标记 DNA	90 pM	[69]
无机非金属					
NO ₃ ⁻	NarX-NarL TCS	基于 TCS 的全细胞生物传感器	sfGFP	4.9 μM	[70]
NO ₂ ⁻	亚硝酸盐还原酶	酶生物传感器	NH ₄ ⁺	0.05 μM	[59]
H ₂ S _n	aTF BigR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	mKate	1 μM	[71]
S ₈	aTF BigR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	mKate	5 μM	[71]
F ⁻	F 响应型核糖开关	基于核糖开关的无细胞生物传感器	C23DO	50 μM	[17]
	F 响应型核糖开关	基于核糖开关的全细胞生物传感器	LacZ	8 μM	[32]
CN ⁻	氰化物二水合酶	酶生物传感器	铵离子	0.92 μM	[72]
有机污染物					
苯并芘	aTF DmpR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	EGFP	9.91 nM	[73]
苯酚	aTF MopR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	Luc	10.63 nM	[54]

续表

检测靶标	生物传感元件	传感器类型	报告元件	检测限	参考文献
十溴二苯醚	胞外受体 Chr1_2466	基于 aTF 的全细胞生物传感器	Luc	0.01 μ M	[74]
五氯酚	aTF NalC	基于 aTF 的无细胞生物传感器	3WJdB/DFHBI-1T	2 nM	[75]
正辛烷	aTF AlkS	基于 aTF 的全细胞生物传感器	GFP/LuxAB	/	[76]
二氯乙烷	aTF AlkS	基于 aTF 的全细胞生物传感器	EGFP	0.30 μ M	[77]
三氯乙烷	aTF AlkS	基于 aTF 的全细胞生物传感器	EGFP	0.30 μ M	[77]
全氟辛酸	人肝脂肪酸结合蛋白 hLFABP	cpFP 型蛋白质开关生物传感器	cpGFP	796.97 nM	[78]
	全氟辛酸 ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	荧光素/dabcyl 探针	0.17 μ M	[79]
聚氯乙烯	聚氯乙烯 ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	TMB	3.1 ng/mL	[80]
聚苯乙烯	聚苯乙烯 ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	TMB	3.7 ng/mL	[80]
多环芳烃	aTF PahR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	GFP	/	[81]
草甘膦	草甘膦氧化酶	酶生物传感器	邻联茴香胺	0.82 μ M	[82]
敌敌畏	乙酰胆碱酯酶	酶生物传感器	FQ 探针	20.91 pM	[83]
四环素	aTF DmpR	基于 aTF 的全细胞生物传感器	EGFP	4.94 nM	[73]
	aTF TetR	基于 aTF 的无细胞生物传感器	3WJdB/DFHBI-1T	0.1 μ M	[84]
多西环素	aTF TetR	基于 aTF 的无细胞生物传感器	3WJdB/DFHBI-1T	0.1 μ M	[84]
替加环素	aTF TetR	基于 aTF 的无细胞生物传感器	3WJdB/DFHBI-1T	0.5 μ M	[84]
红霉素	aTF MphR	基于 aTF 的无细胞生物传感器	3WJdB/DFHBI-1T	0.1 μ M	[84]
阿奇霉素	aTF MphR	基于 aTF 的无细胞生物传感器	3WJdB/DFHBI-1T	5 μ M	[84]
罗红霉素	aTF MphR	基于 aTF 的无细胞生物传感器	3WJdB/DFHBI-1T	3 μ M	[84]
卡那霉素	卡那霉素 DNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	AMCA/BHQ2 探针	29.52 fM	[85]
PCB77	PCB77 ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	FAM 标记 DNA	1.71 fM	[86]
DBP	DBP ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	AuNP	63.38 nM	[56]
DEHP	DEHP ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	AuNP	5.94 nM	[56]
DNOP	DNOP ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	AuNP	67.75 nM	[56]
DEP	DEP ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	AuNP	99.04 nM	[56]
生物性污染物					
MRSA	AP-M ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	BHQ1 探针	1 CFU/mL	[87]
CRPA	AP-P ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	BHQ1 探针	1 CFU/mL	[87]
KPC-2 KP	AP-K ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	BHQ1 探针	1 CFU/mL	[87]
SARS-CoV-2	MBA5SA1 ssDNA 适配体	基于核酸适配体的无细胞生物传感器	四甲基联苯胺	/	[88]
寨卡病毒	Toehold 开关 S23	基于核糖开关的无细胞生物传感器	sfGFP	2.9 aM	[89]

注: aTF: allosteric transcription factor, 变构转录因子; GFP: green fluorescent protein, 绿色荧光蛋白; LuxAB: bacterial luciferase, 细菌荧光素酶; TCS: two-component system, 双组分系统; RFP: red fluorescent protein, 红色荧光蛋白; ssDNA: single-stranded DNA, 单链 DNA; FAM: 6-carboxyfluorescein, 6-羧基荧光素; RFET: Förster resonance energy transfer, 荧光共振能量转移; ECFP: enhanced cyan fluorescent protein, 增强型青色荧光蛋白; cpFP: circularly permuted fluorescent protein, 环状重排荧光蛋白; cpmNeonGreen: circularly permuted green fluorescent protein, 环状重排绿色荧光蛋白; mCherry: red fluorescent protein, 红色荧光蛋白; sfGFP: superfolder green fluorescent protein, 超折叠绿色荧光蛋白; mKate: red fluorescent protein, 红色荧光蛋白; C23DO: catechol (2,3)-dioxygenase, 邻苯二酚 2,3-双加氧酶; LacZ: β -galactosidase, β -半乳糖苷酶; EGFP: enhanced green fluorescent protein, 增强型绿色荧光蛋白; Luc: firefly luciferase, 萤火虫荧光素酶; cpGFP: circularly permuted green fluorescent protein, 环状重排绿色荧光蛋白; TMB: 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine, 3,3',5,5'-四甲基联苯胺; FQ 探针: fluorescence quenching probe, 荧光淬灭探针; AMCA/BHQ2 探针: 7-氨基-4-甲基香豆素-3-乙酸 (7-amino-4-methylcoumarin-3-acetic acid, AMCA) 与黑洞淬灭剂-2 (black hole quencher 2, BHQ2) 修饰的 ssDNA 探针; PCB77: 3,3',4,4'-tetrachlorobiphenyl, 3,3',4,4'-四氯联苯; DBP: dibutyl phthalate, 邻苯二甲酸二丁酯; DEHP: di (2-ethylhexyl) phthalate, 邻苯二甲酸二 (2-乙基己基) 酯; DNOP: di-n-octyl phthalate, 邻苯二甲酸二正辛酯; DEP: diethyl phthalate, 邻苯二甲酸二乙酯; AuNP: gold nanoparticle, 金纳米颗粒; MRSA: methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, 耐甲氧西林金黄色葡萄球菌; CRPA: carbapenem-resistant *Pseudomonas aeruginosa*, 耐碳青霉烯类铜绿假单胞菌; KPC-2 KP: *Klebsiella pneumoniae* carbapenemase 2 (KPC-2)-expressing *Klebsiella pneumoniae*, 产肺炎克雷伯菌碳青霉烯酶 2 型的肺炎克雷伯菌; BHQ1: black hole quencher 1, 黑洞淬灭剂-1

2.1 重金属污染物的检测

重金属广泛赋存于自然环境与工业场景中, 其通过水体、大气及土壤等介质在生态系统内长期蓄积, 对生态健康与公共卫生构成严峻威胁。

生物体在长期进化过程中演化出了抵御重金属胁迫的感应与抗性调控系统, 这为合成生物传感器的开发提供了天然的识别元件库。例如, 研究人员将微生物天然的金属响应调控机制 (如 PbrR-P_{pbr}、ArsR-P_{arsR}、CadC-P_{cadC}、RcnR-P_{rcnA}、UzcRS-

P_{urcB} 等)与绿色荧光蛋白(green fluorescent protein, GFP)、荧光素酶、EET等报告系统相偶联,构建了分别响应 Pb^{2+} 、 As^{3+} 、 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} 、 UO_2^{2+} 等重金属离子的全细胞生物传感器。在此基础上,通过引入正反馈信号级联、多输入逻辑门控等理性基因回路设计,并结合蛋白质工程重塑配体结合口袋以提升亲和力,系统提升了传感元件的检测灵敏度与特异性,从而成功实现了河流、湖泊、地下水、土壤等多种环境介质中靶污染物的定量检测^[8, 25, 57, 61-63]。此外,以天然重金属结合蛋白(如人类铜伴侣蛋白Atox1和WD4、微生物铜系金属离子周质结合蛋白LanM与 Hg^{2+} 周质结合蛋白MerP等)为识别元件,结合FRET技术或cpFP构建的蛋白质开关生物传感器也备受关注。通过理性蛋白质设计对上述元件进行结构改造,研究人员已成功实现对 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Hg^{2+} 等离子的特异性精准检测^[64-66]。然而,对于环境丰度较低的稀有金属离子(如剧毒的分散元素 Tl^+ 和稀土元素 Sc^{3+}),特异性天然生物识别元件仍显匮乏。针对这一问题,研究人员基于SELEX筛选技术,成功获得了靶向 Tl^+ 与 Sc^{3+} 的特异性核酸适配体;进一步结合荧光链置换或荧光染料置换等信号转导策略,开发出相应的核酸适配体生物传感器,并实现了湖水样本中痕量 Tl^+ 与 Sc^{3+} 的高灵敏、高特异性检测^[68, 69]。

2.2 无机非金属污染物的检测

无机非金属污染物主要涵盖氮磷营养盐(如 NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-})、硫化物(如 H_2S 、 S_8)以及卤素与拟卤素等毒性阴离子(如 F^- 、 CN^-)。此类污染物多源于农业化肥过度施用、工业废水违规排放和矿石冶炼加工等,在自然水体与土壤中长期蓄积后,不仅易诱发水体富营养化及微生态失衡,还可导致地方性氟骨症、急性组织缺氧等严重健康危害。通过挖掘并工程化改造天然识别元件,已开发出一系列高灵敏的无机非金属污染物合成生物传感器。例如,Woo等基于大肠杆菌NarX-NarL双组分系统(two-component system, TCS),构建了 NO_3^- 全细胞生物传感器,通过启动子优化有效降低了本底泄露,使检测限降至 $4.9 \mu M$ ^[70]。

针对硫化物,Liu等基于根癌农杆菌的BigR- P_{bigR} 调控系统开发了超硫化物(如 H_2S_a 、 S_8)全细胞生物传感器,经核糖体结合位点优化,对 H_2S_a 、 S_8 的检测限分别达到 $1.0 \mu M$ 与 $5.0 \mu M$,成功实现了较深层海洋沉积物中多硫化物的精准定量^[71]。在毒性阴离子监测方面,Ariyaratna等将丁香假单胞菌来源的氟化物特异性核糖开关与 $lacZ$ 报告基因融合,构建了基于显色反应的F全细胞生物传感器,可对饮用水中的F含量进行高特异性检测^[32]。此外,Kumar等结合琼脂固定化工艺与铵离子选择性电极,开发了基于印度黄杆菌来源的氰化物二水合酶的生物传感器,其对CN⁻的检测限低至 $0.92 \mu M$,满足了工业废水的现场快速检测需求^[72]。

2.3 有机污染物的检测

相较于重金属污染与无机非金属污染,芳香族化合物、烷烃、微塑料、抗生素及农药等有机污染物呈现出显著的结构复杂性与环境滞留效应,其引发的复合生态毒理风险日益凸显。面对庞杂的有机化学污染物,生物体不仅进化出抗性机制,更衍生出以其为底物的特异性降解机制。挖掘并重构这些天然的底物感知回路,已成为拓宽合成生物传感器目标检测谱系的关键途径。例如,在芳香族污染物检测方面,Sun等将DmpR- P_{dmpR} 调控系统与增强型绿色荧光蛋白(enhanced green fluorescent protein, EGFP)报告系统偶联,开发了能够对六种酚类污染物进行纳摩尔级别高灵敏检测的全细胞生物传感器^[73]。Chen等将五氯酚代谢调控系统NalC- P_{nalC} 与无细胞转录体系相偶联,构建了可将五氯酚浓度转化为荧光RNA定量输出的无细胞生物传感器^[75]。针对烷烃及其衍生物,Arce-Rodríguez等借助理性基因回路设计策略,重构了恶臭假单胞菌天然的AlkS- P_{alkB} 调控网络,能够实现中长链烷烃高灵敏检测的同时,还在大肠杆菌CC118与铜绿假单胞菌PAO1中验证了该检测体系的兼容性^[76]。Mann等基于全氟辛酸与人肝脂脂肪酸结合蛋白的相互作用机制,设计了cpFP型蛋白质开关生物传感器,实现了对溪水及大肠杆菌胞内全氟辛酸动态变化的有效监测^[78]。针对微塑料,Choi等利用铜绿假单胞菌的表面黏附响应机

制, 构建了 P_{cdrA} -*gfp* 全细胞生物传感器, 可在微塑料诱导 CdrA 相关基因表达后输出 GFP 荧光信号, 并结合拉曼光谱实现环境水样中微塑料丰度与类型的联合分析^[90]。在抗生素检测方面, Jung 等将 TetR、OtrR、MphR 等多种 aTF 引入无细胞转录体系, 实现了对四环素、土霉素等八种抗生素的灵敏检测; 结合冷冻干燥技术, 该系统被成功应用于加州多处真实水源的便携式现场筛查^[91]。在农药残留检测领域, Liu 等将草甘膦氧化酶 (glyphosate oxidase, GOX) 催化的氧化反应与 HRP 介导的显色反应相偶联, 构建了级联酶生物传感器; 进一步通过苏云金芽孢杆菌 S 层蛋白表面展示技术增强了该检测系统的结构稳定性与环境耐受性, 实现了自来水、湖泊及土壤等环境介质中草甘膦的高灵敏检测^[82]。

2.4 生物性污染物的检测

生物性污染物主要包括病原细菌、致病病毒及寄生虫等, 具有传染性强、变异快等特征。传统的微生物培养鉴定或聚合酶链式反应等技术操作繁琐、检测周期长, 难以满足突发公共卫生事件的现场快速筛查需求。合成生物学驱动的生物传感器通过引入核酸适配体、CRISPR-Cas 等信号识别与转导元件, 有效推动了复杂环境介质中病原体的便携、灵敏监测。例如, 针对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌等多种耐药菌, Liu 等开发了基于核酸适配体的便携式生物传感器。该系统利用特异性适配体识别目标细菌并释放 DNA 激活链, 进而触发 CRISPR-Cas 系统级联信号扩增与光学信号输出, 检测限低至 1 CFU/mL^[87]。为应对病毒变异风险, Wang 等对靶向野生型 SARS-CoV-2 刺突蛋白的核酸适配体进行理性设计与定向进化, 获得了对变异株亲和力更高的新型识别元件, 实现了对突变病原体的快速追踪^[88]。此外, 利用抗体捕获目标病原体并将其信号转化为核酸信号, 可进一步拓宽传感器的检测适用范围。以沙门氏菌为例, Cai 等利用抗体修饰的免疫磁珠与金纳米颗粒 (gold nanoparticle, AuNP) 构建夹心复合物, 将目标菌的浓度信息转化为核酸标签, 随后触发 CRISPR-Cas 系统级联信号放大并产生高灵敏荧光信号, 显著提升了复杂样本中致病微生物的检测

精度^[92]。

3 合成生物传感器在污染物环境过程监测中的应用

常规环境监测多聚焦于污染物浓度的静态评估。然而, 要深入理解污染物的生态效应并制定靶向修复方案, 关键在于明确其在真实环境介质中的动态行为, 包括降解转化、空间分布、介质迁移与毒理效应等过程。合成生物传感器具有响应快速、可原位检测等优势, 为污染物的环境过程监测提供了创新工具, 有助于推动环境分析从静态浓度测定向动态过程追踪的拓展。

3.1 污染物生物降解过程的连续监测

解析污染物的降解与转化动力学, 是评估环境自净能力及生物修复效能的重要环节。传统 HPLC 或 MS 等分析方法难以实现环境样本的连续原位监测, 不易捕捉污染物降解过程中的瞬态变化。相比之下, 通过将目标污染物的生物识别与发光或荧光报告系统相偶联, 合成生物传感器可原位、无损地记录污染物在土壤、水体等复杂介质中的动态变化, 从而直观获取污染物降解反应的迟滞期、速率峰值及反应周期等关键动力学参数 (图 2a)^[93]。例如, 在传统有机污染物监测方面, Applegate 等结合特异性启动子与发光报告基因, 构建了靶向苯、甲苯、乙苯和二甲苯 (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, BTEX) 的全细胞生物传感器^[94]; Dawson 等进一步将该传感器与化学分析技术联用, 实现了土壤中 BTEX 降解动态和毒性变化的原位追踪^[95]。类似地, 针对多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), Segura 等在解析其代谢调控机制的基础上, 利用 PahR- P_{pahR} 调控机制构建了 PAHs 全细胞生物传感器, 并成功应用于海洋环境中 PAHs 降解过程的连续监测^[81]。此外, 在新型大分子污染物领域, Oh 等构建了特异性响应对苯二甲酸 (terephthalic acid, TPA) 的生物传感器, 通过连续监测聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 在酶促水解及生物降解过程中

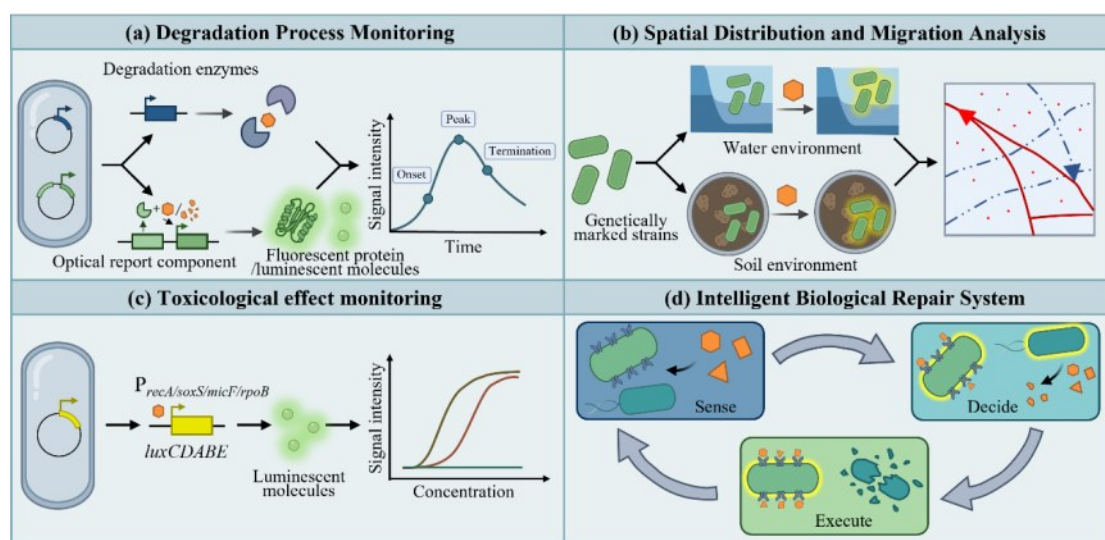


图2 合成生物传感器在污染物环境过程监测中的应用

(a) 合成生物传感器在污染物生物降解过程连续监测中的应用；(b) 合成生物传感器在污染物空间分布与环境迁移分析中的应用；(c) 合成生物传感器在污染物毒理效应监测中的应用；(d) 基于合成生物传感器的智能化生物修复体系的构建与应用

Fig.2 Application of synthetic biosensors in the monitoring of environmental processes of pollutants

(a) Application of synthetic biosensors in continuous monitoring of the biodegradation process of pollutants; (b) application of synthetic biosensors in the analysis of spatial distribution and environmental migration of pollutants; (c) application of synthetic biosensors in the monitoring of toxicological effects of pollutants; (d) construction and application of the intelligent biological repair system based on synthetic biosensors

释放的TPA单体，有效揭示了PET的降解动力学特征^[96]。

3.2 污染物的空间分布与环境迁移分析

明确污染物在生态系统中的空间分布及迁移规律，是环境风险评价与污染溯源的关键。传统HPLC或MS等分析方法难以支撑大面积场地的高密度、高频次筛查。将合成生物传感器部署于广阔环境介质中并结合光学检测，可高效、低成本解析污染物的三维空间分布特征（图2b）^[90]。例如，He等利用特异性响应于汞和菲的全细胞生物传感器，对长江三角洲区域的土壤样本开展了高通量实地筛查^[97]。通过绘制生物有效性空间分布图，直观揭示了污染物赋存浓度与生物暴露风险之间的空间关联。此外，针对传统报告基因系统光学穿透力弱、局限于近距离观测的瓶颈，Chemla等引入了新型高光谱报告基因。将其整合入人工基因线路后，可在自然光照下实现对活体工程菌株信号的远距离（90 m）、大范围（4000 m²）监测，为大尺度环境污染的宏观筛查提供了有力的技术支撑^[98]。在污染物的环境迁移追踪方面，合成生物传感器可无损、直观地记录其在复杂介质

中的动态传输轨迹。例如，针对多环芳烃在非饱和和多孔介质（如干燥土壤）中的迁移行为，Schamfuß等基于多环芳烃全细胞生物传感器，成功验证了茈能够以真菌菌丝为载体进行远距离传输，并最终被末端细菌有效摄取与降解^[99]。

3.3 污染物的毒理效应监测

污染物的生态风险不仅取决于环境浓度，还与其生物可利用性及诱发的细胞损伤密切相关。相比单纯浓度测定，基于毒理效应的生物传感器可利用应激响应型启动子或信号通路，将DNA损伤、氧化应激、蛋白损伤及膜损伤等生物效应转化为发光或荧光信号，为复杂环境样品的风险评价提供依据（图2c）。例如，Song等以贝氏不动杆菌ADP1为宿主，将DNA损伤响应元件*recA*启动子与*luxCDABE*发光报告基因融合，构建了全细胞生物传感器。该系统可在未预处理土壤中直接响应丝裂霉素C、苯并芘、Cr⁶⁺及Pb²⁺等污染物诱导的DNA损伤；通过比较水提液与土壤-水悬液的发光响应，可评估可溶态及颗粒结合态污染物的生物可利用性和遗传毒性^[55]。Jiang等进一步基于大肠杆菌*recA::luxCDABE*建立定量评价模型，并

应用于Cr⁶⁺污染土壤和原油污染海水样品的毒性分析^[100]。在此基础上,Łaska等构建了包含*recA::luxCDABE*、*soxS::luxCDABE*、*micF::luxCDABE*和*rpoB::luxCDABE*的大肠杆菌全细胞传感器阵列,分别表征DNA损伤、氧化应激、膜通透性变化及RNA聚合酶相关转录扰动。通过比较萘啶酸、氨苄青霉素、卡那霉素和双氯芬酸暴露下不同报告株的发光响应,该体系可区分不同毒性作用模式^[101]。因此,将污染物特异性传感器与应激响应型传感器组合,可同时获取污染物暴露和生物毒性效应两类信息,有助于建立面向生态风险的过程监测体系。

3.4 智能化生物修复体系的构建与应用

智能环境修复旨在赋予工程微生物对环境动态变化的自适应调节能力,使其能够根据目标污染物的赋存浓度,自主启停相应的清除途径。将合成生物传感元件与生物吸附或代谢降解模块相偶联,可构建“感知-决策-执行”一体化的智能细胞,实现污染物的精准治理(图2d)。例如,Ravikumar等利用大肠杆菌的TCS(ZraSR和CusSR),将Zn²⁺和Cu²⁺特异性启动子分别与不同荧光报告基因融合,同时将金属结合肽展示于细胞表面,构建了兼具原位监测和生物吸附功能的工程菌株;在100 mg/L的目标离子暴露下,可有效触发细菌的感知与吸附功能,每克干细胞可分别吸附约13 mg/L Zn²⁺和11.4 mg/L Cu²⁺^[102]。此外,Liu等开发了一种集污染物检测、生物降解与自我消亡于一体的智能大肠杆菌。该菌株能在6小时内对0.1-1,000 μM浓度范围的水杨酸产生响应并输出信号;细胞生长至对数末期时,特定启动子触发水杨酸降解酶的表达并启动降解程序;当底物耗尽后,内置的毒素/抗毒素自杀回路可诱导工程菌株自主死亡,以消除生物安全隐患。长期稳定性测试证实了该系统的可靠性能,为环境污染物的智能化修复提供了极具前景的解决方案^[103]。

4 合成生物传感器在环境分析中的优势、挑战与未来发展方向

合成生物传感器作为传统理化检测方法的重

要补充,在环境污染物检测、过程追踪和风险预警中展现出卓越的应用潜能与工程化价值。其优势不仅在于检测成本低、效率高和易于现场部署,更体现在可表征污染物的降解过程、空间迁移及毒理效应,从而为生态环境风险评估提供技术支撑。然而,真实环境介质中污染物种类复杂、浓度波动大、基质干扰强,且长期部署条件不稳定,该技术仍需在识别元件、过程解析、系统集成和数据判读等方面进一步突破。

4.1 识别元件定制与检测谱系拓展

污染物识别元件是决定合成生物传感器检测谱系与特异性的关键。当前,多数合成生物传感器的构建仍高度依赖aTF、结合蛋白、核糖开关或酶等自然进化的天然元件。面对种类繁多且呈指数增长的新型环境污染物,现有天然元件库的响应谱系明显受限。此外,部分天然识别元件存在结合亲和力偏低、易受结构类似物交叉干扰等问题,难以满足复杂环境基质中痕量污染物的精准特异性定量需求^[104, 105]。未来应结合定向进化、SELEX筛选与人工智能辅助的蛋白质设计等技术,实现目标污染物特异性识别元件的按需定制与性能优化(图3a)。例如,借助RFdiffusion等基于条件扩散的蛋白质结构生成模型与LigandMPNN等序列设计工具,研究人员不仅实现了对罗库溴铵、胆酸等小分子结合蛋白的亲和力改造,更成功完成了甲氨蝶呤、胆酸、皮质醇等小分子结合蛋白的从头设计^[106]。此类计算工具的引入将为特定污染物传感器的开发提供支撑,进而拓展合成生物传感器的检测谱系。

4.2 污染过程解析与毒理效应评价

精准解析污染物在生物体内的富集、代谢转化及毒理效应,是评估生态健康风险的关键。合成生物传感器可在活细胞或无细胞体系中将污染物暴露直接转化为荧光、发光或电信号,适用于污染物降解动力学和生物毒性过程的连续监测。相较于其他生物传感体系,遗传编码的蛋白质开关型生物传感器在此方面具有独特优势:一方面,其基因编码特性允许其在活细胞、亚细胞区室及活体生物内原位表达,实现胞内靶污染物的原位

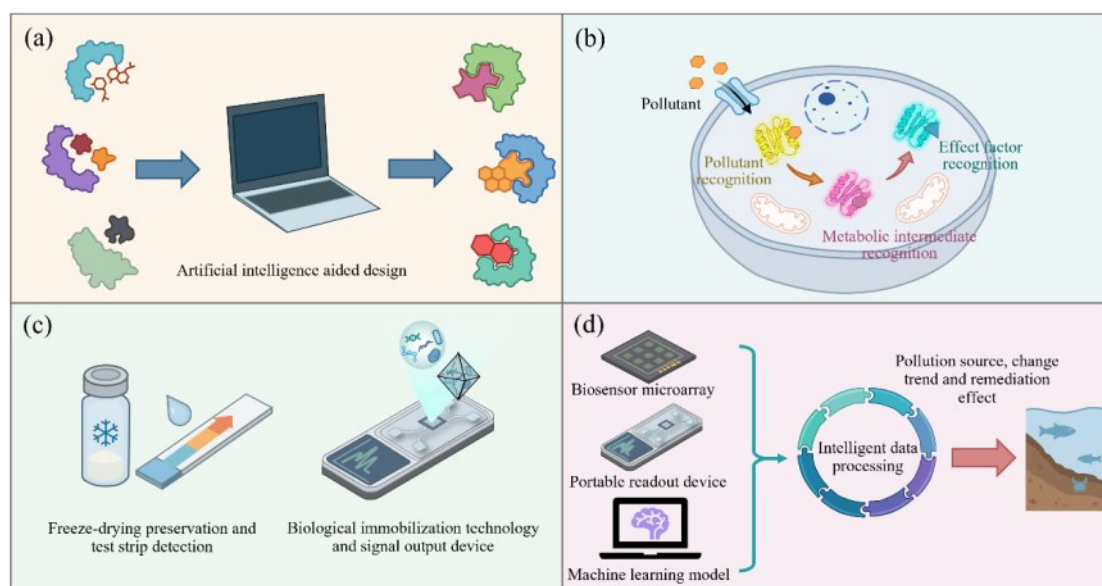


图3 合成生物传感器在环境分析中的未来发展方向

(a) 合成生物传感器识别元件的定制与性能优化；(b) 合成生物传感器对污染物特征性代谢转化过程的集成分析；(c) 基于合成生物传感器的现场监测系统集成；(d) 基于合成生物传感器的智能化数据处理流程

Fig.3 Future development directions of synthetic biosensors in environmental analysis

(a) Customization and performance optimization of recognition elements for synthetic biosensors; (b) integrated analysis of the characteristic metabolic transformation process of pollutants by synthetic biosensors; (c) the field monitoring system integration based on synthetic biosensors; (d) the intelligent data processing process based on synthetic biosensors

无损追踪；另一方面，该类传感器能够以毫秒级速率输出浓度依赖的荧光响应，实现胞内靶污染物的实时动态监测^[107, 108]。未来，通过在同一生物体系内同时表达检测污染物、代谢中间体及效应因子的多路生物传感器，有望实现对污染物特征性代谢转化过程的集成分析，从而在分子及亚细胞尺度系统揭示其环境毒理机制与生物转化网络（图3b）。

4.3 现场监测系统集成与安全部署

合成生物传感器易与纸基芯片、微流控、电化学电极和便携式光学读数设备集成，具备发展为现场即时检测系统的潜力。相较于依赖大型仪器的传统理化分析方法，该类系统更适用于偏远地区、工业场地和突发污染事件的快速筛查。然而，合成生物传感器的真实环境应用仍面临信号稳定性、储运寿命、批次一致性和复杂基质干扰等挑战。水凝胶包埋、金属有机框架封装和冻干保存等策略有助于提高传感器的结构稳定性和现场适用性（图3c）^[109-111]。此外，对于拟应用于开放环境的活体全细胞生物传感器，其潜在的生态

安全风险是开发过程中必须重视的关键问题。当前已有研究通过营养缺陷型生物遏制、遗传隔离和自杀基因线路等策略，降低工程菌的环境逃逸及基因水平转移风险。然而，上述策略在开放场景下的长期稳定性和有效性仍需进一步验证^[112, 113]。未来，一方面需开发受多重环境信号严格控制的防逃逸系统，以提高生物安全屏障的稳定性；另一方面，需加速无细胞传感系统的工程化应用，以降低活体微生物释放风险。

4.4 数据智能判读与环境风险预警

真实环境中，合成生物传感器的输出信号往往受污染物浓度、细胞生理状态、背景基质及温度、pH等环境条件的交互影响，单一阈值判读难以满足复杂场景下的风险评估需求。未来可将传感器阵列、便携式检测设备与机器学习模型相结合，构建从信号采集、结果校正、异常识别至风险等级判断的智能化数据处理流程（图3d）。进一步通过整合多靶标检测结果、环境参数和采样时空位置信息，有望更准确地判断污染来源、变化趋势及修复效果。由此，合成生物传感器将突破

单一污染物浓度检测工具的局限, 发展为兼具现场感知、过程解析和风险判读能力的环境智能预警网络。

总体而言, 合成生物传感器的发展正推动环境监测从传统单一浓度测定, 转向对污染物暴露、生物有效性、迁移转化和毒理效应的综合评估。未来, 随着识别元件的理性定制、传感模块的稳定化封装、便携式硬件集成及智能数据分析模型的不断完善, 该技术有望更好地应用于现场筛查、过程监测、风险预警和修复效果评估。在此过程中, 如何兼顾检测性能、环境适应性、生物安全和标准化应用, 将是决定其从实验室研究走向实际环境治理的关键。

参 考 文 献

- [1] Ayala-Cabrera J F, Santos F J, Moyano E. Recent advances in analytical methodologies based on mass spectrometry for the environmental analysis of halogenated organic contaminants [J]. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 2021, 30: e00122.
- [2] Norvill Z N, Shilton A, Guieysse B. Emerging contaminant degradation and removal in algal wastewater treatment ponds: Identifying the research gaps[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 313: 291-309.
- [3] Gong Y S, Wang Y, Lin N P, et al. Iron-based materials for simultaneous removal of heavy metal(loid)s and emerging organic contaminants from the aquatic environment: Recent advances and perspectives[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 299: 118871.
- [4] Chadha U, Bhardwaj P, Agarwal R, et al. Recent progress and growth in biosensors technology: A critical review[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022, 109: 21-51.
- [5] Gątarek P, Rosiak A, Kałużna-Czaplińska J. Chromatographic methods for the determination of organic pollution in urban water: A current mini review[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2025, 55(5): 840-857.
- [6] Weerasooriyagedara M, Partington J M, Alghamdi W, et al. Development and validation of a multi-class solid-phase extraction and liquid chromatography tandem mass spectrometry method for emerging contaminants in water[J]. *Journal of Chromatography. A*, 2026, 1768: 466655.
- [7] Cheng Y Y, Chen Z Y, Cao X Y, et al. Programming bacteria for multiplexed DNA detection[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2001.
- [8] Shen L, Chen Y W, Pan J J, et al. Development of a highly sensitive PbrR-based biosensor via directed evolution and its application for lead detection[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 488: 137489.
- [9] Thavarajah W, Verosloff M S, Jung J K, et al. A primer on emerging field-deployable synthetic biology tools for global water quality monitoring[J]. *NPJ Clean Water*, 2020, 3(1): 18.
- [10] Azmal Ali S, Mittal D, Kaur G. In-situ monitoring of xenobiotics using genetically engineered whole-cell-based microbial biosensors: Recent advances and outlook[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2021, 37(5): 81.
- [11] Bilal M, Iqbal H M N. Microbial-derived biosensors for monitoring environmental contaminants: Recent advances and future outlook[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 124: 8-17.
- [12] Sohrabi H, Hemmati A, Majidi M R, et al. Recent advances on portable sensing and biosensing assays applied for detection of main chemical and biological pollutant agents in water samples: A critical review[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2021, 143: 116344.
- [13] Schwarzenbach R P, Egli T, Hofstetter T B, et al. Global water pollution and human health[J]. *Annual Review Environment and Resources*, 2010, 35: 109-136.
- [14] Rostami I, Juhasz A L. Assessment of persistent organic pollutant (POP) bioavailability and bioaccessibility for human health exposure assessment: A critical review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41 (7): 623-656.
- [15] Inês A, Cosme F. Biosensors for detecting food contaminants- An overview[J]. *Processes*, 2025, 13(2): 380.
- [16] De Paepe B, De Mey M. Biological switches: Past and future milestones of transcription factor-based biosensors[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2025, 14(1): 72-86.
- [17] Thavarajah W, Silverman A D, Verosloff M S, et al. Point-of-use detection of environmental fluoride via a cell-free riboswitch-based biosensor[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2020, 9 (1): 10-18.
- [18] Zhu Y Z, Cheng Z M, Wang X Q, et al. Synergistic optimization strategies for the development of multienzymatic cascade system-based electrochemical biosensors with enhanced performance[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2025, 274: 117222.
- [19] Stangherlin S, Lui N, Lee J H, et al. Aptamer-based biosensors: From SELEX to biomedical diagnostics[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2025, 191: 118349.
- [20] Han L, Zhao Y K, Cui S, et al. Redesigning of microbial cell surface and its application to whole-cell biocatalysis and biosensors[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2018, 185(2): 396-418.
- [21] Park M, Tsai S L, Chen W. Microbial biosensors: Engineered

- microorganisms as the sensing machinery[J]. *Sensors*, 2013, 13 (5): 5777-5795.
- [22] Chen X J, Yao H, Song D, et al. A novel antimony-selective ArsR transcriptional repressor and its specific detection of antimony trioxide in environmental samples via bacterial biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2023, 220: 114838.
- [23] Liu C J, Yu H, Zhang B C, et al. Engineering whole-cell microbial biosensors: Design principles and applications in monitoring and treatment of heavy metals and organic pollutants[J]. *Biotechnology Advances*, 2022, 60: 108019.
- [24] McCallum G, Burckhardt J C, He J, et al. A *Bacteroides* synthetic biology toolkit to build an in vivo malabsorption biosensor[J]. *Cell*, 2026, 189(4): 1245-1261.
- [25] Chen S Y, Zhang Y, Li R J, et al. De novo design of the ArsR regulated P_{ars} promoter enables a highly sensitive whole-cell biosensor for arsenic contamination[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94(20): 7210-7218.
- [26] Graham A J, Partipilo G, Dundas C M, et al. Transcriptional regulation of living materials via extracellular electron transfer [J]. *Nature Chemical Biology*, 2024, 20(10): 1329-1340.
- [27] Bergman G Ö, Mecacci S, Dos Santos V A P M, et al. Engineering chimeric signaling proteins for microbial whole-cell biosensors: From design to deployment[J]. *Trends in Biotechnology*, 2026, 44(4): 975-990.
- [28] Wan X Y, Volpetti F, Petrova E, et al. Cascaded amplifying circuits enable ultrasensitive cellular sensors for toxic metals [J]. *Nature Chemical Biology*, 2019, 15(5): 540-548.
- [29] Bradley R W, Nunez-Bajo E, Guder F, et al. Synthetic whole-cell bioelectronic chemical sensing with in situ genetic computing[J]. *Chem and Bio Engineering*, 2025, 2(9): 501-510.
- [30] Li S L, Chen D D, Liu Z Q, et al. Directed evolution of TetR for constructing sensitive and broad-spectrum tetracycline antibiotics whole-cell biosensor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 460: 132311.
- [31] Bu F, Lin X W, Liao W J, et al. Ribocentre-switch: A database of riboswitches[J]. *Nucleic Acids Research*, 2024, 52(D1): D265-D272.
- [32] Ariyaratna M R, Nissanka J P, Methlal K, et al. Simple and cost-effective fluoride riboswitch-based whole-cell biosensor for the determination of fluoride in drinking water[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2025, 197(8): 5552-5562.
- [33] Hoetzel J, Wang T H, Suess B. Beyond the niche-unlocking the full potential of synthetic riboswitches[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 9897.
- [34] Ceroni F, Algar R, Stan G B, et al. Quantifying cellular capacity identifies gene expression designs with reduced burden[J]. *Nature Methods*, 2015, 12(5): 415-418.
- [35] Muhamadali H, Xu Y, Morra R, et al. Metabolomic analysis of riboswitch containing *E. coli* recombinant expression system [J]. *Molecular BioSystems*, 2016, 12(2): 350-361.
- [36] Liu S, Ma B Y, Chi H J, et al. Dynamic interaction: Synthetic biology and cell-free biosensors drive each other forward[J]. *ACS Nano*, 2026, 20(1): 14-33.
- [37] Li S S, Li Z L, Tan G Y, et al. In vitro allosteric transcription factor-based biosensing[J]. *Trends in Biotechnology*, 2023, 41 (8): 1080-1095.
- [38] Li S S, Zhou L, Yao Y P, et al. A platform for the development of novel biosensors by configuring allosteric transcription factor recognition with amplified luminescent proximity homogeneous assays[J]. *Chemical Communications*, 2016, 53 (1): 99-102.
- [39] Liang M D, Li Z L, Wang W S, et al. A CRISPR-Cas12a-derived biosensing platform for the highly sensitive detection of diverse small molecules[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3672.
- [40] Feng L J, Sun Y, Jia W S, et al. Advancements in SELEX technology for aptamers and emerging applications in therapeutics and drug delivery[J]. *Biomolecules*, 2025, 15 (6): 818.
- [41] Zhou J H, Rossi J. Aptamers as targeted therapeutics: Current potential and challenges[J]. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2017, 16(3): 181-202.
- [42] Alkhamis O, Canoura J, Bukhryakov K V, et al. DNA aptamer-cyanine complexes as generic colorimetric small-molecule sensors[J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2022, 61 (3): e202112305.
- [43] Lee Y, Buchheim J, Hellenkamp B, et al. Carbon-nanotube field-effect transistors for resolving single-molecule aptamer-ligand binding kinetics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19 (5): 660-667.
- [44] Du J Y, Dang X M, Gan X R, et al. Efficient bisphenol A removal by a photocatalyst-enzyme hybrid system: Horseradish peroxidase integrated with carbon vacancy-modified carbon nitride nanosheets[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 181: 387-394.
- [45] Kadam A A, Saratale G D, Ghodake G S, et al. Recent advances in the development of laccase-based biosensors via nano-immobilization techniques[J]. *Chemosensors*, 2022, 10 (2): 58.
- [46] Zhang Q, Yu J, Wei Y P, et al. Advances in acetylcholinesterase-based biosensing technologies for organophosphorus pesticide detection: A comprehensive review (2020-2024) [J]. *Food Chemistry*, 2025, 496(Part 2): 146769.
- [47] Martinusen S G, Nelson S E, Slaton E W, et al. Protease engineering: Approaches, tools, and emerging trends[J]. *Biotechnology Advances*, 2025, 82: 108602.

- [48] Seo Y, Zhou A, Nguyen T H, et al. Yeast surface-displayed quenchbody as a novel whole-cell biosensor for one-step detection of influenza A (H1N1) virus[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2024, 13(9): 2926-2937.
- [49] Liu W, Sun W J, Liang C C, et al. *Escherichia coli* surface display: Advances and applications in biocatalysis[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2025, 14(3): 648-661.
- [50] Wang M J, Da Y F, Tian Y. Fluorescent proteins and genetically encoded biosensors[J]. *Chemical Society Reviews*, 2023, 52(4): 1189-1214.
- [51] Fatima M, Abbas N. Expanding horizons in advancements of FRET biosensing technologies[J]. *Biosensors*, 2025, 15(7): 452.
- [52] Chen Y N, Cartwright H N, Ho C H. In vivo visualization of nitrate dynamics using a genetically encoded fluorescent biosensor[J]. *Science Advances*, 2022, 8(42): eabq4915.
- [53] Kostyuk A I, Tossounian M A, Panova A S, et al. Hypocrates is a genetically encoded fluorescent biosensor for (pseudo) hypohalous acids and their derivatives[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 171.
- [54] Roy R, Ray S, Chowdhury A, et al. Tunable multiplexed whole-cell biosensors as environmental diagnostics for ppb-level detection of aromatic pollutants[J]. *ACS Sensors*, 2021, 6(5): 1933-1939.
- [55] Song Y Z, Jiang B, Tian S C, et al. A whole-cell bioreporter approach for the genotoxicity assessment of bioavailability of toxic compounds in contaminated soil in China[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 195: 178-184.
- [56] Fu K, Zheng J, Zhang Y C, et al. Construction of a multiplex biosensor for the on-site rapid detection of phthalates in biological fluids based on single-stranded DNA aptamers[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 499: 140164.
- [57] Zhang X, Charrier M, Ajo-Franklin C M. Multichannel bioelectronic sensing using engineered *Escherichia coli*[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 6953.
- [58] Li S L, Zhu D L, Saha K, et al. Synthetic microbial co-cultures for modular bioelectronic sensing in diverse environments[J]. *Nature Biotechnology*, 2026.
- [59] Zhang Z Q, Xia S Q, Leonard D, et al. A novel nitrite biosensor based on conductometric electrode modified with cytochrome *c* nitrite reductase composite membrane[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, 24(6): 1574-1579.
- [60] Khoshbin Z, Moenfarid M, Zahraee H, et al. A fluorescence imaging-supported aptasensor for sensitive monitoring of cadmium pollutant in diverse samples: A critical role of metal organic frameworks[J]. *Talanta*, 2022, 246: 123514.
- [61] Cayron J, Prudent E, Escoffier C, et al. Pushing the limits of nickel detection to nanomolar range using a set of engineered bioluminescent *Escherichia coli*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(1): 4-14.
- [62] Park D M, Taffet M J. Combinatorial sensor design in *Caulobacter crescentus* for selective environmental uranium detection[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2019, 8(4): 807-817.
- [63] Tsai S T, Cheng W J, Zhang Q X, et al. Gold-specific biosensor for monitoring wastewater using genetically engineered *Cupriavidus metallidurans* CH34[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2021, 10(12): 3576-3582.
- [64] Hessels A M, Merckx M. Genetically-encoded FRET-based sensors for monitoring Zn^{2+} in living cells[J]. *Metallomics*, 2015, 7(2): 258-266.
- [65] Park J, Cleary M B, Li D Y, et al. A genetically encoded fluorescent sensor for manganese(II), engineered from lanmodulin[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(51): e2212723119.
- [66] Subach O M, Piatkevich K D, Subach F V. NeMcHg, genetically encoded indicator for mercury ions based on mNeonGreen green fluorescent protein and merP protein from *Shigella flexneri*[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2024, 12: 1407874.
- [67] Zhang Q L, Wei Z X, Jia X Q. Controllable detection threshold achieved through the toehold switch system in a mercury ion whole-cell biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, 256: 116283.
- [68] Li X S, Zhang X H, Wang J, et al. EDTA-masked Tl^{+} detection using a pair of non-G-quadruplex aptamers with opposite fluorescence responses[J]. *Analytical Chemistry*, 2025, 97(31): 17242-17250.
- [69] Wang J, Kaiyum Y A, Li X M, et al. Kinetic and affinity profiling rare earth metals using a DNA aptamer[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(2): 1831-1839.
- [70] Woo S G, Moon S J, Kim S K, et al. A designed whole-cell biosensor for live diagnosis of gut inflammation through nitrate sensing[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020, 168: 112523.
- [71] Liu F, Wang M, Liu H W, et al. Development and application of a highly specific whole-cell biosensor for supersulfide detection in environmental samples[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2025, 287: 117731.
- [72] Kumar V, Kumar V, Singh A K, et al. A potentiometric biosensor for cyanide detection using immobilized whole cell cyanide dihydratase of *Flavobacterium indicum* MTCC 6936 [J]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 73(10): 1014-1019.
- [73] Sun S W, Peng K L, Sun S, et al. Engineering modular and highly sensitive cell-based biosensors for aromatic contaminant monitoring and high-throughput enzyme screening [J]. *ACS Synthetic Biology*, 2023, 12(3): 877-891.
- [74] Chen X J, Yao H, Song D, et al. Extracellular chemoreceptor of

- deca-brominated diphenyl ether and its engineering in the hydrophobic chassis cell for organics biosensing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433: 133266.
- [75] Chen S T, Zhao C, Kang X D, et al. A cell-free fluorescence biosensor based on allosteric transcription factor NalC for detection of pentachlorophenol[J]. *Biotechnology Letters*, 2024, 46(5): 725-737.
- [76] Arce-Rodríguez A, Benedetti I, Borrero-de Acuña J M, et al. Standardization of inducer-activated broad host range expression modules: Debugging and refactoring an alkane-responsive AlkS/P_{alkB} device[J]. *Synthetic Biology*, 2021, 6(1): 1-11.
- [77] Chen D D, Zhao J D, Xu S M, et al. Detection of short-chain chlorinated aliphatic hydrocarbons through an engineered biosensor with tailored ligand specificity[J]. *Analytical Chemistry*, 2024, 96(39): 15614-15623.
- [78] Mann M M, Berger B W. A genetically-encoded biosensor for direct detection of perfluorooctanoic acid[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 15186.
- [79] Park J, Yang K A, Choi Y, et al. Novel ssDNA aptamer-based fluorescence sensor for perfluorooctanoic acid detection in water[J]. *Environment International*, 2022, 158: 107000.
- [80] Guo A J, Guo W, Guo Y Q, et al. Clustered regularly interspaced short palindromic repeat-based colorimetric aptasensor combined with smartphone imaging and deep learning enables selective recycling and visual prediction of microplastics in the environment[J]. *Analytical Chemistry*, 2026, 98(16): 11886-11898.
- [81] Segura A, Hernández-Sánchez V, Marqués S, et al. Insights in the regulation of the degradation of PAHs in *Novosphingobium* sp. HR1a and utilization of this regulatory system as a tool for the detection of PAHs[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590-591: 381-393.
- [82] Liu X X, Guo S Q, Xu Y, et al. Development of a portable biosensor for glyphosate detection using bacterial surface-displayed glyphosate oxidase[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2026, 292: 117974.
- [83] Xue J Q, Mao K, Tang Z H, et al. Machine-learning-assisted CRISPR/Cas12a biosensors for monitoring organophosphorus pesticide degradation[J]. *Analytical Chemistry*, 2025, 97(39): 21491-21501.
- [84] Cui R X, Wang M L, Yuan S Y, et al. An easy-to-use and field-deployable cell-free bioreporter for environmental detection of tetracyclines and macrolides[J]. *Analytical Chemistry*, 2026, 98(8): 5912-5922.
- [85] Lai S S, Guo J H, Li X, et al. Dual DNA recycling amplification-assisted CRISPR/Cas12a cleavage for dual-channel ratiometric fluorescence biosensing of kanamycin antibiotic[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2025, 417(14): 3191-3200.
- [86] Xu S M, Yuan H, Chen S P, et al. Selection of DNA aptamers against polychlorinated biphenyls as potential biorecognition elements for environmental analysis[J]. *Analytical Biochemistry*, 2012, 423(2): 195-201.
- [87] Liu S, Ding Z S, Lu X, et al. Deoxyribonucleic acid activator-triggered entropy-driven catalysis-modulated CRISPR/Cas12a-based portable biosensor for simultaneous detection of multiple pathogenic bacteria[J]. *ACS Sensors*, 2026.
- [88] Wang Q, Li J X, Zhang Z J, et al. Fighting mutations with mutations: Evolutionarily adapting a DNA aptamer for high-affinity recognition of mutated spike proteins of SARS-CoV-2 [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2025, 64(3): e202415226.
- [89] Chen Y B, Xia W H, Pan Z W, et al. Development of a cell-free, toehold switch-based biosensor for rapid and sensitive Zika virus detection[J]. *Analytical Chemistry*, 2025, 97(6): 3486-3494.
- [90] Choi Y, Ma Y P, Wei W, et al. Detection of microplastics pollution using a green fluorescent protein-based microbial biosensor coupled with Raman spectroscopy[J]. *ACS Sensors*, 2025, 10(9): 6615-6622.
- [91] Jung J K, Alam K K, Verosloff M S, et al. Cell-free biosensors for rapid detection of water contaminants[J]. *Nature Biotechnology*, 2020, 38(12): 1451-1459.
- [92] Cai Q Q, Shi H X, Sun M N, et al. Sensitive detection of *Salmonella* based on CRISPR-Cas12a and the tetrahedral DNA nanostructure-mediated hyperbranched hybridization chain reaction[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(51): 16382-16389.
- [93] Kalvapalle P B, Sridhar S, Silberg J J, et al. Long-duration environmental biosensing by recording analyte detection in DNA using recombinase memory[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2024, 90(4): e0236323.
- [94] Applegate B M, Kehrmeier S R, Sayler G S. A chromosomally based *tod-luxCDABE* whole-cell reporter for benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) sensing[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(7): 2730-2735.
- [95] Dawson J J C, Iroegbu C O, Maciel H, et al. Application of luminescent biosensors for monitoring the degradation and toxicity of BTEX compounds in soils[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, 104(1): 141-151.
- [96] Oh S J, An J U, Park J H, et al. A high-sensitivity genetically encoded biosensor for terephthalic acid detection in PET degradation[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2025, 14(9): 3497-3509.
- [97] He W, Hu Z H, Yuan S, et al. Bacterial bioreporter-based mercury and phenanthrene assessment in Yangtze River Delta soils of China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2018, 47

- (3): 562-570.
- [98] Chemla Y, Levin I, Fan Y Y, et al. Hyperspectral reporters for long-distance and wide-area detection of gene expression in living bacteria[J]. *Nature Biotechnology*, 2026, 44(2): 258-268.
- [99] Schamfuß S, Neu T R, Harms H, et al. A whole cell bioreporter approach to assess transport and bioavailability of organic contaminants in water unsaturated systems[J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2014, 94: e52334.
- [100] Jiang B, Li G, Xing Y, et al. A whole-cell bioreporter assay for quantitative genotoxicity evaluation of environmental samples [J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 384-392.
- [101] Łaska G, Matejczyk M, Dauksza U. The expression of different gene constructs in *Escherichia coli* SM *lux* biosensor after exposure to drugs[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 31899.
- [102] Ravikumar S, Ganesh I, Yoo I K, et al. Construction of a bacterial biosensor for zinc and copper and its application to the development of multifunctional heavy metal adsorption bacteria[J]. *Process Biochemistry*, 2012, 47(5): 758-765.
- [103] Liu H, Zhang L G, Wang W W, et al. An intelligent synthetic bacterium for chronological toxicant detection, biodegradation, and its subsequent suicide[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(31): 2304318.
- [104] Guo M Z, Chen S J, Su H F, et al. High-throughput visualization mutation screening technology to enhance the specificity of CadR based whole-cell cadmium biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, 256: 116266.
- [105] Zhang Y, Hu F, Zhou R Y, et al. Enhancing selectivity in affinity biosensors through biorecognition-driven suppression of nonspecific binding[J]. *ACS Sensors*, 2026, 11(2): 853-884.
- [106] Dauparas J, Lee G R, Pecoraro R, et al. Atomic context-conditioned protein sequence design using LigandMPNN[J]. *Nature Methods*, 2025, 22(4): 717-723.
- [107] Kang Z Q, Zhang M M, Gao K Y, et al. An L-2-hydroxyglutarate biosensor based on specific transcriptional regulator LhgR[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3619.
- [108] Kang Z Q, Hou S, Gao K Y, et al. An ultrasensitive biosensor for probing subcellular distribution and mitochondrial transport of L-2-hydroxyglutarate[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(35): 2404119.
- [109] Zhao J H, Dong J H, Xu R, et al. Novel glove-type flexible aptasensor based on DNA hydrogel for the detection of organophosphorus pesticide residues in vegetables[J]. *Sensors and Actuators B. Chemical*, 2026, 447(1): 138716.
- [110] Hu W C, Zhao X P, Wang J, et al. Recent progress in metal-organic frameworks-based biosensors for pathogen detection [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 178: 117857.
- [111] Cai Y Y, Dong T, Bian Z H, et al. Metal-organic frameworks based fluorescent sensing: Mechanisms and detection applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, 529: 216470.
- [112] Halawa E M, Fadel M, Al-Rabia M W, et al. Antibiotic action and resistance: Updated review of mechanisms, spread, influencing factors, and alternative approaches for combating resistance[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2024, 14: 1305294.
- [113] Arnolds K L, Dahlin L R, Ding L, et al. Biotechnology for secure biocontainment designs in an emerging bioeconomy[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2021, 71: 25-31.



通讯作者: 高超(1981—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向为微生物生理与代谢、生物催化、系统代谢工程。
E-mail: jicerb@sdu.edu.cn



共同通讯作者: 康熙琪(1995—), 男, 博士后。研究方向为生物传感器。
E-mail: kangzhaoqi@sdu.edu.cn



第一作者: 侯爽(2000—), 女, 博士研究生。研究方向为生物传感器。
E-mail: 202112531@mail.sdu.edu.cn