

生物传感器在重金属污染水体实时监测中的应用研究

张莹璐*

(大同师范高等专科学校, 大同 037000)

摘要:随着工业化和城市化进程的加速, 重金属污染已成为全球水环境安全的重要威胁。传统检测方法存在操作复杂、耗时长、依赖大型仪器等局限性, 而生物传感器凭借其高灵敏度、快速响应和便携性等优势, 成为重金属污染实时监测的创新解决方案。本文综述了生物传感器的工作原理、技术分类及其在重金属检测中的应用进展, 探讨了现有技术的挑战与未来发展方向, 以期对环境监测技术的优化提供参考。

关键词:生物传感器; 重金属; 水体监测

0 引言

重金属(如铅、镉、汞、砷等)通过工业废水排放进入水环境, 具有生物累积性和毒性, 严重威胁生态安全和人类健康。传统检测方法(如原子吸收光谱法、电感耦合等离子体质谱法)虽精度高, 但存在设备昂贵、操作复杂、无法实时监测等问题^[1]。近年来, 生物传感器技术通过结合生物学识别元件与物理化学信号转换器, 实现了对重金属离子的快速、原位检测, 成为环境监测领域的研究热点。本研究主要综述生物传感器的工作原理、技术分类及其在重金属检测中的应用进展, 并探讨现有技术的挑战与未来发展方向, 为环境监测技术的优化提供参考, 从而为环境保护和水质安全管理提供有力的技术支持。

1 生物传感器的工作原理与技术分类

1.1 工作原理

生物传感器主要由生物识别元件和信号转换器组成。生物识别元件通常由酶、抗体、核酸、全细胞等生物分子构成, 通过其独特的结构和功能, 与特定的化学物质或生物分子相互作用, 实现对目标物质的精确识别^[2]。信号转换器将识别事件转化为可检测信号, 如电化学、光学、压电信号等, 这些信号的类型和性能决定了生物传感器的灵敏度和准确性。生物传感器的工作流程包括三个主要步骤: ①识别结合: 生物识别元件与目标重金属离子特异性结合, 其特异性决定了传感器的选择性和灵敏度。通过表面

活性位点, 生物元件与重金属离子形成稳定复合物。②信号转换: 生物元件与重金属离子结合后, 转换器将此事件转化为可检测信号, 如电流、荧光强度或颜色变化, 为数据分析提供基础。信号转换器的作用是将生物识别元件与目标物质结合产生的变化转换为电信号或其他信号, 便于电子设备处理。③数据输出: 通过仪器或便携设备处理和分析转换信号, 生物传感器能定量分析目标重金属离子。数据输出让用户直观了解浓度水平, 便于决策和处理^[3]。

1.2 技术分类

(1) 酶生物传感器

利用重金属离子对酶活性产生的抑制作用来进行检测是一种非常有效的方法。以脲酶为例, 其酶活性会受到重金属离子的显著抑制。基于该特性构建的一种电化学传感器能够检测到极低浓度的重金属离子。这种传感器的检测限可以达到纳摩尔级别, 这使得它在环境监测、食品安全检测等领域具有重要的应用价值。其传感器的工作原理为重金属离子对酶活性的抑制作用会导致电化学信号的变化, 通过测量这种变化来检测重金属离子的存在。

(2) DNA 生物传感器

基于 DNAzyme 或适配体的特异性识别能力, 这些分子识别元件能够精确地识别并结合到特定的靶标分子上。例如, DNAzyme 在铅离子存在时, 能够发挥其催化活性, 促使底物分子发生裂解反应, 进而产生可检测的荧光信号。这种基于 DNAzyme 的检测方法具有极高的灵敏度, 能检测到极低浓度的铅离子。

* 通信作者: 张莹璐, 硕士, 实验师, 研究方向为生物科学。E-mail: 3014562113@qq.com

(3)全细胞生物传感器

通过基因工程的先进技术手段，科学家们能够对微生物进行改造，让它们表达出能够响应重金属的特定元件。例如，许玫英领导的研究团队成功构建了一个基于 *Sphingobium xenophagum* C1 菌株的全细胞传感器^[4]。该传感器具备特异性检测三氧化二锡的能力，通过荧光素酶信号的放大机制，实现对三氧化二锡的线性响应，从而使得检测过程更为精确和灵敏。其工作原理是，三氧化二锡会与菌株中的特定元件结合，激活荧光素酶的活性，产生荧光信号。

(4)免疫传感器

通过抗原与抗体之间的特异性结合反应，可以有效地检测出重金属复合物的存在。例如，基于纳米抗体的免疫层析试纸条技术可以对铅离子进行现场快速检测。该技术不仅提高了检测的灵敏度和特异性，而且由于其操作简便、结果快速呈现的特点，非常适合于现场即时检测的需求。其工作原理是铅离子会与纳米抗体结合，形成抗原-抗体复合物，通过试纸条上的标记物，可以直观地显示出检测结果^[5]。

2 生物传感器在重金属水体监测中的应用案例

2.1 荧光生物传感器

荧光纳米颗粒：DNA 网状纳米结构荧光传感器的工作原理基于双茎环 DNA 探针的自组装形成网状结构。在重金属(例如铀离子)存在的情况下，会触发荧光信号的放大^[6]。其检测灵敏度极高，检测限低至 2 pmol/L，远低于传统方法的 10 nmol/L，其线性范围从 10 pmol/L 到 1 mmol/L，满足从痕量到高浓度污染检测的需求。与传统的 DTPA-CaCl₂ 法相比，误差小于 10%，且无需复杂的样品前处理。其优势在于信号扩增效率高，适合现场快速检测，实际应用中该技术适用于土壤和水体样品的检测。

基因工程菌：基因工程菌荧光传感器技术的改进，通过将荧光蛋白基因导入大肠杆菌，实现了在镍离子存在时荧光强度的变化，能选择性地仅对镍离子响应，有效抵抗其他重金属的干扰。其检测限达到亚纳摩尔级，非常适合微量污染的监测。此外，该技术具有高生物相容性、低成本，并且可以实现批量生产。

分子逻辑门荧光传感器：利用功能核酸的二进制编码(0/1)，通过特定的荧光信号组合来识别铅、镉等重金属。有效态铅的检测限达到了 0.2 pmol/L^[7]。该技术具有智能化特性，支持 OR、AND、XOR 等逻辑运算，能区分多种重金属的组合。它适用于复杂水体中多种目标污染物的同步检测。

2.2 电化学传感器

纳米材料增强：选择纳米材料修饰电极，采用氧化锡、氧化铜以及碳纳米管，以提升电极的性能^[7]。检测性能卓越，对镉的检测限达到 1 μmol/L，对铅的检测限更是低至 0.1 nmol/L^[8]。稳定性高，经过纳米材料修饰的电极在重复使用 20 次后，信号衰减仍小于 5%。优势明显，具有强大的抗干扰能力，响应时间缩短至 30 s 内，适用于工业废水的实时监测^[8]。

便携式装置：便携式伏安法传感器技术参数体积仅为 3 cm³，集成了微电极和信号处理模块。其对镉离子的检测下限为 1 μmol/L，对铅离子的检测下限为 0.5 μmol/L。在实际应用中，该传感器成功地在野外环境中检测了河流和地下水样本，准确率超过 95%^[9]。

自供电电化学传感器：酶生物燃料电池(EBFC)与适体识别元件的结合，实现了无需外部电源的检测^[10]。铅离子的检测限达到 0.05 nmol/L，锌离子的检测限为 0.1 nmol/L。在稳定性测试中，连续使用 5 次后，功能保持率依然超过 90%。该传感器应用前景极为广阔^[11]，尤其适合于偏远地区的水质监测，且能有效降低成本 50% 以上。

2.3 比色法与试纸条技术

试纸条法：基于 DNAzyme 技术的试纸条能快速检测铅和铜离子，通过颜色变化实现，无需复杂设备。检测时间缩短至 1~2 h，提高了现场检测的便捷性。试纸条特异性高，能准确区分重金属离子，减少误报和漏报。保存和运输简便，无需特殊条件，增强了实际应用可行性^[12]。该技术在重金属水体监测领域具有巨大潜力，为环境保护和水质安全监测提供了高效手段^[13]。

微流控芯片：集成样品预处理与检测模块，实现了多参数同步分析，提高了水体中砷、汞等有害物质在线监测的效率和准确性。微流控芯片技术不仅限于单一重金属离子检测，其集成能力允许多种重金属离子同时检测。通过精密微流道设计，实现了样品处理、反应、检测的全程自动化。这种同步分析功能提升了重金属水体监测的效率和准确性，尤其在复杂水体环境中，能迅速提供全面污染信息，支持环境管理决策。微流控芯片的小型化和便携性，也便于野外现场监测，实现实时监测和快速响应^[14]。

3 技术挑战与优化策略

3.1 主要挑战

抗干扰能力不足：在分析含有有机物和金属离子的复杂水体时，会遭遇干扰，导致假阳性和假阴性的结果^[15]。为了确保分析结果的准确可靠，必须通过样品预处理以及

选择恰当的分析方法来克服这些干扰。

长期稳定性差: 生物元件如酶和细胞易失活, 影响传感器寿命, 且对环境变化敏感, 如温度、pH 值等, 导致传感器性能不稳定, 影响监测结果的连续性和准确性。保持生物元件长期稳定性和活性是生物传感器研究的关键问题^[16]。

标准化缺失: 缺乏统一的生物有效性评价指标体系限制了生物传感器技术的推广。不同传感器对重金属离子的响应差异以及环境条件变化导致的检测结果波动, 使得性能比较和数据应用复杂^[17]。因此, 建立统一、可靠且易操作的评价体系对生物传感器在重金属污染监测中的应用至关重要^[18]。

3.2 优化方向

纳米材料与合成生物学结合, 利用量子点和石墨烯增强信号稳定性, 基因编辑技术优化微生物耐受性和特异性, 实现生物工程技术突破。量子点提供稳定荧光信号, 石墨烯增强电化学传感器性能, 提升生物传感器灵敏度、准确性和使用寿命。结合基因编辑, 提高微生物对重金属污染的耐受性和特异性, 扩大生物传感器应用范围。

多学科交叉, 开发传感器研究土壤与水界面物质迁移, 深入理解重金属环境行为^[19]。结合大数据和人工智能, 优化监测数据处理, 提升监测效率和准确性。

智能化与物联网集成, 利用人工智能优化数据分析, 构建全面监测网络。无线传输技术实现数据实时共享, 提升监测智能化和自动化。开发预警系统, 利用机器学习实时分析数据, 快速响应重金属污染风险, 提供数据支持^[20]。

4 结论与未来展望

综上所述, 生物传感器在重金属污染水体实时监测领域已经取得了显著的进展, 展现了广泛的应用潜力和价值。荧光生物传感器、电化学传感器以及比色法与试纸条技术各自具有独特的优势, 为重金属离子的快速、准确检测提供了有力工具。然而, 当前生物传感器仍面临抗干扰能力不足、长期稳定性差以及标准化缺失等挑战。未来的研究可以从多个方面进行优化。纳米材料与合成生物学的结合有望为生物传感器带来信号稳定性的增强以及灵敏度和准确性的提升。多学科交叉研究将促进对重金属环境行为的深入理解, 为传感器的设计和优化提供科学依据。智能化与物联网的集成将进一步提升监测网络的全面性和智能化水平, 为环境保护提供更加高效、准确的技术支持。随着这些优化策略的实施, 生物传感器在重金属污染水体实时监测中的应用前景将更加广阔, 为水质安全和环境保护事业作出更大贡献。

参考文献

- [1] 李丽丽. 重金属检测技术在水环境检测中的应用[J]. 山西化工, 2023, (7): 102-103, 106.
- [2] 宁梅. 生物监测技术在水环境监测中的应用[J]. 资源节约与环保, 2023, (9): 72-75
- [3] 宋萍. 生物传感器在水环境检测中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2024, (11): 158-160.
- [4] CHENX 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, (2): 433.
- [5] 张迪, 鞠睿, 李丽梅, 等. 基于转录因子生物传感器在环境分析中的应用[J]. *生物技术通报*, 2024, 40(6): 114-125.
- [6] 王辉. 农田土壤和灌溉水中重金属检测关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [7] 刘鑫, 刘士兴, 邵佳豪, 等. 基于 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MoS}_2$ -全氟磺酸纳米复合材料的铅离子电化学传感器[J]. *微纳电子技术*, 2024, 61(9): 71-79.
- [8] 冯丽锦. 纳米材料修饰电极的制备及其对铅离子和双氧水的检测[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- [9] 徐翼飞. 基于伏安传感器阵列与深度学习的水质量参数测定研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2024.
- [10] 周明. 基于酶生物燃料电池的自我供电电化学生物传感器[C]//中国化学会第30届学术年会摘要集-第三分会: 纳米传感新原理新方法, 2016.
- [11] 徐庆章. 新型抗污染电化学生物传感器的构建及其在生物标志物检测中的应用[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- [12] 杜隽睿. 双功能纳米酶传感平台用于牙周炎氧化应激微环境监测的实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [13] 陈浩婷, 张玉静, 刘洁, 等. 低磷胁迫下番茄转录因子WRKY6功能分析[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(10): 136-147.
- [14] 李仁瀚, 张乐乐, 刘春立, 等. 基于紫色杆菌素生物合成途径的L-色氨酸生物传感器的构建[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(10): 80-92.
- [15] 李伟伟. 环境水质分析中重金属检测技术的应用研究[J]. *造纸装备及材料*, 2023, (1): 144-146.
- [16] 赵青凤. 基于水质分析中重金属检测技术的探讨[J]. *皮革制作与环保科技*, 2024, (7): 5-6, 9.
- [17] 陈静. 重金属检测技术在水质分析中的应用[J]. *黑龙江环境通报*, 2024, (4): 154-156.
- [18] 余会玲, 郑培杰. 环境水质分析中重金属检测技术的应用研究[J]. *中国轮胎资源综合利用*, 2024, (12): 112-114.
- [19] 高素青. 重金属检测技术在环境水质分析中的运用[J]. *冶金管理*, 2023, (01): 76-78.
- [20] 刘洁. 环境水质分析中重金属检测技术的应用探析[J]. *黑龙江环境通报*, 2025, (02): 133-135.