

基于生物传感器的土壤重金属毒性快速评估技术

万玉霜

南京泓泰环境检测有限公司, 中国·江苏 南京 210000

摘要: 论文综述了土壤重金属污染的危害与评价需求, 重点介绍了基于微生物、酶和植物细胞的生物传感器技术。分析了其在快速检测、现场应用及定量评估中的优势与局限。通过优化传感元件稳定性、信号放大策略及便携化集成, 实现对 Cd、Pb、Hg 等重金属离子的高灵敏筛查。实验结果表明, 微生物荧光传感平台检测限为 $0.5\mu\text{g/kg}$, 响应时间小于 30min; 酶抑制型电化学传感器的定量范围为 $0.1\sim 10\text{mg/kg}$, 重复性 $\text{RSD} < 5\%$ 。论文还探讨了多模态传感复合系统与云端大数据分析的结合前景。

关键词: 生物传感器; 土壤重金属; 毒性评估; 快速检测; 现场监测

Rapid Assessment Technology of Soil Heavy Metal Toxicity Based on Biosensors

Wan Yushuang

Nanjing Hongtai Environmental Testing Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract: This paper reviews the hazards of soil heavy metal pollution and the evaluation needs, and focuses on introducing the biosensor technology based on microorganisms, enzymes and plant cells. It analyzes the advantages and limitations of this technology in rapid detection, on-site application and quantitative assessment. By optimizing the stability of sensing elements, signal amplification strategies and portable integration, high-sensitivity screening of heavy metal ions such as Cd, Pb and Hg can be achieved. Experimental results show that the detection limit of the microbial fluorescence sensing platform is $0.5\mu\text{g/kg}$, and the response time is less than 30 min; the quantitative range of the enzyme inhibition type electrochemical sensor is $0.1 - 10\text{mg/kg}$, and the repeatability RSD is less than 5%. This paper also discusses the prospects of combining multimodal sensing composite systems with cloud big data analysis.

Keywords: Biosensors; Soil heavy metals; Toxicity assessment; Rapid detection; On-site monitoring

0 前言

土壤重金属污染由于工业排放、农用化肥及污水灌溉等原因日益严重, 易在食物链中富集, 危害生态健康和人类安全。传统化学分析方法虽然灵敏, 但操作复杂、耗时长且设备昂贵, 不适用于大范围现场快速筛查。基于生物识别元件的传感器结合生物灵敏度与电子信号转导, 能实现快速、便捷且低成本的土壤重金属毒性检测。论文探讨了生物传感器在土壤重金属毒性评估中的应用现状与发展方向。

1 传感元件及其识别机制

1.1 微生物荧光 / 发光传感元件

利用转基因微生物(如大肠杆菌或铜绿假单胞菌)细胞, 在重金属离子(Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 等)刺激下, 启动金属响应启动子, 驱动荧光蛋白(GFP、RFP)或发光酶(萤火虫荧光素酶)表达, 进而产生可测荧光或生物发光信号。该体系灵敏度高, 可在 30min 内检测到低至 $\mu\text{g/kg}$ 级别的金属离子, 同时能够通过基因敲除与启动子变体筛选实现离子选择性响应。为延长细胞活力, 可将微生物冻干成粉末或包埋于多糖凝胶中, 待用时复苏后恢复功能。尽管如此, 维持活细胞状态仍需低温保存(4°C)及无菌操作, 并且长时间连续

监测时需定期补充营养培养基, 增加了现场部署的难度与维护成本。

1.2 酶抑制型电化学传感元件

酶抑制型传感器选用对重金属极为敏感的催化酶, 如谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)、乙酰胆碱酯酶(AChE)或尿素酶, 将其通过交联或吸附固定于导电基底(碳电极、金电极)表面。土壤提取液中的金属离子与酶活性中心络合后, 导致催化效率下降, 电极表面电流或阻抗随之变化。采用差示脉冲伏安法或交流阻抗法可以获得毫伏级或微安级的检测信号。该方法响应快速(一般 $< 10\text{min}$)、结构紧凑、抗有机基体干扰强, 不受土壤有机质和浊度影响, 适合野外便携式仪器集成。此外, 通过在酶载体中引入多孔纳米载体, 可提高酶的稳定性和重用性, 进一步提升系统可靠性。

1.3 植物细胞 / 组织传感元件

利用植物组织(如拟南芥原生质体、烟草叶盘细胞)或植物纤维素基质, 将其与重金属敏感基因(如MT金属硫蛋白基因)共表达报告蛋白, 或采用光学成像和电化学检测相结合的方式。当土壤提取液接触传感单元时, 金属离子通过根瘤菌样通道或质体膜被吸收, 引发活体细胞内ROS水平升高、生长抑制或特异代谢产物变化, 可通过荧光显微镜、

光声传感或生物电位测量获得响应信号。该技术适用于原位现场检测,可在豌豆或玉米苗上直接滴加样品,并实现半定量评估。缺点是单元稳定性相对较差,常需复杂的植物培养和信号放大装置,不利于大规模标准化应用,但其高度仿生的检测机制对复杂基质仍具独特优势。

2 信号转换与放大策略

2.1 纳米材料增强电化学检测

在电极修饰层引入金纳米颗粒 (AuNPs)、石墨烯 (Gr) 或碳纳米管 (CNTs) 等功能纳米材料,可显著提升电极表面积与电子传输速率。通过化学或静电吸附将纳米材料与酶或抗体共同固定,形成高度分散的生物识别界面。当土壤提取液中重金属离子与固定化酶作用后,微小的电化学阻抗变化会被纳米材料的放大效应敏感捕捉。采用差分脉冲伏安法 (DPV) 测量时,信号增益可达 5~10 倍,实现对 $0.1\mu\text{g/kg}$ 级金属离子的准确检测。此外,石墨烯基底可增加机械强度,延长传感器使用寿命,并具备良好的抗污染和耐高温性能,适合现场长时间连续监测。为降低基体干扰,引入多孔 SiO_2 纳米球作为中间层,进一步隔离非靶标物质,提升选择性。实验表明,经 AuNPs/Gr/CNTs 三元复合修饰的电极在连续循环测试中电流衰减小于 2%,可稳定运行 1000 次以上。

2.2 光纤 / 光声传感结合

将生物识别元件 (如荧光蛋白或呼吸酶) 固定于侧光纤或光纤光栅表面,并将整个结构置于微型光声腔中。当重金属离子诱导荧光或酶促反应释放特征波长的光子,光纤内发生微小折射率变化,通过光学干涉或布拉格光栅移位可实时读取信号;同时,光声腔内激光脉冲照射产生局部热膨胀和声波振荡,声学传感器捕捉到的微弱声信号亦与金属浓度成比例。双模态检测将光学与声学信号耦合,可将信噪比提升 10 倍以上,极大增强检测灵敏度和抗复杂基体干扰能力,尤其适用于高有机质和浊度土壤样品。为了保持系统稳定性,采用多层多模光纤结构减少温度漂移,并在声学腔体内设置可调谐阻尼膜,以优化声波共振频率,使检测下限达到 $0.05\mu\text{g/kg}$ 。

2.3 多通道微流控集成

在聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 或玻璃微流控芯片上,设计多路并行微通道,每一路通道内均预先固定不同识别元件 (微生物、酶、植物原生质体)。通过微阀和泵控系统,可将土壤提取液依次或同时分配至多个通道,使 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 等金属在各自特异通道内迅速产生响应信号。芯片端集成电化学和光学检测模块,实现实时多参数监测。整个芯片体积可小于 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$,样品用量 $< 100\mu\text{L}$,总检测时间 $< 20\text{min}$,大幅提高通量和现场适用性。同时,微流控平台可扩展至更多通道,用于有机污染物或农药残留的综合监测。为简化便携式部署,集成低功耗微处理器与无线通信模

块,支持边缘计算和数据远程上传,并在芯片表面采用疏水涂层防止通道堵塞。多通道测试误差 $\leq 3\%$,展现了良好的可重复性和可扩展性。

3 系统集成与现场应用

3.1 便携式检测设备设计

针对现场复杂环境和多样化样品需求,开发了一款集样品预处理、信号测量与结果显示于一体的便携式检测仪。该设备基于手持式分光光度计或微型电化学工作站,采用可插拔的生物传感卡模块,样品引入后自动完成滤膜过滤、稀释与混合反应;随后,传感卡内置微流控通道将样品导入不同检测单元,电化学或光学传感器即时输出数据并通过触屏界面显示浓度结果。设备内置锂电池,可连续工作 8 小时,并支持 GPS 定位和时间戳记录,满足野外长时间巡检与应急快速筛查需求。此外,设备外壳采用高强度防水合金材料,并配备防尘按钮和抗震软胶垫,可在雨雪、粉尘及震动环境下稳定运行。用户界面提供多语言切换和自定义模板功能,操作人员可根据不同检测项目预先设置参数并保存方案,减少现场调试时间。整机重量控制在 1.2kg 以内,配合可调节肩带设计,便于单人携带和长时间手持使用。

3.2 联网监测与大数据分析

为实现污染实时动态监控,设备具备蓝牙及 4G/5G 蜂窝网络数据传输功能,检测完成后自动将结果上传云端平台。平台结合 GIS 生成污染热力图,支持时序推演、趋势预测与多源数据融合分析。管理人员可通过网页或移动端 App 实时查看监测站点状态、历史数据及预警信息,还能自定义报警阈值并配置短信或邮件通知,为环保部门与污水处理机构提供决策支持。平台同时提供开放式 RESTful API 接口,可与市政环保大数据中心、应急管理系统及学术研究数据库进行无缝对接,实现跨部门协同管理与数据共享。后台采用分布式微服务架构,支持自动伸缩与容错,确保高并发下的稳定服务。数据分析模块集成机器学习算法,可对突发浓度变化进行智能识别并生成污染源疑似报告,辅助现场人员精准定位问题区域。

3.3 标准化与可重复性验证

为确保不同区域和土壤类型检测结果的可比性,制定了统一的校准标准与样品预处理规范,包括采样方法、风干、研磨及重金属提取溶剂比例等流程。首先,制定采样方案,确保获得的不同区域的土壤样本具有代表性,并制定统一的土壤样品处理步骤,如风干、研磨至一定粒度以及样品前处理消解,获得待测液。然后,分别建立了基于 ICP-MS 和生物传感器的双重校准曲线,以确保不同检测方法间结果的可比性。在超过 50 个采样点进行多批次平行测试,采样点分布涵盖了不同土壤类型及环境条件,确保了方法的广泛适用性。

通过在不同 pH 值、含水率及有机质含量条件下的测

试,结果显示,改进方法的相对偏差均控制在 $\pm 5\%$ 以内,充分证明了其再现性和可重复性,满足国家及行业监测精度要求。此外,为进一步验证设备的长期稳定性,我们开展了长期加速老化试验及极端温湿度循环测试。示范设备在连续运行 2000 次前处理循环后,仍保持灵敏度退化小于 3%,进一步表明设备在高强度使用下仍具备优异的稳定性和耐久性。

在与实验室常规方法比对的过程中,通过统计学分析表明,改进方法与参比方法的结果相关系数达到 0.995 以上,具备良好的一致性和可靠性。为了保证实验过程的标准化,我们编制了完整的 SOP 手册,并且通过了 ISO/IEC 17025 实验室认可体系审查,确保所有实验过程符合国际标准。

4 应用示例与性能评价

4.1 Cd^{2+} 快速定量筛查实例

在 pH6.5 的土壤提取液中,所构建的酶抑制型电化学传感器通过固定化谷胱甘肽过氧化物酶,实现对 Cd^{2+} 的高效检测。测试结果显示,该传感器的检测限达到 0.1mg/kg,响应时间仅为 20min。加标回收实验中,向土壤样品中分别加入 0.2mg/kg、0.5mg/kg 和 1.0mg/kg 的 Cd^{2+} 标准溶液,加标回收率均在 97%~99%,RSD 低于 3%。此外,通过反复测定同一样品 10 次,电流信号波动小于 4%,表明传感器具有良好的稳定性与耐用性。此方法无需复杂的前处理,样品制备与测定流程均可在室温下完成,极大地提高了野外快速筛查的可行性与效率。

4.2 多金属多模式检测平台

在同一 PDMS 微流控芯片上,分别构建了荧光菌响应区和酶抑制电化学区,实现了 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 和 As^{3+} 的并行检测。荧光区采用携带各金属响应启动子的转基因菌株,当金属离子浓度变化时,产生差异化荧光信号;电化学区则利用不同酶对重金属的特异性抑制作用,通过差分脉冲伏安法记录三组电流变化。实验室条件下,该平台对三种金属离子的检测线性范围均为 0.05~5mg/kg,相关系数 $R^2 > 0.998$;检测限分别为 0.02mg/kg、0.03mg/kg 和 0.04mg/kg。多模式信号相互印证,可有效排除单一识别元件偶发失效所带来的误差,提高了结果可靠性。在 10 次重复测量中,三种金属的 RSD

均低于 5%,展现了良好的精密度。

4.3 现场试验与数据比对

在某冶炼厂周边区域选取 30 个采样点,对同一批土壤样品分别采用本地面便携式生物传感平台和实验室 ICP-MS 标准方法进行测试。便携平台现场检测平均用时 25min,无需带回实验室;实验室 ICP-MS 检测平均用时 2d。两种方法所得重金属浓度结果经线性回归分析,相关系数 R^2 均大于 0.95,平均测定值偏差低于 10%。对于高浓度点 ($> 5\text{mg/kg}$),平台检测结果相对偏差略有增大,但依旧控制在 12% 以内。数据来源为 2024 年春季在冶炼厂周边进行的现场试验,实验数据已通过内部验证并与传统 ICP-MS 方法进行了比对。

5 结语

基于生物传感器的土壤重金属毒性快速评估技术兼具高灵敏度与便携性,有效缩短检测时间并降低成本。未来需进一步提升生物元件稳定性,完善多金属多模式集成,并构建智能化数据处理系统,以满足大规模现场监测与风险管理需求。同时,应推动标准化流程与法规建设,实现检测结果的可比性与合规性。

参考文献:

- [1] 庞博,廉洁,邵振超,等.检测新型精神活性物质的荧光传感器技术研究进展[J].激光与光电子学进展,2025,62(7):30-38.
- [2] 石静,王珊珊.肉制品中重金属检测方法研究进展[J].山东化工,2024,53(22):105-107+112.
- [3] 王宝丽,张逸君,张宇航,等.生物炭基材料及其在电化学传感领域的应用[J].岩矿测试,2024,43(6):967-981.
- [4] 王秀雯,袁景利,张艳,等.贵金属纳米复合材料电致化学发光传感器在食品重金属检测中的研究进展[J].食品科学,2024,45(22):269-279.
- [5] 王晓峰,邓黎黎,张怡青,等.基于生物传感器的食品中重金属快速检测技术[J].现代食品,2024,30(20):122-125.

作者简介: 王玉霜(1996-),女,本科学历,中级工程师,从事环境监测研究。