

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.02.016

闵建锋, 方梦旗, 栾云霞. 原位快速检测重金属镉的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 127-135.

MIN J F, FANG M Q, LUAN Y X. Research progress on in situ rapid detection of heavy metal cadmium[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 127-135.

# 原位快速检测重金属镉的研究进展

闵建锋<sup>1</sup>, 方梦旗<sup>2,3</sup>, 栾云霞<sup>2</sup>✉

(1. 中材地质工程勘查研究院有限公司, 北京 100102;

2. 北京市农林科学院 质量标准与检测技术研究所, 北京 100097;

3. 北京城市学院 生物医药学部, 北京 100191)

**摘要:** 镉是一种对环境和人体健康有害的重金属, 虽然基于原子吸收光谱仪和电感耦合等离子体质谱仪等大型仪器的常规检测方法准确度高, 但不能满足快速现场检测和高通量筛查的需求。镉的原位快速检测技术, 可以在粮食安全、农业物联网、生物育种和环境监测等领域提供一种新型、高效、实时的方法, 特别是在筛选不同镉吸收和积累特性的植物品种方面具有很大的应用潜力。本文从检测技术原理和特点入手, 总结了针对动植物体内重金属镉的快速原位检测的不同技术, 如电化学传感技术、荧光传感技术、光学传感器技术等, 及其在食品安全监测、风险评估和在生物体内的迁移、转化和积累等领域的研究进展、应用前景和发展方向, 以为相关的科研工作提供技术参考。

**关键词:** 重金属; 镉; 原位; 快速检测

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)02-0127-09

网络首发时间: 2023-12-27 15:06:34

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20231226.1702.008>

## Research Progress on In Situ Rapid Detection of Heavy Metal Cadmium

MIN Jian-feng<sup>1</sup>, FANG Meng-qi<sup>2,3</sup>, LUAN Yun-xia<sup>2</sup>✉

(1. CNBM Geological Engineering Exploration Academy Co., Ltd, Beijing 100102, China;

2. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

3. Medical College Biochemical School, Beijing City University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Cadmium is a kind of heavy metal, which is harmful to environment and human health. Although conventional detection methods based on large instruments such as atomic absorption spectrometers and inductively coupled plasma mass spectrometers have high accuracy, they cannot meet the needs of rapid field detection and high throughput screening. The in situ rapid detection technology of cadmium can provide a

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 北京市农林科学院科技创新专项建设资助项目 (KJ CX20230437)

Supported by: Science and Technology Innovation Special Construction Funded Program of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences (No.KJ CX20230437)

作者简介: 闵建锋, 男, 1979 年出生, 本科, 高级工程师, 研究方向为环境工程。E-mail: 779212304@qq.com

通讯作者: 栾云霞, 女, 1980 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为污染物的快速检测。E-mail: luanyunxia@163.com

new, efficient and real-time method in the fields of food security, agricultural Internet of things, biological breeding and environmental monitoring, especially in the screening of plant varieties with different cadmium absorption and accumulation characteristics. Starting with the principle and characteristics of detection technology, this paper summarized different technologies for rapid in situ detection of cadmium in animals and plants, such as electrochemical sensing technology, fluorescence sensing technology, optical sensor technology, etc., and its research progress, application prospects and development direction in the fields of food safety monitoring, risk assessment, and migration, transformation and accumulation in organisms. It is hoped to provide technical reference for related research and analysis.

**Key words:** heavy metal; cadmium; in situ; rapid detection

镉是生物毒性最强的重金属之一，它容易被动植物吸收并通过食物链危害人体健康<sup>[1]</sup>。食用农产品是重金属流入人体最主要的途径之一，与其它重金属相比，镉更容易被植物吸收，水稻是最容易吸收并积累镉的农作物<sup>[2]</sup>。长期镉暴露会导致不可逆的慢性疾病的发生<sup>[3]</sup>，也会增加其他疾病发病风险<sup>[4]</sup>，因此，对农产品中镉的含量检测是保障食品安全的重要防线。在动植物样品中，通常用于检测重金属的方法包括石墨炉原子吸收光谱法、原子吸收光谱法（AAS）、电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES）、电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）和原子荧光光谱法（AFS）<sup>[5]</sup>。这些方法具有较高的准确性和可靠性，但同时也存在一些限制。例如，这些方法通常需要昂贵的设备和专门的技术人员进行操作，而且检测过程耗时且繁琐，通常需要大量的样品，前处理复杂。随着社会对食品安全和环境保护的关注度不断提高，对重金属的快速检测方法的需求也日益增加。快速检测方法可以提供及时且准确的结果，有助于及时采取措施以减少潜在的危害。在低积累作物育种和镉在生物体内迁移转化机理的研究中，对生物体中镉的原位快速检测显得尤为重要。如果能够开发适用于生物中镉的快速检测方法，将具有更高的实用性和更广泛的应用前景。

本文总结了针对动植物体重金属镉的快速原位检测方法，如图 1 所示，可以更准确地用于动植物样品中污染物的快速识别，为食品安全监测、风险评估、以及研究镉在生物体内的迁移、转化和积累特性提供新的技术手段，还可以用于筛选不同镉吸收和积累特性的植物品

种，为发展重金属中、低污染农田土壤安全生产提供技术支撑。

## 1 金属镉原位快速检测技术

### 1.1 电化学传感技术

电化学传感方法是一种灵敏、快速的检测方法，在水质重金属检测中应用广泛。近些年，研究人员基于电化学方法开发了不同的新型传感器用于检测生物体中的镉。Zaouak 等<sup>[6]</sup>首次提出了一种基于使用输送机可以将丝网印刷的碳基电极转移到自动填充各种溶液的电化学传感器。该传感器主要原理是与竞争性的汞涂层丝网印刷传感器相连，实现了在无需添加辅助电解质、无需脱气步骤或保护膜条件下，能够快速、低成本检测金属镉。此外，Zhang 等<sup>[7]</sup>开发了一种基于原位快速检测的便携式电化学分析方法检测水稻中的镉。该方法可利用微分脉冲阳极溶出伏安（ASV）传感器实现现场检测，通过对基质干扰、稀酸类型、浓度、样品粒度和检测稳定性等条件的优化后，可将样品投入处理池反应 5 min，直接用手持式电化学传感器进行检测，全程只需 15 min 且结果与微波消解 ICP-MS 法一致。该方法的检测限低，无需高温，比以往的方法更加快速灵敏，且预处理时间更短，实现了便携、操作简便，成本低廉等特点，可以满足原位植物快速检测镉的迫切需要，在重金属传感领域有非常大的发展潜力。

纳米技术在电化学传感器中的应用能够提升传感器的性能，如石墨烯基纳米复合材料、金属基材料、导电聚合物复合材料等，提高电化学传感器的灵敏度的同时可实现实时监测，从而在医学、食品、环境等领域中产生显著的效果，为人

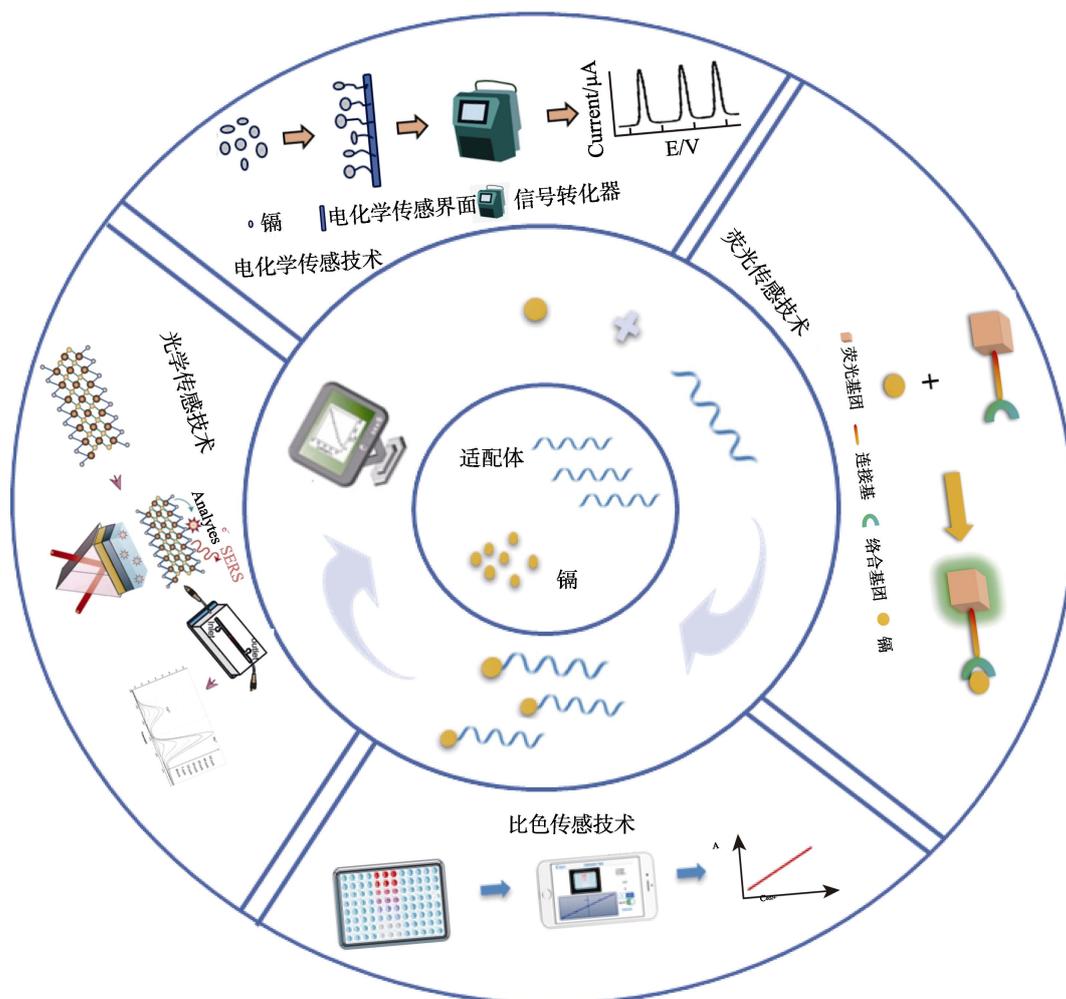


图 1 重金属镉的快速原位检测方法

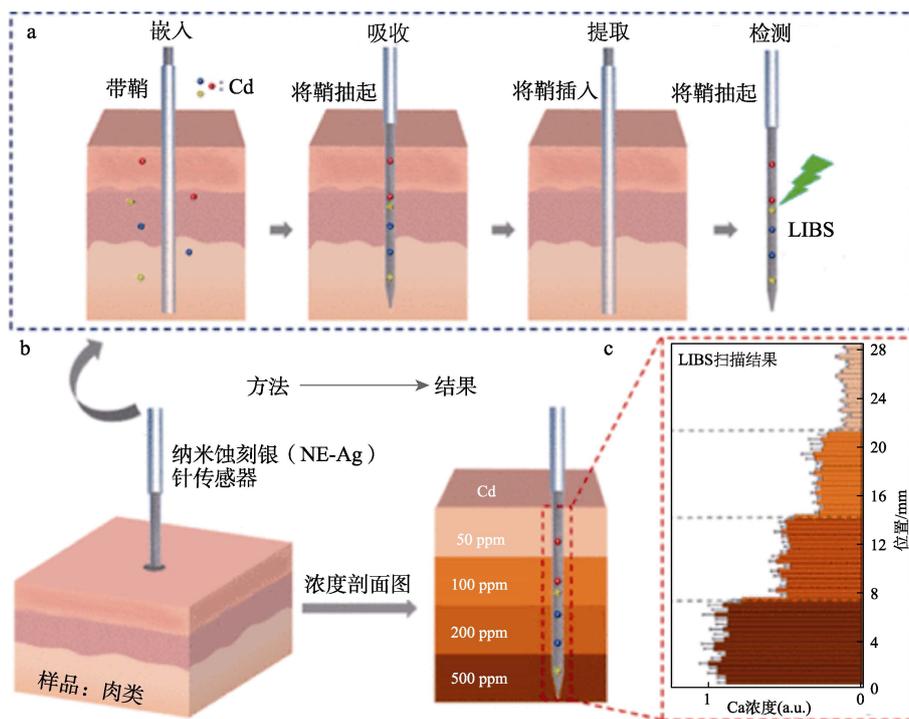
Fig. 1 Rapid in situ detection of cadmium as a heavy metal

们的生活带来更多的便利和保障。结合纳米技术 Liu 等<sup>[8]</sup>提出了一种可插入的、鞘状的、纳米蚀刻银 (NE-Ag) 针传感器, 用于快速原位分析检测植物与肉类中的金属镉, 如图 2 所示, 利用该传感器具有的微纳米结构, 对样品中的金属镉进行了快速的原位吸收, 对金属镉的检出限为 0.8 mg/L, 并且通过进一步设计一个不锈钢鞘可以保证 NE-Ag 针在插针和拔针过程中不受污染。经测试, 这种可插入和鞘状 NE-Ag 针传感器测试时间不超过 1 h。Li Y 等<sup>[9]</sup>基于石墨炔制备的电化学传感器在兼顾检测速度的同时实现了同时测定水中的  $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$ 。另外 Munir A 等<sup>[10]</sup>研制了 1-(3-氯苯基)-3-十二烷基硫脲 (Cl-DPTU) 表面活性剂用于建立电化学传感器。该传感器可用于同时特异性、灵敏地检测  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  和  $\text{Sr}^{2+}$  6 种金属离子。该传感器构建完成后对以上六种

金属离子进行测定, 检测限分别达 6.45、7.85、9.15、11.0、16.9 和 178.8 nM。

## 1.2 荧光传感技术

近年来, 基于荧光探针的生物传感器开发成为研究热点, 其具有高灵敏度、高特异性和实时原位检测的特点, 并且结合低成本、便携式和高通量的现场检测设备将具有良好的应用前景。Durrani 等<sup>[11]</sup>建立了一种环保性荧光传感器, 可对多种细胞进行染色后成像, 并实现了对多种离子的快速及超灵敏检测。该传感器使用苯二胺作为前体, 通过一步水热法制备了具有显著荧光性的多色掺杂碳量子点。通过此碳量子点可以对动物、细菌和真菌细胞等多种细胞进行染色后成像, 并无需清洗样品, 稳定性好, 毒性极低, 显示出良好的光稳定性和生物相容性。基于此传感器, 成功实现了监测活细胞 (如斑马鱼细胞) 内的离



注: a: 操作步骤; b: 探针纵剖面示意图; c: 扫描结果。

Note: a: Operating steps; b: Schematic of the longitudinal section of the probe; c: Graph showing the results.

图 2 纳米蚀刻银 (NE-Ag) 针传感器检测肉质中的金属镉<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Nano-etched silver (NE-Ag) needle sensor to detect cadmium metal in flesh<sup>[8]</sup>

子, 实现了  $Cd^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Hg^{2+}$ 、 $Gd^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$  和  $\Gamma$  的快速及超灵敏检测。He X 等<sup>[12]</sup> 利用一种基于硝基苯并-2-氧杂-1,3 二唑 (NBD) 的荧光探针 (NBDT) 开发了荧光传感器, 可实现用于在体内和体外特异性、灵敏地检测  $Ga^{3+}$  和  $Cr^{3+}$ 。该传感器可在广泛的 pH 范围内对  $Ga^{3+}$  和  $Cr^{3+}$  产生快速响应, 并具有稳定性, 此外研究还展示了该传感器在 MDA-MB-231 和 HepG2 细胞及斑马鱼模型中检测和成像  $Ga^{3+}$  和  $Cr^{3+}$  的能力, 同时实现了对细胞内金属镉的实时动态监测。

基于核酸适配体的生物传感方法在环境监测、食品安全和细胞内生物标记物的检测领域展现出独特的优势和前景, 可用于体外检测包括小分子化合物、蛋白质和金属离子等各种靶标<sup>[13-17]</sup> 如图 1 所示。适配体传感器进行植物原位检测, 主要障碍是缺乏将功能 DNA 传递到植物细胞的有效方法。Mu 等<sup>[18]</sup> 建立了一种硫醇介导的摄取单链功能 DNA 的方法, 该方法比另一种 DNA 纳米结构方法相比能更有效地将 DNA 传递到拟南芥和烟草叶细胞中。用这种方法将葡萄糖 DNA 适配体荧光传感器有效地传递到拟南芥中, 用于

检测植物体内的葡萄糖, 可以更好地了解这些生物体内小分子靶标的生物分布和调控及其富集转移情况, 这为 DNA 适配体传感器应用于植物体内原位检测提供了新思路。

### 1.3 激光诱导击穿技术

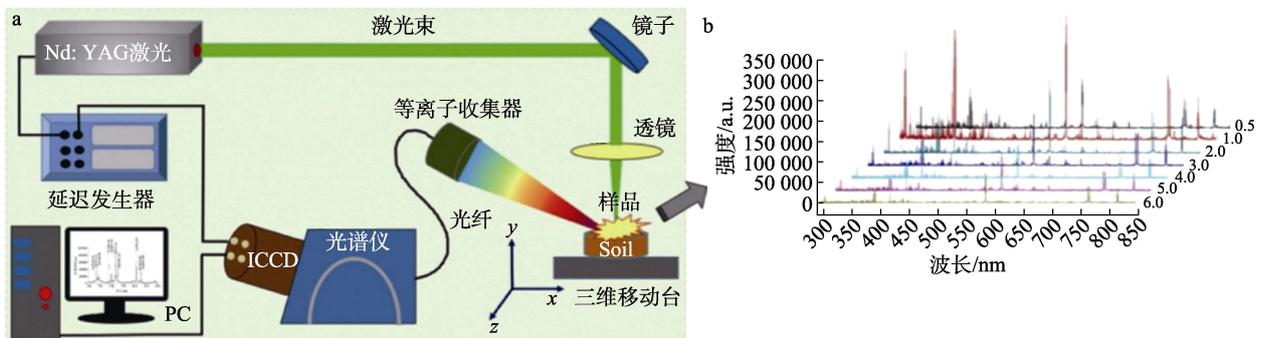
激光诱导击穿光谱技术 (LIBS) 是一种利用超短脉冲激光聚焦样品表面以形成等离子体, 并通过对等离子体发射光谱进行分析以确定样品物质成分及含量的技术。该技术具有高灵敏度、高特异性和实时原位检测等优点, 结合低成本、便携式和高通量的现场检测设备, 具有良好的应用前景。

LIBS 技术可以分析任何物态 (固态、液态、气态) 的样品, 这是因为几乎所有的元素被激发形成等离子体后都会发出特征谱线, 因此, LIBS 技术可用于大多数元素的分析。在具体应用中, 张等<sup>[19]</sup> 利用 LIBS 技术, 通过优化实验过程中的延迟时间和激光能量等参数, 成功建立了镉的谱线强度与真实浓度的关系模型。他们还与原子吸收分光光度计实验结果相比较, 误差不超过 10%, 由此成功建立了一种可以无损脐橙果皮、并实时

动态分析植物果皮中金属镉的检测技术。Huang 等<sup>[20]</sup>通过使用 1 064 nm 的脉冲 YAG 激光器, 优化了延迟时间、重复频率和激光能量等操作条件。他们还配合偏最小二乘回归模型 (Partial least squares regression, PLS), 成功构建检测橙皮中金属镉的传感器。与传统的原子吸收光谱结果进行分析, 两者的相关系数分别为 0.909 6 和 0.991 0。这表明, LIBS 直接分析脐橙中镉的大多数结果与湿法酸分解后 AAS 的结果基本一致。LIBS 技术能很好的定量检测脐橙果皮中镉元素的含量, 检测时间短, 可现场实时检测, 前景广阔,

对于无需前处理的原位分析植物内重金属具有重大意义。徐等<sup>[21]</sup>发明了一种基于激光诱导击穿在线原位快速检测水稻叶片中金属镉的传感器, 如图 3 所示。通过优化激光波长、两束脉冲间隔时间、光谱采集方法等条件, 成功提高了传感器的灵敏度与检测准确率, 实现了水稻叶片中的金属镉原位在线检测。

激光诱导击穿光谱技术在环境监测、食品安全和细胞内生物标记物的检测等领域展现出独特优势和广阔前景, 尤其对于脐橙果皮和水稻叶片等植物组织的重金属检测具有重要意义。



注: a: 设计原理; b: 检测结果。

Note: a: Design principle; b: Testing result.

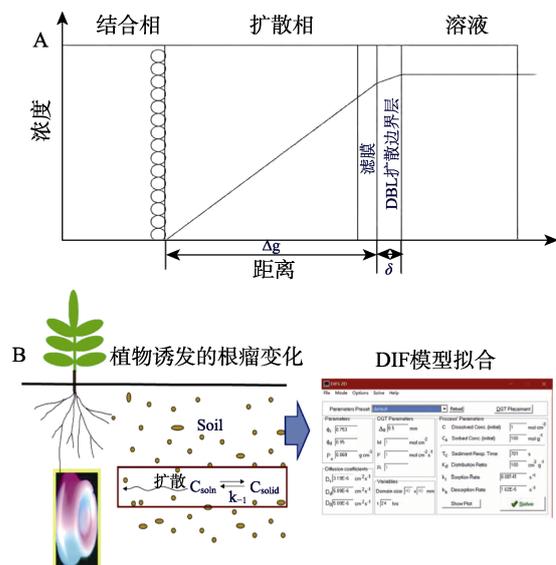
图 3 激光诱导击穿传感器在线原位快速检测水稻叶片中金属镉<sup>[21]</sup>

Fig. 3 Laser-induced breakdown sensor for online in situ rapid detection of cadmium metal in rice leaves<sup>[21]</sup>

#### 1.4 梯度扩散薄膜技术

梯度扩散薄膜技术 (DGT) 是一种常用的重金属检测技术, 它具备原位富集和实时监测污染物浓度的能力。该技术的核心装置主要由一个带有开口的塑料外壳、滤膜、扩散层和结合相组成。其工作原理是在待测液和扩散相之间形成一个扩散边界层, 离子通过边界层进行扩散, 如图 4-A 所示。在装置放置时间内, 特定金属离子从扩散相到结合相的扩散量  $M(\text{ng})$  可以计算出来, 这种原位快速检测重金属技术已被广泛应用于环境介质中重金属生物有效性的测定<sup>[22]</sup>。

高等<sup>[23]</sup>成功运用梯度扩散薄膜技术对土壤内的金属镉进行了检测。同时, 他们还使用了一些单一化学提取剂如  $\text{HNO}_3$ 、 $\text{DTPA}$ 、 $\text{NH}_4\text{Ac}$ 、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{LMWOAs}$  等与梯度扩散薄膜技术进行对比, 结果表明有效态 Cd 与作物可食用部分均表现出显著正相关性 ( $P < 0.001$ )。然而, 当 Cd 在植物体内



注: A: 薄膜扩散梯度技术原理; B: 梯度扩散薄膜技术对土壤进行金属镉和镍含量的测定。

Note: A: Principle of thin film diffusion gradient technique; B: Gradient diffusion thin film technique for determination of metal cadmium, nickel content in soil.

图 4 薄膜扩散梯度技术<sup>[24]</sup>

Fig. 4 Thin film diffusion gradient technique<sup>[24]</sup>

传输距离较远的情况下, DGT 技术测定结果的相关性明显优于其他五种基于化学提取的方法。LUO 等<sup>[24]</sup>通过梯度扩散薄膜技术对含金属镉和镍等的农作物的土壤进行测定, 如图 4-B 所示。其将 DGT 和 DIFS 模型结合, 提供了关于根际土壤固、液相间交换动力学的关键信息, 成为对重金属镉、镍含量动态监测的极具潜力的技术。

### 1.5 光学传感技术

光学传感器的出现为重金属的快速、高精度和非接触检测提供了新的解决方案, 具有广泛的应用前景。光学传感技术主要利用光学信号与目标物质之间的相互作用, 通过光学信号的变化反应目标物的信息, 实现非接触、快速、高精度的检测。

姜等<sup>[25]</sup>创新性的发明了嵌套式测样瓶, 利用液体闪烁计数仪内的放射性同位素镉 109 的  $\gamma$  射线特性测定放射量, 突破了在普通测样瓶中无法实现的内放射镉的检测。嵌套式测样瓶的设计机理是将 20 mL 大体积闪烁瓶与 6 mL 小体积闪烁瓶进行嵌套, 闪烁液置于两瓶之间的空间内, 样品置于小闪烁瓶内。在测量时只需更换小闪烁瓶内的样品即可, 实现了测样瓶在不破坏待测样品的前提下定量检测液体和固体样品中以及生物体内镉含量。基于这种检测方法, 采用  $^{109}\text{Cd}$  示踪法成功研究了赤子爱胜蚓对土壤中镉的富集, 实现了对蚯蚓体内镉富集量的检测, 并将结果与传统的原子吸收光谱法进行比较, 测量的镉含量之间无显著差异。实现了成本低廉, 操作简单的蚯蚓体内金属镉的原位灵敏检测。

Khrushev 等<sup>[26]</sup>阐述了一个运用 Python 编程语言和 TensorFlow 软件设计的全连接神经网络重金属检测模型。其主要原理是在强光脉冲的照射下, 暗色植物或藻类植物内部会引起反映植物光合作用的电子传递链从氧化态到完全还原态的逐步转变 (OJIP 瞬态)。接着引入了一种描述光合电子传递链能量通量的 JIP-text 来定量 OJIP 瞬态的值。将得到的测试参数输入此神经网络模型, 便可得到水体植物内的金属镉含量。通过记录 9

个暴露于不同浓度金属镉水体浮游植物不同阶段的 OJIP 曲线并计算 JIP-text 参数后, 对整个数据集进行了分析。结果表明, 该模型对金属镉的检测准确率高达 90%。显示了计算机技术在对植物的原位重金属检测与环境监测中的广阔应用前景。

孙等<sup>[27]</sup>提出一种基于红外可见光谱蔬菜叶片重金属镉检测方法, 其通过设计一款无需预处理、检测速度快、体积小且便于携带的重金属镉检测仪, 通过高光谱成像系统采集叶片反射光谱数据, 采用偏最小二乘回归法搭建重金属镉检测模型, 该模型测试集相关系数高, 测试集均方根误差小。最后对便携式重金属镉无损检测仪检测精度进行验证, 与标准理化值对比, 无显著差异, 实现了此便携式检测仪对生菜叶片镉含量的实时无损检测。

### 1.6 比色传感技术

比色传感技术是利用某些化学反应产生的颜色差异, 通过特定的仪器或设备来检测物质浓度的方法。Gan 等<sup>[28]</sup>提出了一种基于智能手机的快速简单、高效的比色系统 (SBCS)。其利用了适配体可以保护胶体金避免因为盐离子的作用而聚集变蓝的原理, 在加入镉离子后, 适配体和镉离子之间的特异性相互作用导致保护胶体金的适配体变少, 使胶体金因高盐离子的作用下而聚集变色。这个基于智能手机的比色系统 (SBCS) 可以在 10 min 内快速捕捉并分析比色变化, 并使用图像处理算法分析数据, 实现了对镉离子的定量检测。此方法具有高灵敏度、操作简便、易于实现和高穿透率的特点, 这为在实际应用中原位测定镉离子提供了一种有效简便的方法。

Charoensuk J 等<sup>[29]</sup>建立了一种基于自组装的三甲基十八烷基溴化铵 (TTAB) 和邻硝基酚荧胺在胶体二氧化硅表面上的特异性检测镉离子 ( $\text{Cd}^{2+}$ ) 的比色传感器 (TTAB/Murexide/Silica sol)。 $\text{Cd}^{2+}$  与比色传感器上的探针形成络合物, 使溶液立即从淡紫色变为橙色, 并通过分光光度法在 485 nm 处进行检测, 检测限可达 0.21 mM。

杨等<sup>[30]</sup>同样以普通滤纸为载体,通过优化试纸条制备条件与检测因素,将具有特效显色反应的镉试剂通过浸渍附载到试纸上,制备成重金属镉快速检测试纸,并利用传统标准技术电感耦合等离子质谱(ICP-MS)同时检测金属镉,结果无显著差异,为烟叶中镉的快速、实时、现场检测提供了非常有价值的参考。这些方法具有高灵敏度、操作简便、易于实现和高穿透率的特点,为实际应用中快速测定重金属镉提供了一些新的思路和方法。

## 2 结论与展望

生物体内重金属镉的检测对生态环境与食品安全有重要意义,在环境方面,可以及时、快速地了解环境中的重金属污染物情况并掌握污染物的环境生态行为,以便采取有效的治理措施,保

护生态环境。在食品安全领域,原位快速检测技术可以用于农产品安全筛查,如粮食收储过程中重金属镉的快速高通量检测,以保障粮食及其制品的质量安全。此外,通过原位快速检测技术,可以筛选不同镉吸收和积累特性的植物品种,为发展重金属中低污染农田土壤安全生产技术提供技术支撑。

本文总结了目前已报道的基于原位快速检测金属镉的技术,可以看出,目前针对此类技术的研究比较匮乏,普及性也不如传统大型仪器,同时面临着一些问题和挑战(表 1)。首先,样品中的基质成分会干扰传感体系,影响结果的准确性。其次,生物内其他金属离子的存在也会产生交叉反应,对镉的检测产生干扰。再者,目前的原位快速检测技术对金属的富集量要求较高,难以达到理想的检测效果。

表 1 金属镉原位快速检测技术方法汇总表

Table 1 Summary of technical methods for rapid in situ detection of cadmium metal

方法	技术	样品	靶标	检出限	特点	参考文献
电化学传感	纳米蚀刻银针	肉类	Cd	0.8 mg/L	效率高	[8]
	表面活性剂 改性	水	Cd Cu Hg Pb Zn Sr	6.45 nM	同时检测多种金属离子	[10]
				7.85 nM		
				9.15 nM		
				11.0 nM		
ASV 传感器	水稻	Cd	2.02 μg/kg	操作简便	[7]	
荧光传感	多色掺杂碳量子点	斑马鱼 细胞	Cd Cu Hg Gd Fe Zn Fe I		细胞内金属离子的灵敏 检测	[11]
激光诱导击穿	谱线与浓度关系模型	橙皮	Cd		可以实时动态分析	[19]
	YAG 脉冲激光器	橙皮	Cd		无需前处理、检测的时 间短,可现场实时检测	[20]
		水稻	Cd	43.1 mg/kg	灵敏度高	[21]
梯度扩散薄膜	薄膜扩散梯度技术	马铃薯	Cd Pd	0.49 mg/kg	操作简便,成本低廉	[23]
		玉米		0.02 mg/kg		
	白菜		0.29 mg/kg			
	薄膜扩散梯度技术和扩散 梯度模型结合	土壤	Cd Ni		可动态监测	[24]
光学传感	嵌套式测样瓶	蚯蚓	Cd	50 pg/kg	检出限低	[25]
	红外可见光谱	生菜	Cd	0.53 mg/kg	可实时无损检测	[27]
比色传感	显色反应	水稻	Cd	0.21 mM	简单高效	[29]
	电感耦合	烟叶	Cd	0.5 μg/mL	快速、实时、现场检测	[30]

因此,未来仍需进行大量针对重金属的原位快检技术的探究,可以利用纳米材料和生物分子进行特异性识别和富集,结合先进的信号处理技

术,提高检测的灵敏度和准确性;还可针对目前传感器存在的不足,研究新的传感器设计和制造方法,以提高传感器的灵敏度、稳定性和使用寿

命。同时,需要开发出能够同时检测多种重金属元素的传感器,以实现多种重金属元素的实时监测。另外,针对现场快速检测的需求,开发低成本、易操作、便携式的检测设备,以实现现场快速、实时的检测,提高检测的效率和实用性,为环境监测、生物育种、食品安全等领域提供更好的技术支持。

### 参考文献:

- [1] BISWAS A, KANON K F, RAHMAN M A, et al. Assessment of human health hazard associated with heavy metal accumulation in popular freshwater, coastal and marine fishes from south-west region, Bangladesh[J]. *Heliyon*, 2023, 9(10).
- [2] TSUKAHARA T, EZAKI T, MORIGUCHI J, et al. Rice as the most influential source of cadmium intake among general Japanese population[J]. *Science of The Total Environment*, 2003, 305(1): 41-51.
- [3] DIN I U, MUHAMMAD S, FAISAL S, et al. Heavy metal (loid) s contamination and ecotoxicological hazards in coal, dust, and soil adjacent to coal mining operations, Northwest Pakistan[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2023: 107332.
- [4] PEANA M, PELUCELLI A, CHASAPIS C T, et al. Biological effects of human exposure to environmental cadmium[J]. *Biomolecules*, 2022, 13(1): 36.
- [5] ZHANG H, SONG J, WANG S, et al. Recent progress in macrocyclic chemosensors for lead, cadmium and mercury heavy metal ions[J]. *Dyes and Pigments*, 2023: 111380.
- [6] ZAOUAK O, AUTHIER L, CUGNET C, et al. Electroanalytical device for cadmium speciation in waters. Part 2: Automated system development and cadmium semicontinuous monitoring [J]. *Electroanalysis*, 2010, 22(11): 1159-1165.
- [7] ZHANG J Q, ZHOU M H, TIAN W, et al. In situ fast analysis of cadmium in rice by diluted acid extraction-anodic stripping voltammetry[J]. *RSC Adv*, 2019, 9(35): 19965-19972.
- [8] LIU Y, ZHOU B, WANG W, et al. Insertable, scabbarded, and nanoetched silver needle sensor for hazardous element depth profiling by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *ACS Sens*, 2022, 7(5): 1381-1389.
- [9] LI Y, HUANG H, CUI R, et al. Electrochemical sensor based on graphdiyne is effectively used to determine Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> in water[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 332: 129519.
- [10] MUNIR A, SHAH A, NISAR J, et al. Selective and simultaneous detection of Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup> and Sr<sup>2+</sup> using surfactant modified electrochemical sensors[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 323: 134592.
- [11] DURRANI S, ZHANG J, PANG A P, et al. Carbon dots for multicolor cell imaging and ultra-sensitive detection of multiple ions in living cells: One Stone for multiple Birds[J]. *Environ. Res*, 2022, 212.
- [12] HE X, WU C, QIAN Y, et al. Highly sensitive and selective light-up fluorescent probe for monitoring gallium and chromium ions in vitro and in vivo[J]. *Analyst*, 2019, 144(12): 3807-3816.
- [13] ZHAO B, LUO Z, ZHANG H, et al. Imaging tools for plant nanobiotechnology[J]. *Front Genome Ed*, 2022, 8(4): 1029944.
- [14] LARA-CRUZ G A, JARAMILLO-BOTERO A. Molecular level sucrose quantification: A critical review[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(23): 9511.
- [15] GIRALDO J P, WU H, NEWKIRK G M, et al. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors[J]. *Nat Nanotechnol*, 2019, 14(6): 541-553.
- [16] VELBEL M A, COCKELL C S, GLAVIN D P, et al. Planning implications related to sterilization-sensitive science investigations associated with mars sample return (MSR)[J]. *Astrobiology*, 2022, 22(S1): S112-S164.
- [17] LIU C, ZHOU H, ZHOU J. The applications of nanotechnology in crop production[J]. *Molecules*, 2021, 26(23): 7070.
- [18] MOU Q, XUE X, MA Y, et al. Efficient delivery of a DNA aptamer-based biosensor into plant cells for glucose sensing through thiol-mediated uptake[J]. *Sci Adv*, 2022, 8(26): 902.
- [19] ZHANG X, YAO M, LIU M. Nondestructive determination for concentration of Pb and Cd in navel orange peel by laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng*, 2013, 29(2): 260-265.
- [20] HUANG L, YAO M Y, LIN J L, et al. Determination of cadmium in gannan navel orange using laser-induced breakdown spectroscopy coupled with partial least squares calibration model[J]. *J. Appl. Spectrosc*, 2014, 80(6): 957-961.
- [21] XU C, FAN S, XU Z, et al. Investigation of detection of cadmium in rice leaves based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chin. J. Quantum Electron*, 2020, 37(3): 363-369.
- [22] 张婷, 刘爽, 管鹏, 等. 薄膜扩散梯度技术在重金属生物有效态监测中的应用[J]. *中国环境监测* 2019, 35(2): 117-128.
- [23] ZHANG T, LIU S H, GUAN P, et al. Application of thin-film diffusive gradient technique in heavy metal bioeffective state monitoring[J]. *China Environmental Monitoring*, 2019, 35(2): 117-128.
- [24] 高慧, 宋静, 吕明超, 等. DGT 和化学提取法评价贵州赫章土法炼锌区污染土壤中镉的植物吸收有效性[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(10): 1992-1999.
- [25] GAO H, SONG J, LV M C, et al. Evaluation of plant uptake effectiveness of cadmium in contaminated soils from Hezhang earthen zinc refining area, Guizhou by DGT and chemical extraction method[J]. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 2017, 36(10): 1992-1999.
- [26] LUO J, YIN D, CHENG H, et al. Plant induced changes to rhizosphere characteristics affecting supply of Cd to *noccaea caerulescens* and *Ni* to *thlaspi goesingense*[J]. *Environmental*

- Science & Technology, 2018, 52(9): 5085-5093.
- [25] 姜湘韬, 马旖旎, 季荣. 基于镉-109 同位素示踪的蚯蚓体内镉的活体检测方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(5): 1009-1015.
- JIANG X T, MA Y N, JI R. In vivo detection of cadmium in earthworms based on Cd-109 isotope tracing[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2018, 54(5): 1009-1015.
- [26] KHRUSCHEV S S, DROZDENKO T V, PLYUSNINA T Y, et al. Heavy metal toxicity detection in phytoplankton by using neural network analysis of chlorophyll fluorescence induction[J]. Theor. Appl. Ecol, 2021(2): 134-141.
- [27] 孙俊, 胡双齐, 周鑫, 等. 便携式蔬菜叶片重金属镉含量无损检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 195-202+220.
- SUN J, HU S Q, ZHOU X, et al. Design and test of portable non-destructive detector for heavy metal cadmium content in vegetable leaves[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 195-202+220.
- [28] GAN Y, LIANG T, HU Q, et al. In-situ detection of cadmium with aptamer functionalized gold nanoparticles based on smartphone-based colorimetric system[J]. Talanta, 2020, 208.
- [29] CHAROENSUK J, THONGLAO J, WICHAIYO B, et al. A simple and sensitive colorimetric sensor for cadmium (II) detection based on self-assembled trimethyl tetradecyl ammonium bromide and murexide on colloidal silica[J]. Microchemical Journal, 2021, 160: 105666.
- [30] 杨慧, 周淑平, 张婕, 等. 试纸法快速检测烟叶中的镉[J]. 烟草科技, 2018, 51(2): 34-40.
- YANG H, ZHOU S P, ZHANG J, et al. Rapid detection of cadmium in tobacco by test paper method[J]. Tobacco Science and Technology, 2018, 51(2): 34-40. 完

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://llyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。