

便携式重金属电化学传感器研制及其在大米重金属检测中的应用

Development of portable electrochemical sensor for heavy metals and application of detection of heavy metals lead and cadmium in rice

徐昊阳^{1,2} 王冉冉² 姚帮本³

XU Haoyang^{1,2} WANG Ranran² YAO Bangben³

陈伟² 邓尚贵¹ 姚丽^{2,4}

CHEN Wei² DENG Shanggui¹ YAO Li^{2,4}

(1. 浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江 舟山 316022; 2. 合肥工业大学食品与生物工程学院,

安徽 合肥 230601; 3. 安徽省产品质量监督检验研究院, 安徽 合肥 230051;

4. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114)

(1. College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China; 2. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China; 3. Anhui Province Institute of Product Quality Supervision & Inspection, Hefei, Anhui 230051, China; 4. School of Food and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

摘要: [目的] 建立大米中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的电化学快速检测方法。 [方法] 采用一次性丝网印刷电极, 基于阳极溶出伏安法, 建立了基于同位镀铋电极的便携式电化学传感器。 [结果] 通过方波伏安法 (SWV)、循环伏安法 (CV)、计时电流法 (I-T) 对传感器进行了优化, 在最适检测条件下, Cd^{2+} 的线性范围为 $20 \sim 80 \mu\text{g/L}$, Pb^{2+} 的线性范围为 $10 \sim 80 \mu\text{g/L}$, Cd^{2+} 的检测限为 $1.2010 \mu\text{g/L}$, Pb^{2+} 的检测限为 $0.9639 \mu\text{g/L}$ 。 [结论] 建立的重金属电化学传感器灵敏度高, 操作简单、快速、绿色环保。

关键词: 大米; 重金属残留; 丝网印刷电极; 电化学检测

Abstract: [Objective] To develop an efficient electrochemical method for the rapid detection of cadmium and lead ions (Cd^{2+} and Pb^{2+}) in rice samples. [Methods] Designed a portable electrochemical sensor utilizing a disposable screen printed electrode and anodic stripping voltammetry with an isoplated bismuth electrode. This setup was further optimized through square wave voltammetry (SWV), cyclic voltammetry (CV),

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (编号: 2208085QB56); 国家重点研发计划项目 (编号: 2022YFF1102900); 安徽省重点研究与开发计划项目 (编号: 2022f04020003)

作者简介: 徐昊阳, 男, 浙江海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 姚丽 (1988—), 女, 长沙理工大学讲师, 博士。

E-mail: ybl200999@126.com

收稿日期: 2023-12-26 **改回日期:** 2024-06-16

and chronocurrent methods (I-T). [Results] The proposed approach exhibited outstanding performance with a linear detection range of 20 to $80 \mu\text{g/L}$ for Cd^{2+} and 10 to $80 \mu\text{g/L}$ for Pb^{2+} . The LOD of the cadmium ion were $1.2010 \mu\text{g/L}$, the LOD of the lead ion were $0.9639 \mu\text{g/L}$. [Conclusion] Our newly established electrochemical sensor for heavy metal detection in rice offers high sensitivity, ease of operation, rapid analysis, and aligns with environmentally friendly practices.

Keywords: rices; heavy metal residue; screen printed electrode; electrochemical detection

水稻具有发达的根系和特殊的生长周期, 对重金属污染物尤其是镉和铅的吸收、富集能力强于一般农作物^[1-2]。人食用被镉和铅污染的大米后, 会逐渐在身体中富集, 其复合物通过与氧、硫、氮、磷官能团相互作用使酶和蛋白质失活, 阻碍人体细胞的生物活性和代谢, 最终危害人体的健康和生命安全^[3-4]。GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中的污染物限量》规定稻米中镉和铅的含量不能超过 0.2 mg/kg 。

传统的重金属检测方法主要依赖大型仪器, 如原子吸收光谱 (AAS)^[5-6]、电感耦合等离子体原子发射光谱 (ICP-AES)^[7-8]、冷蒸气原子荧光光谱 (CV-AFS)^[9-10] 等。这些常规方法具有精密度高、特异性好、稳定性高等

优点^[11]。但是这些方法所需仪器设备比较昂贵,检测成本过高,且对测试样品纯度要求高,需要复杂的样品前处理过程,需要专业操作人员,检测耗时长^[12]。因此,传统的检测方法不适用于现场检测。与传统检测方法相比,近年来发展起来的快速检测方法因其高效便捷的特点逐渐被广泛应用^[13]。其中,电化学检测法具有即时性、高灵敏、成本低等优势,更适用于现场初步筛查。然而传统电化学传感器中主要使用汞膜电极^[14-15],汞是一种有毒的重金属,可以破坏人体中枢神经系统,长时间暴露在高汞环境中可以导致脑损伤和死亡,会对从事电化学检测人员的健康造成威胁。随着电化学传感技术的发展,越来越多的低毒电化学传感器被开发出来^[16-17]。如基于核酸适配体修饰电极的电化学传感器,但修饰过程比较复杂,且稳定性较差^[18-19];随后,利用铋膜、锡膜、镉膜修饰电极的电化学传感技术也相继发展起来^[20-21]。其中,用铋膜修饰的电极因其低毒性、低成本的优势得到了越来越多研究人员的关注。

近年来迅速发展起来的丝网印刷碳电极具有体积小、成本低、重复性好的特点。研究拟采用丝网印刷电极结合方波阳极溶出伏安法建立便携式重金属电化学传感器,通过试验确定传感器的最佳工作条件,以期实现大米中重金属 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的高灵敏检测。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

镉和铅标准溶液:坛墨质检科技股份有限公司;

五水硝酸铋、铁氰化钾(K₃[Fe(CN)₆])、亚铁氰化钾(K₄[Fe(CN)₆]):分析纯,百灵威科技有限公司;

硝酸、氢氧化钠、无水乙酸钠(99%)、冰醋酸、氯化钾、氯化钠:分析纯,上海生工有限公司;

大米:安徽省产品质量监督检验研究院;

试验用水均为超纯水。

1.2 主要仪器设备

丝网印刷电极:TC201型,深圳刷新生物传感有限公司;

电化学工作站:CHI660E型,上海辰华仪器有限公司;

磁力加热搅拌器:IKA RCT basic型,广州仪科实验室技术有限公司;

高速万能粉碎机:FW100型,天津市泰斯特仪器有限公司;

低温高速离心机:Fritsch LEGEND MICRO17R型,德国贺利氏公司;

超声清洗仪:IT07型,昆山市超声仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 试验方法 采用方波伏安法检测 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的含量。首先,将丝网印刷电极安装于电极插槽上,然后将电极浸没在 0.5 mol/L 醋酸-醋酸钠缓冲液中,使用计时

电流法(程序设置为恒定电压-0.4 V,运行 120 s)对电极进行活化后,从电极背面缓慢加入一定浓度的 Cd²⁺、Pb²⁺ 和 Bi³⁺ 标准溶液,开启磁力搅拌器,转速为 240 r/min。在搅拌条件下,采用计时电流法进行电化学富集,电位为-1.3 V,富集时间为 240 s。富集结束后停止搅拌,静置 10 s,在-1.2~0.4 V 范围内利用方波伏安法(SWV)扫描,扫描范围-1.2~-0.4 V,电压增量 5 mV,振幅 25 mV,采样频率 10 Hz,静止 5 s 得到 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的溶出峰电流。

1.3.2 大米样品前处理 将干燥大米充分粉碎后,过 60 目筛,准确称取 0.5 g 大米置于坩埚中,在马弗炉中于 530 °C 灼烤 30 min。再将灼烧后的大米粉末置于离心管中,加入 2.5 mL 质量分数为 8% 的 HNO₃ 进行提取,密封后充分涡旋震荡 5 min。随后在 4 500 r/min 离心 5 min,取上清液待测。

1.3.3 可行性验证 按 1.3.1 中的操作步骤,对电极进行初步活化后从电极背面缓慢加入 100 μg/L 的 Cd²⁺、Pb²⁺ 标准溶液和 5 mg/L Bi³⁺ 标准溶液,开启磁力搅拌器,转速为 240 r/min。在搅拌条件下,采用计时电流法进行电化学富集,电位为-1.3 V,富集时间为 240 s。富集结束后停止搅拌,静置 10 s,在-1.2~0.4 V 范围内进行 SWV 扫描,得到 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的溶出峰电流。

1.3.4 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 沉积电势优化 在缓冲液的 pH 值为 5.5,沉积时间为 240 s,Bi³⁺ 质量浓度为 5 mg/L 的条件下,考察沉积电位(-0.8,-0.9,-1.0,-1.1,-1.2,-1.3,-1.4 V)对大米中重金属 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 检测效果的影响。

1.3.5 缓冲液 pH 值优化 在沉积电势为-1.3 V,沉积时间为 240 s,Bi³⁺ 质量浓度为 5 mg/L 的条件下,考察缓冲液 pH 值(4.5,5.0,5.5,6.0,6.5)对大米中重金属 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 检测效果的影响。

1.3.6 沉积时间优化 固定沉积电势为-1.3 V,Bi³⁺ 质量浓度为 5 mg/L,缓冲液的 pH 值为 5.5,考察沉积时间(50,100,150,200,250,300 s)对大米中重金属 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 检测效果的影响。

1.3.7 Bi³⁺ 质量浓度选择 固定沉积电势为-1.3 V,缓冲液的 pH 值为 5.5,沉积时间为 240 s,考察 Bi³⁺ 质量浓度(1.25,2.50,5.00,7.50,10.00 mg/L)对大米中重金属 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 检测效果的影响。

1.3.8 传感器灵敏度的验证 选择优化后的最适条件,将活化铋膜电极浸入含有不同质量浓度 Cd²⁺(20,40,50,60,80 μg/L)和 Pb²⁺(10,20,40,60,80 μg/L)的乙酸-乙酸钠缓冲液中,采用方波伏安法对溶液中的 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 进行检测。

1.3.9 电化学传感器抗干扰性的验证 为了验证该方法是否受其他离子的干扰,分别向含有质量浓度为 100 ng/mL 的 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的溶液中加入终质量浓度为

500 ng/mL 的 Fe^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Fe^{3+} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} , 利用建立的电化学传感器在最优条件下同时检测, 观察其峰电流值的变化。

1.3.10 电化学传感器重现性分析 为了探究同一批次丝网印刷电极之间的差异性, 取同一批次的 5 支电极在相同条件下对含有质量浓度均为 100 $\mu\text{g/L}$ 的 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的溶液进行测定, 分析 5 支电极检测结果的差异性。

1.3.11 电化学方法对比电感耦合等离子体质谱法检测实际样本 采用电感耦合等离子体质谱法与电化学方法进行对比。按 1.3.2 中的前处理的方案操作, 得到待测液。将待测液分为 3 组, 分别往每组待测液中添加 40, 60, 80 $\mu\text{g/L}$ 的 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 标准溶液, 按 1.3.1 中的方法, 对加标的待测液进行检测。随后准确称取 0.5 g 大米, 将其分为 3 组。分别往每组大米中添加 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 标准溶液, 质量浓度分别为 40, 60, 80 $\mu\text{g/L}$ 。将完成加标的大米置于微波消解内罐中, 加入 5 mL 硝酸, 扣盖放置 1 h。旋紧罐盖, 按照微波消解仪的操作步骤进行消解, 冷却后取出, 缓慢打开消解罐排气, 用少量水冲洗消解罐内盖, 将消解罐放在控温电热板上, 于 100 $^{\circ}\text{C}$ 加热控温电热板 30 min 赶酸, 用水定容至 25 mL 混匀备用。使用电感耦合等离子体质谱仪对加标样品进行检测。

2 结果与分析

2.1 电化学检测原理

试验依据电化学阳极溶出伏安法原理。对于大米及其制品, 利用稀酸提取法, 将 Cd 和 Pb 变为游离在稀酸中的 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} ; 随后在溶液中加入 Bi^{3+} 溶液, 在电极上施加一个恒定负电势, 使溶液中的 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 在电极表面发生还原反应从而沉积在电极表面; 经过一段时间的富集后, 控制电极上的电势从负电势向正电势扫描, 当电势达到 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的氧化电势时, Cd、Pb 迅速氧化溶出, 形成强烈的氧化溶出电流峰, 记录其电流—电势曲线, 即可获得阳极溶出伏安图。对样品中的 Cd、Pb 进行定量判定。该方法利用目标重金属离子 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的特征溶出电流作为定量指标, 构建标准曲线, 进行定量分析。在优化的检测条件下, 利用同一批次的样品处理试剂和检测试剂, 则可利用已经建立的标准曲线直接进行目标重金属离子 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的定量分析。图 1 为大米中重金属 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 电化学检测原理图。

2.2 电化学方法检测重金属离子的可行性验证

从图 2 可以看出, 检测阳性样本时, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 分别在电位 -0.9, -0.7 V 的位置出现溶出曲线, 产生峰电流值。而空白对照在电位 -0.9, -0.7 V 的位置未出现溶出曲线。说明阳性样本可以检测出具有显著性差异的峰电流值。

2.3 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 沉积电势的优化

选择合适的沉积电势有助于 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 沉积到电

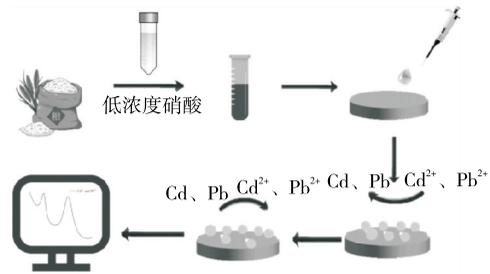


图 1 大米中重金属镉和铅电化学检测原理图

Figure 1 Schematic diagram of electrochemical detection of heavy metals cadmium and lead in rice

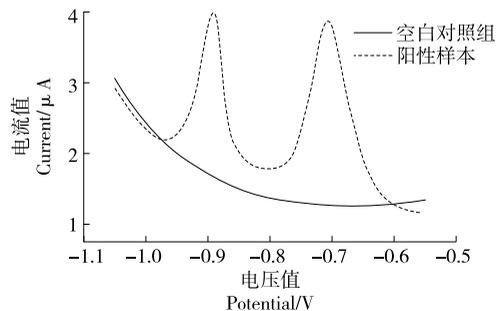


图 2 电化学检测重金属 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的可行性

Figure 2 Feasibility of electrochemical detection of heavy metals cadmium Cd^{2+} and lead ions Pb^{2+}

极表面。沉积电位过低或过高的条件下, 都会对试验结果造成不利的影响。从图 3 可以看出, 沉积电位为 -1.4 ~ -0.8 V 时, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的溶出峰电流值逐渐升高, 在 -1.3 V 时达到最高。随后电流值开始下降, 主要由于在 -1.4 V 时发生了析氢反应。因此, 选择 -1.3 V 为最佳富集电位。

2.4 缓冲液 pH 值优化

从图 4 可以看出, 当醋酸—醋酸钠缓冲液的 $\text{pH} < 5.5$ 时, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的溶出峰电流几乎为 0, 这是因为发生了极强的析氢现象。当 $\text{pH} > 5.5$ 时, 随着缓冲溶液的 pH 增大, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的溶出峰电流逐渐减小, 这可能是随

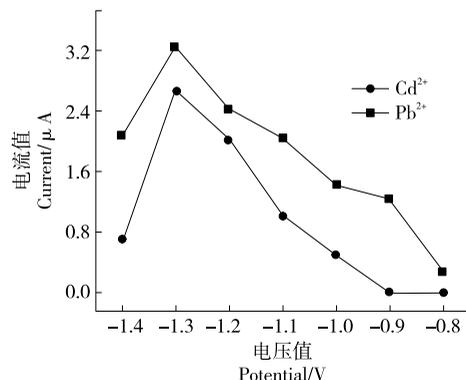


图 3 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 富集电位优化

Figure 3 Optimization of Cd^{2+} and Pb^{2+} enrichment potential

随着 pH 值的提高, Bi^{3+} 会发生水解, 铋膜结构变得不稳定。同时, 由于醋酸-醋酸钠缓冲液的缓冲 pH 范围大致在 3.6~5.8, 当缓冲液的 $\text{pH} > 5.8$ 时, 溶液的缓冲体系会受到破坏, 缓冲能力下降。因此, 检测缓冲液的最佳 pH 值为 5.5。

2.5 沉积时间的优化

从图 5 可以看出, 随着富集时间从 60 s 逐渐增加到 240 s, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的溶出峰电流值逐渐增大, 当富集时间超过 240 s 时, 峰电流不再增加, 反而开始减小, 主要是由于 Bi^{3+} 沉积的厚度过高, 影响了 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的析出。为了保证检测的高灵敏度, 选择 240 s 的沉积时间为最佳沉积时间。

2.6 Bi^{3+} 质量浓度优化

从图 6 可以看出, Bi^{3+} 质量浓度为 1.25~5.00 mg/L 时, 随着 Bi^{3+} 质量浓度的增加, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的溶出峰电流值逐渐增大, 当 Bi^{3+} 质量浓度超过 5 mg/L 时, 电流值开始下降, 主要是因为 Bi^{3+} 质量浓度超过 5 mg/L 时, 铋膜沉积的厚度过高, 影响了 Cd 和 Pb 的析出。因此, 选择 5 mg/L 为 Bi^{3+} 的工作浓度。

2.7 电化学传感器检测灵敏度的验证

从图 7 可以看出, 随着溶液中 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 浓度的不断增大, 溶出峰电流值也不断提高。结果表明, Cd^{2+} 质量

浓度为 20~80 $\mu\text{g/L}$ 时, 溶出峰电流值与 Cd^{2+} 浓度之间具有良好的线性关系; Pb^{2+} 质量浓度为 10~80 $\mu\text{g/L}$ 时, 溶出峰电流值与 Pb^{2+} 质量浓度具有良好的线性关系; Cd^{2+} 的线性回归方程为 $Y=0.011\ 21X-0.047\ 79$, $R^2=0.992\ 32$, 检测限为 1.201 $\mu\text{g/L}$ 。 Pb^{2+} 的线性回归方程为 $Y=0.014\ 69X-0.013\ 46$, $R^2=0.987\ 48$, 检测限为 0.963 9 $\mu\text{g/L}$ 。

2.8 传感器抗干扰性的验证

从图 8 可以看出, 待测液中含有的其他离子对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的溶出峰电流值并未造成明显的影响。

2.9 传感器重现性的验证

从图 9 可以看出, 当待测液中分别含有 100 $\mu\text{g/L}$ 的 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 时, 产生的峰电流值分别为 2.2~2.5, 3.5~3.7 μA 。试验表明, 同一批次电极具有良好的重现性。

2.10 电化学方法对比电感耦合等离子体质谱法检测实际样本的验证

通过检测添加有不同质量浓度 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的大米样品, 进行回收率测试分析(每组试验重复 3 次)。如表 1 所示, 电化学方法检测添加 Pb^{2+} 的食品样品的回收率为 104.0%~109.7%, 添加 Cd^{2+} 的食品样品的回收率为 108.1%~112.8%, 结果表明建立的检测方法有良好的回收率, 证明该方法在实际样本检测中的应用潜力。为了

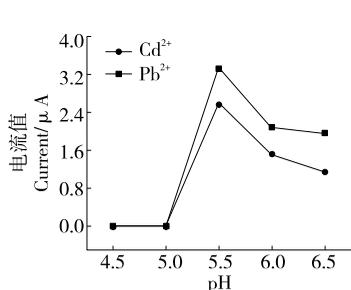


图 4 缓冲液 pH 值优化
Figure 4 Optimization of buffer pH

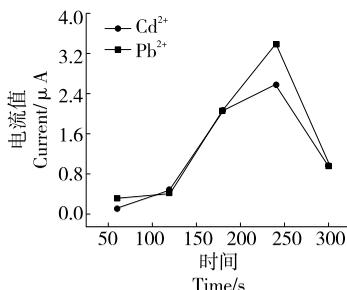


图 5 沉积时间的优化
Figure 5 Optimization of deposition time

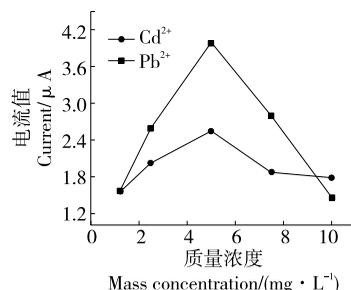


图 6 Bi^{3+} 质量浓度优化
Figure 6 Mass concentration optimization of Bi^{3+}

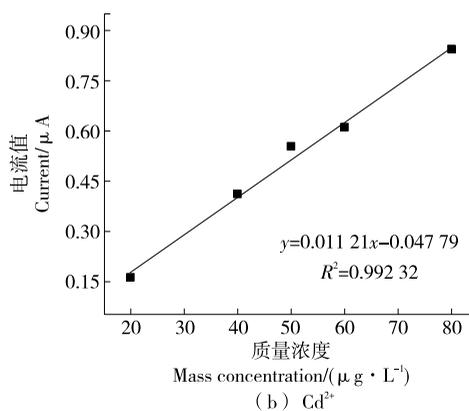
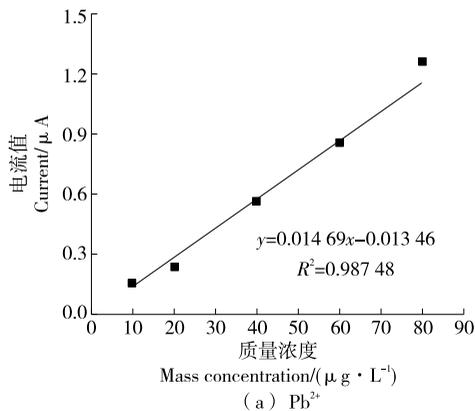


图 7 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 质量浓度与溶出电流的线性关系图

Figure 7 Linear relationship between mass concentration of Pb^{2+} and Cd^{2+} and dissolution current

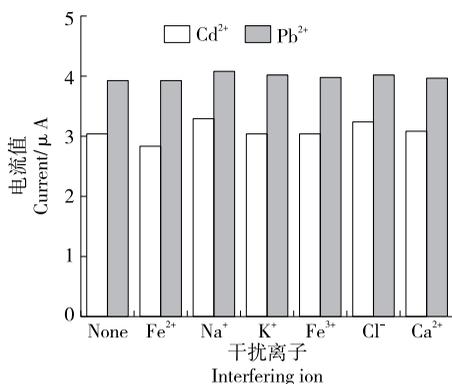


图 8 干扰物质对 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 检测溶出峰电流值的影响

Figure 8 Dissolution peak current values of Cd²⁺ and Pb²⁺ in the presence of interfering substances

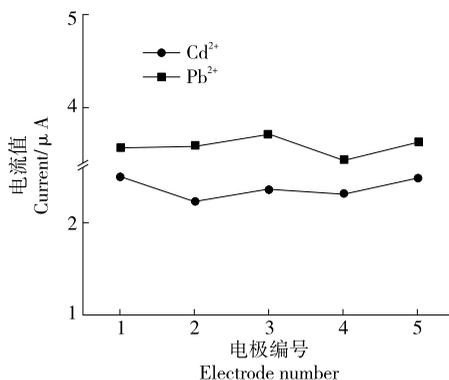


图 9 同一批次的 5 枚电极分别检测 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的溶出峰电流值

Figure 9 The peak dissolution current values of Cd²⁺ and Pb²⁺ respectively detected by 5 electrodes from the same batch

表 1 Pb²⁺ 和 Cd²⁺ 的食品样品回收率

Table 1 Recovery rates of Pb²⁺ and Cd²⁺ food samples

添加量/ (μg · L ⁻¹)	Pb ²⁺ 检测量/(μg · L ⁻¹)		Cd ²⁺ 检测量/(μg · L ⁻¹)		Pb ²⁺ 回收率/%		Cd ²⁺ 回收率/%	
	电化学	ICP-MS	电化学	ICP-MS	电化学	ICP-MS	电化学	ICP-MS
40	43.911	42.760	45.124	37.760	109.8	106.9	112.8	94.4
60	62.400	64.980	64.912	65.160	104.0	108.3	108.1	108.6
80	87.200	84.640	89.350	76.000	109.0	105.8	111.6	95.0

验证试验方法检测大米中 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的准确性,采用电感耦合等离子体质谱法与之进行对比。采用电感耦合等离子体质谱法检测添加 Pb²⁺ 的食品样品的回收率为 105.8%~108.3%。添加 Cd²⁺ 的食品样品的回收率为 94.4%~108.6%。由此可知,两种方法检测 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的准确度相当,两种方法均能满足实际检测要求,且电化学方法更加适用于现场快速检测。因此,该方法具有良好的实际应用潜力。

3 结语

研究使用一次性丝网印刷电极,建立了大米中重金属 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的电化学快速检测传感器,并通过在电极上面修饰了 Bi³⁺ 来提高检测的灵敏度。该方案采用低浓度的 HNO₃ 来提取大米中的 Cd²⁺ 和 Pb²⁺,样品前处理简便;并基于方波伏安法,对大米中含有的 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 进行检测。通过对 Bi³⁺ 质量浓度、富集电位、富集时间等参数的优化,确定了传感器最佳工作条件。同时在最佳的优化条件下,对不同浓度重金属 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 利用方波伏安法进行了检测,探究了重金属 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的最低检测限。在最适检测条件下,Cd²⁺ 的检测线性范围为 20~80 μg/L,Pb²⁺ 的检测线性范围为 10~80 μg/L,二者的检测限分别为 1.201 0,0.963 9 μg/L。整个检测过程在 20 min 内即可完成,简便、快捷的检测优势适合于现场的

大量样本筛查,有助于基层执法人员的现场检测。

参考文献

[1] 李克强,王韧,冯伟,等. 整米中重金属镉的酸法消减工艺优化[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(8): 10-17.
 LI K Q, WANG R, FENG W, et al. Optimization of acid removal process for cadmium in whole rice[J]. Chinese Journal of Food and Biotechnology, 2019, 38(8): 10-17.

[2] 张昌,任晓雨,崔航,等. 黑龙江省不同产地大米中几种重金属元素的检测及膳食风险评估[J]. 现代食品科技, 2020, 36(11): 281-286, 195.
 ZHANG C, REN X Y, CUI H, et al. Detection and dietary risk assessment of several heavy metal elements in rice from different producing areas in Heilongjiang Province[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(11): 281-286, 195.

[3] 沈珺珺,林亲录,罗非君. 防治大米镉污染的生物及农作技术研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 172-175, 210.
 SHEN J J, LIN Q L, LUO F J. Research progress of biological and agricultural techniques for controlling cadmium pollution in rice[J]. Food & Machinery, 2018, 34(12): 172-175, 210.

[4] 张群. 食品中重金属离子高灵敏快速检测技术研究与应用[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(4): 112.
 ZHANG Q. Research and application of high sensitivity and rapid detection of heavy metal ions in food[J]. Chinese Journal of Food

- and Biotechnology, 2023, 42(4): 112.
- [5] 张洪春, 杨凯. 粮油食品污染物检测中原子吸收光谱法的技术分析[J]. 中国食品, 2023(14): 81-83.
ZHANG H C, YANG K. Technic alanalysis of atomic absorption spectrometry for detection of grain, oil and food contaminants[J]. Chinese Food, 2023(14): 81-83.
- [6] 秦祎芳, 尹成华, 路辉丽, 等. 石墨炉原子吸收光谱法和 X 射线荧光光谱法测定小麦中镉的对比研究[J]. 粮食与饲料工业, 2022(5): 59-62.
QIN Y F, YI C H, LU H L, et al. Comparative study on determination of cadmium in wheat by graphite furnace atomic absorption spectrometry and X-ray fluorescence spectrometry [J]. Food and Feed Industry, 2022(5): 59-62.
- [7] 陈晓琴, 黄晶, 张蕾. 固相萃取—电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定地下水中三种重金属[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(5): 7-12.
CHEN X Q, HUANG J, ZHANG L. Determination of three heavy metals in groundwater by solid phase extraction-inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(5): 7-12.
- [8] 吴珉, 邵燕子, 严峰, 等. 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定辛菌胺危险废物工业盐中 9 种重金属元素[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(3): 7-11.
WU M, SHAO Y Z, YAN F, et al. Determination of 9 heavy metals in industrial salt of octamine hazardous waste by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(3): 7-11.
- [9] XU Q, WANG Z, JIN L, et al. Non-chromatographic separation and determination of thimerosal and inorganic mercury in vaccines by Fe³⁺-induced degradation with cold vapor atomic fluorescence spectrometry[J]. Analytical Methods, 2018, 10(18): 2 144-2 150.
- [10] LIU Y M, ZHANG F P, JIAO B Y, et al. Automated dispersive liquid-liquid microextraction coupled to high performance liquid chromatography-cold vapour atomic fluorescence spectroscopy for the determination of mercury species in natural water samples[J]. Journal of Chromatography A, 2017, 1 493: 1-9.
- [11] MOHAMED R, ZAINUDIN B H, YAAKOB A S. Method validation and determination of heavy metals in cocoa beans and cocoa products by microwave assisted digestion technique with inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2020, 303: 125392.
- [12] MALIK L A, BASHIR A, QUREASHI A, et al. Detection and removal of heavy metal ions: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17: 1 495-1 521.
- [13] BERLINA A N, ZHERDEV A V, DZANTIEV B B. Progress in rapid optical assays for heavy metal ions based on the use of nanoparticles and receptor molecules[J]. Microchimica Acta, 2019, 186: 1-39.
- [14] 钟平胜, 田春妹, 任佳丽. 电化学修饰电极在食品重金属快速检测中的研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 192-196.
ZHONG P S, TIAN C M, REN J L. Research progress of electrochemical modified electrode for rapid detection of heavy metals in food[J]. Food & Machinery, 2018, 34(4): 192-196.
- [15] 彭钢, 刘玉婷, 宋继博, 等. 基于特异性识别元件的电化学传感器在食品中重金属检测的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 347-355.
PENG G, LIU Y T, SONG J B, et al. Research progress of electrochemical sensors based on specific recognition elements for detection of heavy metals in food [J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(18): 347-355.
- [16] 刘淼淼, 孙倩倩, 张波, 等. 稻谷重金属检测和去除方法的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 259-268.
LIU M M, SUN Q Q, ZHANG B, et al. Research progress on detection and removal of heavy metals in rice [J]. Journal of Cereals and Oils, 2022, 37(12): 259-268.
- [17] 刘明言, 石秀顶, 李天国, 等. 电化学分析方法检测重金属离子研究进展[J]. 应用化学, 2023, 40(4): 463-475.
LIU M Y, SHI X D, LI T G, et al. Advances in the detection of heavy metal ions by electrochemical analysis[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2023, 40(4): 463-475.
- [18] 隋佳辰, 于寒松, 代佳宇, 等. 核酸适配体生物传感技术在食品中重金属铅检测中的应用[J]. 中国食品学报, 2017, 17(8): 203-209.
SUI J C, YU H S, DAI J Y, et al. Application of aptamer biosensing technology in detection of heavy metal lead in food[J]. Chinese Journal of Food Science, 2017, 17(8): 203-209.
- [19] 魏静, 朱治, 王亚生, 等. 生物传感技术在食品中重金属检测中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6 337-6 345.
WEI J, ZHU Z, WANG Y S, et al. Application of biosensing technology in the detection of heavy metals in food[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2022, 13(19): 6 337-6 345.
- [20] RUONAN M, QIN J Z, TINGYN L, et al. The innovative and accurate detection of heavy metals in foods: a critical review on electrochemical sensors[J]. Food Control, 2023, 150: 109743.
- [21] 农春, 张林丽, 梁红, 等. 基于 Bi₂S₃/rGO 修饰电极对铅离子的检测[J]. 轻工科技, 2023, 39(3): 122-124.
NONG C, ZHANG L L, LIANG H, et al. Detection of lead ion based on Bi₂S₃/rGO modified electrode[J]. Light Industry Science and Technology, 2023, 39(3): 122-124.