DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260214001
引用格式: 李罗京, 王琦. 阳极溶出伏安法快速检测乳制品中的铅[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 148–154.
LI LJ, WANG Q. Rapid detection of lead in dairy products by anodic stripping voltammetry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 148–154. (in Chinese with English abstract).

阳极溶出伏安法快速检测乳制品中的铅

李罗京, 王 琦*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘 要: 目的 建立阳极溶出伏安法快速检测乳制品中铅的方法。**方法** 采用金电极与机器学习算法, 优化沉积时间、脉冲高度以及样品前处理参数, 并确定该方法的线性范围、检出限、加标回收率、相对标准偏差等指标。**结果** 优化后的电化学检测参数为沉积时间 360 s、脉冲高度 270 mV; 样品前处理优化参数为: 牛奶稀释 1:3 (*V*:*V*)、乳粉稀释 1:2 (*m*:*V*)、酸奶稀释 1:4 (*V*:*V*), 离心时间分别为 10 min(牛奶)、10 min(乳粉)和 14 min(酸奶)。实验结果显示, 该方法在 187.5~6000.0 ng/mL 范围内线性良好(r^2>0.99), 检出限为 123.32~273.10 ng/mL, 加标回收率 90%~110%, 相对标准偏差小于 5%。**结论** 本研究建立了一种快速、简便、准确地检测乳粉、酸奶、牛奶中铅含量的方法, 为重金属防控提供标准化解决方案。

关键词: 乳制品; 铅; 阳极溶出伏安法; 快速检测; 前处理

Rapid detection of lead in dairy products by anodic stripping voltammetry

LI Luo-Jing, WANG Qi*

(*College of Food Science and Nutritional Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

ABSTRACT: Objective To develop a method for rapid detection of lead in dairy products by anodic stripping voltammetry. **Methods** The gold electrode and machine learning algorithm were used to optimize the deposition time, pulse height and sample pretreatment parameters. The linear range, limit of detection, recovery rate, relative standard deviation and other indicators of the method were determined. **Results** Setting deposition time to 360 s, pulse height to 270 mV and the optimized parameters of sample pretreatment were as follows: 1:3 (*V*:*V*) for milk, 1:2 (*m*:*V*) for milk powder and 1:4 (*V*:*V*) for yogurt, centrifugation 10 min (milk), 10 min (powder), 14 min (yogurt) were determined as the optimal parameters for rapid detection. The results showed that the method had good linearity in the range of 187.5–6000.0 ng/mL (r^2>0.99), the limit of detections were 123.32–273.10 ng/mL, the recovery rates were 90%–110%, and the relative standard deviation was less than 5%. **Conclusion** This study establish a fast, simple and accurate method for detecting lead content in milk powder, yogurt and milk, providing standardized solutions for heavy metal prevention and control.

KEY WORDS: dairy products; lead; anodic stripping voltammetry; rapid detection; pretreatment

收稿日期: 2026-02-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(30471225); 国家重点研发计划项目(2023YFD2100202); 北京市科协青年人才托举工程项目(BYESS2023264)
第一作者: 李罗京(2005—), 男, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 1736088675@qq.com
***通信作者:** 王琦(1994—), 女, 博士, 实验师, 主要研究方向为食品安全方面的研究。E-mail: wangqi0928@cau.edu.cn

0 引　言

乳制品是世界消费量最大产品之一, 深受我国人民喜爱[1]。近年来我国乳制品安全性整体向好, 但仍时有污染物超标问题发生, 其中重金属铅超标是主要安全隐患之一[2]。我国乳制品铅污染呈现工业区集聚性[3], 华北/长三角生鲜乳铅含量(0.08~0.12 mg/kg)较西北高 60%~80%, 主要污染路径包括: 环境迁移(大气沉降贡献率 37%), 如某冶炼厂周边牧场原料乳铅超标 2.4 倍; 饲料添加剂滥用(含铅矿物质添加剂残留量达 1.2 mg/kg); 加工环节含铅设备析出(马口铁罐铅迁移量 0.05 mg/kg·h)[4]。婴幼儿配方乳粉因原料复合性(矿物质添加剂铅贡献率 51%)成为高风险品类, 2024 年抽检显示其超标率(3.7%)为液态乳的 3 倍[5]。现行 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》虽设定严格限量(液态乳 0.05 mg/kg), 但基层检测仍依赖石墨炉原子吸收法(单样检测耗时大于 4 h), 导致工业区原料乳抽检覆盖率不足 30%[5–6]。

针对传统检测瓶颈, 张毛赛[7]制备了基于碱处理 Fe_3O_4@SiO_2 和氨基化 Fe_3O_4@SiO_2 用于检测重金属离子的电化学传感器, 使铅离子的检出限达到 0.01 μmol/L; 徐丽佳[8]建立了以胶体钯作为基体改进剂的石墨炉原子吸收光谱法, 测得回收率为 99.3%~104.2%, 最低检出限是 20 μg/kg, 定量限为 40 μg/kg; 宛丽等[9]采用激光剥蚀与电感耦合等离子体质谱法(aser ablation and inductively coupled plasma mass spectrometry, LA-ICP-MS)同时测定奶粉中多种重金属元素含量, 测得回收率为 82.4%~103.0%, 最低检出限是 40 μg/kg, 定量限为 60 μg/kg; ZHANG 等[10]基于表面增强拉曼光谱法利用了功能化金纳米粒子传感器来检测牛乳中 Pb^{2+}使检出限低至 5 pmol/L; KONG 等[11]利用新型功能化金属有机骨架(metal organic framework, MOF)材料, 基于 UiO-66-PDDA-PDA 修饰的玻碳电极开发了一种电化学传感器检测乳制品中重金属离子, 测得铅离子回收率为 72.7%~118.0%, 最低检出限是 0.9 ng/mL, 定量限为 3.0 ng/mL; QUINTANA 等[12]采用 HCl、$HClO_4$ 和 H_2O_2 湿法消化并结合超声波处理样品, 然后使用经 Nafion 修饰的一次性丝网印刷电极和“原位”铋膜对处理过的牛奶中的铅离子进行检测, 检出限达到 20 μg/kg。这些方法虽精度较高, 但多具有前处理烦琐, 不能检测多种类型乳制品的缺点。阳极溶出伏安法将还原电势施加于工作电极, 当电极电势超过某种金属离子的析出电势, 溶液中被分析的金属离子还原为金属电镀于工作电极表面, 电势施加时间越长, 还原出来电镀于电极表面(被称为“沉积”或“积累”过程)的金属越多, 当足够的金属镀于工作电极表面, 向工作电极以恒定速度增加电势, 金属将在电极上溶出(氧化)。对于给定电解质溶液和电极, 每种金属都有特定的氧化或溶出反应电压, 该过程释放出的电子形成峰值电流, 通过计算电流峰高或者面积并且与相同条件下的标准溶液相比较得出待测金属浓度, 在灵敏度较高的同时操作便捷[13–14], 但大多数模型均处于实验室阶段, 未投入市场[15], 具有较高应用潜力。

当前,《乳制品质量安全提升行动方案》(2024 年, 国家市场监督管理总局)强调原料验收与重金属风险管控。《中共中央办公厅 国务院办公厅关于进一步强化食品安全全链条监管的意见》(2022 年)提出明确农用地土壤重金属溯源整治, 从源头防控乳制品重金属风险。《乳制品质量安全提升行动方案》(2020 年, 国家市场监督管理总局)要求加强原料供应商审核与进货查验, 强化重金属等风险管控, 提升乳制品质量安全水平, 探究乳制品中铅快速检测方法具有重要的实际意义。本研究采用阳极溶出伏安法(anodic stripping voltammetry, ASV)通过金电极和机器学习算法(卷积神经网络准确率 98%)实现技术革新[16]。

本研究旨在建立一种基于阳极溶出伏安法的乳制品中铅离子的快速检测方法, 并对其进行全面的性能验证, 提升在复杂机制条件下的检测稳定性, 为乳制品中重金属防控的标准化和市场监管提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

某品牌牛乳、乳粉、原味酸奶均在市场购买。

乙酸、氢氧化钠(分析纯, 北京化工厂); 二价铅离子溶液(质量浓度 1 mg/mL)(分析纯, 国家环境保护总局标准样品研究所)。

1.2 仪器与设备

电化学传感微电极芯片、MECStat Pr10 PTS 电化学工作站模块(广州钰芯传感科技有限公司); FA2204 分析天平(精度 0.01 mg)、LC-LX-H185C 离心机、UPTC 超纯水机(上海力辰仪器科技有限公司); FE22 酸度计(上海梅特勒托利多科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 溶液的配制

乙酸盐缓冲液配制: 配制 1 mol/L 乙酸, 另加入 1 mol/L 氢氧化钠溶液, 同时使用 pH 计调整 pH 至 4.5, 备用;

不同浓度铅离子标样溶液配制: 取超纯水加入适当体积的铅离子标液, 混匀后备用;

乳粉稀释方法: 取适量乳粉, 用 10 倍质量的温开水冲泡以得到与成品牛乳相符的口感, 搅拌均匀, 冷却后备用。

1.3.2 可行性实验

由于铅离子在 pH>7.2 的条件下即可完全沉淀, 故本研究采用缓冲范围在 3.6~5.6 的乙酸缓冲液稀释铅标准品溶液: 取 10 μL 的铅标准品溶液, 加入 990 μL 的 0.1 mol/L 乙酸盐缓冲液, 得到质量浓度为 10 μg/mL 的铅标准品母液,

再进一步取 100 μL 铅标准品母液加入 900 μL 的乙酸盐缓冲液，混匀得到质量浓度为 1 μg/mL 的铅标准品溶液，再 2 倍稀释得到 500 ng/mL 的铅标准品溶液用于测试。实验中电化学模块的参数设置为：沉积时间 0 s，脉冲电压 100 mV，分别取 500 ng/mL、1 μg/mL、0 ng/mL 的铅离子乙酸盐缓冲液滴于芯片上，分析峰图谱。

1.3.3 样品前处理方法优化

(1)稀释比例与离心时间的优化

选取乳品常见的 3 大种类：牛乳、乳粉、酸奶，探究样品稀释的最佳比例。分别取样品加入 1、2、3、4、5 倍样品体积的 0.1 mol/L 乙酸盐缓冲液，混匀后静置，待出现分层后进行离心，取上清液检测，并分析结果；

基于实验分析所得的最佳稀释比例，进一步优化离心时间：以 5000 r/min 转速，分别离心 2、4、6、8、10、12、14 min，取上清。进一步检测分析以获得最佳前处理方法。

(2)性能参数的优化

针对方法影响灵敏度的主要参数——沉积时间、脉冲高度值进行优化，以 500 ng/mL 的铅离子溶液，分别调整沉积时间为 0、60、120、180、240、300、360、420、480 s，脉冲高度为 100 mV，分析沉积时间的优化结果；基于实验所得的最佳沉积时间为实验参数，进一步优化脉冲高度值：调整脉冲高度为 20、70、120、170、220、270、320、370 mV 分别进行实验，并分析结果。

1.3.4 方法学验证

(1)铅离子水溶液的标准曲线的建立

基于优化实验的结果作为测定参数，建立标样工作曲线：分别检测 6000.0、3000.0、1500.0、750.0、375.0、187.5 ng/mL 的铅离子乙酸盐缓冲液，分析并绘制标准曲线。

(2)乳制品中铅离子的标准曲线的建立

基于优化后的方法参数对 3 种乳制品样品进行检测，重复 5 次，使用一元线性回归模型处理数据，建立工作曲线。

1.3.5 实际样品检测

对 3 种乳制品样品进行加标，质量浓度分别为 300、1500、4000 ng/mL，应用本方法检测，计算检出限、回收率和相对标准偏差。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2024 软件进行数据处理及制表，采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 检测条件的优化

2.1.1 前处理方法优化

牛乳和酸奶富含大量的酪蛋白，直接滴加样品进行电化学检测，沉积时蛋白会被芯片电极上的金单质依靠金硫键吸附，从而降低检测效率，需对样品进行前处理，这与文献中 Cd^{2+}、Pb^{2+}等重金属离子会与酪蛋白上的特定氨基酸位点结合，从而导致芯片检测信号降低或失真，故检测牛奶上清液中的砷和镉需通过分析上清液避免基质干扰的观点相一致[17]。本研究基于已有研究，添加一定比例的乙酸盐缓冲液，使其与乳制品反应，通过降低样品的 pH 到达酪蛋白的等电点附近，将酪蛋白沉淀，离心获得上清液进行检测，最大限度地降低蛋白干扰[18]。此外，本研究对前处理过程中的稀释比例和离心时间进行进一步优化，从而避免添加缓冲液过少和离心时间过短不能有效降低蛋白干扰[19]；添加过多缓冲液降低该方法的灵敏度，以及过长的离心时间降低该方法的操作效率。

由图 1(a)所示，对最佳稀释倍数进行摸索，3 种样品在 1:2 至 1:4 倍数的稀释取得了较好的相对电流强度，随着稀释倍数的提高，相对电流值出现下降的趋势，原因在于过高的稀释倍数降低了铅离子浓度，故选取乳粉最佳稀释比 1:2；牛奶最佳稀释比 1:3，酸奶最佳稀释比 1:4 为优化结果。如图 1(b)，对离心转速进行优化，考虑到快检方法的离心转速，本次优化实验的转速设为 5000 r/min，通过分析结果得知，牛奶和乳粉在离心 10 min 后得到了较好的相对

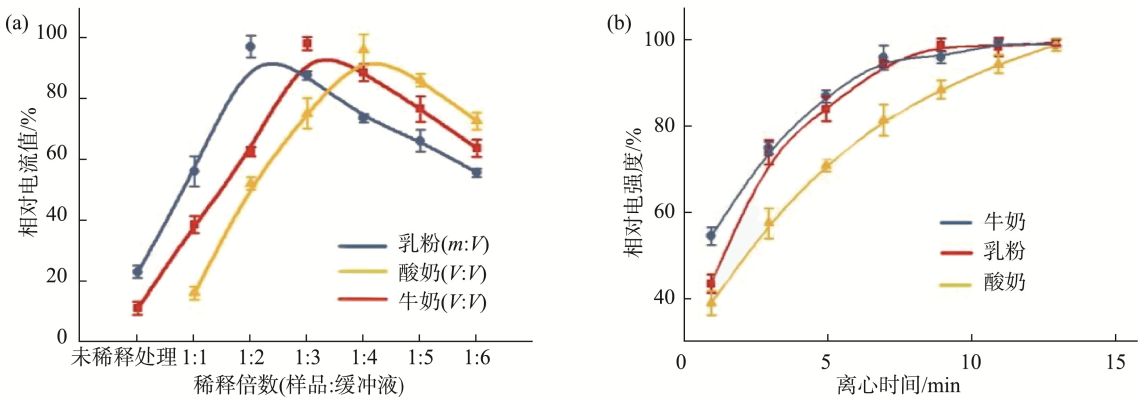


图 1 不同类型的乳品不同稀释倍数(a)、离心时间(b)的相对电流值(n=5)

Fig.1 Relative current values of different types of dairy products with different dilution multiples (a) and centrifugation time (b) (n=5)

电流强度，而酸奶由于密度较大，离心 14 min 所获得的上清液检测效果最佳，推测与酸奶中存在如明胶、果胶等食品添加剂的轻微干扰有关，这与文献中指出的果胶和明胶中含有可与重金属离子特异性结合的活性基团的结论相一致。综合上述结果可知，牛奶、乳粉最佳离心时间为 10 min，酸奶最佳离心时间为 14 min。

2.1.2　电化学参数的优化

在初步实验中，本研究测试了 500 ng/mL 和 1500 ng/mL 两个质量浓度的铅离子标准溶液，并以阴性溶液作对照。如图 2 所示，在–300 mV 左右出现明显的溶出峰，峰高随铅离子浓度的提高而增大，表明阳极溶出伏安法具备检测铅离子的基本能力。但同时也观察到，500 ng/mL 低质量浓度样品的检测曲线干扰噪声较高，信号稳定性较差。已有研究表明，电化学检测铅离子常需通过预富集(沉积)步骤来提高灵敏度[20]；无沉积时间设置时，铅离子在电极上的吸附不充分，易导致低浓度下检测误差较大[21]。因此，为降低噪声干扰、提高低浓度样品的检测可靠性，有必要对沉积时间、脉冲电压等关键电化学参数进行系统优化。

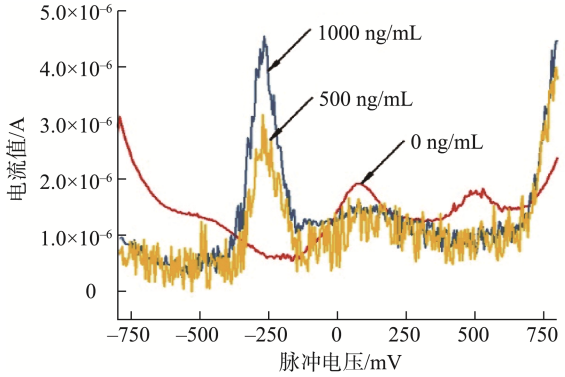


图 2　不同浓度的铅离子标品检测图谱

Fig.2　Detection spectra of lead ion standard with different concentrations

参照文献[22]中的方法分别对沉积时间和脉冲电压进行条件优化。如图 3(a)，实验测试了 0~480 s 的沉积时间，通过比较相对电流强度可看出，无沉积时间的电流强度为充分沉积后电流强度的 40%，随着沉积时间的增加，电流变化值逐渐趋于稳定，在 360 s 后几乎无变化，因此选取 360 s 为最佳沉积时间。如图 3(b)，分别测试了 20~370 mV 的脉冲高度，按照每 50 mV 逐渐递增，通过图 3(b)分析得知，在 270 mV 可得到最佳的电流值，超过 270 mV，相对电流值出现下降的情况，在实验中发现，脉冲高度值过高会引起异常的噪声峰的形成，综合分析选取 270 mV 作为最佳脉冲高度参数。

2.2　方法学验证结果

2.2.1　铅离子水溶液的标准曲线建立结果

基于优化后的电化学参数，在沉积时间为 360 s，脉冲高度为 270 mV 条件下，建立铅离子电流标准曲线。该方法可在 25 min 内完成对铅离子的检测。图 4(a)为 6 个含量下铅离子的电化学测定结果，可知电流强度随着铅离子浓度增加而升高，图 4(b)为铅离子的电流标准曲线，该曲线的线性范围为 187.5~6000.0 ng/mL，线性回归方程为 Y=1.051×10^{-6}X–4.58×10^{-6}，决定系数为 0.9936，表明电流值与铅离子含量具有良好的线性关系，可实现痕量铅离子的检测。

2.2.2　乳制品基质中的标准曲线与基质效应

通过优化完成的参数，分别对质量浓度为 10000.0000、5000.0000、2500.0000、1250.0000、625.0000、312.5000、156.2500、78.1250、39.0625 ng/mL 的乳品加标，经优化后的前处理方法处理并检测，得到了图 5(a)的曲线结果，进一步进行线性拟合达到了图 5(b)的直线方程：牛乳：Y_1=1.30X×10^{-6}–4.245×10^{-6}，线性范围：156.25~5000.00 ng/mL；乳粉：Y_2=1.400X×10^{-6}–5.162×10^{-6}，线性范围：156.25~5000.00 ng/mL；酸奶 Y_3=9.273X×10^{-6}–2.93×10^{-6}，线性范围：312.50~5000.00 ng/mL，其相关系数均达到了 0.99 以上。以信噪比为 3:1 时对应待测物质量浓度为检出限，分别为 123.32、131.84、273.10 ng/mL。结果表明，酸奶的线性范围下限(312.5 ng/mL)显著高于牛乳和乳粉(156.25 ng/mL)，且检出限约为后两者的 2 倍，说明酸奶基质对低浓度待测物的检测灵敏度产生了明显抑制，

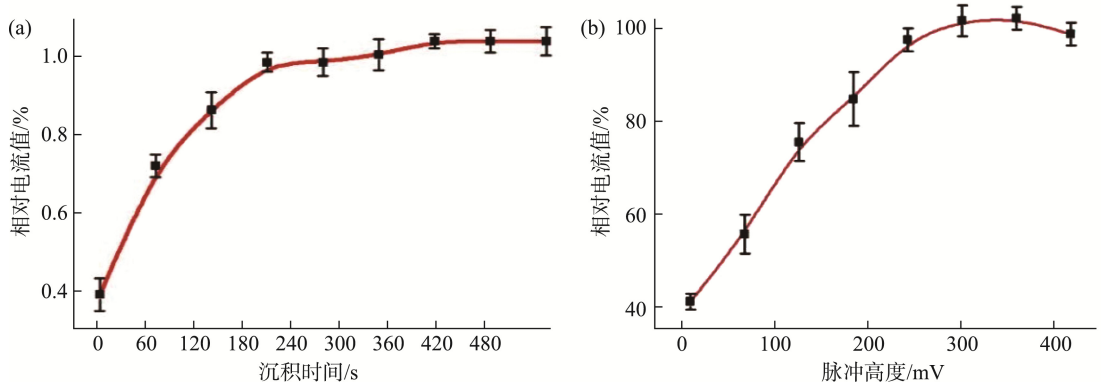
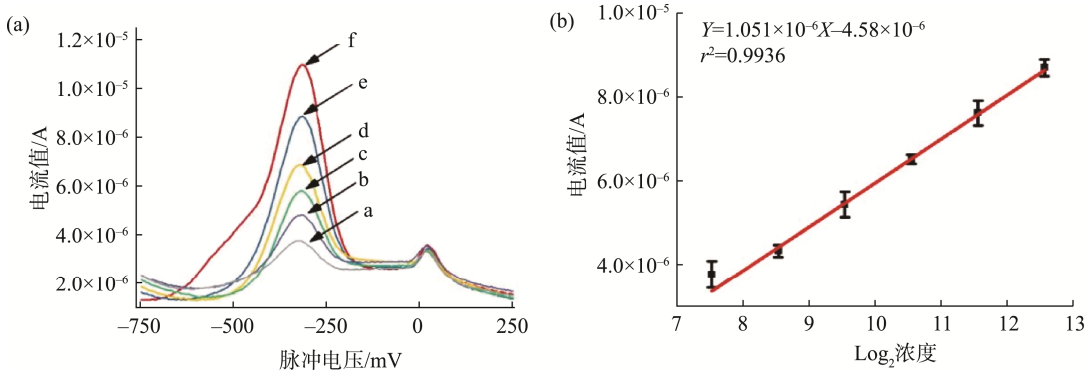


图 3　不同沉积时间(a)、脉冲高度(b)的相对电流值(n=5)

Fig.3　Relative current values of different deposition time (a) and pulse height (b) (n=5)



注: 图 4(a)中, a~f 分别为 187.5、375.0、750.0、1500.0、3000.0、6000.0 ng/mL。

图 4 不同浓度的铅离子标样检测图谱(a)、拟合线性曲线(b) (n=5)

Fig. 4 Detection spectrum (a), fitting linear curve (b) of different concentrations of lead ion standard sample (n=5)

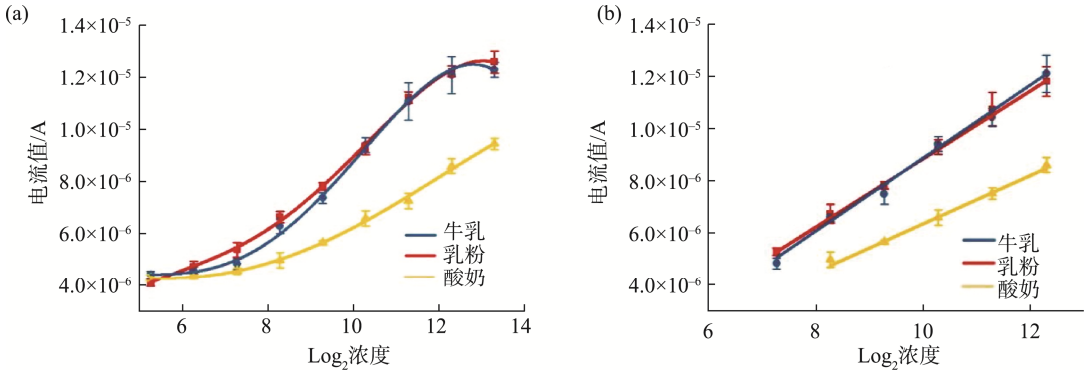


图 5 不同类型的乳品对应不同浓度的铅离子检测图谱(a)、线性拟合曲线(b) (n=5)

Fig.5 Corresponding lead ion detection spectrum (a), linear fitting curve (b) of different concentrations with different types of dairy products (n=5)

原因可能在于酸奶的基质更复杂[23], 如增稠剂、甜味剂、酸度调节剂、防腐剂等[24]。已有研究表明果胶与明胶对铅离子存在不可忽视的吸附作用[25−30], 上述添加剂可能通过静电作用、络合或物理截留等方式与铅离子结合, 导致提取效率下降; 尤其在低浓度水平下, 吸附造成的相对损失更为突出。相比之下, 牛乳和乳粉的基质相对简单, 干扰物质较少, 因此能够实现更宽的线性范围和更低的检出限。尽管酸奶的线性范围收窄、检出限升高, 本方法仍可有效用于酸奶样品中浓度不低于 312.5 ng/mL 的待测物定量分析, 且在该范围内具有良好的准确度和精密度。针对酸奶基质中果胶、明胶等成分引起的吸附干扰, 后续研究可考虑对前处理步骤进行进一步优化, 例如引入酶解(如果胶酶、蛋白酶)或酸辅助水解以破坏凝胶网络结构[31−32], 或添加竞争性络合剂(如乙二胺四乙酸)以提高待测物的释放效率[33], 从而降低检出限并拓宽线性范围。

2.3 加标回收率验证

以市售牛乳、酸奶、乳粉为实际样品, 加入低、中、高 3 种浓度的铅标准品, 按优化后的前处理和电化学条件进行检测, 计算加标回收率和相对标准偏差。结果如表 1 所示, 加标回收率在 90%~110%之间, 相对标准偏差在 5%以内, 表明本方法在实际乳制品基质中具有良好的准确度和精密度, 具备可推广应用的能力。

表 1 3 种乳制品铅加标回收结果(n=5)

Table 1 Lead spiking recovery results of 3 kinds of dairy products (n=5)

样品	加标量/(mg/L)	检出量/(mg/L)	回收率/%	相对标准偏差/%
乳粉	0.300	0.28071	95.67	4.13
	1.500	1.53675	102.45	3.09
	4.000	3.94720	98.68	3.44
酸奶	0.300	0.31935	106.45	4.21
	1.500	1.60923	107.28	4.38
	4.000	4.12625	103.16	3.95
牛奶	0.300	0.28062	93.54	3.74
	1.500	1.58021	105.34	4.26
	4.000	4.08436	100.21	3.37

3　结　论

本研究成功构建了基于 ASV 的乳制品铅污染快速检测体系, 通过金电极显著提升检测性能。实验表明: 脉冲高度 270 mV 时信噪比提高 40%; 该方法在 187.5~6000.0 ng/mL 范围内线性良好(r^2>0.99), 液态乳检出限低至 123.32 ng/mL, 根据检测电极等耗材及试剂等费用计算得平均单样品检测成本在 20 元以内, 较 ICP-MS 方法检测降低 30%, 提高经济效益。针对乳品基质干扰, 创新性提出差异化前处理方案: 乳粉、牛乳、酸奶分别采用 1:2、1:3、1:4 稀释, 并优化离心时间至 10 min(乳粉/牛乳)及 14 min(酸奶), 有效解决了酪蛋白吸附问题。加标回收实验验证了方法的可靠性, 3 类乳品在 300~4000 ng/mL 加标范围内的回收率为 93.54%~107.28%, 相对标准偏差均低于 5%, 符合快速检测技术要求。

该技术为乳制品供应链全环节监控提供了高效工具, 尤其适用于婴幼儿配方乳粉等高危品类。当前 GB 2762—2022 标准下, 液态铅限量严苛(0.05 mg/kg), 但传统石墨炉原子吸收法单样耗时大于 4 h, 导致工业区原料乳抽检覆盖率不足 30%。本方法可将单次检测缩短至 30 min 内, 显著提升基层检测效率。本方法符合《乳制品质量安全提升行动方案》(2024 年, 国家市场监督管理总局)与《中共中央办公厅 国务院办公厅关于进一步强化食品安全全链条监管的意见》(2022 年)等政策要求, 具有良好应用前景。然而, 酸奶等复杂基质因添加剂干扰, 检出限(273.1 ng/mL)及相对标准偏差(当前 8.3%)仍需优化。建议后续研究聚焦 3 点: (1)开发适配酸奶的脱胶酶解前处理工艺; (2)建立基于卷积神经网络的基质干扰校正模型; (3)推动该方法纳入国家标准, 为乳制品铅污染风险防控提供核心技术支撑。

参考文献

[1] 刘晓海, 刘永永, 朱一林, 等. 乳制品中污染物检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(24): 1–12.
LIU XH, LIU YY, ZHU YL, *et al*. Research progress on detection technology of contaminants in dairy products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(24): 1–12.

[2] 赵娅柔, 张秀宇, 左敏, 等. 2016—2019 年前三季度我国乳制品监督抽检结果分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(3): 1184–1191.
ZHAO YR, ZHANG XY, ZUO M, *et al*. Analysis of the supervised sampling inspection of dairy products in China in the first three quarters of 2016—2019 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(3): 1184–1191.

[3] 毛淑娟, 赵新淮. 重金属铅在奶产业链中的分布和生物迁移研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(4): 87–90.
MAO SJ, ZHAO XH. Study on the distribution profiles and biotransformation of heavy metal lead in the production chain of dairy [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(4): 87–90.

[4] 庞洁. 乳制品中重金属的污染来源及相关安全问题的对策[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(8): 19–20.
PANG J. The source of contamination of heavy metals in dairy products and its countermeasures [J]. Food and Nutrition in China, 2012, 18(8): 19–20.

[5] 宋洁, 王丽芳, 张三粉, 等. 牛奶中铅的污染及控制措施[J]. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(1): 48–50.
SONG J, WANG LF, ZHANG SF, *et al*. Pollution and control measures of lead in milk [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2018, 39(1): 48–50.

[6] 刘国钧. 乳制品质量快速检测系统开发报告[R]. 北京: 中国农业大学, 2024.
LIU GJ. Development report on rapid quality testing system for dairy products [R]. Beijing: China Agricultural University, 2024.

[7] 张毛赛. 基于电化学传感技术检测牛乳中安全危害因子的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023.
ZHANG MS. Research on the detection of safety hazards factors in milk based on electrochemical sensor technology [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2023.

[8] 徐丽佳. 采用石墨炉原子吸收光谱法测定牛奶中铅的含量[J]. 乳品与人类, 2024(2): 18–22.
XU LJ. Determination of lead content in milk by graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. Dairy Science and Human Health, 2024(2): 18–22.

[9] 苑利, 张敏爱, 姚亚婷. LA-ICP-MS 同时测定奶粉中铅、镉、铜、铁元素含量[J]. 中国口岸科学技术, 2023, 5(3): 74–79.
YUAN L, ZHANG MAI, YAO YT. Simultaneous determination of lead, cadmium, copper, and iron in inf formula by LA-ICP-MS [J]. China Port Science and Technology, 2023, 5(3): 74–79.

[10] ZHANG DR, PU HB, HUANG LJ, *et al*. Advances in flexible surface-enhanced Raman scattering (SERS) substrates for nondestructive food detection: Fundamentals and recent applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 690–701.

[11] KONG WH, ZHU HT, CHENG XW, *et al*. Electrochemical determination of Cd, Cu, Pb, and Hg in water and food using a glassy carbon electrode modified with metal-organic framework, polydiallyldimethylammonium, and polydopamine [J]. Analytical Letters, 2026, 59(9): 1609–1626.

[12] QUINTANA JC, ARDUINI F, AMINE A, *et al*. Part two: Analytical optimisation of a procedure for lead detection in milk by means of bismuth-modified screen-printed electrodes [J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 736: 92–99.

[13] YANG YX, HUANG YL, LUO HL, *et al*. Review-ion interference and elimination in electrochemical detection of heavy metals using anodic stripping voltammetry [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2023, 170(5). DOI: 10.1149/1945-7111/acd1ba

[14] WYGANT BR, LAMBERT TN. Thin film electrodes for anodic stripping voltammetry: A mini-review [J]. Frontiers in Chemistry, 2022(9): 809535.

[15] 黄晓燕, 唐烁, 刘丽君, 等. 乳及乳制品中元素检测技术研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2023, 46(5): 54–60.
HUANG XY, TANG S, LIU LJ, *et al*. Analysis and review of element detection techniques for milk and dairy products [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2023, 46(5): 54–60.

[16] 刘涛. 基于阳极溶出伏安法的重金属铅和镉检测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020.
LIU T. Detection of heavy metals lead and cadmium based on anodic stripping voltammetry [D]. Harbin: Harbin University of Commerce,

2020.

[17] 李红, 杨同香, 薛一为, 等. 中国水牛乳中 α-乳白蛋白活性分离方法比较[J]. 食品工业科技, 2013, 34(4): 277–280.
LI H, YANG TX, XUE YW, *et al*. Comparison of methods for the isolation of active α-lactalbuminin Chinese buffalo milk [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(4): 277–280.

[18] 王兴磊, 闫秀玲, 何晓燕. 阳极溶出方波伏安法测定水体中的铅离子[J]. 伊犁师范学院学报(自然科学版), 2015, 9(4): 39–43.
WANG XL, YAN XL, HE XY. Determination of lead ions in water by anodic stripping voltammetry [J]. Journal of Yili Normal University (Natural Science Edition), 2015, 9(4): 39–43.

[19] GAO J, CUI Y, YIN J, *et al*. Pre-enrichment-free electrochemical detection of lead ions using functionalized tungsten oxide: Integration of surface functionalization and redox cycling mechanisms [J]. Talanta, 2025, 292: 127923.

[20] ISLAM K, DAIMARI KN, BISWAS R, *et al*. Copper electrodes modified with gold nanoparticles detect two hazardous contaminants (As, Cd) in raw milk [J]. Recent Patents on Nanotechnology, 2025, 19(4): 535–543.

[21] 王崭铎, 鲁迎瑞, 宋礼, 等. 牦牛乳酪蛋白胶束的制备及其理化特性[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-12. [2025-12-30]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042123
WANG ZD, LU YR, SONG L, *et al*. Preparation and physicochemical properties of yak milk casein micelles [J/OL]. Food and Fermentation Industry, 1-12. [2025-12-30]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042123

[22] 张翠忠, 连欢, 杨薇, 等. 混合气凝胶负载铋纳米粒 子的电化学传感器检测 Pb^{2+}和 Cd^{2+}[J]. 分析化学, 2022, 50(8): 1233–1242.
ZHANG CZ, LIAN H, YANG W, *et al*. Detection of Pb^{2+} and Cd^{2+} by an electrochemical sensor loaded with bismuth nanoparticles in gas mixture gel [J]. Analytical Chemistry, 2022, 50(8): 1233–1242.

[23] 汪春明, 王美玲, 任丽娜, 等. QuEChERS-液相色谱-串联质谱法检测乳及乳制品中喷沙西林及其代谢物含量[J]. 分析科学学报, 2025(6): 684–690.
WANG CM, WANG ML, REN LN, *et al*. Determination of penicillin and its metabolites in milk and dairy products QuEChERS-liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Analytical Science, 2025(6): 684–690.

[24] 缪树婷, 盛丽娟, 张进涛. 食品添加剂在酸奶凝固过程中的应用研究[J]. 中国食品, 2025(6): 117–119.
MIAO ST, SHENG LJ, ZHANG JT. Research on the application of food additives in the curdling process of yurt [J]. China Food, 2025(6): 117–119.

[25] 彭晓夏, 崔泾洁, 逯晓青, 等. 向日葵盘低酯化果胶对重金属离子 Pb^{2+}的吸附性能研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 25–32.
PENG XX, CUI JJ, LU XQ, *et al*. Research on the adsorption performance of sunflower disk lowesterified pectin to heavy metal ion Pb^{2+} [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 25–32.

[26] 罗君兰, 熊华, 赵强. 白木通果胶对水中重金属铅、镉离子的吸附性能[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 102–110.
LUO JL, XIONG H, ZHAO Q. Adsorption performance of pectin from *Fructus Akebiae* on metal ions lead and cadmium in water [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(8): 102110.

[27] 梁瑞红, 李鹏琳, 贺小红, 等. 不同酯化度的柑橘果胶对 Pb^{2+}的吸附作用影响及其机理研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 13–18.
LIANG RH, LI PL, HE XH, *et al*. Influence of different esterification degrees citrus pectin on the adsorption of Pb^{2+} and its mechanism [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 13–18.

[28] 史钰琪. 明胶气凝胶的制备及其吸附性能的研究[D]. 海口: 海南大学, 2022.
SHI YQ. Preparation and adsorption properties of gelatin aerogels [D]. Haikou: Hainan University, 2022.

[29] 王立娜, 赵瑞雪, 郑月, 等. 海藻酸钠-明胶-PVA 包埋法固定化酵母菌吸附铅[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007(4): 80–83.
WANG LN, ZHAO RX, ZHENG Y, *et al*. Immobilization of yeast adsorbing lead by sodium algin-gelatin-PVA embedding method [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007(4): 80–83.

[30] OLIVEIRA DPD, TODOROV DS, FABI PJ. Exploring the prebiotic potentials of hydrolyzed pectins: Mechanisms of action and gut microbiota modulation [J]. Nutrients, 2024, 16(21): 3689.

[31] ZHU GR, SUN CS, LI FY, *et al*. Comparative effects of pectin and hydrolyzed pectin coating as pre-frying treatments on acrylamide formation in potato chips [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 269(P1): 132015.

[32] 乔铭君. 壳聚糖复合生物质基材料去除水中重金属的研究[D]. 杭州: 浙江科技大学, 2025.
QIAO MJ. Study of chitosan composite biomass-based materials for the removal of heavy metals from water [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2025.

[33] 刘玉环, 关瑞, 曹雷鹏, 等. 壳聚糖-果胶凝胶珠吸附剂的改性及其去除藻蓝蛋白中 Pb(II)的应用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 68–75.
LIU YH, GUAN R, CAO LP, *et al*. Modification of chitosan-pectin gel beads adsent and its application in the removal of Pb(II) from phycocyanin [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 4(22): 68–75.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)