

基于胶体金侧向层析原理的大米中痕量镉 现场快速检测方法

A method for on-site and rapid detection of trace cadmium in rice
based on colloidal gold lateral chromatography

王冉冉¹ 姚 丽¹ 姚帮本² 陈 伟² 陈赵然²

WANG Ranran¹ YAO Li¹ YAO Bangben² CHEN Wei² CHEN Zhaoran²

(1. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 安徽省产品质量监督检验研究院, 安徽 合肥 230051)

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230601, China;

2. Anhui Province Institute of Product Quality Supervision & Inspection, Hefei, Anhui 230051, China)

摘要:目的:建立一种可实现对大米中镉元素现场快速检测的胶体金试纸条检测方法。方法:基于侧向免疫层析技术,对胶体金试纸条一系列影响检测性能的参数进行系统优化。结果:所制备的胶体金试纸条对大米中镉元素的检测达到了可视化检测限为 10 ng/g 的水平。在实际应用中,此方法样品前处理过程操作简单,低浓度酸直接提取并稀释后即可用于试纸条检测。结论:胶体金试纸条快速检测方法适用于大米镉的现场快速筛查。

关键词:大米;镉;现场快速检测;胶体金试纸条;可视化检测;低浓度酸

Abstract: Objective: A colloidal gold test strip method that can achieve on-site and rapid detection of cadmium elements in rice was established. **Methods:** Based on lateral immunochromatographic technology, the colloidal gold test strip was systematically optimized for a series of parameters that affect the detection performance. **Results:** The visual detection limit of cadmium in rice was reached at 10 ng/g with the colloidal gold test strip. In practical applications, the sample pretreatment process is simple, low concentration acid can be directly extracted and diluted for test strip detection. **Conclusion:** The colloidal gold test strip was suitable for on-site rapid screening of cadmium in rice.

Keywords: rice; cadmium; on-site and rapid detection; colloidal

gold test strip; visual detection; low concentration acid

镉是一种通过工业生产和农业实践广泛传播的银白色有毒金属污染物,具有不可降解性和积聚性,是环境中毒性最强的重金属之一^[1-4]。镉普遍存在于环境中,会通过水源、土壤、空气流动等进入生态系统内循环。水稻具有发达的根系和特殊的生长周期,对重金属镉的吸收、富集能力强于一般农作物,导致大米重金属镉超标问题尤为突出^[5-7]。中国相关法律规定大米中镉含量不得超过 0.2 mg/kg^[8]。因此,对大米中镉污染的检测对于保障人的生命健康具有重要意义。

大米中重金属污染尤其是镉污染已严重危害到人类健康^[9]。目前,对于镉污染的检测方法主要依赖于一些大精仪器,如原子荧光光谱(AFS)^[10-12]、电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)^[13-14]、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)^[15-17]等。这些方法虽然具有较高的灵敏度与精确度,但是检测样品要求高,样品前处理复杂,检测耗时长,所需仪器昂贵并需要专业人员操作,不适合现场即时筛查。一些快速检测方法如比色检测法^[18-22]、电化学分析法^[23-27],因灵敏度低、抗干扰能力弱,不适用于复杂的实际样本检测。

近年来,侧向层析试纸技术因其简单、易操作、低成本、检测耗时短等而被广泛应用于食品安全检测领域^[28-29]。Xu 等^[30]开发了一种基于 QuEChERS 方法的便携式仪器,经酸溶液剧烈振荡提取后,转移到分散固相萃取柱中由高氯酸洗脱,通过免疫层析试纸法检测含有镉的纯化和浓缩样品,通过将该方法与电感耦合等离子体质谱法获得的结果进行比较,进一步验证了该方法实

基金项目:安徽省自然科学基金项目(编号:2208085QB56);安徽省重点研究与开发计划项目(编号:202104a07020008, 2022f04020003)

作者简介:王冉冉,女,合肥工业大学在读硕士研究生。

通信作者:姚丽(1988—),女,合肥工业大学博士后,博士。

E-mail: ybl200999@126.com

收稿日期:2022-12-02 **改回日期:**2023-08-03

际应用中的可靠性。Ling 等^[31]用具有复杂三维花状结构的纳米花颗粒(AuNFs)作为高信号报告基因,成功开发了基于 AuNFs 标记的条带。与传统胶体金标记的结果相比,检测线提高了约 12 倍,将获得的试纸测试用于真实水样中镉离子的检测,其灵敏度高,且具有良好的重复性。Arai 等^[32]开发了糙米中镉免疫检测试剂盒,由免疫色谱装置和用于预处理的选择性纯化柱组成,定量范围为 100~1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$,可用于现场快速检测。

研究拟通过胶体金免疫层析试纸条检测技术,构建镉离子便携可视化快速检测平台,并与传统的重金属镉提取方法进行比较,以期为大米中镉的现场检测提供更快速便捷的途径。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大米:籼米和糯米,安徽省质检院;

氯金酸、柠檬酸三钠:分析纯,生工生物工程(上海)股份有限公司;

牛血清蛋白(BSA)、人血清蛋白(HSA)、酪蛋白(Casein)、酪蛋白钠(Na-Casein):分析纯,百灵威科技有限公司;

磷酸缓冲溶液(PB)、磷酸盐缓冲溶液(PBS)、磷酸盐吐温缓冲液(PBST)、三羟甲基氨基甲烷盐酸盐(Tris-HCl)、硝酸(HNO_3)、氢氧化钠(NaOH)、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

水中镉标准品:1 000 mg/L ,坛墨质检科技股份有限公司;

镉抗体、镉包被原、羊抗鼠二抗:杭州贤至科技生物有限公司;

硝酸纤维素膜(NC 膜)、吸水垫、玻璃纤维膜、聚氯乙烯(PVC)底板:上海捷宁科技生物有限公司。

1.2 主要仪器设备

磁力搅拌器:IKA RCT basic 型,广州仪科实验室技术有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:101-1B 型,上海三发科学仪器有限公司;

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

试纸条喷膜仪:XYZ 型,美国 Bio-dot 公司;

试纸条切条机:CM4000 型,美国 Bio-dot 公司;

高速万能粉碎机:FW100 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

超声仪:IT07 型,昆山市超声仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 胶体金的制备 采用柠檬酸三钠还原法。将 250 mL 锥形瓶和磁力搅拌子用自来水冲洗干净后,加入

王水浸泡 24 h。向锥形瓶中加入双蒸水煮沸后倒出,反复用沸水洗涤 5 次。向洗净的锥形瓶中加入 2.55 mL 质量浓度为 5 g/L 的氯金酸溶液,并加双蒸水至 150 mL,混匀,置于磁力搅拌器上加热至暴沸状态时,开启搅拌,转速调至 12 000 r/min ,随后迅速加入 3 mL 1%柠檬酸三钠溶液,边加热搅拌边,当溶液由黑变紫再变成稳定的酒红色后,继续加热搅拌 5 min,关闭热源,继续搅拌 5 min,关闭仪器,将锥形瓶于室温冷却,并于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱贮藏备用。

1.3.2 胶体金标记镉抗体偶联物的合成 取 1 mL 胶体金溶液于 1.5 mL 离心管内,加入 K_2CO_3 溶液调节 pH,再加入 1 mg/mL 镉抗体,室温下摇晃孵育 1 h。加入 100 μL 封闭剂,继续室温孵育 0.5 h。反应结束后,9 000 r/min 离心 10 min,弃去上清液后加入 100 μL 重悬液进行复溶,获得所需偶联物。移取 4 μL 偶联物滴加至金标垫上,于 27 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱干燥,备用。

1.3.3 免疫侧向层析试纸的制备 胶体金免疫侧向层析试纸从下到上依次由 PVC 底板、样品垫、金标垫、NC 膜和吸水垫 5 个部分组成。将一定浓度的镉包被原和羊抗鼠二抗经喷膜仪分别以直线的形式喷涂至 NC 膜上,分别作为检测线(T 线)和质控线(C 线),随后将膜放入 27 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥 2 h。最后将样品垫、金标垫、NC 膜和吸水垫依次粘贴在 PVC 底板上,用切条机切割成 3 mm 宽的试纸条保存备用。

1.3.4 大米样品中镉的检测

(1) 样品前处理:将标准浓度镉大米样本粉碎后过 60 目筛网,以保证每一批样本提取前粒径相等。

(2) 试样提取:准确称取 1 g 过筛后的大米于 4 mL 离心管中,加入 2 mL 质量分数为 5% 的 HNO_3 提取镉离子。将溶液于室温下剧烈涡旋震荡 5 min,使样品与硝酸充分反应。将溶液于 9 000 r/min 离心 10 min,获得含有镉离子的上清液。

(3) 镉离子检测:取 100 μL 上清液加入适量 1 mol/L 的 NaOH 溶液调至中性,待充分混匀后,加入 20 μL (含 100 mg/L EDTA-2Na) 100 mmol/L 的 PBST 缓冲液,混匀,得到的溶液即为上样液。取 50 μL 上样液滴加到制备好的镉胶体金试纸条样品垫上,等待 5 min 后观察结果。

1.4 试验参数优化

1.4.1 胶体金与镉抗体偶联体系 pH 优化 向 1 mL 胶体金溶液中加入不同体积(4, 6, 8, 10 μL) 0.1 mol/L 的 K_2CO_3 , 根据试纸条检测结果确定最适的 K_2CO_3 用量。

1.4.2 镉抗体用量优化 在 K_2CO_3 用量优化结果的基础上,偶联过程中,在等量胶体金中加入不同体积(1, 2, 3, 4 μL) 质量浓度为 1 mg/mL 的镉抗体,制备成胶体金镉抗体偶联物,最终根据试纸条检测结果确定最适的镉抗体用量。

1.4.3 封闭剂种类的选择 分别选择质量分数为 10% BSA、10% HSA、0.5% Casein、0.5% Na-Casein 作为封闭剂进行封闭,最终制备成胶体金镉抗体偶联物,根据试纸条检测结果确定最适的封闭剂种类。

1.4.4 重悬液的选择 在前期参数优化的基础上,平行 4 组进行胶体金与抗体的偶联与封闭,选择质量分数为 10% BSA、10% HSA、0.5% Casein、0.5% Na-Casein 作为重悬液对 4 组偶联物进行复溶,根据试纸条检测结果确定最适的重悬液种类。

1.4.5 螯合缓冲液的选择 为了验证不同的盐离子浓度和不同的 pH 检测环境对大米中镉离子检测效果的影响,选择 0.01 mol/L PB、0.01 mol/L PBS、0.01 mol/L Tris-HCl、0.01 mol/L PBST 4 种溶液分别作为螯合缓冲液,根据试纸条检测结果确定最适的缓冲液种类。

1.4.6 试纸条检测灵敏度的验证 选择优化后的最适条件,分别取 100 μL 质量浓度分别为 0, 1, 5, 10, 25, 50 ng/mL 稀释后的镉标准溶液于不同离心管中,经 1 mol/L NaOH 将 pH 调至中性后,与 20 μL (含 100 mg/L EDTA-2Na) 100 mmol/L PBST 混合,等待 5 min 后观察试纸条显线情况。

1.4.7 试纸条特异性验证 为了验证此方法是否受其他重金属离子的干扰,分别选取质量浓度为 500 ng/mL 的 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 以及空白对照 PBST,与质量浓度为 50 ng/mL 的目标物 Cd^{2+} ,利用制备的试纸同时进行检测,等待 5 min 后观察其显线情况。

2 结果与分析

2.1 镉胶体金试纸条检测原理

如图 1 所示,镉抗体标记胶体金形成金标抗体,铺在标记垫上,NC 膜上分别喷涂了羊抗鼠二抗和镉包被原作为 C 线和 T 线。当被测样品中含有重金属镉时,通过样品的前处理将其转化成镉离子,再与乙二胺四乙酸形成螯合物,会与 T 线上的镉包被原共同竞争金标抗体,金标抗体便不能与喷涂于 T 线上的镉包被原结合,使 T 线显线较弱或者不显线,随着金标抗体继续向前迁移,将与 C 线上的羊抗鼠二抗结合,显示红线最终试纸条上 C 线较强, T 线较弱或者不显线,即为阳性;若样品中不含镉,金标抗体便会与 T 线上的镉包被原以及 C 线上的羊抗鼠二抗结合,此时试纸条显示两条颜色较强的红线,即为阴性。

2.2 胶体金与镉抗体偶联 pH 优化

图 2 为胶体金与镉抗体偶联体系最适 pH 优化结果,由于合适的酸碱环境有助于抗体在胶体金表面的结合,而过酸过碱条件下,容易导致胶体金聚集,故选择 K_2CO_3 这种强碱弱酸盐来对初始状态为酸性的胶体金进行 pH 值的调节。由图 2 可知,随着体系中加入 K_2CO_3 量的增加,溶液的 pH 值随之增大,试纸条的灵敏度逐渐增强,说

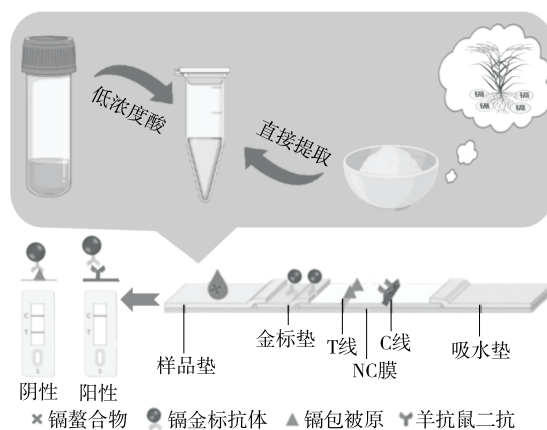


图 1 重金属镉胶体金试纸条检测原理图

Figure 1 Detection schematic diagram of the colloidal gold test strip for the heavy metal cadmium

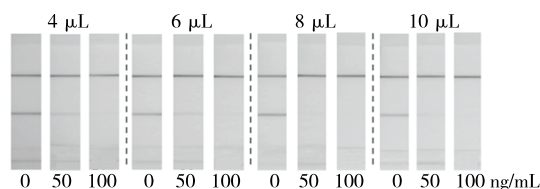


图 2 胶体金与抗体偶联体系最适 pH 优化结果

Figure 2 Optimization results of optimum pH for colloidal gold and cadmium antibody conjugated systems

明在偏碱性条件下,有助于抗体与胶体金的结合。当 K_2CO_3 用量为 8 μL 时,检测灵敏度最高,且阴性 T 线强度最强,阴阳结果对比明显,因此在该反应条件下,选择 K_2CO_3 用量为 8 μL 进行标记体系 pH 的调节。

2.3 镉抗体用量优化

由图 3 可知,镉抗体用量太低时,影响 T 线的显现,随着镉抗体用量的增多,检测结果中 T 线的强度增强,但相应的灵敏度降低,综合考虑 T 线强度和检测灵敏度,最终选择 4 μL 的镉抗体为最终使用量。

2.4 胶体金与镉抗体偶联封闭剂的选择

由图 4 可知,使用 Casein 和 Na-Casein 作为封闭剂制备的金标抗体偶联物,测试过程中偶联物在金标垫上不容易释放,测试完成后金标垫上仍有大量偶联物堆积,而 BSA 和 HSA 作为封闭剂时释放效果良好。在二者检测

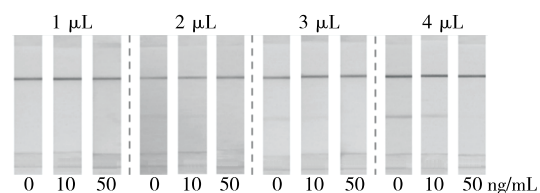


图 3 抗体标记量优化结果

Figure 3 Optimization results of cadmium antibody dosage

灵敏度一致的情况下,BSA 封闭组阴性 T 线强度略高于 HSA 封闭组,综合考虑,选取质量分数为 10% 的 BSA 溶液作为试纸条偶联过程的封闭剂。

2.5 重悬液的选择

由图 5 可知,4 种不同的重悬液制备的试纸条,检测过程中金标垫上偶联物均有良好的释放效果,对比 4 组检测结果中的灵敏度和显线强度,最终选择质量分数为 0.5% 的 Na-Casein 作为重悬液。

2.6 整合过程缓冲液的优化

由图 6 可知,当 PBST 作为缓冲液时,其灵敏度与其他 3 种缓冲液相比明显提高,可能是 PBST 中含有的表面活性剂吐温-20 提高了镉与金标抗体的结合。因此,选择 PBST 作为整合缓冲液。

2.7 标准曲线的建立

由图 7(a)可知,随着样品中 Cd^{2+} 质量浓度的增加,试纸条 T 线的颜色强度逐渐减弱,当 Cd^{2+} 质量浓度达到

10 ng/mL 时,可以明显看出其 T 线颜色与阴性样本的差异,当 Cd^{2+} 质量浓度达到 50 ng/mL 时,试纸条 T 线完全消除。由图 7(b)可知,随着 Cd^{2+} 质量浓度的增大,T 线的峰值面积越来越小,在 10 ng/mL 时检测线的峰面积显著减小,并且在 Cd^{2+} 质量浓度达到 50 ng/mL 时基本消失,与图 7(a)中的检测线变化趋势保持一致,进一步证明了该试纸条肉眼观察的准确性。由图 7(c)可知,T 线峰面积与对应的 Cd^{2+} 质量浓度在 0~50 ng/mL 时具有良好的线性关系,证明了试验方法的定量检测潜力。

2.8 特异性检测结果

由图 8(a)可知,利用制备的试纸条对多种金属离子进行检测时,只有 Cd^{2+} 能够使试纸条 T 线消失,其他重金属离子样本上样时,T 线的强度与空白对照组几乎一致,表明该试纸条对于镉离子具有良好的特异性。图 8(b)和图 8(c)分别是根据图 8(a)中 T 线处信号强度的灰度扫描图谱和峰面积获得的柱状图,进一步验证了此镉胶体金试纸条具有良好的特异性。

2.9 实际样品检测

对 6 份不同大米样本通过镉离子提取并整合后利用制备的镉离子试纸条进行上样检测,结果如图 9 所示。由图 9 可知,6 份大米样本中有 2 个样本对应 T 线与 C 线强度区别不大,无明显减弱,可判定为阴性样本;4 份 T 线明显变弱,可判定为阳性样本。并且试纸条对应 T 线的灰度扫描结果也显示,其中 2 份样本 T 线峰值较高,另

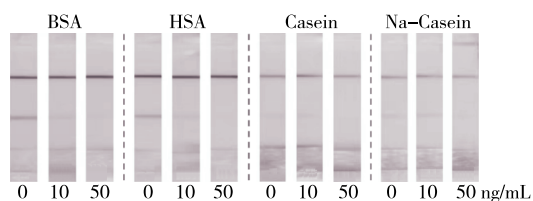


图 4 封闭剂优化结果

Figure 4 Optimization of test results of different blocking agents

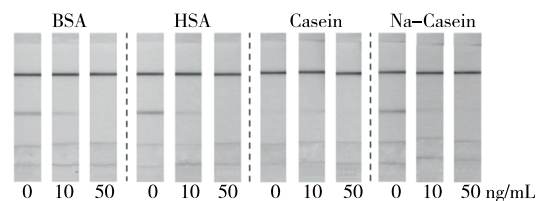


图 5 重悬液优化结果

Figure 5 Optimization of test results of different resuspensions

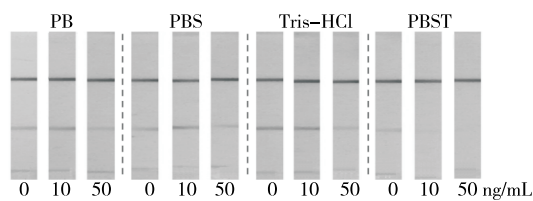


图 6 整合缓冲液优化结果

Figure 6 Optimization results of chelating buffer

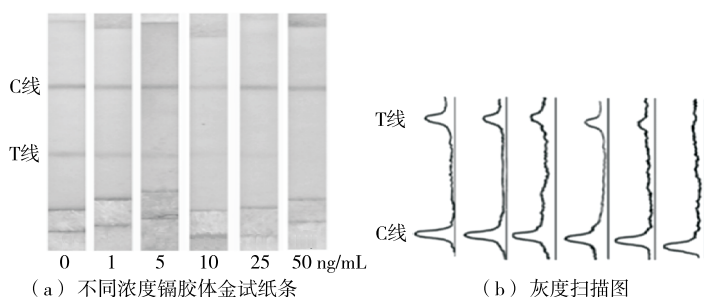
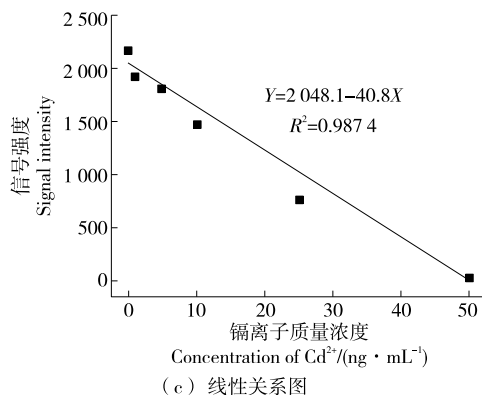


图 7 镉胶体金试纸条与标准曲线的建立

Figure 7 Establishment of standard curve of cadmium colloidal gold strip



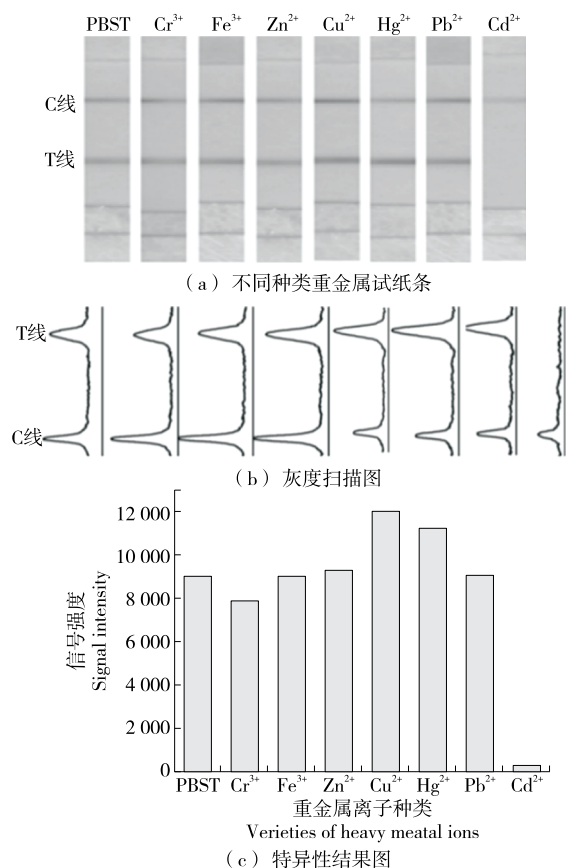


图 8 镉胶体金试纸条特异性检测结果

Figure 8 Specific test results of cadmium colloidal gold test strip

外 4 份 T 线峰值降低明显。而通过原子吸收光谱法测得 6 份样本中镉含量分别为籼米 19 ng/g、籼米 27 ng/g、籼米 240 ng/g、籼米 260 ng/g、糯米 240 ng/g、糯米 260 ng/g，根据国标对大米中镉离子的限量要求可知，低于 200 ng/g 时可视为阴性样本，说明试纸条检测结果与仪器测定结果一致，进一步验证了胶体金试纸条方法的可行性与有效性。

2.10 与市售试剂盒对比

为了验证试验方法检测大米中镉的准确性，购买了市售的检测试剂盒与之进行对比。由图 10 可知，试验所制备的胶体金试纸条比商业化试剂盒的消线效果更好，更适用于现场快速检测。将该胶体金试纸条检测法与商业化电化学检测仪相比，两者均能满足实际检测要求，但该方法的便携性和特异性更好。因此试验方法具有极大的实际应用潜力。

3 结论

研究建立了一种可现场快速检测大米中重金属镉的胶体金试纸条。结果表明，与传统的镉离子检测方法相比，试验方法的样品前处理过程简便、耗时短，无需复杂的样本提取过程，操作过程简单、温和，经过稀酸提取并

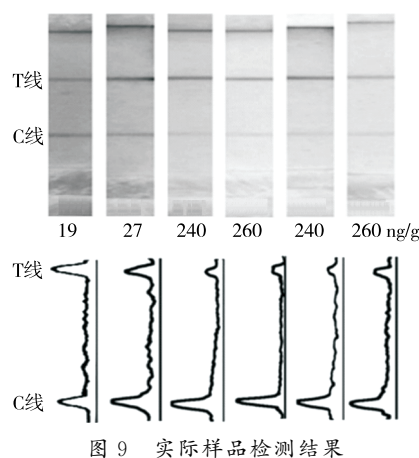


Figure 9 Detection results of cadmium in real sample

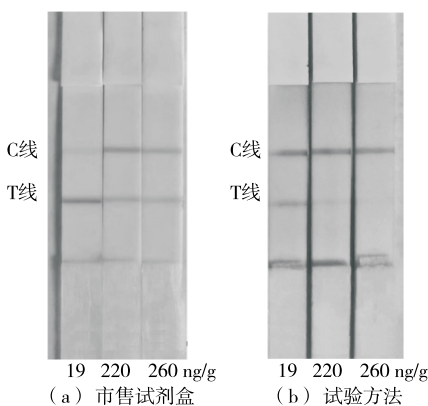


图 10 市售试剂盒与试验方法检测结果对比

Figure 10 Comparison of test results between commercial reagent kit and test method

稀释后即可于试纸条上检测，短时间内就能获得检测结果，节省了大量时间。研究仅对大米中的镉进行了检测，后续可以将该方法应用于其他谷物及各种水产品等镉污染环境中，通过进一步优化提取方法，实现各种环境下镉离子的快速检测，提高该方法在复杂样品中的检测性能。

参考文献

- [1] MONDAL S C, SARMA B, FAROOQ M, et al. Cadmium bioavailability in acidic soils under bean cultivation: Role of soil additives[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, 17: 153-160.
- [2] LI S, ZHANG C C, WANG S N, et al. Electrochemical microfluidics techniques for heavy metal ion detection[J]. Analyst, 2018, 143: 4 230-4 246.
- [3] BANSOD B, KUMAR T, THAKUR R, et al. A review on various electrochemical techniques for heavy metal ions detection with different sensing platforms[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2017, 94: 443-455.
- [4] LU Y Y, LIANG X Q, NIYUNGEKO C, et al. A review of the identification and detection of heavy metal ions in the environment

- by voltammetry[J]. *Talanta*, 2018, 178: 324-338.
- [5] 耿萍, 徐志爱. 石墨烯修饰电极测定中成药中铅和镉离子含量的研究[J]. *化学研究与应用*, 2019, 31(8): 1 448-1 453.
- GENG P, XU Z A. Determination of lead and cadmium ions using anodic stripping voltammetry at a reduced graphene modified electrode[J]. *Chemical Research and Application*, 2019, 31(8): 1 448-1 453.
- [6] AMIT P, AJAY K, ZHONG H, et al. Adverse effect of heavy metals (As, Pb, Hg, and Cr) on health and their bioremediation strategies: A review[J]. *International Microbiology*, 2018, 21: 97-106.
- [7] RANA M N, TANGPONG J, RAHMAN MM, et al. Toxicodynamics of lead, cadmium, mercury and arsenic-induced kidney toxicity and treatment strategy: A mini review[J]. *Toxicology Reports*, 2018, 5: 704-713.
- [8] GB 2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》[J]. *中国食品卫生杂志*, 2018, 30(3): 329-340.
- GB 2762—2017 National food safety standard-limits of pollutants in food[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2018, 30(3): 329-340.
- [9] UDDIN MM, ZAKEEL M C M, ZAVAHIR J S, et al. Heavy metal accumulation in rice and aquatic plants used as human food: A general review[J]. *Toxics*, 2021, 9: 360.
- [10] 王春慧, 刘霁欣, 毛雪飞, 等. 直接进样钨丝电热蒸发—原子荧光光谱法快速测定蒸馏酒中镉[J]. *中国无机分析化学*, 2022, 12(1): 1-7.
- WANG C H, LIU J X, MAO X F, et al. Rapid determination of cadmium in distilled liquor by direct sampling W-coil electrothermal vaporization-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2022, 12(1): 1-7.
- [11] 杨有泽, 杨珍, 贺攀红, 等. 盐酸振荡浸取—原子荧光光谱法测定大米中的痕量镉[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(3): 1 107-1 112.
- YANG Y Z, YANG Z, HE P H, et al. Determination of trace cadmium in rice by atomic fluorescence spectrometry with hydrochloric acid oscillating extraction[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(3): 1 107-1 112.
- [12] 权斌, 王海军, 马怡飞, 等. 原子荧光光谱法测定镉和铅技术应用[J]. *石化技术*, 2017, 24(10): 13.
- QUAN B, WANG H J, MA Y F, et al. Technical application of atomic fluorescence spectrometry for determination of Cd and Pb[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2017, 24(10): 13.
- [13] 江荆, 魏雅娟, 伍斯静, 等. 强碱性阴离子交换纤维吸附—电感耦合等离子体原子发射光谱法测定含锌物料中镉[J]. *冶金分析*, 2016, 36(12): 38-43.
- JIANG J, WEI Y J, WU S J, et al. Determination of cadmium in mixture containing zinc by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry combined with strong alkaline anion exchange fiber adsorption[J]. *Metallurgical Analysis*, 2016, 36(12): 38-43.
- [14] 张丽, 张芳, 陈雄飞, 等. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定K金首饰中的微量重金属元素[J]. *世界有色金属*, 2019(6): 170-171.
- ZHANG L, ZHANG F, CHEN X F, et al. Determination of trace heavy metal elements in k-gold jewelry by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019(6): 170-171.
- [15] LONDONIO A, MORZAN E, SMICHOWSKI P, et al. Determination of toxic and potentially toxic elements in rice and rice-based products by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2019, 284: 149-154.
- [16] YANG Q, CHEN H J, HU J, et al. Simultaneous detection of ruthenium and osmium by photochemical vapor generation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94: 593-599.
- [17] 胡桂霞, 曹美萍, 张燕峰, 等. 电感耦合等离子体—质谱法测定上海市售大米中40种元素含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(10): 3 902-3 912.
- HU G X, CAO M P, ZHANG Y F, et al. Determination of 40 kinds of elements in rice sold in Shanghai by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(10): 3 902-3 912.
- [18] 张光胤, 鲁迨, 邓放明, 等. 基于纳米材料改良酶联免疫吸附法的研究进展[J]. *食品与机械*, 2020, 36(3): 225-231.
- ZHANG G Y, LUD, DENG F M, et al. Research progress of improved enzyme-linked immunosorbent assay based on nanomaterials[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(3): 225-231.
- [19] 蒋文慧, 吴小胜, 崔娜, 等. 一种多菌灵酶联免疫快速检测方法的建立[J]. *食品与机械*, 2021, 37(1): 94-98.
- JIANG W H, WU X S, CUI N, et al. Establishment of a rapid detection method for carbendazim enzyme-linked immunosorbent[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(1): 94-98.
- [20] 王琳, 王耀, 胡晓飞, 等. 免疫分析技术在金刚烷胺残留检测中的应用[J]. *食品与机械*, 2023, 39(4): 205-210.
- WANG L, WANG Y, HU X F, et al. Application of immunoassay in the detection of amantadine residues[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(4): 205-210.
- [21] PADMALAYA G, SREEJA B S, KUMAR P D, et al. A facile synthesis of cellulose acetate functionalized zinc oxide nanocomposite for electrochemical sensing of cadmium ions[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2019, 29: 989.
- [22] 涂东堃, 鲁悦, 郑晓亮, 等. 基于荧光分子开关和核酸适配体的镉离子快速检测方法[J]. *食品与机械*, 2020, 36(3): 63-68.
- TU D K, LU Y, ZHENG X L, et al. Rapid detection of cadmium based on fluorescence molecular switch and aptamer[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(3): 63-68.
- [23] YAO Y, WU H, PING J F, et al. Simultaneous determination of Cd (II) and Pb(II) ions in honey and milk samples using a single-walled carbon nanohorns modified screen-printed electrochemical sensor[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 8-15.

(下转第88页)

- [4] 王述诚, 申东滨, 肖芳远, 等. 电子皮带秤在维护校准时需注意的几个问题[J]. 工业计量, 2022, 32(5): 79-82.
- WANG S C, SHEN D B, XIAO F Y, et al. Several problems needing attention in maintenance and calibration of electronic belt weigher[J]. Industrial Metrology, 2022, 32(5): 79-82.
- [5] 王晓光, 刘柯, 郭天茂, 等. 相对行程传感器高低温动态校准装置设计[J]. 中国测试, 2021, 47(S2): 153-158.
- WANG X G, LIU K, GUO T M, et al. Design of high and low temperature dynamic calibration device for displacement sensor[J]. China Measurement & Testing Technology, 2021, 47(S2): 153-158.
- [6] 卢小彝, 翟琼劫, 屠淳, 等. 压电式动态力传感器校准方法的研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 261-265.
- LU X B, ZHAI Q J, TU C, et al. Calibration method of piezoelectric dynamic force sensor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 261-265.
- [7] 马娟, 韦宣, 曹逢. 0.2 级高精度智控矩阵电子皮带秤在火电厂的应用[J]. 工业计量, 2021, 31(4): 8-12.
- MA J, WEI X, CAO F. Application of 0.2 level high precision intelligent control matrix electronic belt scale in thermal power plants[J]. Industrial Metrology, 2021, 31(4): 8-12.
- [8] 胡强. 定量皮带秤自动定量误差测定方法研究[J]. 中国测试, 2019, 45(6): 60-64.
- HU Q. Research on measuring methods for auto-quantifying error of constant feeding belt weigher[J]. China Measurement & Testing Technology, 2019, 45(6): 60-64.
- [9] 范爱军. 电子皮带秤恒张力自动纠偏机构的设计[J]. 烟草科技, 2021, 54(5): 90-94.
- FAN A J. Design of automatic adjustment mechanism for constant tension of electronic belt weigher[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(5): 90-94.
- [10] 胡强. 连续累计自动衡器动态物料试验控制衡器的研究和应用[J]. 计量学报, 2017, 38(S1): 122-126.
- HU Q. Application and research of control scales for continuous totalizing automatic weighing instruments material testing[J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(S1): 122-126.
- [11] 颜敏, 邓如勇, 黄校春, 等. 电子皮带秤计量准确性方法研究与设计[J]. 自动化仪表, 2019, 40(1): 67-69, 73.
- YAN M, DENG R Y, HUANG X C, et al. Research and design of measurement accuracy method for electronic belt scale[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(1): 67-69, 73.
- [12] 张晓凯. 电子皮带秤的应用与使用维护分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2018(5): 33-35.
- ZHANG X K. Application and maintenance analysis of electronic belt scale[J]. Instrument Standardization & Metrology, 2018(5): 33-35.
- [13] 陈小明, 李皎, 张一帆, 等. 基于上位机的层间角联锁织机用织机开口控制系统设计[J]. 纺织学报, 2022, 43(4): 174-179.
- CHEN X M, LI J, ZHANG Y F, et al. Design of loom shedding control system for interlayer angle interlocking fabric based on use of host computer[J]. Journal of Textile Research, 2022, 43(4): 174-179.
- [14] 陈友东, 常石磊, 冯强国. 基于 CPS 方法的工业机器人系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(5): 931-938.
- CHEN Y D, CHANG S L, FENG Q G. Industrial robot system based on CPS approach[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(5): 931-938.
- (上接第 65 页)
- [24] BI X M, WANG H R, GE L Q, et al. Gold-coated nanostructured carbon tape for rapid electrochemical detection of cadmium in rice with in situ electrodeposition of bismuth in paper-based analytical devices[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 260: 475-479.
- [25] AIHAITI A, LI Z D, QIN Y N, et al. Construction of electrochemical sensors for antibiotic detection based on carbon nanocomposites[J]. Nanomaterials, 2022, 12: 2 789.
- [26] MISHRA R, NAWAZ M H, HAYAT A, et al. Electrospinning of graphene-oxide onto screen printed electrodes for heavy metal biosensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 247: 366-373.
- [27] LI Q F, JING J, LOU F M, et al. Metal sulfide quantum dots-aggregated PAMAM dendrimer for cadmium ion-selective electrode-based immunoassay of alpha-fetoprotein[J]. Science China Chemistry, 2018, 61: 750-756.
- [28] ZHANG W J, DUAN H, CHEN R, et al. Effect of different-sized gold nanoflowers on the detection performance of Immunochromatographic assay for human chorionic gonadotropin detection[J]. Talanta, 2019, 194: 604-610.
- [29] 胡元斌, 许艳霞, 王达能, 等. 超微量点一免疫荧光法快速测定粮食中黄曲霉毒素 B₁ 的方法验证[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 84-87.
- HU Y B, XU Y X, WANG D N, et al. Validation of the method for determination of aflatoxin B₁ by QD-Infinity immunofluorescence method in grain[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 84-87.
- [30] XIAO M, FU Q Q, SHEN H C, et al. A turn-on competitive immunochromatographic strips integrated with quantum dots and gold nano-stars for cadmium ion detection[J]. Talanta, 2018, 178: 644-649.
- [30] XU L, XING C, LIU L, et al. Quick, easy, cheap, effective, rugged and safe strategy for quantifying cadmium polluted rice[J]. Food and Agricultural Immunology, 2016, 27(6): 783-795.
- [31] LING S, ZHAO Q, IQBAL M N, et al. Development of immunoassay methods based on monoclonal antibody and its application in the determination of cadmium ion[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 411: 124992.
- [32] ARAI H, NAKAMURA K, YOSHIDA Y, et al. Development of quantitative immunochromatographic kit and visual screening immunoassay strip for cadmium[J]. Anal Bioanal Chem, 2016, 408(22): 6 063-6 068.