

石墨炉原子吸收法测定武汉市售大米中镉含量的研究

陈露¹, 陈季旺^{1,2*}, 刘珊珊¹, 黄迪¹, 王慧平¹, 丁文平^{1,2}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 农产品加工湖北省协同创新中心, 武汉 430023)

摘要: **目的** 研究石墨炉原子吸收光谱法测定大米中镉含量, 并对武汉市售大米中镉含量进行测定分析。**方法** 采用湿法消解对样品进行前处理, 测定大米中镉含量的检出限、重复性、回收率和精密度。**结果** 较佳消化条件为大米质量 1 g、消化剂包括 10 mL 硝酸和 2 mL 过氧化氢、时间 12 h。在该试验条件下, 石墨炉原子吸收光谱法测定大米中镉含量的检出限为 0.051 μg/kg, 加标回收率为 98.85%。大米中镉含量随产区和品种的不同差异显著, 湖南、湖北、江西等中南地区的大米镉含量较高, 吉林、黑龙江等东北地区的大米镉含量较低; 籼米的镉含量高于粳米和糯米, 糯米的镉含量高于粳米。**结论** 该方法测定大米中的镉含量准确、试验误差小, 重复性好, 可以用于大米中镉含量的测定。

关键词: 石墨炉原子吸收光谱法; 大米; 镉; 消化

Determination of cadmium content in rice from Wuhan market using graphite furnace atomic absorption spectrometry

CHEN Lu¹, CHEN Ji-Wang^{1,2*}, LIU Shan-Shan¹, HUANG Di¹, WANG Hui-Ping¹, DING Wen-Ping^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Processing of Agricultural Products, Wuhan 430023, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the method of graphite furnace atomic absorption spectrometry (GFAAS) to determine the cadmium content in rice, and its application in rice from Wuhan market. **Methods** Rice was digested by wet digestion for sample pretreatment, the detection limits, precision, repeatability, and recovery rate of GFAAS method were determined under preferred conditions. **Results** The detection limit of GFAAS method to determine the cadmium content in rice was 0.051 μg/kg and the recovery rate was 98.85% under the preferred sample pretreatment conditions, including 1 g rice, 10 mL nitric acid digestion reagent, 2 mL hydrogen peroxide, and 12 h of digestion time. The cadmium content of indica rice was higher than that of japonica rice, and the cadmium content of glutinous rice was higher than that of japonica rice. The cadmium content of rice produced in Hunan, Hubei, and Jiangxi province was higher than that in Jilin and Heilongjiang province. **Conclusion** This method to determine the cadmium content in rice is accurate and has lower test

基金项目: 武汉轻工大学重大项目培育专项(2011Z05)、武汉市国际合作项目(201231234466)、湖北省自然科学基金项目(2014CFB888)、武汉轻工大学研究生教育创新基金(2012cx012, 2013cx011)

Fund: Supported by the Major Project to Special Cultivate of Wuhan Polytechnic University (2011Z05), the International Cooperation Projects of Wuhan City (201231234466), the National Natural Science Foundation of Hubei Province (2014CFB888) and the Graduate Education Innovation Fund of Wuhan Polytechnic University (2012cx012, 2013cx011)

*通讯作者: 陈季旺, 教授, 主要研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。E-mail: jiwangchen1970@126.com

*Corresponding author: CHEN Ji-Wang, Professor, College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China. E-mail: jiwangchen1970@126.com

error and better repeatability under the preferred sample pretreatment conditions, and it can be utilized to determine the cadmium content in rice.

KEY WORDS: graphite furnace atomic absorption spectrometry; rice; cadmium; digest

1 引言

镉因具有极大毒性和致突变性被称为环境污染物,易在体内蓄积且在人体内的半衰期长达数十年,已被美国毒物管理委员会列为第6位危及人类健康的有毒物质^[1]。大米是我国人民的主食之一,以大米为主食的人口占60%以上^[2]。2007年,潘根兴等对我国六个地区县级以上市场的大米进行随机采购,分析采集的170多个大米样品,结果发现镉超标的大米占10%^[3]。近年来,有关大米镉污染的报道较多,已严重影响我国人民的生活,关乎国家粮食安全,是迫切需要解决的问题^[4]。

镉的检测方法主要有原子吸收光谱法^[5]、原子荧光法^[6]、电感耦合-等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)法^[7]、紫外分光光度法(Ultraviolet Spectrophotometry, UV法)^[8]等。日本和欧盟国家通常采用ICP-MS或原子荧光法,ICP-MS法测量准确,但操作比较复杂且仪器购买和维护成本高,原子荧光法的优点是无损检测,可直接分析成品,但检测精度和重复性不如光谱法^[9]。石墨炉原子吸收光谱(GFAAS)法具有灵敏、准确、选择性好的优点^[10],已作为镉含量测定的常用方法在日常检测中推广应用。

朱启思^[11]对稻谷中镉的石墨炉原子吸收测定方法进行优化,确定了石墨炉最佳升温程序为:干燥温度110℃,27s;灰化温度300℃,20s;原子化温度1700℃,2s;除残温度2100℃,2s。陶曙华^[12]对稻米镉测定国标方法进行改进,采用硝酸和混合酸(硝酸:高氯酸=6:1)做消解剂可以满足大米镉含量测定的要求,同时可以适当缩短样品消解时间,降低实验成本和劳动强度,提高分析测试速度。

目前,优化测定镉含量的消化方式、消化剂的选择及仪器的操作条件等已有较多报道^[11,12],测定大米中镉含量也有国标方法,但是这些方法只说明采用湿式消解法时需称取样品1.00~5.00g,加盖浸泡过夜,未给出具体的取样量及消化时间,致使分析人员采用这些方法条件测定大米中镉含量时仍需要摸

索样品预处理条件,给分析工作带来很大难度。但是研究具体的取样量、消化液添加量及消化时间能使大米样品完全消化并测定准确,因此研究较佳、合理、具体的样品前处理方式和试验条件对保障我国粮食安全具有重要意义。

本文通过单因素试验优化大米质量、消化试剂添加量和消化时间,确定较佳的大米样品预处理条件。采用该试验条件消化大米,测定大米中镉含量的检出限、重复性、回收率和精密度,并在该样品预处理条件下测定武汉市售大米中镉含量,为建立GFAAS测定大米中镉含量的方法提供试验依据。

2 材料与方法

2.1 仪器与试剂

MP-200A 电子天平(上海精密科学仪器有限公司);FW-80 微型高速粉碎机(郑州科丰仪器设备有限公司);TAS-990 原子吸收分光光度计(附石墨炉及镉空心阴极灯);DL-1 可调式电炉(北京市永光明医疗仪器厂);FW80 微型高速万能粉碎机(郑州科丰仪器设备有限公司);101-1-BS 电热恒温鼓风干燥箱(上海跃进医疗器械厂);移液枪(1 mL、10 μ L)。

大米样品:A、B、X₁(籼米)、X₂(籼米)、X₃(籼米)、X₄(籼米)、X₅(籼米)、X₆(籼米)、X₇(籼米)、X₈(籼米)、X₉(籼米)、X₁₀(籼米)、X₁₁(籼米)、X₁₂(籼米)、X₁₃(籼米)、J₁(粳米)、J₂(粳米)、J₃(粳米)、J₄(粳米)、J₅(粳米)、J₆(粳米)、J₇(粳米)、J₈(粳米)、J₉(粳米)、N₁(糯米)、N₂(糯米)、N₃(糯米),均购于武汉各大超市及多个大型农贸菜市场。

硫酸、磷酸铵溶液、盐酸、过氧化氢(优级纯,国药集团化学试剂有限公司)。

2.2 标准溶液的配制

镉标准储备液:称取1.000g金属镉(99.99%),分次加20mL盐酸(1:1)溶解,加2滴硝酸,移入1000mL容量瓶,加水至刻度,混匀,此溶液每毫升含1.0mg镉。

镉标准使用液: 每次吸取镉标准储备液 10 mL 于 100 mL 容量瓶中, 加硝酸(0.5 mol/L)至刻度。如此经多次稀释成 1、2、3、5、7、10 ng/mL 浓度的镉的标准使用液^[13]。

2.3 试验方法

2.3.1 大米中镉含量的测定

将标准储备液(1 mg/mL)用 0.5%的 HNO₃ 逐级稀释, 配成 100 ng/mL 标准使用液, 用 0.5%的 HNO₃ 逐级稀释标准使用液, 使其分别为 0、1、2、3、4、5、7、10 ng/mL 的镉标准工作液。调整仪器至其性能最佳状态。仪器的工作条件分别为波长 228.8 nm、灯电流 4 mA、狭缝 0.7 nm、氘灯扣背景、背景校正为塞曼效应, 石墨炉升温程序见表 1^[11]。

表 1 石墨炉升温程序

Table 1 The temperature rising program of graphite furnace

	温度 (°C)	升温时间 (s)	保持时间 (s)	氩气流量 (mL/min)
干燥温度	110	1	30	250
干燥温度	120	15	30	250
灰化温度	450	10	20	250
原子化温度	1800	0	3	0
清烧温度	245	1	5	250

吸取上述各标准溶液 10 μL, 注入石墨炉, 测得其吸光值, 根据吸光值与浓度的线性关系建立标准曲线方程: $Y=0.0167X+0.0131(R^2=0.992)$ 。

大米去除杂质后, 超微粉碎机粉碎, 过 80 目标筛, 备用。称取试样于锥形瓶中, 放入数粒沸石, 加入消化液, 加盖玻璃皿, 隔夜浸泡, 于电炉上消解, 直至消化液呈无色透明或略带黄色, 待消化液冷却, 用玻璃棒将其移入容量瓶中, 用蒸馏水将锥形瓶中残留液体吸入容量瓶, 定容至 25 mL, 混匀备用^[14]。同时做试剂空白。

吸取样液 10 μL 注入石墨炉, 测得其吸光值, 代入标准系列的一元线性回归方程中, 计算样液中镉含量。按如下公式计算:

$$X = \frac{(A_1 - A_2) \times V \times 1000}{m \times 1000}$$

式中: X—试样中镉含量(μg/kg);

A₁—测定试样消化液中镉含量(ng/mL);

A₂—空白液中镉含量(ng/mL);

V—试样消化液总体积(mL);

m—试样质量(g)。

2.3.2 大米样品湿法消解条件优化

(1) 大米质量对镉含量测定的影响

在消化液为 10 mL 硝酸、2 mL 过氧化氢和 2 滴硫酸, 消化时间为 9 h 的试验条件下, 分别称取大米试样 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 g 于锥形瓶中, 进行消化, 测定大米样品中镉含量。研究大米质量对 GFAAS 法测定大米样品中镉含量的影响。

(2) 消化剂添加量对镉含量测定的影响

利用上述确定的最佳大米样品质量, 分别添加不同体积的混合酸(硝酸:过氧化氢=5:1, 硝酸:过氧化氢=10:2, 硝酸:过氧化氢=12.5:2.5, 硝酸:过氧化氢=15:3, 硝酸:过氧化氢=20:4), 在消化时间为 12 h 条件下进行消化, 测定大米样品中镉含量。研究消化剂添加量对 GFAAS 法测定大米样品中镉含量的影响。

(3) 消化时间对镉含量测定的影响

利用上述确定的大米样品质量和消化剂添加量的条件下, 分别按 3、6、9、12、24 h 进行消化试验, 研究消化时间对 GFAAS 法测定大米样品中镉含量的影响。

2.3.3 检出限测定

吸取各标准溶液 10 μL 注入石墨炉, 测得其吸光值, 根据吸光值与浓度的线性关系建立方程。多次测量同一样本, 平行测定 6 次, 计算浓度值的标准差, 然后以标准差的三倍表示仪器检出限^[15]。计算公式如下:

$$D_c = 3s$$

式中: D_c—检出限;

3—置信水平为 90%时, 检出限系数;

s—浓度值的标准偏差。

2.3.4 精密度试验

根据实验优化的较佳条件, 分别测定大米样品 A、B 中的镉含量, 重复测定 6 次, 算出的相对标准偏差再平均^[16]。

2.3.5 重复性试验

准确称取 6 份平行大米样品 A, 在上述确定的最佳试验条件下进行消化, 测定其镉含量。

2.3.6 加标回收率试验

称取大米样品 A、B, 各取三份平行样, 在上述确定的较佳条件下进行消化, 一份直接消化, 另一份加入 3 ng/mL 的镉标准液 1 mL(即 3 ng 镉)进行消化,

定容后测定, 计算回收率^[17]。计算公式如下:

$$P = \frac{c_2 - c_1}{c_3} \times 100\%$$

式中: P 为加标回收率;

c_1 为试样浓度;

c_2 为加标试样浓度;

c_3 为加标量。

2.3.7 武汉市售大米镉含量测定

试验优化的较佳条件下, 测定大米样品 $X_1 \sim N_3$ 中的镉含量。应用 SPSS 17.0 软件处理样品的检测数据, 对数据进行正态分布单样本 $K-S$ 检验和方差齐性检验。

3 结果与分析

3.1 大米样品湿法消解条件优化

3.1.1 大米质量对镉含量测定的影响

大米质量对镉含量测定的影响如图 1 所示。由图 1 可以看出, 随着大米质量的增加, 样液中的镉浓度几乎呈线性增加。当大米质量在 0.75~1.25 g 时, 相应的样液中镉浓度在 3~6 ng/mL 之间, 正好对应标准曲线横坐标的中间位置。

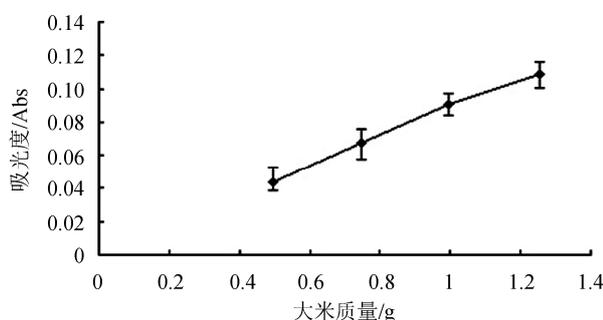


图 1 大米质量对镉含量测定的影响

Fig. 1 Effects of rice amount on determination of cadmium content

由试验数据可知大米质量增加, 相应样液中的镉含量也增大, 因此 1 g 优于 0.75 g。1 g 大米经消化所得样液中镉含量为 4.4 ng/mL 左右, 已位于标准曲线横坐标的中间位置, 测定镉含量更加准确, 因此选择大米质量为 1 g。

3.1.2 消化试剂添加量对镉含量的影响

消化试剂添加量对镉含量的影响如图 2 所示。由图 2 可以看出, 样液中镉浓度随着消化试剂量的增加而增大, 当消化剂为 10 mL 硝酸和 2 mL 过氧化氢时,

样液中的镉浓度达到最大值并趋于稳定, 表明消化剂的添加量对镉含量的测定有很大影响。消化剂添加量较少时样品消化不完全, 镉含量的测定值不准确; 添加量较多时硝酸不易挥发完全, 增加了试验时间。因此, 确定 10 mL 硝酸、2 mL 过氧化氢和 2 滴硫酸为消化剂的较佳添加量。

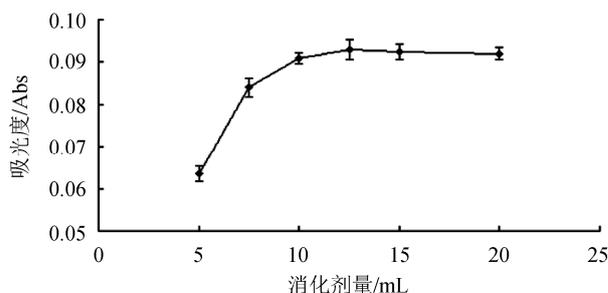


图 2 消化剂添加量对镉含量测定的影响

Fig. 2 Effect of digestive agent amount on the determination of cadmium content

3.1.3 消化时间对镉含量测定的影响

消化时间对镉含量的影响如图 3 所示。由图 3 可以看出, 样液中镉浓度随着消化时间的增加而增大, 当消化时间达到 12 h 时, 样液中的镉浓度达到最大值并趋于稳定, 表明消化时间对镉含量的测定有很大影响。消化时间过短时样品消化不完全, 镉含量的测定值不准确; 消化时间过长时, 增加了试验时间。因此, 确定 12 h 为较佳消化时间。

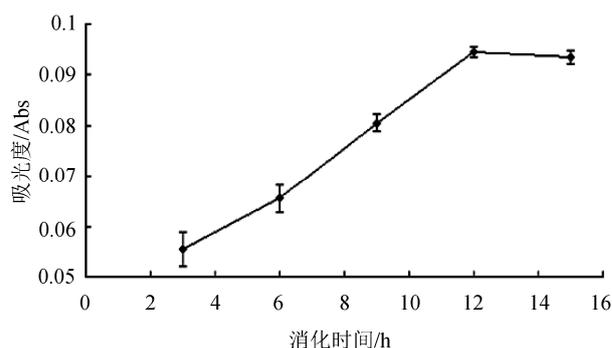


图 3 消化时间对镉含量测定的影响

Fig. 3 Effect of digestion time on the determination of cadmium content

3.2 检出限测定

样品溶液吸光度测定结果见表 2。浓度值标准差 $S=0.0415$, 则检出限 $Dc=3s$ 为 $0.1247 \mu\text{g/L}$ 。

表2 石墨炉原子吸收法的检出限 ($n=6$)
Table 2 Detection limit of GFAAS method ($n=6$)

次数	吸光度 A	浓度 ($\mu\text{g/L}$)
1	0.107	5.440
2	0.108	5.501
3	0.106	5.389
4	0.106	5.389
5	0.107	5.440
6	0.107	5.440

3.3 精密度试验

大米样品 A、B 中镉含量的精密度测定结果见表 3。由表 3 可知, A 和 B 样品的相对标准偏差(RSD)分别为 1.090%和 0.471%, RSD 均小于 5%, 因此该方法具有良好精密度。

表3 石墨炉原子吸收法的精密度 ($n=6$)
Table 3 Precision of GFAAS method ($n=6$)

次数	A	B
	Cd 浓度 (ng/mL)	Cd 浓度 (ng/mL)
1	2.224	4.999
2	2.310	4.999
3	2.076	5.077
4	1.992	5.085
5	2.433	5.208
6	2.212	5.236
\bar{X} (平均值)	2.208	5.101
SD(标准差)	0.024	0.024
RSD(相对标准偏差, %)	1.090	0.471

3.4 重复性试验

大米中镉含量测定的重复性试验结果与数据处理见表 4。由表 4 可知, 相对误差为 0.102, 相对标准偏差为 0.018, 未超过 0.02, 表明误差相对较小, 测定结果重复性好。

3.5 加标回收率试验

加标样品回收率试验结果见表 5, 由表 5 可知, 该样品的平均加标回收率为 98.85%, 表明此方法的准确性良好, 试验结果准确可靠。

表4 石墨炉原子吸收法重复性 ($n=6$)
Table 4 Repeatability test of GFAAS method ($n=6$)

大米质量 (g)	吸光值	样液浓度 (ng/mL)	相对误差	相对标准偏差
0.000	0.021	0.178		
1.010	0.098	5.509		
1.012	0.099	5.578		
1.038	0.097	5.447	0.102	0.018
0.993	0.098	5.509		
0.995	0.096	5.371		
0.992	0.095	5.301		

表5 石墨炉原子吸收法的回收率 ($n=2$)
Table 5 Recovery rate of GFAAS method ($n=2$)

样品	加标前 (ng/mL)	加标量 (ng)	加标后 (ng/mL)	平均回收率(%)
空白	0.522	3.000	3.403	96.031
A	2.002	3.000	5.101	103.302
B	2.015	3.000	4.934	97.233

3.6 武汉市售大米镉含量研究

采集武汉当地市售常用大米样品 31 个, 采用 GFAAS 法测定其镉含量, 测定结果见表 6。单样本 $K-S$ 检验分析大米中镉含量得: $P>0.05$, 即数据呈正态分布, 其镉含量范围为 0.4~221.5 $\mu\text{g/kg}$, 其中有 3 个样品超过国家标准限量(200 $\mu\text{g/kg}$), 即不合格率为 9.67%, 说明武汉市售大米存在一定程度的镉超标。稻米中含有的重金属元素主要来自于土壤中的自然本底, 加大环境综合治理力度, 解决工业有害物质、城市垃圾对农田、海域、河流的污染, 从根本上解决重金属镉对农产品的污染非常必要。

从品种上分, 粳米的镉含量范围为 0.4~220.4 $\mu\text{g/kg}$, 平均值为 50.8 $\mu\text{g/kg}$, 籼米的镉含量范围为 10.9~221.5 $\mu\text{g/kg}$, 平均值为 118.6 $\mu\text{g/kg}$, 糯米的镉含量范围为 22.6~212.1 $\mu\text{g/kg}$, 平均值为 107.3 $\mu\text{g/kg}$, 根据现有大米样品分析结果得出, 籼米的镉含量高于粳米和糯米, 糯米的镉含量高于粳米。

从加工程度上分, 糙米的镉含量范围为 123.4~221.5 $\mu\text{g/kg}$, 平均值为 184.2 $\mu\text{g/kg}$, 精米的镉含量范围为 0.4~183.4 $\mu\text{g/kg}$, 平均值为 68.8 $\mu\text{g/kg}$, 且糙米和精米的镉含量差异非常显著($P<0.01$); 由此

表 6 不同品种、加工程度、产地大米中镉含量 ($n=3$)
Table 6 The rice cadmium content of different varieties, origin and processing stage ($n=3$)

	精米	镉含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)		糙米	镉含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)		
籼米	湖北	X_1	104±2.17	湖北	X_1	183.3±4.23	
		X_2	152±4.38		X_2	221.5±3.56	
		X_3	66±2.03		X_3	140.7±2.09	
		X_4	153±1.25		X_{13}	211±3.28	
		X_5	101.3±0.93				
		X_6	74.4±0.67				
	湖南	X_7	167±1.14				
		X_8	156±2.88				
		江西	X_9	157±2.62			
			安徽	X_{10}	58±0.54		
				X_{11}	32.8±0.42		
			泰国	X_{12}	10.9±0.09		
粳米	黑龙江	J_1	189±1.12	湖北	J_1	220.4±2.55	
		J_2	14±0.17				
		J_3	9±0.08				
		J_4	5±0.05	安徽	J_9	80±0.94	
		J_5	4±0.06				
		J_6	3±0.04				
		J_7	3±0.02				
			J_8	0.4±0.006			
糯米	湖北	N_1	69.9±0.67	湖北	N_1	123.4±1.82	
		N_2	108.5±2.13		N_2	212.1±2.69	
		安徽	N_3	22.5±0.75			

可知, 糙米的镉含量明显高于精米, 其中 42.9%(3/7) 的糙米镉超标, 未超标的糙米镉含量也接近限值, 因此直接食用糙米在很大程度上会增加人体的镉暴露风险。

从产地来看, 湖北产区的大米镉含量范围为 65.7~221.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均值为 143.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 黑龙江产区的大米镉含量范围为 0.4~15.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均值为 6.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 安徽产区的大米镉含量范围为 22.6~61.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 平均值为 46.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。另外, 所收集的样品中镉含量较高的还有湖南、江西产区的大米, 其镉含量分别为 148.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 114.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 杭州和泰国产区的大米镉含量都偏低, 分别为 10.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 32.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。由以上数据可知, 黑龙江产区的大米受镉污染小, 湖北、湖南、江西产区的大米有一定程度的污染, 安徽、杭州等产区的大米镉污染水平较低。采用 SPSS 17.0 软件对其进行方差分析, 发现大米中镉含量随产区不同, 镉含量差异非常显著 ($P<0.01$), 这可能跟

种植环境、水分、矿脉、土壤、农药使用、化学残留等情况有关。徐丹先^[18]等对昆明市售大米的镉含量的调查分析, 也得到了类似的结论。

4 结 论

(1)GFAAS 法测定大米镉含量的较优样品预处理条件为大米质量 1 g, 消化试剂为 10 mL 硝酸、2 mL 过氧化氢和 2 滴硫酸, 消化时间 12 h。

(2)在上述条件下采用 GFAAS 法测定大米中的镉含量, 测定结果具有良好的线性关系, 检出限为 0.051 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 精密度和重复性良好, 加标回收率为 98.85%, 试验结果准确可靠。

(3)在上述条件下采用 GFAAS 测定武汉市售大米中镉含量平均值为 94.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 其中 9.67%大米中镉含量超标。大米品种、产地和加工精度影响其镉含量。籼米的镉含量高于粳米和糯米, 糯米的镉含量高于粳米; 糙米的镉含量明显高于精米; 黑龙江产区

的大米受镉污染较少,湖北、湖南、江西产区的大米有一定程度的污染,安徽、杭州等产区的大米镉污染水平较低。

参考文献

- [1] Zhang ZW, Shinichiro Shimbo, Noriko Ochi, *et al.* Determination of lead and cadmium in food and blood by inductively coupled plasma mass spectrometry: a comparison with graphite atomic absorption spectrometry [J]. *Sci Total Environ*, 1997, 5: 179–187.
- [2] Shahryar Abbasi, Kobra Khodarahmiyan, Freshteh Abbasi. Simultaneous determination of ultra trace amounts of lead and cadmium in food samples by adsorptive stripping voltammetry [J]. *Food Chem*, 2011, 128: 254–257.
- [3] Shahryar Abbasi, Atousa Bahiraei, Freshteh Abbasai. A highly sensitive method for simultaneous determination of ultra trace levels of copper and cadmium in food and water samples with luminol as a chelating agent by adsorptive stripping voltammetry [J]. *Food Chem*, 2011, 129: 1274–1280.
- [4] Dianne R, William J. Heavy metal poisoning and its laboratory investigation [J]. *Ann Clin Biochem*, 1999, 36: 267–300.
- [5] Li YJ, Hu B. Cloud point extraction with /without chelating agent on-line coupled with inductively coupled plasma optical emission spectrometry for the determination of trace rare earth elements in biological samples [J]. *J Hazard Mater*, 2001, 174: 534–540.
- [6] Aranda PR, Gil RA, Moyano S, *et al.* Cloud point extraction for ultra-trace Cd determination in microwave-digested biological samples by ETAAS [J]. *Talanta*, 2008, 77(2): 663–666.
- [7] Cheng FM, Zhao NC, Xu HM, *et al.* Cadmium and lead contamination in japonica rice grains and its variation among the different locations in southeast China [J]. *Sci Total Environ*, 2006, 359: 156–166.
- [8] Ensafi A, Khayamian T, Benvidi A, *et al.* Simultaneous determination of copper, lead and cadmium by cathodic adsorptive stripping voltammetry using artificial neural network [J]. *Anal Chim Acta*, 2006, 561: 225–232.
- [9] Karavoltos S, Sakellari A, Dassenakis M, *et al.* Cadmium and lead in organically produced foodstuffs from the Greek market [J]. *Food Chem*, 2008, 106: 843–851.
- [10] 吴怡, 曹旭, 郭亚飞, 等. 重金属镉的分析方法研究进展[J]. *广东微量元素科学*, 2010, 17(10): 1–7.
Wu Y, Cao X, Guo YF, *et al.* Progresses on analytical techniques for Cd determination [J]. *Guangdong Trace Elem Sci*, 2010, 17(10): 1–7.
- [11] 朱启思, 江华邦, 钟国才, 等. 稻谷中镉的石墨炉原子吸收测定方法优化及其分布[J]. *河南工业大学学报*, 2011, 32(6): 76–79.
Zhu QS, Jiang HB, Zhong GC, *et al.* Optimization on determination of cadmium in paddy by graphite furnace atomic absorption spectrometry and distribution of cadmium in paddy [J]. *J Henan Univ Technol*, 2011, 32(6): 76–79.
- [12] 陶曙华. 稻米镉测定国标方法的改进[J]. *中国稻米*, 2007,(3),22–25.
Tao SH. Improved method for the determination of cadmium in rice [J]. *China Rice*, 2007, (3): 22–25.
- [13] GB 2715-2005 粮食卫生标准[S].
GB 2715-2005 Hygienic standard for grains [S].
- [14] 袁秀金, 黄宏志, 罗勇, 等. 湿式消解法石墨炉原子吸收光谱法测定大米中镉含量[J]. *广东农业科学*, 2010, 37(8): 240–243.
Yuan SJ, Huang HZ, Luo Y, *et al.* Determination of cadmium in rice by wet digestion graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2010, 37(8): 240–243.
- [15] 卢明波. 浅析原子吸收仪和原子荧光仪仪器检出限的测定方法[J]. *中国保健营养*, 2013, 12: 7369.
Lu MB. The detection method for the determination of limit analysis of atomic absorption spectrometer and atomic fluorescence instrument [J]. *China Health Nutr*, 2013, 12: 7369.
- [16] Järup L, Akesson A. Current status of cadmium as an environmental health problem [J]. *Toxicol Appl Pharm*, 2009, 238(3): 201–208.
- [17] 温圣平, 向国强, 王瑞丽, 等. 浊点萃取-火焰原子吸收光谱法测定大米样品中的痕量镉[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(2): 66–70.
Wen SP, Xiang GQ, Wang RL, *et al.* Determination of trace cadmium in rice samples by cloud point extraction and flame atomic absorption spectrometry [J]. *J Henan Univ Technol (Nat Sci Edit)*, 2010, 31(2): 66–70.
- [18] 徐丹先, 金莉, 孙灿. 昆明市售大米中镉含量调查分析[J]. *中国卫生检验杂志*, 2012, (5): 1145–1146.
Xu DX, Jin L, Sun C. Survey and analysis of cadmium content in commercial rice in Kunming [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2012, (5): 1145–1146.

(责任编辑: 李振飞)

作者简介



陈露, 在读硕士研究生, 主要研究方向是粮食、油脂及植物蛋白工程。
E-mail: loiscl@126.com



陈季旺, 教授, 主要研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。
E-mail: jiwangchen1970@126.com