

稀酸微波消解-氢化物发生原子荧光光谱法测定蔬菜中总汞

张晓荣¹ 傅志丰^{2,3*}

(1. 永修县检验检测中心, 江西九江 330300; 2. 江西省科学院应用化学研究所, 南昌 330096;
3. 九江市检验检测认证中心 食品分中心, 江西九江 332000)

摘要 为践行食品检测工作“环保”的理念,以菠菜粉质控样品为研究对象,通过考察硝酸浓度、微波消解温度、赶酸条件以及其他检测条件对总汞测定的影响,建立稀酸微波消解-氢化物发生原子荧光光谱法测定蔬菜中总汞的方法,并对方法进行评价,对九江市售蔬菜中汞含量进行测定。结果表明,最佳消解液组成为5 mL 硝酸(20%) + 1.0 mL 过氧化氢、微波消解最高温度为160 °C、载流为HNO₃(5%)、负高压280 V、KBH₄浓度0.5%。新建的方法检出限为0.000 1 mg/kg,汞在0~2.0 µg/L线性关系良好,加标回收率为92.0%~106%,相对标准偏差RSD为2.5%~5.5%。方法操作简便,大幅度减少了前处理过程硝酸使用量,无需赶酸,精密度、重现性好,灵敏度、准确度高,推广应用前景广阔。

关键词 稀酸微波消解;蔬菜;总汞;氢化物发生原子荧光光谱法

中图分类号:O657.31 文献标志码:A 文章编号:2095-1035(2024)11-1485-07

Determination of Total Mercury in Vegetables by Hydride Generation Atomic Fluorescence Spectrometry with Diluted Nitric Acid-Microwave-assisted Digestion

ZHANG Xiaorong¹, FU Zhifeng^{2,3*}

(1. Testing and Certification Center of Yongxiu County, Jiujiang, Jiangxi 330300, China;
2. Institute of Applied Chemistry, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang, Jiangxi 330096, China;
3. Food Inspection Sub Center of Jiujiang Inspection, Testing and Certification Center, Jiujiang, Jiangxi 332000, China)

Abstract For practicing the concept of “greening” in the food inspection, a microwave-assisted digestion method using diluted nitric acid-hydride generation atomic fluorescence spectrometry was established to determine total mercury content in vegetables. The effects of nitric acid concentration, microwave digesting temperature, acid-driving and other conditions on the determination of total mercury were investigated. A method for determining total mercury in vegetables using dilute acid microwave digestion hydride

收稿日期:2024-01-18 修回日期:2024-04-26

基金项目:江西省市场监督管理局科技项目(GSJK202212);九江市指导性科技计划项目(S2023ZDYFN800)

作者简介:张晓荣,女,工程师,主要从事食品安全检测技术研究。E-mail:753699202@qq.com

* 通信作者:傅志丰,男,工程师,主要从事食品安全检测技术及天然产物化学研究。E-mail:dsqhlh112@163.com

引用格式:张晓荣,傅志丰. 稀酸微波消解-氢化物发生原子荧光光谱法测定蔬菜中总汞[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(11):1485-1491.

ZHANG Xiaorong, FU Zhifeng. Determination of Total Mercury in Vegetables by Hydride Generation Atomic Fluorescence Spectrometry with Diluted Nitric Acid-Microwave-assisted Digestion [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(11):1485-1491.

generation atomic fluorescence spectrometry, and evaluate the method to determine the mercury content in vegetables sold in Jiujiang city. Results showed that the optimal composition of the digestion solution consist was 5 mL of 20% nitric acid and 1.0 mL of hydrogen peroxide, the maximum microwave digestion temperature was 160 °C, the carrier current was 5% HNO₃, the negative high voltage was 280 V, and the KBH₄ concentration was 0.5%. The detection limit of the newly established method was 0.000 1 mg/kg, the linear range of mercury was good at 0—2.0 µg/L, the recovery ranged from 92.0% to 106%, and the relative standard deviation (RSD) was from 2.5% to 5.5%. The method is easy to operate, reduces the amount of nitric acid used in the pre-treatment steps significantly, free of acid driving, good precision and reproducibility, high sensitivity and accuracy, and has broad prospects for promotion and application.

Keywords microwave-assisted digestion using diluted nitric acid; vegetables; total mercury; hydride generation atomic fluorescence spectrometry

蔬菜因富含维生素、膳食纤维和矿物质等多种营养物质,成为我国以及部分发展中国家人们饮食的重要组成部分。汞是一种具有较强毒性的元素,非常容易在环境和生物体中积累^[1]。人体过量接触汞容易引发脑肾损害、不孕不育等危害^[2]。近年来由于工业三废及含汞农药和化肥的滥用,汞被释放到土壤、水和空气中,使蔬菜受到污染。如 XIONG 等^[3]调查了我国 8 个莲藕主产区的重金属污染情况,发现有 1 个地区的 Hg²⁺ 超标。因此,加强对蔬菜中汞的检测,减少其通过食物链进入人体,对保障人们的身体健康安全具有重要意义。

目前,基层实验室通常采用直接测汞仪法^[4]、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)^[5]及氢化物发生原子荧光光谱法(HG-AFS)^[6]等对食品中总汞进行测定。其中直接测汞仪法样品称量小,对操作者要求高;ICP-MS 价格昂贵,无法全面推广。HG-AFS 由于具有谱线简单、灵敏度和精确度高、干扰少及成本低等特点^[7],应用广泛,成为国标 GB/T 5009.17—2021《食品中总汞及有机汞的测定》中第一篇第一法。在总汞测定时,通常需借助浓硝酸将样品消解成溶液。但该法将产生较多的废酸与废气。近年来,人们环保理念不断增强,在此背景下,采用稀酸微波消解法逐渐成为一种趋势。该方法大幅度降低了浓硝酸使用量,现已被成功应用于大米^[7]、牛奶^[8]、红糖^[9]等多种类型食品中不同元素的测定,但至今未见采用稀酸微波消解结合 HG-AFS 测定蔬菜中总汞的研究。故本文以菠菜粉质控样品(Quality control sample, QCM)为研究对象,通过优化前处理条件结合 HG-AFS,建立稀酸微波消解法测定蔬菜中总汞,然后应用此方法对市售 100 批蔬菜测定,为九江市蔬菜汞污染控制提供参考。

1 实验部分

1.1 仪器及试剂

AFS-3100 型双道原子荧光光度计(北京海光仪器有限公司);CEM MARS-XPRESS 微波消解仪(美国安培公司);原子荧光光谱专用汞空心阴极灯(北京有色金属研究总院)。

新鲜蔬菜,从江西省九江市各大商超、农贸市场采集;菠菜粉质控样品[(0.567±0.081) mg/kg,广州谱恩科学仪器有限公司];汞标准溶液(质量浓度 1 000 µg/mL,中国计量科学研究院);30%过氧化氢(CMOS 级)、浓硝酸(UP-S 级),均购自国药集团化学试剂有限公司;KBH₄(分析纯,天津南开允公合成技术有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

取蔬菜搅碎混匀,然后准确称取 2.0 g(精确至 0.001 g)置于消解罐中,加入 5 mL 硝酸(20%,V/V,下同)以及 1.0 mL 过氧化氢溶液进行微波消解,消解程序为:0~6 min,从室温升到 120 °C,保持 3 min;9~15 min,从 120 °C 升到 150 °C,保持 8 min;23~31 min,从 150 °C 升到 160 °C,保持 20 min。结束后将消解液转移至 10 mL 容量瓶中,用超纯水定容。

1.2.2 标准溶液的配制

吸取汞标准溶液 0.1 mL 于 100 mL 容量瓶中,加入 10%硝酸至刻度得到标准储备液(1 000 µg/L)。再吸取此标准储备液 0.1 mL 于 50 mL 容量瓶中,加入 10%硝酸至刻度即为标准使用溶液(2.0 µg/L),备用。

1.2.3 AFS 工作条件

负高压 280 V、灯电流 30 mA、载气流量 300 mL/min、屏蔽气流量 1 000 mL/min、原子化器温度 200 °C、原子化高度 8 mm、5% HNO₃ 载流、

0.5% KBH_4 + 0.5% NaOH 还原剂、读数时间 16 s、延迟时间 1 s。

1.3 数据处理

每个样品重复测量 3 次,总汞含量结果表示为 $\bar{X} \pm SD$,采用 SPSS 19.0 对数据分析处理,运用 Origin 9.0 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 硝酸浓度的选择

以菠菜粉质控样品为测试对象,固定称样量 0.2 g(精确至 0.000 1 g,约折合新鲜菠菜 2 g),加入 5 mL 硝酸、1.0 mL 过氧化氢,微波消解最高温度为 160 $^{\circ}\text{C}$,比较以不同硝酸浓度(0、2.5%、5%、10%、20%、50%、80%和 100%)为消解液时,总汞测定结果的区别,如图 1 所示:当浓度为 0~2.5%时,菠菜粉质控样品未检出总汞;当浓度为 2.5%~20%时,随着硝酸浓度的增加,总汞逐渐增加至质控样品标示值;继续增加硝酸浓度,总汞测定值不再增加($P > 0.05$)。这可能是由于硝酸浓度较低时,消解液氧化能力不足以将菠菜粉质控样品消解完全,其中汞元素无法完全释放出;而当硝酸浓度超过 20%后,样品中的汞元素已经完全溶出^[7]。因此采用 20%硝酸作为消解溶液。

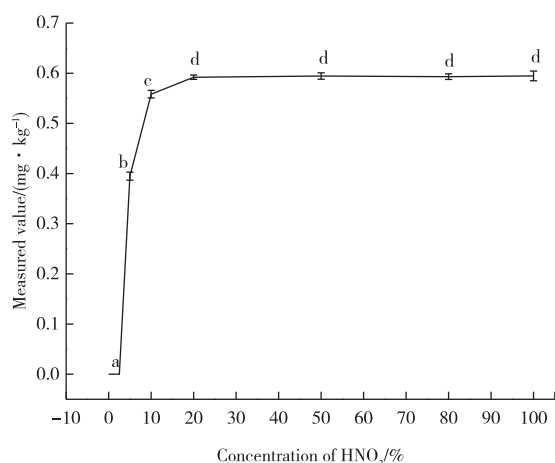


图 1 硝酸浓度对质控样品汞测定值的影响

Figure 1 Effects of nitric acid concentration on Hg measured value of QCM.

Note: Different lowercase letters (a, b, c, etc.) indicate significant differences among samples ($P < 0.05$), the same below.

2.2 微波消解温度的选择

GB 5009.17—2021 规定食品中汞测定微波消解的最高温度为 190 $^{\circ}\text{C}$,但由于蔬菜基质较简单,最适消解温度可能有所差异,因此固定称样量 0.2 g

(精确至 0.000 1 g),20%硝酸添加体积 5 mL,过氧化氢添加体积 1.0 mL,分别设定微波消解最高温度 150、160、170、180 和 190 $^{\circ}\text{C}$,考察菠菜粉质控样品汞测定值的变化。如图 2 所示,在 150~190 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,汞测定值呈先增大后趋于平稳的变化趋势,其中 150 $^{\circ}\text{C}$ 下汞的测定值显著低于 160~190 $^{\circ}\text{C}$ ($P < 0.05$),但 160、170、180、190 $^{\circ}\text{C}$ 结果间无显著性差异($P > 0.05$),这可能是由于样品在 150 $^{\circ}\text{C}$ 时消解不完全,菠菜粉质控样品中汞无法完全溶出,但随着温度的提高,样品已经消解彻底,因此,从节约能源和安全性的角度下,选择 160 $^{\circ}\text{C}$ 进行消解。

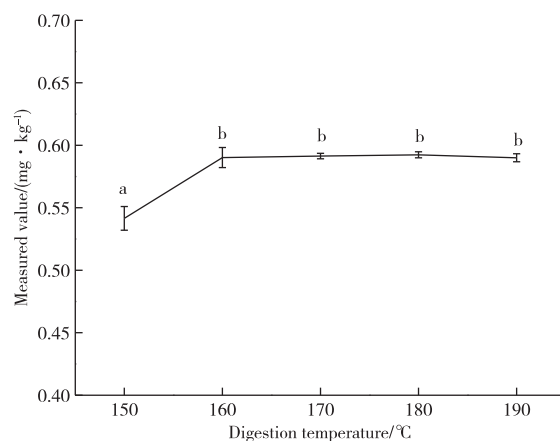


图 2 最高消解温度对质控样品汞测定值的影响

Figure 2 Effects of the highest digestion temperature on Hg measured value of QCM.

2.3 赶酸条件的选择

GB 5009.17—2021 规定测汞时消解液应进行赶酸处理。由于采用稀硝酸消解,实验时发现几乎不产生棕色气体,故比较了经稀酸微波消解的菠菜粉质控样品,在赶酸与不赶酸两种条件下结果的区别,如表 1 所示,80 $^{\circ}\text{C}$ 赶酸(0.1、0.5 h)与不赶酸(0 h)的测定结果间无显著性差异($P > 0.05$),因此在后续实验中选择不赶酸。

2.4 标准溶液酸度的选择

GB 5009.17—2021 使用 10% HNO_3 配制系列标准溶液,但样品前处理采用 5~8 mL 硝酸消解,然后赶酸、定容至 25 mL,此过程样品溶液酸度与标准溶液不一致。由于无机元素准确分析的一个重要原则就是样品溶液酸度与标准溶液保持一致^[10]。因此分别用 2%、4%、5%、10%、20%、30% 的 HNO_3 和盐酸溶液配制 2.0 $\mu\text{g/L}$ 的汞标准溶液,探究试剂种类和酸度对测定荧光值的影响。如图 3 所示:采用硝酸配制溶液时,在 2%~10% 时,样品溶液荧光值

逐渐升高,再继续增加硝酸浓度荧光值不继续增加;而采用盐酸溶液配制时,虽浓度在 2%~5%,样品荧光值逐渐增大,但继续增加盐酸浓度时,荧光值大小呈波动变化。因此为保证检测结果的准确性与稳定性,采用 10%硝酸配制标准溶液,与国家标准保持一致。

表 1 赶酸条件对汞测定的影响
Table 1 Effect of acid driving conditions on Hg detection

Sample	Total mercury content/(mg · kg ⁻¹)		
	Acid driving for 0 h	Acid driving for 0.1 h	Acid driving for 0.5 h
QCM of spinach	0.572±0.010	0.571±0.01	0.573±0.012

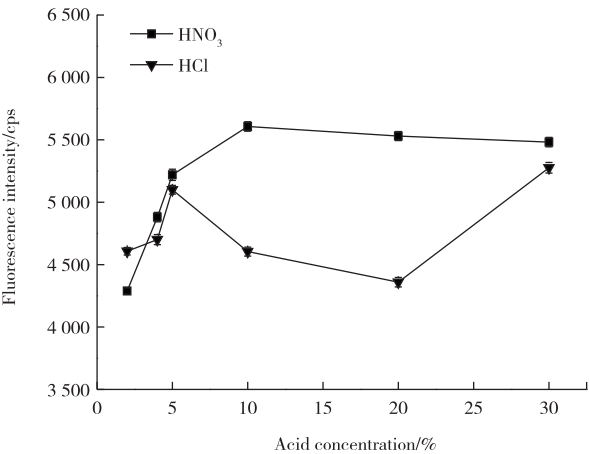


图 3 标准溶液酸浓度及种类对汞测定的影响
Figure 3 Effects of acid concentration and type of standard solution on Hg detection.

2.5 载流酸度的选择

为降低干扰,选择硝酸溶液作为载流,并比较了不同浓度硝酸作为载流对 2.0 μg/L 的汞标准溶液(10%硝酸配制)荧光值的影响。如图 4 所示,当硝酸浓度在 5%~25%时,汞标准溶液荧光值间无显著性差异($P>0.05$),与陈曦等^[11]的报道一致,由于硝酸浓度过高会腐蚀原子荧光光谱仪管路接线,且所耗试剂增多,因此选择载流为 5%硝酸。

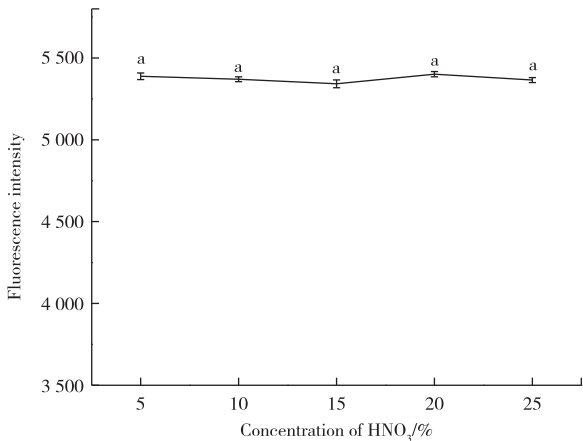


图 4 载流溶液酸度对汞测定的影响
Figure 4 Effects of the carrier solution acidity on Hg detection.

2.6 负高压的选择

图 5 为负高压对汞标准溶液(1.0 μg/L)荧光响应值的影响,结果显示在 240~320 V,汞的荧光值随负高压的增加而增加,但同时标准空白的荧光值也增加,在综合考虑检测方法灵敏度、空白背景值、信噪比等指标,选择负高压为 280 V。

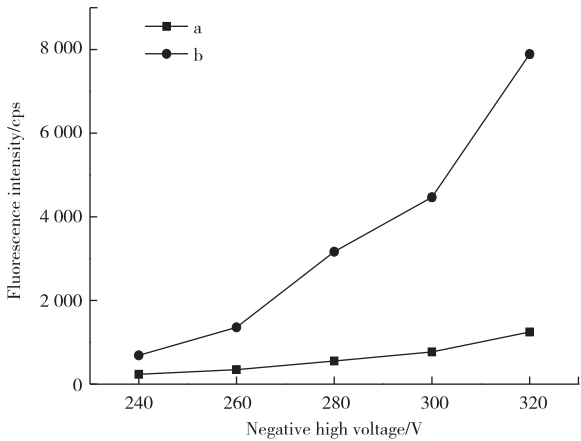


图 5 负高压对汞测定的影响
(a:空白溶液;b:汞标准溶液)
Figure 5 Effects of negative high voltage on Hg detection (a:blank solution;b:mercury standard solution).

2.7 KBH₄ 浓度

如图 6 所示,KBH₄ 浓度对总汞测定具有显著影响。在 0.1%~0.5%内,随着 KBH₄ 浓度的增加,样品(2.0 μg/L 汞标准溶液)的荧光值逐渐升高,到 0.5%达到最大值,继续增加浓度荧光值反而降低。KBH₄在低浓度下汞荧光值较高,继续增加 KBH₄ 浓度,荧光值反而降低,这是因为 AFS 测定汞时不生成氢化物,当 KBH₄ 浓度过高时过量氢气稀释了汞蒸气使荧光值降低^[11]。因此选择 0.5%的 KBH₄ 进行后续实验。

2.8 方法学验证

2.8.1 标准曲线

配制 0.2、0.8、1.2、1.6 和 2.0 μg/L 的系列标准溶液。然后以汞浓度为横坐标,荧光值为纵坐标进行线性拟合,得到回归方程为: $y = 2570.021x -$

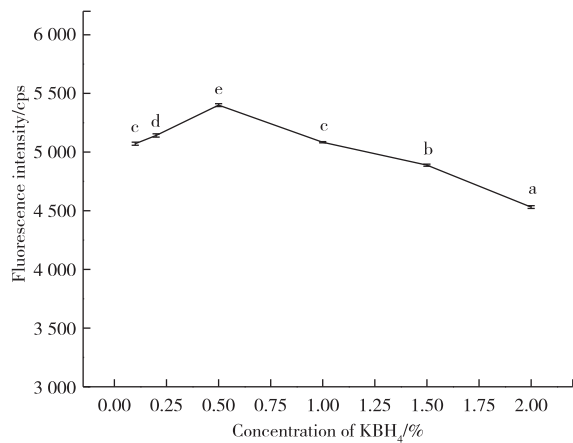


图 6 KBH_4 浓度对汞测定的影响

Figure 6 Influence of KBH_4 concentration on Hg detection.

23.496。汞在 0~2.0 $\mu\text{g/L}$ 线性关系良好,决定系数 R^2 为 0.999 7,符合实验要求。

2.8.2 检出限

按照实验方法制备 11 份空白样品,然后测定,得到的 3 倍标准偏差/标准曲线斜率,乘以稀释系数,再通过折算蔬菜称样量(2.0 g)和定容体积(10 mL)计算检出限为 0.000 1 mg/kg,灵敏度优于 GB 5009.17—2021 第一篇第一法(0.003 mg/kg)以及李霞等^[12]

(0.001 mg/kg),稀酸微波消解法灵敏度高的原因一方面可能是较少的硝酸用量使空白值降低^[7],另一方面,较高的取样量与较低的定容体积也可能是灵敏度提高的重要因素。

2.8.3 精密度、重现性

采用实验方法制备一份菠菜粉质控样品溶液,连续测定 6 次,测定值分别为 1.16、1.18、1.13、1.12、1.14 及 1.12 $\mu\text{g/L}$,RSD 为 1.9%。另外取同一菠菜粉质控样品 6 份,按照实验方法消解、测定,得到总汞分别为 0.57、0.58、0.60、0.54、0.58 及 0.55 mg/kg,平均值为 0.57 mg/kg,RSD 为 3.4%,以上表明该方法精密度及重现性均良好。

2.8.4 准确性

为了验证方法的准确性,选取 6 种蔬菜,向其中加入 3 个水平的标准溶液进行加标回收实验。如表 2 所示,建立的方法加标回收率为 92.0%~106%,RSD 为 2.5%~5.5%。同时比较了该法与 GB 5009.17—2021 第一篇第一法对不同样品测定结果的区别,如表 3 所示,2 种方法对菠菜粉质控样品及 3 批蔬菜的测定结果间均无显著性差异(t 检验, $P>0.05$),以上表明本研究方法结果可靠。

表 2 蔬菜总汞测定的加标回收实验结果

Table 2 The recoveries of Hg determined by vegetables piked with standard solution

Vegetable types	Background value/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Spike added/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Measured results/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Recoveries/%	RSD/%
Turnip	<LOD	2.00	1.92	96.0	4.2
	<LOD	4.00	3.87	96.8	
	<LOD	6.00	6.21	104	
Tomato	5.3	2.00	7.14	92.0	5.5
	5.3	4.00	9.41	103	
	5.3	6.00	11.24	99.0	
Spinach	4.1	2.00	6.11	101	2.5
	4.1	4.00	7.95	96.3	
	4.1	6.00	10.14	101	
Chinese cabbage	3.4	2.00	5.46	103	3.9
	3.4	4.00	7.62	106	
	3.4	6.00	9.28	98.0	
Eggplant	6.2	4.00	10.31	103	3.2
	6.2	6.00	12.56	106	
	6.2	8.00	14.17	99.6	
Auricularia auricula	16.1	10.00	26.70	106	3.8
	16.1	20.00	35.84	98.7	
	16.1	30.00	46.27	101	

表 3 两种测定方法结果比较

Table 3 Comparison of results between two methods

Sample	Methods/(mg · kg ⁻¹)	
	HG-AFS	Method 1,chapter 1 of GB 5009.17—2021
QCM of spinach	0.569±0.006	0.571±0.007
Vegetable 1	<LOD	<LOD
Vegetable 2	0.004 2±0.001	0.004 1±0.002
Vegetable 3	0.005 1±0.001	0.005 2±0.001

2.9 实际样品测定

应用稀酸微波消解-HG-AFS法对九江市售约100批各类蔬菜中总汞含量进行测定。如图7所示,蔬菜中总汞平均含量的变化为0.001 0~0.015 2 mg/kg。不同蔬菜总汞含量有所不同,在测试的蔬菜中,木耳平均含量最高(0.015 2 mg/kg),其次为茄子(0.006 0 mg/kg),所有样品汞含量均低于GB 2762—2017标准对其的相关要求(新鲜蔬菜≤0.01 mg/kg,食用菌≤0.1 mg/kg),这表明九江市人们日常食用的蔬菜汞含量处于较安全范围。研究结果与ZHANG等^[13]报道的蔬菜中汞含量接近,但高于李霞雪等^[5]的研究结果。不同蔬菜总汞含量差异的原因一方面可能是不同蔬菜对汞富集能力不同,另一方面,蔬菜所处大气的汞含量差异也是一个重要因素^[14]。

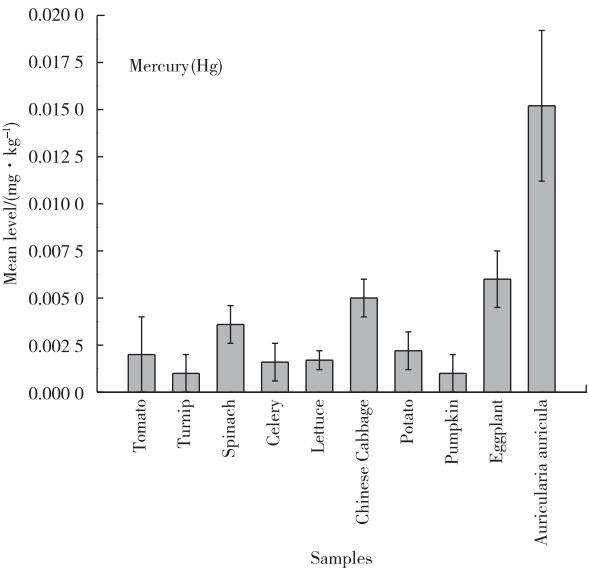


图 7 九江市售蔬菜中总汞含量

Figure 7 The concentration of Hg in vegetables sold in Jiujiang city.

3 结论

通过优化得到稀酸微波消解-HG-AFS测定蔬菜总汞的条件为20%硝酸添加5 mL,过氧化氢添加1 mL,微波消解最高温度为160℃,消解结束后

不赶酸,载流5% HNO₃、负高压280 V、KBH₄浓度0.5%。该方法使消解所需硝酸量大幅度减少(降低80%),同时无需赶酸,方法操作简单,灵敏度和准确度高,精密度、重现性好,推广应用前景广阔。

参考文献

[1] FAN M M, PAN Z H, WANG C J, et al. Quantitative visual detection of mercury ions with ratiometric fluorescent test paper sensor[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2022, 10: 859379. DOI:10.3389/fchem.2022.859379.

[2] CLARKSON T W. Mercury: major issues in environmental health[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1993, 100: 31-38.

[3] XIONG C H, ZHANG Y Y, XU X G, et al. Lotus roots accumulate heavy metals independently from soil in main production regions of China[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 164: 295-302.

[4] ENRICO M, BALCOM P, JOHNSTON D T, et al. Simultaneous combustion preparation for mercury isotope analysis and detection of total mercury using a direct mercury analyzer[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2021, (1154): 338327. DOI:10.1016/j.aca.2021.338327.

[5] 李霞雪, 刘爱平, 陈亚, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定蔬菜中铬、镉、砷、铅、汞的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2019, 55(1): 39-45.

LI Xiaoxue, LIU Aiping, CHEN Ya, et al. ICP-MS determination of chromium, cadmium, arsenic, lead and mercury in vegetables with microwave digestion of samples[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2019, 55(1): 39-45.

[6] 刘景龙, 韩倩. 超声辅助浊点萃取-原子荧光光谱法测定水中痕量汞[J]. *中国无机分析化学*, 2022, 12(6): 1-7.

LIU Jinglong, HAN Qian. Determination of trace mercury in water by atomic fluorescence spectrometry with ultrasonic-assisted cloud point extraction[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2022, 12(6): 1-7.

[7] 傅志丰, 周鹤. 稀酸微波消解-原子荧光光谱法测定大米中总砷[J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13(4): 311-317.

- FU Zhifeng, ZHOU He. Determination of total arsenic in rice by microwave-assisted digestion using diluted nitric acid-atomic fluorescence spectrometry method[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(4): 311-317.
- [8] LEE J, PARK Y S, LEE H J, et al. Microwave-assisted digestion method using diluted nitric acid and hydrogen peroxide for the determination of major and minor elements in milk samples by ICP-OES and ICP-MS[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131483. DOI: 10. 1016/j. foodchem. 2021. 131483.
- [9] 杨伟, 李蓉, 范晓旭, 等. 稀酸微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定红糖中六种营养元素[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 261-264, 270.
- YANG Wei, LI Rong, FAN Xiaoxu, et al. Microwave-assisted digestion using diluted acid for six nutrient elements determination in brown sugar by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 261-264, 270.
- [10] 梅广, 倪小英, 黄力, 等. 消解液酸度对石墨炉-原子吸收光谱法测定稻谷中镉元素的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2015(6): 63-65.
- MEI Guang, NI Xiaoying, HUANG Li, et al. Effect of acidity of digestion solution on the determination of Cd in rice by GFA-AAS[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(6): 63-65.
- [11] 陈曦, 周明慧, 伍燕湘, 等. 稻米中汞元素的样品前处理和检测关键因素研究[J]. 分析科学学报, 2022, 38(1): 56-60.
- CHEN Xi, ZHOU Minghui, WU Yanxiang, et al. Study on the key factors of sample pretreatment and detection for mercury in rice[J]. Journal of Analytical Science, 2022, 38(1): 56-60.
- [12] 李霞, 王棚, 罗丽卉, 等. 湿法快速消解-原子荧光光谱法测定农产品中汞[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(1): 41-45.
- LI Xia, WANG Peng, LUO Lihui, et al. Determination of total mercury in agricultural products by rapid wet digestion-atomic fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(1): 41-45.
- [13] ZHANG X, WANG X L, CAO X B, et al. Heavy element contents of vegetables and health-risk assessment in China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 828: 154552. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2022. 154552.
- [14] SCHWESIG D, KREBS O. The role of ground vegetation in the uptake of mercury and methylmercury in a forest ecosystem[J]. Plant and Soil, 2003, 253: 445-455.