

分析测试经验介绍 (272 ~ 277)

液相色谱-原子荧光联用仪测定地表水中的砷形态

于福池, 查圣华, 张 宏

(北京同仁堂健康药业股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 建立液相色谱-原子荧光联用仪(LC-AFS)同时对地表水中三价砷 [As(III)]、二甲基砷(DMA)、一甲基砷(MMA)、五价砷 [As(V)] 4 种砷形态的测定方法. 以 10 mmol/L 磷酸氢二铵水溶液为流动相, 样品通过 0.45 μm 水系微孔滤膜过滤后, 经阴离子色谱柱进行 4 种砷形态分离, 原子荧光进行定性和定量. 结果表明: 在质量浓度为 0~100 $\mu\text{g/L}$ 范围内, 4 种砷形态线性关系良好, 相关系数均大于 0.999. As(III)、DMA、MMA、As(V) 的检出限分别为 0.31、0.41、0.53 和 0.81 $\mu\text{g/L}$, 相对标准偏差(RSD)在 1.01%~3.83%($n=6$)范围内, 加标回收率在 90.41%~105.90% 范围内. 方法简便易行、精密度好, 可用于地表水中 4 种砷形态含量的测定.

关键词: 地表水; 砷形态; 液相色谱-原子荧光联用仪

中图分类号: O657.31

文献标志码: B

文章编号: 1006-3757(2024)04-0272-06

DOI: 10.16495/j.1006-3757.2024.04.009

Determination of Arsenic Speciation in Surface Water Using Liquid Chromatography-Atomic Fluorescence Spectrometer

YU Fuchi, ZHA Shenghua, ZHANG Hong

(Beijing Tong Ren Tang Health-Pharmaceutical Co. Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: A method for the simultaneous determination of arsenite [As(III)], dimethyl arsenic (DMA), monomethyl arsenic (MMA) and arsenate [As(V)] in surface water using liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometer (LC-AFS) was established. With 10 mmol/L diammonium hydrogen phosphate solution as the mobile phase, the samples were filtered through 0.45 μm aqueous microporous filter membrane, and 4 arsenic speciation were separated by an anion chromatographic column, qualitative and quantitative analysis were achieved using atomic fluorescence spectrometer. The results showed that the linearity of the 4 arsenic speciation were good in the range of 0~100 $\mu\text{g/L}$, and the correlation coefficients were all greater than 0.999. The limits of detection of As(III), DMA, MMA, and As(V) were 0.31, 0.41, 0.53, and 0.81 $\mu\text{g/L}$ respectively, and the relative standard deviations (RSD) ranged from 1.01%~3.83% ($n=6$). The spiked recoveries ranged from 90.41%~105.90%. The method is simple and easy to implement, highly accurate, and can be used for the determination 4 arsenic speciation in surface water.

Key words: surface water; arsenic speciation; liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometer

我国城市中主要供水源为水库供水, 水库中的水多来自地表径流和降水. 近年来, 我国水体污染事件频发, 其中化学性污染以砷污染为主^[1-2]. 砷污染有着不易察觉、累积性、持久性强等特点, 对环境和人体有着严重的危害^[3]. 研究表明, 砷的毒性大小不仅与含量有关, 而且还与其形态有关^[4-5]. 一般认

为, 无机砷 As(V) 和 As(III) 的毒性最大, 国际癌症研究机构确认为 I 类致癌物^[6]. 而有机砷中仅一甲基砷(MMA)和二甲基砷(DMA)有较小的毒性, 其他大多数无毒^[7-8]. 目前, 国内对地表水监测的质量标准《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)以总砷的形式进行评价, 导致其真实的毒性不能被准确呈现

收稿日期: 2024-06-07; 修订日期: 2024-07-26.

作者简介: 于福池(1985-), 男, 本科, 主要从事微量元素检测与分析, E-mail: yufuchi2005@163.com.

出来,因此,对砷的形态分析测定具有重要意义。现阶段,砷形态的主要检测方法有高效液相-电感耦合等离子体质谱法(HPLC-ICP-MS)^[9-10]、液相色谱-原子荧光光谱法(LC-AFS)^[11-14]、高效液相色谱-电感耦合等离子体串联质谱法(HPLC-ICP-MS/MS)^[15-16]等。LC-AFS法因其灵敏度高、分离度好,是砷形态常用的分析方法。邵长伟等^[17]通过LC-AFS法分析了底泥孔隙中水的砷形态,优化了流动相的pH值等指标。本试验参考了其pH值,同时在兼顾4种砷形态分离度的基础上,优化了流动相的浓度。与之相比,4种砷形态完全分离所需时间缩短至8 min,且分离效果良好。夏拥军^[18]采用LC-AFS法测定水产品中4种砷形态,其以单一砷形态信号值作为优化指标,分别优化了载流盐酸浓度,还原剂硼氢化钾浓度。本试验分别以4种砷形态峰面积作为优化指标,对试验条件进行优化,其中在优化盐酸体积分数时,发现不同砷形态,趋势变化差异明显,所以单一砷形态信号值不足以反映出4种砷形态的真实情况,故优先考虑了相对峰面积较小的As(V),尽可能地筛选出最佳试验条件。试验采用LC-AFS联用技术建立了地表水中砷形态的测定方法,为更好的研究砷形态提供参考。

1 试验部分

1.1 仪器与试剂

液相色谱-原子荧光联用仪:LC-AFS9710,北京海光仪器有限公司;SQP酸度计:UB-7型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;UB-7电子天平:SQP型,分度值0.1 mg,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;磷酸氢二铵、硼氢化钾、氨水:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;氢氧化钾:优级纯,上海麦克林生化科技有限公司;盐酸、硝酸:优级纯,国药集团化学试剂有限公司;亚砷酸根溶液标准物质、砷酸根溶液标准物质、一甲基砷溶液标准物质、二甲基砷溶液标准物质:以砷计,质量分数分别为75.7、17.5、25.1、52.9 $\mu\text{g/g}$,中国计量科学研究院;试验用水为超纯水。

1.2 仪器工作条件

1.2.1 液相色谱条件

色谱柱条件:阴离子交换色谱柱:Hamilton PRP-X100(250 mm $\times$ 4.1 mm, 10 μm);保护柱:Hamilton PRP-X100(20 mm $\times$ 2.1 mm, 10 μm);等度洗脱流动

相:10 mmol/L磷酸氢二铵溶液;流动相流速:1.0 mL/min;进样量:100 μL ;柱温:25 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.2 原子荧光检测条件

还原剂:25 g/L硼氢化钾溶液;载流:7%盐酸溶液;光电倍增管负高压:300 V;砷空心阴极灯主电流:60 mA;阴极灯辅电流:30 mA;原子化方式:火焰原子化;原子化器温度:200 $^{\circ}\text{C}$;原子化器高度:8 mm;蠕动泵转速:60 r/min;采样频率:10 Hz;载气(高纯氩)流速:300 mL/min;屏蔽气(高纯氩)流速:900 mL/min。

1.3 溶液的配制

10 mmol/L磷酸氢二铵溶液:称取1.320 6 g的磷酸氢二铵溶解于500 mL超纯水中,然后用超纯水定容至1 000 mL,用10%硝酸溶液和10%氨水溶液调节pH值为6.0,经0.45 μm 水性滤膜过滤后超声脱气2 min。

还原剂25 g/L硼氢化钾:称取25 g硼氢化钾,用2.5 g/L氢氧化钾溶液溶解并定容至1 000 mL(现用现配)。

载流7%盐酸:量取70 mL盐酸,溶于水并稀释至1 000 mL。

砷形态混合标准溶液配制:分别准确吸取适量亚砷酸根[As(III)]、砷酸根[As(V)]、一甲基砷(MMA)、二甲基砷(DMA)4种砷形态标准物质,用超纯水配制成含砷质量浓度为1 000 $\mu\text{g/L}$ 的砷形态单标储备溶液,再分别准确移取一定量的砷形态单标储备溶液,用流动相稀释成0、10、20、40、80、100 $\mu\text{g/L}$ 砷形态系列混合标准工作溶液,临用现配。

样品溶液:样品瓶(PET)用10%硝酸浸泡过夜后,用超纯水洗净后晾干备用,在廊坊凤河采集10个样品,水样采集后,密封常温保存,48 h内完成检测。水样经0.45 μm 水系微孔滤膜过滤后上机待测定。

1.4 试验方法

将空白样品溶液、系列混合工作溶液、地表水样品溶液在1.2项仪器工作条件下测定,记录色谱图峰面积。以色谱峰面积为纵坐标,对应砷形态质量浓度为横坐标绘制标准工作曲线。采用色谱峰保留时间定性,色谱峰面积外标法定量。

2 结果与讨论

2.1 流动相浓度的选择

使用超纯水配制浓度分别为5、10、15、20、

25 mmol/L 的磷酸氢二铵溶液,用 10% 硝酸溶液和 10% 氨水溶液调节 pH 值为 6.0, 配制 As(III)、DMA、MMA、As(V) 混合标准溶液质量浓度为 40 $\mu\text{g/L}$, 在载流为 7% 盐酸, 还原剂为 25 g/L 硼氢化钾溶液的条件下进样. 分析不同流动相浓度对 4 种砷形态峰面积的影响. 试验结果如图 1(a) 所示, 磷酸氢二铵浓度为 10 mmol/L 时, 4 种砷形态的峰面积最大, 之后趋于平缓. 但随着磷酸氢二铵溶液浓度

的增大, As(III) 与 DMA, DMA 与 MMA 的分离度越来越小. 如图 1(b) 所示, 当磷酸氢二铵浓度为 15 mmol/L 时, DMA 与 MMA 的分离度为 1.65, 峰形已有轻微叠加. 当磷酸氢二铵浓度为 20 mmol/L 时, DMA 与 MMA 的分离度为 1.36, 4 种砷形态不能完全分离. 综合考虑, 选用流动相磷酸氢二铵浓度为 10 mmol/L, pH 值为 6.0. (注: 两相邻色谱峰的分离度为两峰保留时间差与两峰峰底宽平均值之商.)

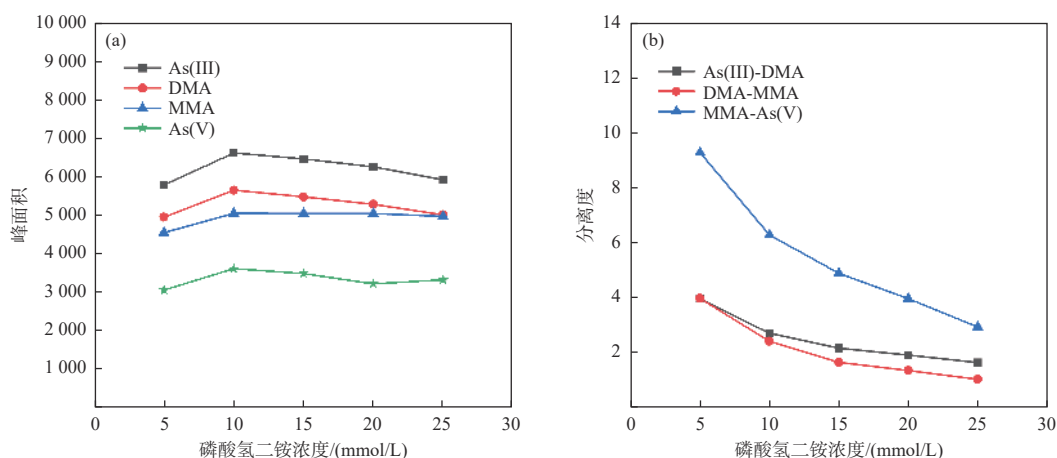


图 1 不同浓度流动相对 4 种砷形态(a) 峰面积及 (b) 分离度的影响

Fig. 1 Effect of different concentrations of mobile phase on (a) peak areas and (b) separations of 4 arsenic speciation

2.2 还原剂硼氢化钾浓度的影响

配制质量浓度分别为 10、15、20、25、30、35 g/L 的还原剂硼氢化钾溶液, 流动相磷酸氢二铵浓度为 10 mmol/L, pH 为 6.0, 载流为 7% 盐酸, 其他条件不变, 用上述标准溶液浓度进样, 比较不同质量浓度的硼氢化钾对 4 种砷形态峰面积的影响. 如图 2 所示, 随着硼氢化钾浓度的增大, 峰面积不断

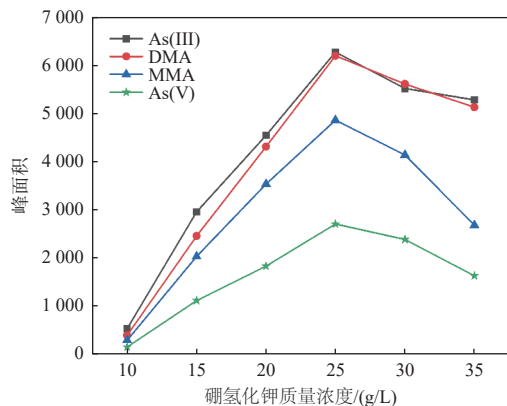


图 2 不同浓度还原剂对 4 种砷形态峰面积的影响

Fig. 2 Effect of different concentrations of reducing agent on peak areas of 4 arsenic speciation

增大, 当硼氢化钾浓度达到 25 g/L 时, 峰面积最大, 故选择还原剂硼氢化钾浓度为 25 g/L.

2.3 盐酸体积分数的选择

配制体积分数为 3%、4%、5%、6%、7%、8%、9% 的盐酸溶液, 流动相磷酸氢二铵浓度为 10 mmol/L, pH 为 6.0, 还原剂硼氢化钾浓度为 25 g/L, 其他条件不变, 用上述标准溶液浓度进样, 试验结果如图 3 所示. 由图可见, 当盐酸体积分数为 5% 时, As(III)、DMA 峰面积最大, 但随着盐酸体积分数的增大, As(V) 峰面积增大, As(III)、MMA 峰面积变化不大, DMA 峰面积减小. 综合考虑, 在相同条件下 As(V) 峰面积比其他 3 种砷形态的响应值偏低. 而 DMA 随着盐酸体积分数的增大, 峰面积减小. 故在优先考虑 As(V), 其次考虑 DMA 条件下, 选择盐酸的体积分数为 7%.

2.4 色谱图

参考上述优化后的试验条件, 空白样品、4 种混合标准溶液、地表水加标溶液色谱图如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 色谱峰的保留时间适宜, 均约为 8 min, 目标物分离效好, 且色谱峰形良好.

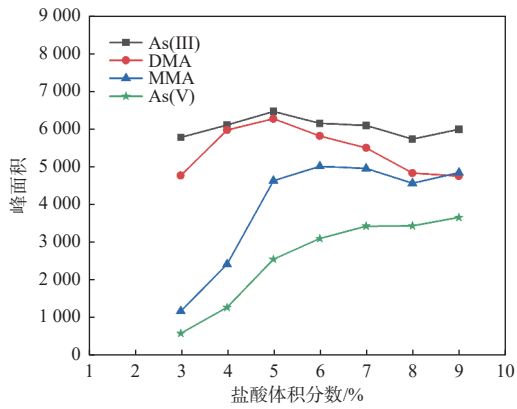


图3 不同体积分数盐酸对4种砷形态峰面积的影响
Fig. 3 Effects of different volume fractions of hydrochloric acid on peak areas of 4 arsenic speciation

2.5 线性范围和检出限

在0~100 μg/L 范围内配制质量浓度为0、10、20、40、80、100 μg/L 的4种砷形态混合标准溶液,以峰面积为纵坐标(Y),质量浓度为横坐标(X),绘制标准工作曲线,计算回归方程及相关系数,将混合标准品溶液进行适当稀释后,上机检测.按3倍信噪比(S/N≥3)计算出检出限,如表1所示.结果显示,在0~100 μg/L 范围内,4种砷形态线性关系良好,相关系数均大于0.999. As(III)、DMA、MMA、As(V)的检出限分别为0.31、0.41、0.53和0.81 μg/L.

2.6 精密度与加标回收率

取地表水样品,准确加入质量浓度分别为5.00、15.00、30.00 μg/L 的混合标准溶液,按最终优化条

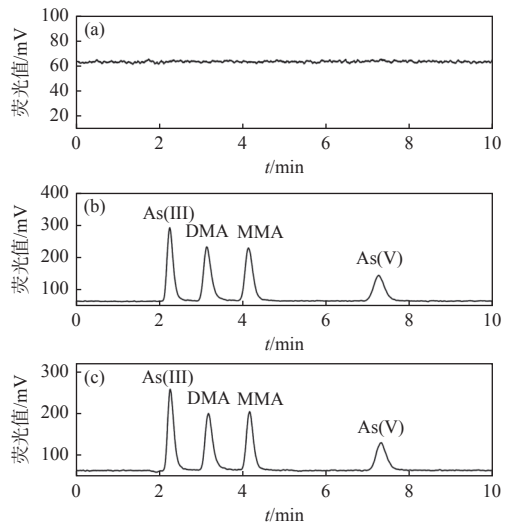


图4 (a)空白样品溶液,(b)混合标准溶液,(c)地表水加标溶液色谱图

Fig. 4 Chromatograms of (a) blank sample solution, (b) mixed standard solution, (c) spiked solution of surface water

件进行试验测定.计算测定结果的平均值、相对标准偏差(RSD)、加标回收率,结果如表2所列.由表2可见,4种砷形态的精密度RSD在1.01%~3.83%(n=6)范围内,加标回收率在90.41%~105.90%范围内.

2.7 地表水样品分析

使用该方法检测取自廊坊凤河10个样品中砷形态(结果如表3所示),DMA、MMA这两种砷形

表1 4种砷形态的保留时间、校准曲线和检出限

Table 1 Retention times, calibration curves and limits of detection of 4 arsenic speciation					
形态砷	保留时间/min	回归方程	相关系数r	线性范围/(μg/L)	检出限/(μg/L)
As(III)	2.26	$Y=133.21X-149.07$	0.999 8	0~100	0.31
DMA	3.15	$Y=114.64X-33.97$	0.999 9	0~100	0.41
MMA	4.15	$Y=111.34X-11.54$	0.999 8	0~100	0.53
As(V)	7.26	$Y=68.12X+55.15$	0.999 9	0~100	0.81

表2 地表水中砷形态的精密度和加标回收率(n=6)

Table 2 Precisions and spiked recoveries of arsenic speciation in surface water (n=6)											
名称	本底质量浓度/(μg/L)	加标质量浓度/(μg/L)	测定结果/(μg/L)						平均值/(μg/L)	RSD/%	加标回收率/%
			1	2	3	4	5	6			
As(III)	0.37	5.00	5.25	5.46	5.29	5.36	5.55	5.45	5.39	2.11	100.40
	0.37	15.00	16.09	16.33	16.11	16.42	16.10	16.48	16.25	1.07	105.90
	0.37	30.00	31.31	31.17	31.51	30.68	30.80	33.96	31.57	3.83	104.00

续表 2

名称	本底质量浓度 /(μg/L)	加标质量浓度 /(μg/L)	测定结果/(μg/L)						平均值 /(μg/L)	RSD/%	加标回 收率/%
			1	2	3	4	5	6			
DMA	ND	5.00	5.07	4.98	4.95	4.92	5.00	4.92	4.97	1.16	99.45
	ND	15.00	15.16	14.97	14.79	15.20	15.12	14.98	15.04	1.01	100.24
	ND	30.00	29.57	30.14	30.27	29.12	29.98	30.17	29.88	1.48	99.58
MMA	ND	5.00	5.13	5.07	5.06	4.97	5.01	5.00	5.04	1.18	100.79
	ND	15.00	15.16	15.42	14.60	15.39	15.22	15.10	15.15	1.96	100.98
	ND	30.00	29.73	29.21	29.36	29.08	30.08	30.32	29.63	1.68	98.77
As(V)	1.53	5.00	6.15	5.98	6.06	5.81	6.29	6.02	6.05	2.67	90.41
	1.53	15.00	15.95	16.70	15.85	15.53	16.30	15.93	16.05	2.52	96.77
	1.53	30.00	30.07	30.97	30.01	30.14	29.85	30.09	30.19	1.31	95.53

注: ND表示组分低于方法检出限

表 3 地表水样品中 4 种砷形态

Table 3 Four arsenic speciation in surface water samples
/(μg/L)

样品	As(III)	DMA	MMA	As(V)
1	0.45	ND	ND	1.67
2	0.39	ND	ND	1.51
3	0.37	ND	ND	1.52
4	0.43	ND	ND	1.43
5	0.36	ND	ND	1.66
6	0.37	ND	ND	1.40
7	0.36	ND	ND	1.86
8	0.43	ND	ND	1.68
9	ND	ND	ND	1.11
10	0.35	ND	ND	1.48

注: ND表示组分低于方法检出限

态含量低于检出限,该水域地表水样品中以无机砷 As(III)和 As(V) 存在.

3 结论

通过对流动相浓度、还原剂浓度、盐酸体积分数条件的优化,建立了液相色谱-原子荧光联用仪测定地表水中 4 种砷形态的分析方法,结果表明:校准曲线在 0~100 μg/L 质量浓度范围内线性关系良好,样品前处理简单,分析速度快,目标物分离效果好,方法简单. 将该方法应用于地表水中 4 种砷形态检测,结果发现地表水中的砷形态以 As(V) 为主,还有微量的 As(III). 表明该方法可用于地表水中砷形态测试.

参考文献:

[1] 席北斗, 王晓伟, 霍守亮, 等. 纳滤膜技术在地下水除砷应用中的研究进展 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 353-360. [XI Beidou, WANG Xiaowei, HUO Shouliang, et al. Investigation progress of arsenic removal from groundwater by nanofiltration membrane technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(2): 353-360.]

[2] 姚尧, 刘志佳, 陈瑶, 等. 热解自活化法制备竹箨活性炭及其砷吸附性能 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 149-158. [YAO Yao, LIU Zhijia, CHEN Yao, et al. Preparation of activated carbon from bamboo shoot shell by pyrolysis self-activation method and its arsenic adsorption performance[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 149-158.]

[3] 赵述华, 陈志良, 张太平, 等. 土壤砷污染及其修复技术研究进展 [C]//中国环境科学学会. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集 (第五卷). 2013: 4880-4886.

[4] 李昌平, 李月娥, 陈邵鹏, 等. 高效液相色谱-原子荧光光谱联用测定水中形态砷 [J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(6): 61-64. [LI Changping, LI Yue'e, CHEN Shaopeng, et al. Determination of arsenic speciation in water by HPLC-AFS[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, 23(6): 61-64.]

[5] 欧朝接. 水环境中元素形态分析技术研究进展 [J]. 化学分析计量, 2024, 33(3): 129-136. [OU ChaoJie. Research progress of elemental speciation analysis technology in water environment[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2024, 33(3): 129-136.]

[6] 苏祖俭, 黄伟雄, 蔡文华, 等. 食品中无机砷分析技术

- 进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(14): 3580-3589. [SU Zujian, HUANG Weixiong, CAI Wenhua, et al. Advances in analysis of inorganic arsenic in food[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2018, 9(14): 3580-3589.]
- [7] 曹军, 于伯华, 沈山江, 等. 高效液相色谱-原子荧光光谱联用技术测定水产品及其产地底泥中4种砷的形态残留[J]. *检验检疫学刊*, 2013, 23(5): 53-56. [CAO Jun, YU BoHua, SHEN Shanjiang, et al. Analysis of arsenic speciation in aquatic products and environments by HPLC-HG-AFS[J]. *Quality Safety Inspection and Testing*, 2013, 23(5): 53-56.]
- [8] 钟跃汉, 王利华, 孙友宝, 等. 基于反相色谱原理 HPLC-ICP-MS 法同时分离测定环境水中的6种形态砷和3种形态汞[J]. *环境化学*, 2021, 40(9): 2943-2946. [ZHONG Yuehan, WANG Lihua, SUN Youbao, et al. Simultaneous separation and determination of 6 forms of arsenic and 3 forms of mercury in environmental water by HPLC-ICP-MS based on the principle of reversed phase chromatography[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(9): 2943-2946.]
- [9] 陈满姑. HPLC-ICP-MS 法测定水产动物中5种砷形态的研究[J]. *食品安全导刊*, 2020(36): 129-130. [CHEN Mangu. Study on the determination of five forms of arsenic in aquatic animals by HPLC-ICP-MS[J]. *China Food Safety*, 2020(36): 129-130.]
- [10] 刘崴, 胡俊栋, 杨红霞, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法快速测定天然水中无机砷的形态[J]. *分析试验室*, 2014, 33(4): 462-465. [LIU Wei, HU Jundong, YANG Hongxia, et al. Rapid determination of inorganic arsenic in natural water by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2014, 33(4): 462-465.]
- [11] 彭稳, 李霞, 黄兰蕙. LC-AFS 测定湖南14个地级市大米的4种形态砷[J]. *微量元素与健康研究*, 2024, 41(3): 66-68. [PENG Wen, LI Xia, HUANG Lanhui. Determination of four forms of arsenic in rice from 14 prefecture-level cities in Hunan by LC-AFS[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2024, 41(3): 66-68.]
- [12] 曹晓钢, 王君, 李建民, 等. HPLC-HG-AFS 法分析西藏冬虫夏草中的砷形态化合物[J]. *中成药*, 2015, 1(9): 1985-1989. [CAO Xiaogang, WANG Jun, LI Jianmin, et al. Analysis of arsenic speciations in Cordyceps sinensis in Tibet by HPLC-HG-AFS[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2015, 1(9): 1985-1989.]
- [13] 戴志英, 杨清华, 王金鑫, 等. 液相色谱-原子荧光光谱法检测海产品中4种形态砷含量的方法研究[J]. *中国卫生检验杂志*, 2022, 32(8): 921-924. [DAI Zhiying, YANG Qinghua, WANG Jinxin, et al. Method study for determination of four arsenic species in seafood by liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2022, 32(8): 921-924.]
- [14] 宋冠仪, 梅勇, 商律, 等. 高效液相色谱-氢化物发生-原子荧光联用技术测定饮用水中四种形态砷[J]. *环境与职业医学*, 2017, 34(4): 350-353. [SONG Guanyi, MEI Yong, SHANG Lv, et al. Determination of four arsenic species in drinking water by high performance liquid chromatography-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2017, 34(4): 350-353.]
- [15] 李爱阳, 黄建华. 氢化物发生-电感耦合等离子体串联质谱法分析大米中的无机砷[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 331-336. [LI Aiyang, HUANG Jianhua. Inorganic arsenic analysis in rice by hydride generation inductively coupled plasma-tandem mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 331-336.]
- [16] 安娅丽, 赵艳萍, 刘宁, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体串联质谱法同时测定土壤中的阿散酸、洛克沙肿及其降解产物[J]. *分析测试学报*, 2019, 38(11): 1353-1357. [AN Yali, ZHAO Yanping, LIU Ning, et al. Simultaneous determination of p-arsanilic acid, roxarsone and their degradation products in soils by HPLC-ICP-MS/MS[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2019, 38(11): 1353-1357.]
- [17] 邵长伟, 黄杰超, 梁毓娜, 等. 高效液相色谱-原子荧光光谱法分析底泥孔隙水中形态砷[J]. *分析测试技术与仪器*, 2021, 27(1): 1-7. [SHAO Changwei, HUANG Jiechao, LIANG Yuna, et al. Analysis of arsenic forms in interstitial water of sediment by high performance liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 2021, 27(1): 1-7.]
- [18] 夏拥军. 高效液相色谱-原子荧光光谱法测定水产品中4种砷形态[J]. *化学分析计量*, 2017, 26(5): 46-49, 58. [XIA Yongjun. Determination of 4 arsenic species in aquatic products by high performance liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2017, 26(5): 46-49, 58.]