

超声波提取 - 原子荧光光谱法同时测定磷石膏中的水溶性砷、汞

黄韵婷¹, 苏海涛¹, 杨智蓉¹, 彭钰萍², 董茜茜¹, 刘金秋¹, 徐永娥¹, 李志朋¹

¹云南省产品质量监督检验研究院化工所, 云南 昆明

²云南农业大学烟草学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年7月6日; 录用日期: 2025年7月26日; 发布日期: 2025年8月8日

摘要

本研究围绕磷石膏和磷石膏土壤调理剂中水溶性砷、汞含量测定展开, 构建了基于原子荧光光谱法(AFS)的精准测定体系。对云南典型磷石膏7个企业提供的十个样品分析显示, 水溶性砷、水溶性汞最高检出含量分别为15.65 mg/kg和0.10 mg/kg。该方法展现出极低的检出限, 砷为0.05 ng/mL、汞为0.02 ng/mL, 精密度高(RSD < 4%), 加标回收率砷在86.0%~102.4%、汞在63.6%~80.0%, 能有效满足磷石膏环境监测与质量控制需求, 并为磷石膏综合利用过程中的环境风险防范与控制提供了关键技术支持。

关键词

磷石膏, 磷石膏土壤调理剂, 原子荧光光谱法, 水溶性砷, 水溶性汞

Determination of Water-Soluble Mercury and Arsenic in Phosphogypsum by Ultrasonic Extraction-Atomic Fluorescence Spectrometry

Yunting Huang¹, Haitao Su¹, Zhirong Yang¹, Yuping Peng², Qianqian Dong¹, Jinqiu Liu¹, Yong'e Xu¹, Zhipeng Li¹

¹Chemical Engineering Division, Yunnan Provincial Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Kunming Yunnan

²College of Tobacco Science, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan

Received: Jul. 6th, 2025; accepted: Jul. 26th, 2025; published: Aug. 8th, 2025

文章引用: 黄韵婷, 苏海涛, 杨智蓉, 彭钰萍, 董茜茜, 刘金秋, 徐永娥, 李志朋. 超声波提取-原子荧光光谱法同时测定磷石膏中的水溶性砷、汞[J]. 分析化学进展, 2025, 15(3): 303-312. DOI: 10.12677/aac.2025.153029

Abstract

This study focuses on the determination of water-soluble arsenic and mercury content in phosphogypsum, and constructs an accurate measurement system based on atomic fluorescence spectroscopy (AFS). The analysis of ten samples provided by seven typical phosphogypsum enterprises in Yunnan shows that the highest detected levels of water-soluble arsenic and water-soluble mercury are 15.65 mg/kg and 0.10 mg/kg, respectively. This method exhibits extremely low detection limits, with arsenic at 0.05 ng/mL and mercury at 0.02 ng/mL, high precision (RSD < 4%), and spiked recovery rates of arsenic at 86.0%~102.4% and mercury at 63.6%~80.0%. It can effectively meet the environmental monitoring and quality control needs of phosphogypsum. This research provides key technical support for environmental risk prevention and control in the comprehensive utilization of phosphogypsum.

Keywords

Phosphogypsum, Phosphogypsum Soil Conditioner, AFS, Water-Soluble Arsenic, Water-Soluble Mercury

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的副产物，其年产生量占据着全球工业固废总量的重要比例，约为 12% [1]。而在我国，磷石膏的堆存量形势更为严峻，已超过 8.2 亿吨 [1]。云南作为我国磷化工产业的重要聚集地，凭借丰富的磷矿资源和成熟的产业基础，在全国磷化工领域占据着举足轻重的地位。但与此同时云南的磷石膏年排放量占到了全国总量的 1/5，累积存放量已达 9000 万吨 [2]。近年来，随着“无废城市” [3] 建设理念的提出与逐步推进，磷石膏的资源化利用成为了研究和实践的热点方向。从数据上看，磷石膏资源化利用率从 2021 年的 17.4% 提升至 2022 年的 39.5% [3]，这无疑是一个积极的发展趋势，表明在磷石膏资源化利用方面已经取得了一定的成果。

然而，当磷石膏被应用于建材、农业等领域时，其含有的重金属的释放风险却一直缺乏全面、系统的评估。据报道，磷石膏中的主要重金属成分包括铅、铬、镉、砷、汞、锑、锰等元素 [4]。其中砷的各类化合物具有不同程度的毒性，一次性摄入过多严重时会引起死亡，即使是低浓度也会对人体有致癌作用和蓄积毒性。而汞的危害性有两方面，一方面由无机汞引起的急性中毒可能会导致肾组织坏死，发生尿毒症；另一方面甲基汞对动物具有致畸性和生育毒性 [5]。磷石膏中的砷汞在使用过程中可能会缓慢释放，对环境造成污染，威胁食品安全以及危害人体健康 [6]。综上所述，砷汞都会造成严重的健康风险，即便是低浓度也会对身体造成危害，可能引发各种类型的癌症，因此检测磷石膏中水溶性砷汞具有重要意义 [7]。

在环境样品中痕量砷、汞的测定方面，原子荧光光谱法 (AFS) 凭借其灵敏度高、抗干扰能力强等优势，成为了一种广泛应用的分析技术。它能够精准地检测出环境样品中极其微量的砷和汞元素，为环境监测提供了有力的技术支持。

基于上述背景，本研究将重点聚焦于云南典型的磷石膏样品，通过深入研究，建立一套适用于磷石膏的 AFS 测定方法，优化前处理流程和仪器参数，最大程度降低基体干扰的影响。同时，全面系统地评估磷石膏中重金属的释放特征，为磷石膏的资源化利用提供科学、可靠的依据，推动磷石膏在各个领域

的安全、合理应用。

2. 原理

试样水溶液加入硫脲使五价砷预还原为三价砷。在酸性介质中，砷还原生成砷化氢，硼氢化钾使汞还原成原子态汞，由氩气载入石英原子化器中，在砷、汞空心阴极灯的发射光激发下产生原子荧光，利用荧光强度在特定条件下与被测液中的砷、汞质量浓度成正比的特性，对砷、汞进行测定。

3. 仪器

双道原子荧光光度计(配有砷、汞空心阴极灯)：AFS-9800 型，北京海光仪器有限公司；超声波清洗器：SK8210HP 型，上海科导超声仪器有限公司；精密电子天平：METTLER-TOLEDO MS-S 型，梅特勒托利多科技(中国)有限公司；艾柯实验室超纯水机：Exceed-Cb-30 型，成都唐氏康宁科技发展有限公司；烘箱：101-3As 型，北京市永光明医疗仪器有限公司。

4. 试剂和材料

所用试剂和溶液的配制均符合 HG/T 2843 的规定；实验室用水符合 GB/T 6682 中二级水规格。

盐酸：优级纯，重庆川东化工(集团)有限公司；

氢氧化钾(KOH)：分析纯，西陇科学股份有限公司；

硼氢化钾(KBH₄)：分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；

硫脲(NH₂CSNH₂)：分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；

抗坏血酸(C₆H₈O₆)：分析纯，四川西陇科学有限公司；

盐酸溶液：C(HCl) = 5%。量取 50 mL 盐酸，缓慢加入约 950 mL 水中，用水稀释至 1000 mL，混匀；

盐酸溶液：C(HCl) = 50%。量取 50 mL 盐酸，缓慢加入约 50 mL 水中，用水稀释至 100 mL，混匀；

氢氧化钾溶液：C(KOH) = 5 g/L，称取 5 g 氢氧化钾，溶解于 1000 mL 水中，混匀；

硼氢化钾溶液：C(KBH₄) = 20 g/L，称取硼氢化钾 10.0 g，溶于 500 mL 氢氧化钾溶液中，混匀(此溶液于 4℃ 冰箱中可保存 10 d，常温下应当日使用)；

硫脲 - 抗坏血酸溶液：C(NH₂CSNH₂) = 50 g/L，C(C₆H₈O₆) = 50 g/L，称取 50.0 g 硫脲和 50 g 抗坏血酸，溶解于 1000 mL 水中，混匀，现用现配；

砷标准储备溶液：C(As) = 1000 μg/mL，国家有色金属及电子材料分析测试中心；

汞标准储备溶液：C(Hg) = 1000 μg/mL，国家有色金属及电子材料分析测试中心；

汞标准溶液：C(Hg) = 10 μg/mL。吸取汞标准储备溶液 10.00 mL，用 5% 盐酸溶液定容至 1000 mL，混匀；

砷标准溶液：C(As) = 100 μg/mL。吸取砷标准储备溶液 10.00 mL，用 5% 盐酸溶液定容至 100 mL，混匀；

砷标准溶液：C(As) = 1 μg/mL。吸取 100 μg/mL 砷标准溶液 10.00 mL，用 5% 盐酸溶液定容至 1000 mL，混匀；

汞标准溶液：C(Hg) = 0.1 μg/mL。吸取 10 μg/mL 汞标准溶液 10.00 mL，用 5% 盐酸溶液定容至 1000 mL，混匀；

氩气：纯度 ≥ 99.995%。

5. 样品前处理

样品经多次缩分后，取出约 100 g，40℃ ± 2℃ 烘干至恒重。混合均匀，置于洁净、干燥的容器中。

称取约 1.0 g 试样, 精确至 0.0001 g, 置于 50 mL 容量瓶中, 加入约 40 mL 水, 超声 15 min。用水定容, 混匀, 静置。取上清液过滤, 弃去初滤液约 5 mL, 其余滤液混合均匀。分取 10.0 mL 混合滤液于 25 mL 容量瓶中, 加入 5.0 mL 硫脲溶液和 3.0 mL 盐酸溶液, 用水定容, 混匀, 放置至少 30 min 后测试。同时做空白试验。

6. 标准曲线的绘制及样品测定

用移液管分别量取 1 $\mu\text{g/mL}$ 砷标准溶液 2.5 mL 及 0.1 $\mu\text{g/mL}$ 汞标准溶液 2.5 mL 于同一个 50 mL 容量瓶中, 加入 10.0 mL 硫脲溶液和 5.0 mL 50% 盐酸溶液, 用水定容, 配置成砷汞混合标液混匀待测。仪器根据 50.00 ng/mL 的砷标液和 5.00 ng/mL 的汞标液进行自动稀释。得到砷标准系列的质量浓度为 0.00、5.00、10.00、20.00、30.00、50.00 ng/mL, 汞标准系列的质量浓度为 0.00、0.50、1.00、2.00、3.00、5.00 ng/mL。所绘制的标准曲线相关系数见图 1。砷的标准曲线相关系数 R^2 为 0.9999, 汞的标准曲线相关系数 R^2 为 0.9998。

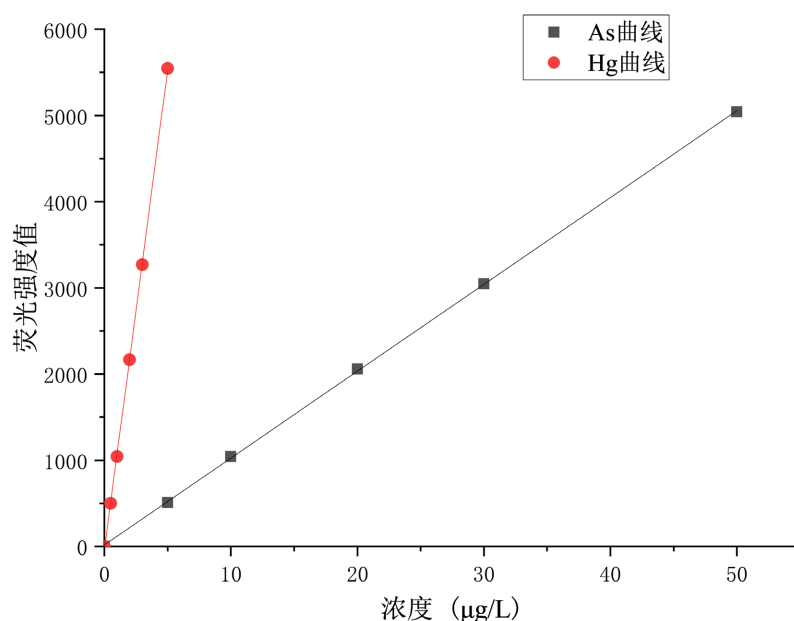


Figure 1. Atomic fluorescence standard curve

图 1. 原子荧光标准曲线图

6.1. 仪器参考条件

光电倍增管负高压 230 V; 汞空心阴极灯电流 30 mA; 砷空心阴极灯电流 45 mA; 原子化器温度 200 $^{\circ}\text{C}$; 高度 8 mm; 氩气流速 300 mL/min; 屏蔽气 800 mL/min; 测量方式: 标准曲线法; 读数方式: 峰面积; 积分时间: 12 s。每次测试采集样品溶液体积为 1.0 mL。

以盐酸溶液和硼氢化钾溶液为载体流, 砷、汞质量浓度为 0.00 ng/mL 的标准溶液为参比溶液调零, 测定各标准溶液的荧光强度。以各标准溶液砷、汞的质量浓度 (ng/mL) 为横坐标, 相应的荧光强度为纵坐标, 制作标准曲线。

6.2. 测定试样溶液

直接(或适当稀释后)在与测定标准系列溶液相同的条件下, 测定试样溶液的荧光强度, 在标准曲线上查出相应砷、汞的质量浓度 (ng/mL)。

7. 样品来源

以云南天安化工有限公司、云南磷化集团有限公司、云南三环中化化肥有限公司、云南祥丰金麦化工有限公司、云南弘祥化工有限公司、云南中正化学工业有限公司、云南磷化集团海口磷业有限公司等七家企业的十个磷石膏样品作为本次实验的研究对象。

8. 实验结果与讨论

8.1. 水溶性砷、汞含量范围

经现阶段实验测定，云南磷石膏中水溶性砷、汞含量范围见表 1。数据表明磷石膏中水溶性砷的含量范围在 0.06 至 15.65 mg/kg 之间；磷石膏中水溶性汞的含量范围在未检出至 0.10 mg/kg 之间。

Table 1. Preliminary statistics on the range of water-soluble arsenic and mercury content in phosphogypsum
表 1. 磷石膏中水溶性砷、汞含量范围初步统计

样品序号	砷(As) mg/kg	汞(Hg) mg/kg
1#	3.31	0.02
2#	0.08	未检出
3#	1.03	未检出
4#	0.10	未检出
5#	0.30	未检出
6#	0.47	未检出
7#	0.06	未检出
8#	15.65	0.08
9#	2.37	未检出
10#	1.16	0.10

8.2. 检出限与定量限

绘制出标准曲线后，将样品空白平行测定 20 次，计算空白荧光强度的平均值与标准偏差，方法的检出限 $C_{LOD} = 3S_0/b$ ，定量限 $C_{LOQ} = 10S_0/b$ (S_0 为空白 20 次平行测定值的标准偏差， b 是标准曲线的斜率)。经试验，磷石膏中水溶性砷、汞含量检出限与定量限见表 2。结果表明原子荧光光谱法同时测定磷石膏中的水溶性砷和水溶性汞具有较低的检出限和定量限。

Table 2. Detection limits and quantification limits for water-soluble arsenic and mercury in phosphogypsum
表 2. 磷石膏中水溶性砷、汞含量检出限与定量限

序号	元素名称	元素符号	检出限 ng/mL	定量限 ng/mL
1	砷	As	0.05	0.18
2	汞	Hg	0.02	0.07

8.3. 精密度

平行测定 10 号磷石膏样品 7 次，计算测定结果的相对标准偏差(RSD)，考查原子荧光光谱法同时测

定磷石膏中的水溶性砷、汞方法的精密度，经试验，磷石膏中水溶性砷、汞含量 7 次测量精密度见表 3。砷汞的精密度结果 $RSD < 4\%$ ，表明该方法的重复性较好。

Table 3. Precision of water-soluble arsenic and mercury content in Phosphogypsum
表 3. 磷石膏中水溶性砷、汞含量精密度

序号	砷(As) ng/mL	相对标准偏差 %	汞(Hg) ng/mL	相对标准偏差 %
1	11.23795	1.12	0.98843	3.30
2	11.27029		0.99413	
3	11.36483		1.01879	
4	11.41556		1.02503	
5	11.43546		1.03527	
6	11.61703		1.07613	
7	11.46695		1.07034	

8.4. 回收率

对三个不同企业来源的磷石膏 1 号、8 号和 10 号进行加标分析试验，经试验，磷石膏中水溶性砷、汞含量回收率见表 4。水溶性砷在 1.16~15.65 mg/kg 的本底含量范围内，回收率可达 86.0%~102.4%；水溶性汞在 0.02~0.10 mg/kg 的本底含量范围内，回收率可达 63.6%~80.0%，结果表明该方法满足 GB/T 27417-2017《合格评定 化学分析方法确认和验证指南》中附录 A 方法回收率偏差范围的要求。

Table 4. Recovery rates of water-soluble arsenic and mercury in phosphogypsum
表 4. 磷石膏中水溶性砷、汞含量回收率

样品序号	元素	本底值 μg	加标值 μg	测定值 μg	回收率 %
1#	砷	3.47	3.00	6.05	86.0
	汞	0.02	0.05	0.06	80.0
8#	砷	15.98	16.00	32.36	102.4
	汞	0.08	0.11	0.15	63.6
10#	砷	1.24	1.00	2.12	88.0
	汞	0.11	0.11	0.19	72.7

8.5. 实验条件筛选

8.5.1. 酸度的控制

相关研究表明[8][9]，硝酸对原子荧光强度有负干扰作用，有可能被样品机体还原成亚硝酸根，降低预还原剂作用，从而让砷的测定结果偏低。因此本次实验选择盐酸溶液作为介质。 As^{3+} 的氢化物(AsH_3)生成需强酸性条件。若 pH 过高(>3)， As^{5+} 还原为 As^{3+} 不完全，导致信号降低；若 pH 过低(<1)，可能引起试剂(如 KBH_4)过度分解，产生过量氢气干扰。 Hg^{2+} 直接还原为 Hg^0 需弱酸性条件(pH 2~3)。高 pH (>5)导致 Hg 吸附或形成 $Hg(OH)_2$ 沉淀，信号降低；低 pH (<1)可能引起汞的氧化损失(需加入 $K_2Cr_2O_7$ 稳定)。实验过程中选取 10 号磷石膏样品对酸度进行筛选，结果见表 5。因此在本次实验过程中选择了 5%盐酸溶液

作为载流，测试中样品、标液与载流酸度要保持基本一致。

8.5.2. 还原剂的浓度以及配制注意事项

仪器使用的还原剂参照 NY/T1978-2022 附录 A，按 2.0%硼氢化钾加 0.5%氢氧化钾的浓度进行配制。为避免玻璃被强碱性溶液腐蚀、降低氢气积聚风险，同时兼顾操作的便利性和安全性，实验过程中建议使用塑料瓶进行配制。因硼氢化钾易受潮或受热分解，故配制还原剂时先使氢氧化钾溶解成碱性溶液后，再加入硼氢化钾搅拌混匀。硼氢化钾在潮湿环境或水溶液中会迅速与水反应，生成硼酸钾(KBO₂)、氢氧化钾(KOH)和氢气(H₂)，这一水解过程会导致有效还原剂(KBH₄)的浓度显著降低，影响其在反应中的还原能力，因此还原剂不能储存需要现用现配。

Table 5. Statistical results of acidity control
表 5. 酸度控制结果统计

溶液酸度	砷(As) mg/kg	汞(Hg) mg/kg
1%	0.42	0.02
5%	1.16	0.10
10%	0.85	0.06

9. 延伸讨论

9.1. 与其他地区磷石膏样品进行水溶性砷汞含量比较

目前我国磷石膏堆存量已超过 7×10^8 t，每年新增约 8×10^7 t，且主要集中在长江流域。其中，云南省、湖北省和贵州省的磷石膏产量占全国总产量的 70%以上。当磷矿来源不同时，磷石膏的化学组成也会存在一定差异，比较云南省、湖北省和贵州省的砷汞含量[10]，见表 6。

Table 6. Arsenic and mercury content in different regions
表 6. 不同地区砷汞含量

样品来源及处理方法	砷(As) mg/kg	汞(Hg) mg/kg
云南省(超声)	0.06~15.65	0~0.10
云南省(浸出)	-	0.003~0.004
湖北省(浸出)	0.019~0.054	-
贵州省(浸出)	0.006~0.290	0~0.24

9.2. 磷石膏中砷汞溶出机理及影响因素探讨

磷石膏中的砷和汞主要以两种形态存在：结合态和游离态。结合态砷汞通常通过吸附或共沉淀与石膏晶格结合，而游离态则可能以可溶性盐形式(如 AsO₄³⁻、Hg²⁺)存在于孔隙溶液中。游离态砷汞具有溶出性和迁移性，是影响环境的主要因素也是本次试验检测的对象。

9.2.1. 磷石膏中砷的溶出机理

磷石膏中砷的溶出首先是矿物的分解：磷石膏中的砷酸盐在酸性条件(pH < 5)或微生物作用下发生溶解，释放 As(V)。例如： $\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{OH} + 7\text{H}^+ \rightarrow 5\text{Ca}^{2+} + 3\text{H}_2\text{AsO}_4^- + \text{H}_2\text{O}$ 。

其次是可能存在的还原作用：环境中存在的硫酸盐还原菌等微生物将 As(V)还原为 As(III)，由于 As(V) 的吸附能力较强而 As(III)吸附能力较弱，砷的价态转换后会显著提高其在环境中的迁移性和毒性[11][12]。

9.2.2. 磷石膏中汞的溶出机理

环境中汞的形态以 Hg^{2+} 和甲基汞(CH_3Hg^+)为主，后者因脂溶性和生物累积性更具环境风险。磷石膏中汞的溶出主要分为了两部分。其一是氧化溶解，这也是最主要的溶出途径： HgS 在氧化条件下分解为 Hg^{2+} ： $HgS + O_2 + 2H_2O \rightarrow Hg^{2+} + SO_4^{2-} + 4H^+$ 。其二是甲基化作用：在厌氧环境中，微生物会将无机汞转化为甲基汞(CH_3Hg^+)，显著增强了生物累积性[13]-[15]。

9.2.3. 磷石膏中砷汞的溶出影响因素以及潜在环境风险探讨

根据对磷石膏中砷汞溶出机理的探讨和相关文献的查阅，本次实验将影响因素聚焦于温度和 pH 值，同时这两个因素也是自然条件下堆放磷石膏最常见面对的变量因素。对 8 号磷石膏进行不同温度、pH 值条件下分析试验，经试验，磷石膏中水溶性砷、汞含量见表 7 和表 8。根据表内数据分析，一定范围内温度对磷石膏中的水溶性砷汞含量影响并不是很大；而 pH 值对水溶性砷汞含量具有较大的影响，pH 值越小酸度越高，水溶性砷汞含量越高，而这也符合对磷石膏水溶性砷汞的溶出机理的分析。当处于碱性环境时，砷汞可能通过生成难溶性氢氧化物从而抑制释放。

Table 7. Content of water-soluble arsenic and mercury in phosphogypsum sample 8# at different temperatures
表 7. 磷石膏 8#样品中不同温度下水溶性砷、汞含量

温度(°C)	砷(As) mg/kg	汞(Hg) mg/kg
5	15.08	0.07
10	15.12	0.08
20	15.65	0.08
30	14.92	0.07
40	13.56	0.06
50	10.14	0.06

Table 8. Content of water-soluble arsenic and mercury in phosphogypsum sample 8# at different pH values
表 8. 磷石膏 8#样品中不同 pH 值下水溶性砷、汞含量

pH 值	砷(As) mg/kg	汞(Hg) mg/kg
1	17.48	0.12
3	16.70	0.10
5.5	15.59	0.09
7	15.65	0.08
12	0.7	0.002
13.6	0.2	0

2022 年我国磷石膏综合利用率为 50.5%，不能综合利用的磷石膏仍将以堆存方式进行处理；而目前我国磷石膏综合利用的部分仍以传统的石膏建材和水泥缓凝剂为主[10]。这些磷石膏在堆放和利用的过程中，可溶性砷汞会随着降水渗透进土壤和地下水造成污染，不仅会通过食物链富集对人体健康造成威

胁,还会对土壤中的不同的微生物菌群产生或刺激或抑制的作用从而影响土壤的稳定性[16]-[19]。因此,建立一套快速有效的 AFS 检测方法检测磷石膏中水溶性砷汞具有十分重要的意义。

10. 结论

本研究成功建立了原子荧光光谱法(AFS)同时测定磷石膏中水溶性砷、汞含量的分析方法,该方法在磷石膏环境监测和质量控制方面具有显著优势。

从方法性能来看,其检出限低,砷为 0.05 ng/mL,汞为 0.02 ng/mL,能够精准检测出磷石膏中极微量的砷和汞;精密度高,相对标准偏差(RSD)均小于 4%,保证了检测结果的可靠性和重复性;加标回收率方面,砷在 1.16~15.65 mg/kg 的本底含量范围内,回收率可达 86.0%~102.4%,汞在 0.02~0.10 mg/kg 的本底含量范围内,回收率为 63.6%~80.0%,表明该方法准确性良好。综合这些性能指标,说明此方法完全能够满足磷石膏中水溶性砷、汞含量测定的需求,而对水溶性砷汞的同时测定也极大地提高了检验检测效率,为相关环境监测和质量控制工作提供了有力的技术手段。是一种值得推广的测定磷石膏和磷石膏土壤调理剂中水溶性砷、汞含量的方法。

基金项目

研究课题:《云南磷石膏土壤调理剂可利用元素的分析方法研究及效果评价》(2024YSJK02);《磷石膏中 13 种水溶性有害物质检测技术的研究》(2022YSJK07)。

参考文献

- [1] 顾阳. 打赢磷石膏治理“绿色突围战”[N]. 经济日报, 2025-02-15(005).
- [2] 刘昱成, 周洪印, 杨德剑, 李润和, 张乃明. 磷化工固废改性造地土壤的水环境效应研究[J]. 环境工程, 1-17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20250102.1638.004.html>, 2025-07-26.
- [3] 姬成岗, 孟祥琪, 邢杰, 钱琪所, 叶珊. “双碳”视角下“无废城市”建设路径研究——以昆明市为例[J]. 环境科学与管理, 2025, 50(2): 159-164.
- [4] 王先桥, 龚浩播, 龚姝, 黄华, 王露, 范开静. 磷石膏主要化学成分及重金属元素分析[J]. 云南化工, 2025, 52(4): 51-54.
- [5] 潘琤, 袁鹏, 于海华, 赵永进, 秦健, 朱珠, 吴惠, 何武顺. 饲料级大米次粉中砷汞的危害与检测[J]. 饲料与畜牧, 2015(1): 55-58.
- [6] 张瞿天, 梁处芳, 阮耀阳, 杨丙桥, 余军霞, 罗惠华, 池汝安, 周芳. 磷石膏无害化与资源化研究现状[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(1): 84-90.
- [7] 黄洁, 黎晟沅, 杨晶媛, 普康晶, 张晓旭. 云南省磷石膏综合利用现状及对策建议[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(2): 12-16.
- [8] 邓勃. 应用原子吸收与原子荧光光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [9] 王雪芹, 鲁丹, 刘金华, 殷学锋. 快速去除硝酸和亚硝酸对氢化物发生原子荧光法测定砷的干扰[J]. 分析化学, 2009, 37(2): 288-290.
- [10] 白春华, 王金宝, 李光辉, 刘玉强, 徐亚, 钱臻, 林民松, 龙杰, 姚光远. 我国磷石膏污染特性、利用及环境管理研究[J]. 环境科学研究, 2025, 38(3): 632-641.
- [11] 赵占冲, 史谊峰, 祝星, 祁先进, 王晓武, 尤开云, 王华. 含砷石膏渣还原分解行为及砷迁移规律[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(1): 187-197.
- [12] Ma, M., Xu, X., Su, Q., et al. (2023) Deep Insight on Mechanism and Contribution of Arsenic Removal and Heavy Metals Remediation by Mechanical Activation Phosphogypsum. *Environmental Pollution*, 336, Article 122258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122258>
- [13] 李鑫, 王明涌, 公旭中. 汞尾矿同步高效浸出汞镉规律[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(4): 9-13+68.
- [14] 王道涵, 吕艾静, 王营军, 焦峰, 于令令, 邹佳霖. 内蒙古草原植物羊草对外源汞的积累特征[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4): 1550-1554.

- [15] 王明勇, 乙引. 一种新发现的汞富集植物——乳浆大戟[J]. 江苏农业科学, 2010(2): 354-356.
- [16] 江涛, 乔雪园, 童军, 陈祥, 陈亚松, 师雄. 长江经济带磷石膏资源化利用现状、问题及对策[J]. 化学与生物工程, 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1710.TQ.20250507.1110.002.html>, 2025-07-26.
- [17] 姜国庆, 刘帅杰, 段利中, 田华. 磷石膏无害化处理及其在生态修复中的应用进展[J]. 云南化工, 2025, 52(4): 17-20+30.
- [18] 范俊楠, 贺小敏, 陆泗进, 李爱民, 宋国强. 湖北省重点行业企业周边土壤重金属污染现状及潜在生态危害评价[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(5): 74-80.
- [19] 陈欣瑶, 杨惠子, 陈楸健, 王丽娜, 王贵鑫, 张园. 重金属胁迫下不同区域土壤的生态功能稳定性与其微生物群落结构的相关性[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 356-364.