

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2021.02.010

# 聚氨酯泡沫塑料吸附-电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)法测定地球化学样品中的痕量金

刘彤彤 黄登丽

(甘肃有色金属地质勘查局 张掖矿产勘查院,甘肃 张掖 734000)

**摘要** 探讨了聚氨酯泡沫塑料的预处理、样品浓度、水洗条件、基体元素对金吸附率的影响等因素。结果表明,用泡沫塑料吸附含金量为 5 ng~500  $\mu\text{g}$  的溶液,吸附率均在 90% 以上。影响聚氨酯泡沫塑料吸附率的重要条件是振荡前要用充分浸透,水洗基体元素,矿渣宜在酸性环境下进行。铁、钛等离子可以提高吸附率,钠、钙、锌、矿渣等影响不显著,铝离子有微弱的抑制作用。ICP-MS 的灵敏度与介质的雾化率有一定的相关性,应当使用硫脲介质的工作溶液作工作曲线,内标元素可用 $^{103}\text{Rh}$ 或 $^{185}\text{Re}$ ,但是对于高含量 W 样品,只能使用 $^{103}\text{Rh}$ 作内标。用金矿石国家标准物质做精密度与准确度验证,测定值与标准值无显著差异,相对标准偏差(RSD)均小于 10%,精密度能满足地球化学样品中痕量金的分析要求。

**关键词** 聚氨酯泡沫塑料;金;地球化学样品;ICP-MS

中图分类号:O657.63;TH843

文献标志码:A

文章编号:2095-1035(2021)02-0045-06

## Adsorption and Thiourea Desorption of Trace Gold in Geochemical Samples by Foam Plastics

LIU Tongtong, HUANG Dengli

(Zhangye Geo-mine Survey Institute of Non-ferrous Metal Geological Exploration Bureau  
of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China)

**Abstract** The factors such as pretreatment of polyurethane foam, sample concentration, washing conditions and the effect of matrix elements on gold adsorption rate were discussed. The results showed that the gold content of the solution adsorbed by foam plastics ranged from 5 ng to 500  $\mu\text{g}$ , and the adsorption rate was above 90%. The important conditions that affect the adsorption rate of polyurethane foam plastics are that the base elements should be thoroughly soaked with water, and the slag should be washed in acidic environment before oscillation. Iron and titanium can improve the adsorption rate, sodium, calcium, zinc and slag are have less of effect, aluminum can cause little inhibition. The sensitivity of ICP-MS has a certain correlation with the atomization rate of the medium. The working solution of thiourea medium should be used as the working curve. The internal standard elements can be  $^{103}\text{Rh}$  or  $^{185}\text{Re}$ , but only  $^{103}\text{Rh}$  can be used for high W samples. The method is accurate and reliable, The results show that  $\text{RSD} < 10\%$ , and it can meet the requirements of gold analysis and analysis in geochemical samples.

**Keywords** foam plastics; gold; geochemistry samples; ICP-MS

收稿日期:2020-08-17 修回日期:2020-10-09

作者简介:刘彤彤,男,工程师,主要从事地质样品、土壤样品的光谱分析研究。E-mail:gstvliutt@163.com

引用格式:刘彤彤,黄登丽. 聚氨酯泡沫塑料吸附-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定地球化学样品中的痕量金[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(2): 45-50.

LIU Tongtong, HUANG Dengli. Adsorption and Thiourea Desorption of Trace Gold in Geochemical Samples by Foam Plastics[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(2): 45-50.

## 前言

金在地壳中含量极低且分布不均匀,是区域地球化学调查样品化学成分分析的必测元素之一,区域地球化学调查样品的测定具有含量低、基体复杂、样品量大等特点。因此首先要对试样中的金进行分离富集,常用的金分离富集方法包括:火试金法、活性炭吸附法、泡沫塑料吸附法<sup>[1]</sup>、离子交换法、萃取法、共沉淀法等。测定方法包括火焰原子吸收光谱法、石墨炉原子吸收光谱法、电火花发射光谱法、电感耦合等离子体发射光谱法、电感耦合等离子体质谱法等。其中聚氨酯泡沫塑料吸附-硫脲解脱法操作流程短,工作效率高,成本低,可以大批量进行前处理,电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法因具有方法检出限低、线性范围宽、分析速度快等优点,被广泛应用于痕量金的测定<sup>[2-8]</sup>。聚氨酯泡沫塑料富集法缺点在于吸附率比活性炭低,吸附率在 80%~95%,不同型号,同一实验条件下,泡沫塑料吸附率差异明显。对泡沫塑料进行预处理、水洗条件、基体干扰等前处理的掌控是分析结果可靠性的基础。以往论文对前处理的讨论只得出最优条件,这些实验条件已成为行业常识,但是还没有进行机理探索或对实验现象做出进一步的理论分析,以实现通过现象得出理论,用理论指导生产的目的。

## 1 实验部分

### 1.1 主要仪器

iCAP-Q 型电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔科技有限公司),ICP6300 型电感耦合等离子体光谱仪(美国赛默飞世尔科技有限公司),AA400 型火焰原子吸收(美国珀金埃尔默公司),SX2-8-10 型高温马弗炉(沈阳市节能电炉厂),HY-S 型摇瓶机(金坛市盛威实验仪器厂)。

### 1.2 主要试剂

金标准溶液(1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,编号 GSB 04-1715-2004,国家有色金属及电子材料分析测试中心),泡沫塑料(剪成约 1.0 cm $\times$ 0.5 cm $\times$ 3.0 cm 的小块,每块约 0.1 g)。

实验所用盐酸、硝酸、硫脲等试剂均为分析纯试剂,配制硫脲(2%)及标准溶液用去离子水,其它操作用水为普通自来水。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 泡沫塑料预处理对吸附率的影响

目前有较多聚氨酯泡沫塑料预处理方法的报道,主要有碱处理法、有机试剂处理法<sup>[9]</sup>、酸处理法、HCl 溶液和 NaOH 溶液联合预处理<sup>[10]</sup>、沸水-HCl 处理等<sup>[11]</sup>。将裁剪好的小块泡沫塑料分别用水、HCl(1+10)、NaOH(5%)、乙醇、洗衣粉水、洗洁精水浸泡 0.5 h,用水清洗干净备用。在 250 mL 三角瓶中加入 100 mL 王水(10%),加入 2.00 mL 王水(10%)介质的金标准溶液(50 ng/mL),放 1 块不同预处理的泡沫塑料,在振荡频率为 200 r/min 的摇瓶机上振荡 30 min。取出泡沫塑料,挤干残留水分,放到已加入 10.0 mL 硫脲(1%)的 25 mL 比色管中,沸水浴 30 min,趁热取出泡沫塑料,用标准曲线法测定,实验结果如表 1 所示。

表 1 泡沫塑料的预处理

预处理	吸附率/%	备注
未处理	77.50	干泡沫塑料
氢氧化钠	84.14	干泡沫塑料
盐酸	83.80	干泡沫塑料
乙醇	81.78	干泡沫塑料
洗衣粉	83.72	干泡沫塑料
洗洁精	85.20	干泡沫塑料
水	85.90	干泡沫塑料
氢氧化钠	94.10	水浸透
盐酸	95.00	水浸透
乙醇	93.80	水浸透
洗衣粉	95.30	水浸透
洗洁精	94.50	水浸透
水	94.20	水浸透

从吸附率结果可以得出,无论何种预处理,干泡沫塑料的吸附率在 81%~86%,用水浸透的吸附率明显提高至 95%左右。水浸透的泡沫塑料与干泡沫塑料吸附率差异显著。聚氨酯泡沫塑料是由甲苯二异氰酸酯与多元醇反应而成,成分非常复杂,有些化学基团具有一定的亲水性,可以与金属元素的卤配离子物质结合,有些化学基团具有疏水性,对有机物也有一定的吸附性<sup>[12]</sup>。由于干泡沫塑料孔隙填满空气,在振荡过程中,漂浮在溶液表面,阻碍了金向泡塑表面的扩散和交换,影响了吸附效果。

用  $t$  检验法对氢氧化钠、盐酸、乙醇、洗衣粉、洗洁精、水清洗后的泡沫塑料吸附率进行离群值的检验,不存在显著性差异。这是由于泡沫塑料的饱和吸附容量在 54~160 mg/g 之间<sup>[13]</sup>,实验溶液中的

金含量为纳克级,远小于饱和吸附容量,不同预处理间的吸附差异性体现不出。因此对地球化学样品来说,泡沫塑料的预处理只需要用水完全润湿即可,减少空气泡对吸附效果的影响,必要时可以用表面活性剂清洗一些吸附的油污性的杂质。

## 2.2 泡沫塑料对不同浓度金标准溶液的吸附率

在烘干后的 250 mL 三角瓶中加入一定量的标准溶液,再用 100 mL 滴定管加入王水(10%),使溶液体积为 100 mL,实验条件同 2.1,用 ICP-MS 法测定含金量小于 5 000 ng/100 mL 的样品,含金量在 5 000 ng/100 mL 及以上的样品用火焰原子吸收测定,母液残留用 ICP-MS 法测定,实验结果见表 2。

表 2 泡沫塑料的吸附率

Table 2 Adsorption rate of foam plastics

含量/ (ng · 100mL <sup>-1</sup> )	吸附率/ %	残留浓度/ (ng · mL <sup>-1</sup> )	回收率/ %
5	99.8	0.00	
10	98.5	0.00	
20	96.8	0.01	
50	97.4	0.01	
100	97.4	0.04	101
200	97.5	0.05	100
500	95.0	0.15	98.0
1 000	95.4	0.67	102
2 000	94.8	1.02	99.9
5 000	94.1	3.15	101
10 000	91.5	4.33	95.8
20 000	95.0	6.35	98.2
50 000	94.8	17.6	98.3
100 000	92.0	33.5	95.4
200 000	92.5	71.1	96.1
500 000	92.4	265	97.7

结果表明泡沫塑料吸附的金量及母液残留的金量之和,回收率在 95%以上,随着浓度的增加,泡沫塑料的吸附率逐渐下降,母液残留越多。

对于地球化学样品中金的分析,目的在于异常点普查,吸附率不足不影响异常点验证分析,仍能满足“DZ/T 0130.4—2006”地质矿产实验室测试质量管理规范中金元素的分析要求。对于高品位的金矿石样品来说,吸附率不足对测定的准确度影响较大,这种样品一般要进行二次复核分析。复核时可以通过二次吸附的方法降低母液中金量,从而提高分析结果的准确性。还可以通过将样品溶液分取一定体积,在有较高吸附率的浓度下振荡吸附,最后乘以分取倍数计算出准确浓度。

## 2.3 水洗条件对泡沫塑料吸附率的影响

泡沫塑料吸附后,清洗矿渣的时候会损失一部

分已吸附的金,损失量与水洗条件、时间、挤压力度等操作手法有密切关系<sup>[14]</sup>。为了消除操作手法间的差异,采取加入 100 mL 洗液,振荡 3 min 模拟水洗,取出泡沫塑料后挤干水份,放入干净的三角瓶中,含盐样品需要用自来水或王水(10%)洗去盐分,解脱同上,测定结果见表 3。

表 3 水洗损失的影响

Table 3 Impact of washing

洗液	吸附率/%	备注
去离子水	94.7	
自来水	95.8	
王水(10%)	97.3	
HCl(7%)	97.7	
HNO <sub>3</sub> (3%)	95.1	
NaCl(5%)	95.5	王水去盐
NaCl(5%)	91.8	水洗去盐
NaHCO <sub>3</sub> (0.5%)	81.3	水去盐
NaHCO <sub>3</sub> (0.5%)	83.1	王水去盐

用  $t$  检验法对吸附率进行离群值的检验,用水冲洗,NaCl 洗液(5%)振荡后泡沫塑料中的盐份,与水洗或王水洗,NaHCO<sub>3</sub> 洗液(0.5%)振荡后的盐份存在显著性差异,去离子水、自来水、王水(10%)、盐酸(7%)、硝酸(3%)、NaCl(5%)、王水去盐间不存在显著性差异。实验结果表明,Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>对泡沫塑料对吸附率影响不明显,pH 值对吸附率有显著性的影响,碱性环境下水洗易造成损失。

用王水(10%)洗 NaCl、NaHCO<sub>3</sub> 中的钠盐时损失较少,用自来水洗钠盐时损失较多,这是由于 AuCl<sub>4</sub><sup>-</sup> 在水溶液中存在以下化学平衡:



由化学平衡关系可得出:

$$\frac{[\text{AuCl}_4^-]}{[\text{Cl}^-]} = K \cdot K_{sp}(\text{AuCl}_3)$$

$$\frac{[\text{AuCl}_4^-] \cdot [\text{OH}^-]^3}{[\text{Cl}^-]^4} = K \cdot K_{sp}(\text{Au}(\text{OH})_3)$$

可知 AuCl<sub>4</sub><sup>-</sup> 的稳定性正比于 Cl<sup>-</sup> 的浓度,反比于 OH<sup>-</sup> 的浓度。查询金的物性数据,AuCl<sub>4</sub><sup>-</sup> 的稳定常数  $K = 4.0 \times 10^{25}$  (根据氧化电位计算得出),Au(OH)<sub>3</sub> 的溶度积  $K_{sp}(\text{Au}(\text{OH})_3) = 5.5 \times 10^{-46}$ ,AuCl<sub>3</sub> 的溶度积  $K_{sp}(\text{AuCl}_3) = 1.25 \times 10^{-25}$ 。自来水中 Cl<sup>-</sup> 的浓度通常大于 10 mg/L,pH 值在 7.5~8.5,用自来水洗泡沫塑料孔隙中的矿渣时,不会有 AuCl<sub>3</sub> 生成,由于泡沫塑料孔隙间有酸溶液,冲洗时整体上处于酸性环境下,损失量较少,长时间冲洗

时, pH 值 会 上 升, 当  $\text{pH} > 5.21$  时, 会有  $\text{Au}(\text{OH})_3$  生成, 元素形态的改变影响吸附效果, 造成损失。因此用自来水清洗泡沫塑料时, 冲洗掉大部分矿渣即可, 不能长时间冲洗。

## 2.4 金属离子及矿渣对泡沫塑料吸附率的影响

矿石的基体复杂, 大量存在的金属元素为 Al、Fe、Ti、Ca、Na、Zn 等, 矿渣通常为硅酸盐。在 100 mL 含 Au 量为 100 ng 的王水(10%)中加入相应的金属盐, 矿渣用过 75  $\mu\text{m}$  筛孔的石英砂替代, 其它操作同上, 用 ICP-MS 法测定硫脲解脱液中的 Au, 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定硫脲解脱液中其它金属元素。实验结果见表 4。

表 4 金属离子及矿渣对泡沫塑料吸附率的影响

Table 4 Effect of metal ions and slag on adsorption rate of foam plastics

基体元素	金回收率/ %	残留基体元素/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
对照	95.6	Na(0.36), Ca(0.65), Fe(0.04), Al(0.01), Ti(0.03), Zn(0.01)
(0.1%)氯化铁	97.9	Fe(0.32)
(5%)氯化钠	96.0	Na(3.6)
氯化钠(5.0%) + 氯化铁(0.1%)	97.4	Fe(0.43), Na(5.4)
氯化铝(1.0%)	93.4	Al(0.52)
三氯化钛(0.1%)	96.9	Ti(0.45)
硫酸锌(0.1%)	95.2	Zn(0.23)
氯化钙(4.0%)	95.8	Ca(1.84)
10 g 石英砂	96.8	

实验结果表明, 硫脲解脱溶液中 Al、Fe、Ti、Ca、Na、Zn 等元素可以通过水洗除去, 这些金属元素不会大量带入解脱液中。Fe、Ti 均是地壳中大量存在的金属元素, 形成的金属多氯配合物与氯金酸配合物相比, 泡沫塑料的吸附能力较弱, 易水洗除去, 对泡沫塑料富集金有促进作用。钠盐、钙盐、锌盐及石英砂对泡沫塑料富集金影响不显著, 泡沫塑料适用于碳酸盐类样品, 锌矿石中痕量金的测定。铝盐有微弱的抑制作用, 机理不明, 有待进一步研究。

## 2.5 质谱干扰与校正

### 2.5.1 金的质谱干扰与内标元素的选择

金只有  $^{197}\text{Au}$  一个稳定同位素, 其氧化物质谱干扰是  $^{181}\text{Ta} + ^{16}\text{O}$ , 由于 Ta 的难溶于王水中, 氧化物质谱干扰通常不考虑, 氢化物质谱干扰是比金丰度更低的  $^{196}\text{Pt} + ^1\text{H}$ , 1 000 ng/mL 的 Pt 造成的质谱干扰小于 50 cps, 可以忽略不计。

测定金的内标元素应该选择地壳中丰度比金更稀有的元素, 通常用  $^{185}\text{Re}$  和  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{185}\text{Re}$  与  $^{197}\text{Au}$  质量数接近, 质量歧视效应较小, 是 DZ/T 0279.4—

2016 推荐使用的内标元素。Re 由于在焙烧过程中可以挥发除去, 样品引入的 Re 远低于内标浓度 5 ng/mL, 可以忽略不计。用 Re 作内标时存在  $^{185}\text{Re} + ^{12}\text{C}$  对  $^{197}\text{Au}$  的质谱干扰, Re 的浓度为 5 ng/mL 时, 这种干扰可以忽略不计。对于祁连山钨异常区域, 存在  $^{184}\text{W} + ^1\text{H}$  的质谱干扰, 内标  $^{185}\text{Re}$  不稳定, 此时可以选用  $^{103}\text{Rh}$  作为内标元素。Rh 只有  $^{103}\text{Rh}$  一个稳定的同位素, 比 Au 更稀有, 且大多数形态的 Rh 难溶于王水中, 样品中引入的 Rh 远低于内标浓度 5 ng/mL。  $^{103}\text{Re}$  的氧化物质谱干扰元素是  $^{87}\text{Rb} + ^{16}\text{O}$ , 泡沫塑料对 Rb 没有吸附作用, 不会对  $^{103}\text{Rh}$  造成干扰。

### 2.5.2 标准溶液介质对测定的影响

配制王水(10%)介质与硫脲介质(1.5%)的 Au 标准溶液, 浓度均为 1.0 ng/mL, 以含有 5.0 ng/mL Rh、5.0 ng/mL Re 的溶液为内标, 测得的离子计数(cps)如图 1 所示。

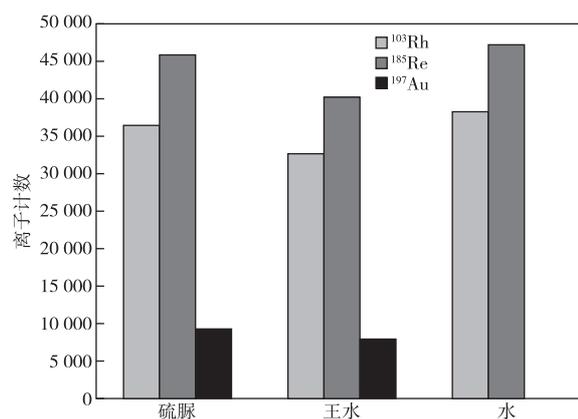


图 1 介质对离子计数的影响

Figure 1 Effect of media on ion counting.

Au 的离子计数(cps), 王水(10%)介质 < 硫脲(1.5%)介质; 内标元素的离子计数(cps), 王水(10%)介质 < 硫脲(1.5%)介质 < 纯水, 说明 ICP-MS 法对介质比较敏感。

在 25  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 测定水、硫脲、王水(10%)的密度, 用重量法测定进样 5 min 时的体积, 排废体积, 从而间接测得雾化率, 实验结果如表 5 所示。

从实验结果可以得出, 三种介质均是由蠕动泵引入雾化室, 进样体积是相等的, 证明蠕动泵对介质不敏感。雾化率差异显著, 水 > 硫脲 > 王水(10%), 与内标离子计数强度差异为正相关。可以得出, 相同浓度的标准溶液, 不同介质离子计数的差异主要是由于雾化率不同引起的, 用 ICP-MS 法测定金时, 应当使用与样品基体相匹配的硫脲介质为工作曲线。

表 5 三种介质的雾化率

Table 5 Atomization rate of third medium

进样介质	密度/ (g · mL <sup>-1</sup> )	进样体积/ mL	排废体积/ mL	雾化率/ %
水	0.997 0	3.47	3.10	10.65
硫脲	1.001	3.49	3.15	9.70
王水	1.028	3.48	3.19	8.52

## 2.6 准确度与精密度实验

用国家一级标准物质进行准确度与精密度实验,每个标准物质做 12 份,同时做空白实验,测定结果见表 6。

表 6 方法精密度、准确度实验

Table 6 The test of precision, accuracy

/(ng · g<sup>-1</sup>)

标准物质	标准值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均值	RSD <sup>1)</sup>	t
GBW07805	0.85±0.05	0.79	0.82	0.90	0.88	0.85	0.91	0.84	0.8	0.76	0.93	0.92	0.9	0.86	6.5	0.34
GBW07243a	1.6±0.1	1.65	1.46	1.73	1.53	1.74	1.53	1.52	1.49	1.63	1.73	1.67	1.74	1.62	6.6	0.06
GBW07244a	5.1±0.2	4.74	4.63	4.92	4.61	5.24	4.66	5.54	5.28	4.87	5.31	4.9	5.29	5.0	6.3	0.16
GBW07245a	10.5±0.5	9.59	10.3	11.03	9.51	9.78	9.84	10.21	9.84	11.05	10.79	10.67	9.82	10.2	5.5	1.18
GBW07247	50±2	53.2	47.4	46.7	51.6	46.9	47.9	53.5	49.6	51.7	47	50.2	45.6	49.3	5.5	0.12
空白		0.016	0.017	0.016	0.026	0.028	0.019	0.026	0.017	0.021	0.016	0.019	0.028	0.021		

注:1)单位为%。

## 3 结论

对于地球化学样品来说,泡沫塑料的不同预处理方法没有显著性差异,吸附率在 95%以上。影响吸附率的重要条件是振荡前要用水完全浸透,测定时可以用工作曲线校正吸附率不足引起的偏差。随着溶液中金浓度的增加,泡沫塑料的吸附率逐渐下降,母液残留越多,不影响地球化学样品中金元素异常点查证的分析要求,对于高品位的金矿石,吸附率的下降值得注意。铁、钛离子对泡沫塑料富集金有促进作用,钠盐、钙盐、锌盐、氯离子及矿渣影响不显著,铝盐有微弱的抑制作用。通过水洗,可以去除铁、钛、铝、钠、钙等可溶性基体元素及矿渣等难溶基体,酸性条件下水洗损失量较少,碱性环境下容易造成水洗损失,用偏碱性的自来水清洗矿渣时需要注意冲洗时间不能过长。ICP-MS 法对介质比较敏感,这是由于不同介质,雾化率不同引起的,因此应当使用与样品基体相接近的标准溶液作工作曲线,高 W 含量样品应当用<sup>103</sup>Rh 作为内标。用金标准物质确认,方法的准确度与精密度符合 DZ/T 0130.4—2006 地质矿产实验室测试质量管理规范中金元素的分析要求。

### 参考文献

[1] 冉恒星. 泡沫塑料富集-原子吸收光谱法测定铅精矿中的金[J]. 中国无机分析化学, 2015, 5(3): 45-47.

从测试结果来看,每份试样测定结果均不超差,接近保证值。每个标准物质平均值的相对标准偏差 RSD 均小于 10%,用 *t* 检验法进行均值的显著性检验分析可知,所有样品的 |*t*| 值均小于临界值  $t_{0.05,11} = 2.20$ ,说明本方法得到的结果与保证值间没有显著性差异。准确度与精密度符合 DZ/T 0130.4—2006 地质矿产实验室测试质量管理规范中金元素的分析要求。

12 份空白试样的标准偏差为 0.005 ng/g,按 3 倍标准偏差计算检出限得仪器的检出限为 0.015 ng/g。

RAN Hengxing. Determination of gold in lead concentrate by atomic absorption spectrometry with polyurethane foam pre-concentration[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2015, 5(3): 45-47.

[2] 马景治,李策,张明杰,等. 王水溶样-电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中的金[J]. 中国无机分析化学, 2020, 10(2): 48-51.

MA Jingzhi, LI Ce, ZHANG Mingjie, et al. Direct determination of gold in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry with aqua regia sampling preparation[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, 10(2): 48-51.

[3] 金倩,李晓敬,陈庆芝,等. 聚氨酯泡沫塑料吸附-电感耦合等离子体质谱法测定化探样品中的痕量金[J]. 黄金, 2018, 39(3): 80-82.

JIN Qian, LI Xiaojing, CHEN Qingzhi, et al. Determination of trace gold in geochemical samples by the polyurethane foam plastics absorption-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Gold, 2018, 39(3): 80-82.

[4] 王趁荣,李晓敬,陈庆芝,等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定地质样品中的金[J]. 中国无机分析化学, 2017, 7(1): 32-34.

WANG Chenrong, LI Xiaojing, CHEN Qingzhi, et al. Determination of gold in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2017, 7(1): 32-34.

- [5] 胡智,覃盛,赵平涛,等. 聚氨酯泡沫塑料分离富集内标校正 ICP-MS 法测定水系沉积物及土壤中的痕量金[J]. 化工技术与开发,2017,47(7):42-45  
HU Zhi, QIN Sheng, ZHAO Pingtao, et al. Determination of trace gold in stream sediment and soil by internal standard calibration ICP-MS method separated and enriched with polyurethane foam [J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2017, 47(7): 42-45.
- [6] 侯江颖. 区域地质调查土壤样品中痕量金的测试-泡沫塑料吸附-电感耦合等离子体质谱法[J]. 科技资讯, 2016, 14(17): 70-72.  
HOU Jiangying. Measurement of trace gold in soil samples by regional geological survey foam plastics adsorption inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Science Technology Information, 2016, 14(17): 70-72.
- [7] 樊勇,修凤凤,韩一帆. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定地球化学样品中的痕量金[J]. 中国无机分析化学, 2017, 7(2): 18-21.  
FAN Yong, XIU Fengfeng, HAN Yifan. Determination of trace gold in geochemical samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry with water-bath digestion [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2017, 7(2): 18-21.
- [8] 曾庆庭. 泡沫塑料吸附-电感耦合等离子体质谱法测定区域地球化学样品中痕量金方法探讨[J]. 广东化工, 2018, 45(13): 251-252.  
ZENG Qingting. A method for determination of trace gold in regional geochemical samples by foam adsorption-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(13): 251-252.
- [9] 艾晓军,鞠军. 泡沫塑料富集分离金中几个问题的探讨[J]. 黄金, 2008, 29(2): 46-49.  
AI Xiaojun, JU Jun. Discussion on several problems in the separation and enrichment of foam plastics [J]. Gold, 2008, 29(2): 46-49.
- [10] 马怡飞,汪广恒,高文旭. 聚氨酯泡沫塑料富集-电感耦合等离子体发射光谱法测定地质样品中的金[J]. 化学分析计量, 2018, 27(1): 59-63.  
MA Yifei, WANG Guangheng, GAO Wenxu. Determination of gold in geological sample by ICP-OES with polyurethane foaming plastic [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2018, 27(1): 59-63.
- [11] 任英,雷中利,张晶玉. 泡沫塑料动态快速分离富集金方法的研究[J]. 分析化学, 1993, 21(1): 99-101.  
REN Ying, LEI Zhongli, ZHANG Jingyu. Study on the method of dynamic rapid separation and enrichment of foam plastics [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 1993, 21(1): 99-101.
- [12] 冯尚彩,余天桃,庄会荣,等. 泡沫塑料分离富集技术的应用现状[J]. 理化检验(化学分册), 2000, 36(11): 522-525  
FENG Shangcai, YU Tiantao, ZHUANG Huirong, et al. The present status of the application of technique of separation and concentration with foam plastics [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2000, 36(11): 522-525.
- [13] 熊昭春. 聚氨酯泡沫塑料分离富集之应用与进展综述[J]. 岩石矿物及测试, 1985, 3(4): 278-283.  
XIONG Zhaochun. A summary of application of polyurethane foam in separation and preconcentration techniques [J]. Rock and Mineral Analysis, 1985, 3(4): 278-283.
- [14] 王川. 泡沫塑料富集金后水洗时金的损失及其它注意事项[J]. 甘肃冶金, 2010, 32(2): 67-68.  
WANG Chuan. Enriched foam when washing the money after the loss of gold and other notes [J]. Gansu Metallurgy, 2010, 32(2): 67-68.