徐卓,李力力,朱留超,等. Eichrom Sr 树脂用于铀矿浓缩物中铅锶的分离富集研究[J]. 岩矿测试,2019,38(1):55-61. XU Zhuo, LI Li-li, ZHU Liu-chao, et al. Application of Eichrom Sr Resin to the Separation and Enrichment of Lead and Strontium in Uranium Ore Concentrates[J]. Rock and Mineral Analysis,2019,38(1):55-61.

[DOI: 10.15898/j. cnki. 11 – 2131/td. 201803260031]

Eichrom Sr 树脂用于铀矿浓缩物中铅锶的分离富集研究

徐卓,李力力*,朱留超,赵兴红,黄声慧,赵立飞 (中国原子能科学研究院放射化学研究所,北京 102413)

摘要:铀矿浓缩物的溯源研究在核法证学中具有重要地位,通过测量其中的铅、锶同位素丰度比能为溯源提供部分地理指示信息。对铀矿浓缩物中铅、锶同位素的精准测量主要受制于大量铀与微量铅、锶的分离、富集。本文利用 Eichrom Sr 树脂对铅、锶的特效吸附性,通过正交试验对影响铅、锶回收率的主要因素(淋洗酸度、流速、体积)进行了优化,确定了最佳淋洗条件;进而利用 UTEVA 树脂对铀的特效吸附性,与 Eichrom Sr 树脂联用,实现了铀矿浓缩物中大量铀与微量铅、锶的分离,有效降低了因铅、锶洗脱液中铀含量过高而引起的基体效应。实验结果表明:铅、锶回收率均>90%,铅、锶洗脱液中的铀含量低于 500ng,优于文献报道值(48.8μg)。利用该方法对实际铀矿浓缩物样品进行测量,分析结果显示铅、锶同位素丰度比可以作为铀矿浓缩物的地理溯源判据,为今后建立铀矿浓缩物中铅、锶同位素数据库提供技术支持。

关键词: Eichrom Sr 树脂; 铀矿浓缩物; 铅; 锶; 基体效应

要点:

(1)选取铀矿浓缩物作为研究对象,对其中铅、锶进行不同条件的分离研究。

(2) 通过 Eichrom Sr 树脂和 UTEVA 树脂联用有效降低铅、锶洗脱液中铀含量,低于文献报道值48.8µg。

(3) 对实际铀矿浓缩物中铅、锶同位素丰度进行初步溯源研究。

(4)该分离方法为铀矿浓缩物中铅、锶同位素丰度比数据库建立提供技术支持。

中图分类号: 0614.62; 0657.75 文献标识码: A

铀矿浓缩物(俗称"黄饼"),作为核燃料循环的 中间产物,是一种主要成分为重铀酸铵或三碳酸铀 酰铵的复杂化合物,其中²³⁵U的丰度为0.7%,状态 稳定,敏感度低,易于储存和运输,在涉核的国际贸 易中流通较为频繁。且近年来各个国家对敏感核材 料的管控逐渐加强,法国、加拿大和南非等同位素生 产大国均承诺减少高浓铀生产,甚至开始尝试改用 低浓铀^[1]。因此,涉及铀矿浓缩物等初级核材料的 核走私活动有取代敏感核材料的趋势,成为核法证 学关注的重点核材料之一。在核法证学针对铀矿浓 缩物的溯源研究中,地理信息备受关注。目前认为 具有溯源潜力的地理指纹主要为 Pb、Sr 等同位素组 成和稀土元素分布模式组成。其中 Pb、Sr 等同位素 组成在铀矿浓缩物的地理溯源研究中占有重要地 位,这主要是由于 Pb、Sr 等重元素在铀矿浓缩物生 产过程中的同位素分馏效应很小,矿石中 Pb、Sr 同 位素组成可最大程度地保留其中,成为溯源判据。 目前,美国的 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory,劳伦斯·利弗莫尔实验室)建立了铀矿 浓缩物中 Pb、Sr 同位素组成全球范围内的数据 库^[2]; 欧盟的 ITU (Institute for Transuranium Elements,超铀元素研究所)和澳大利亚 ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation,澳大利亚核科学与技术组织)也相继开 展了铀矿浓缩物或铀矿中 Pb 的溯源研究^[2]。而我 国将 Pb、Sr 同位素丰度比应用于环境监测^[3-8]、产

收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-06-01; 接受日期: 2018-06-11

作者简介:徐卓,硕士研究生,专业为核燃料循环与材料研究。E-mail: 13671072607@163.com。

通信作者:李力力,博士,研究员,主要从事核燃料循环与材料研究。E-mail: 13641368967@139.com。

地溯源^[9-11]和矿石年龄测定^[12-13]等领域的报道很 多,而对铀矿浓缩物中 Pb、Sr 的溯源研究鲜以报道。

对铀矿浓缩物中 Pb、Sr 同位素精准测量在很大 程度上取决于微量 Pb、Sr 与大量铀基体的分离。目 前,LLNL 的 Balboni 等^[14]利用 AG50W – X8 树脂将 铀矿浓缩物中 Sr 和稀土元素分离出来,并进行了溯 源研究;ITU 的 Varga 等^[15]利用单一 Eichrom Sr 树 脂和0.05 mol/L 硝酸将铀矿浓缩物中 Sr 分离出来, 根据文献信息,推算出在 Sr 回收液中的铀含量仍然 高达 1.8 μ g,这在质谱测量中会产生严重的基体效 应;Švedkauskaite – LeGore 等^[16]利用 Eichrom Pb 树 脂和0.1mol/L 碳酸铵将铀矿浓缩物中的 Pb 分离出 来,但由于 Eichrom Pb 树脂对 Pb 的单一吸附性和 洗脱试剂的特殊性,如需用有机试剂^[17],并且难以 实现铀矿浓缩物中 Pb、Sr 同时分离。因此,需考虑 适当的分离方式,以期能同时实现铀矿浓缩物中的 大量 U 与微量 Pb、Sr 分离以及 Pb、Sr 高效富集。

电感耦合等离子体质谱(ICP - MS)具有高精 度、高准确度的技术优势,是测量同位素比值的常用 技术手段,也是分析铀矿浓缩物中 Pb、Sr 同位素比 值的有效选择^[18]。因此,建立能够满足 ICP - MS 测量要求的 Pb、Sr 与 U 分离流程是利用 Pb、Sr 同位 素比进行铀矿浓缩物地理溯源的先决条件。本研究 利用 Eichrom Sr 树脂对 Pb、Sr 和 UTEVA 树脂对 U 的高效吸附性,拟采用两种树脂联用的方式,通过 优化 U、Pb、Sr 的淋洗条件,建立一套能够同时分离 铀矿浓缩物中 U、Pb、Sr 的方法,为 ICP - MS 准确测 量 Pb、Sr 同位素比奠定基础。

1 实验部分

1.1 仪器及工作条件

PE-300Q型电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司), (仪器工作条件为: ICP 射频功率 1150W, 脉冲阶段电压 750V, 等离子体气流量 18L/min,辅助气流量 1.4L/min,雾化气流量 0.95 L/min。

1.2 实验材料与主要试剂

标准铀矿浓缩物(核工业北京化工冶金研究 院)。

X、Y两种实际铀矿浓缩物样品(产地:中国,具体不详)。

U 单元素溶液标准物质 GBW(E)080173(核工 业北京化工冶金研究院);Pb单元素溶液标准物质 GBW08619(中国计量科学研究院);Sr 单元素溶液标准物质 GSB04 - 1754 - 2004(国家有色金属及电子材料分析测试中心)。

硝酸(BV – Ⅲ级,北京化学试剂研究所);盐酸 (优级纯,国药集团化学试剂有限公司);实验用水 (Milli – Q 水,电阻率 18.2MΩ · cm,购自美国 Millipore 公司)。

Eichrom Sr 树脂, UTEVA 树脂(100~150μm, 购 自法国 TRISKEM 公司); 色层分离柱: Φ4mm。

1.3 铀矿浓缩物中 Pb、Sr 分离方法

采用湿法装柱,分离柱高约为1cm。装好后分 别用 5mL 去离子水和 2mL 8mol/L 盐酸清洗分离 柱,将分离柱中的天然 Pb 淋洗掉。

用 3mL 2mol/L 硝酸平衡分离柱,移取一定量样 品液至分离柱,待样品液缓慢流过 Eichrom Sr 树脂 后,先用 4mL 2mol/L 硝酸将吸附在树脂上 U 和其 他杂质元素去除,然后用 4mL 0.01mol/L 硝酸将 树脂上 Sr 淋洗至溶液中,再用 2mL 3mol/L 盐酸 进行淋洗,将树脂转为 Cl⁻体系,最后用 3mL 8mol/L盐酸将树脂柱上 Pb 淋洗下来(流速约 0.2mL/min)。将 Pb、Sr 混合溶液蒸至近干,加入 1mL 3mol/L 硝酸,用 3mL 3mol/L 硝酸平衡分离 柱,将混合溶液移至分离柱,待其缓慢流过 UTEVA 树脂后,收集流出液,蒸至近干后加入 1mL 2% 硝酸,作为待测液。

2 结果与讨论

2.1 铅锶上柱酸度

上柱酸度的选择原则为尽可能将混合溶液中的 Pb、Sr 吸附在树脂上。配制 6 份 Pb(5mL 1000 ng/mL)、Sr(5mL 1000ng/mL)混合标准溶液,将其 硝酸酸度分别调节为1、2、3、4、5、6mol/L,收集经树 脂柱吸附后的流出液,测量其 Pb、Sr 含量,通过树脂 相与水相含量比值确定 Pb、Sr 的最佳上柱酸度。 实验结果如表 1 所示:在 1~6mol/L 硝酸体系下, K_{Pb} 值的顶点为 2mol/L 硝酸(K = 1277),而后随硝 酸酸度上升不断下降; K_{Sr} 值随硝酸酸度增加而上 升,在 2~6mol/L 硝酸体系下, K_{Sr} 的增长趋势明显 变小,并逐渐趋于平稳。比较 K_{Pb} 和 K_{Sr} 发现:在 1~6mol/L硝酸体系下, K_{Pb} 均大于 K_{Sr} 表明 Eichrom Sr 树脂对 Pb 有更强的吸附性能。因此,以 Pb 的分 配比为主要参考指标,选择低酸上柱,将 2mol/L 硝 酸作为最终上柱酸度。

表	1	Eichrom	Sr	树脂柱	Ŀ	Pb,Sr	分配比	
---	---	---------	----	-----	---	-------	-----	--

Table 1 Distribution ratio of Pb and Sr on Eichrom Sr resin

实验序号	硝酸酸度(mol/L)	Pb/K	Sr/K
1	1	1063	83
2	2	1277	96
3	3	1253	96
4	4	889	99
5	5	726	100
6	6	578	100

注:K=树脂相含量/液相含量。

2.2 铅锶淋洗正交试验结果

在铀矿浓缩物样品中,Pb、Sr 含量很低,若在淋 洗过程中淋洗不完全,则会导致回收率偏低,致使在 后续同位素丰度比测量中,无法满足质谱测量的浓 度要求。因此,本研究拟采用3因素3水平的正交 实验法,分别进行三组实验,按表2所列分别考察 Pb、Sr 的淋洗酸度、流速和淋洗体积对回收率的影 响,确定其最佳淋洗条件。

以 Sr 的回收率作为评定指标,采用极值分析法 对表 3 的数据进行分析,表中 A(酸度)、B(流速)、 C(体积)三因素的极差 R 大小顺序为 C > B > A,表 明因素 C 对 Sr 回收率的影响极为显著,因素 B 的影 响较为显著,而因素 A 对结果的影响效果最小。通 过比较同一因素不同水平的 T_i值发现:A1、B3 和 C3 的 T 值最大,表明在 A 因素 1 水平、B 因素 3 水平和 C 因素 3 水平下,Sr 的回收率最佳,即淋洗酸度为 0.01mol/L 硝酸,淋洗流速为 0.2mL/min,淋洗体积 为 4mL。在此条件下,三次实验对 Sr 的平均回收率 为 93.2%,能够很好地将溶液中的 Sr 回收。

表 2 Pb、Sr 正交试验

Table 2 Orthogonal tests of Pb and Sr

	因素	因素 B	因素 C	
水平	Sr 淋洗酸度 (硝酸,mol/L)	Pb 淋洗酸度 (盐酸,moL/L)	淋洗流速 (mL/min)	淋洗体积 (mL)
1	0.01	6	1	2
2	0.05	7	0.5	3
3	0.1	8	0.2	4

同样以 Pb 的回收率作为评定指标对表 4 得到 的数据进行分析:三因素 A、B、C 的 R 值大小顺序为 A > B > C,且 A 的 R 值明显大于 B 和 C 的 R 值,表 明因素 A 对 Pb 回收率的影响极为显著,因素 B 对 回收率的影响显著,而因素 C 对结果的影响较小。 通过比较A、B因素下不同水平的T,值发现:A3和

表 3 不同酸度、流速和体积条件下 Sr 的正交试验结果

Table 3 Orthogonal test results of Sr in various acidity, current velocity and volume

	影响因素			Sr 回收率(%)			
实验 序号	A (mol/L)	B (mL/min)	C (mL)	组1	组2	组3	平均值
1	0.01	1	2	68.1	72.4	72.2	70.9
2	0.01	0.5	3	79.9	78.5	82.1	80.2
3	0.01	0.2	4	92.9	94.7	92.1	93.2
4	0.05	1	3	75.1	78.8	76.2	76.7
5	0.05	0.5	4	86.5	88.8	86.2	87.2
6	0.05	0.2	2	69.5	70.8	69.5	69.9
7	0.1	1	4	83.2	82.3	79.8	81.8
8	0.1	0.5	2	65.7	67.6	63.8	65.7
9	0.1	0.2	3	89.8	86.9	88.5	88.4
T_1	732.9	688.1	619.6				
T_2	701.4	699.1	735.8				
T_3	707.6	754.7	786.5				
\overline{x}_1	81.4	76.5	68.8				
\overline{x}_2	77.9	77.7	81.8				
\overline{x}_3	78.6	83.9	87.4				
R	3.5	7.4	18.5				

注: T_i代表各因素相同水平实验结果之和,同一因素下,T值越大表 明该水平对结果影响的贡献越大;R代表极差,即各水平最大与 最小平均值之差,其大小反映了各个因素对结果的影响,R值越 大,表明该因素对结果的影响越大; x_i代表实验结果的平均值。

表 4 不同酸度、流速和体积条件下 Pb 的正交试验结果

 Table 4
 Orthogonal test results of Pb in various acidity, current velocity and volume

	影响因麦			Ph 同收索(%)			
实验	影响凶永			110回仅平(70)			
序号	A	B	C	组1	组2	组 3	平均值
	(mol/L)	(mL/min)	(mL)				
1	6	1	2	58.2	61.5	58.9	59.5
2	6	0.5	3	63.6	66.1	64.5	64.7
3	6	0.2	4	71.7	69.1	72.9	71.2
4	7	1	3	75.3	76	74.5	75.3
5	7	0.5	4	80.3	81.4	79.3	80.3
6	7	0.2	2	76.6	78.1	77.7	77.5
7	8	1	4	80.1	82.8	81.6	81.5
8	8	0.5	2	81.4	82.6	82.7	82.2
9	8	0.2	3	93.5	92.8	92.4	92.9
T_1	586.5	648.9	657.7				
T_2	699.2	681.9	698.7				
T_3	769.9	724.8	699.2				
x_1	65.2	72.1	73.1				
x_2	77.7	75.8	77.6				
<i>x</i> ₃	85.5	80.5	77.7				
R	20.4	8.4	4.6				

B3 的 T 值均为该因素下最大值,而 C 因素下 T₂与 T₃接近,表明 C 2与 C 3对回收率的影响接近。因 此,将淋洗酸度 8mol/L 盐酸,淋洗流速 0.2mL/min, 淋洗体积 3mL 作为 Pb 的最佳淋洗条件,三次实验 对 Pb 的平均回收率为 92.9%,能够很好地将溶液 中的 Pb 回收。

2.3 铀淋洗条件

配制 U(0.5mg)、Pb(5µg)、Sr(5µg)的混合标 准溶液,将其调制成2mol/L 硝酸的介质,以保证溶 解液中微量 Pb、Sr 尽可能吸附在树脂相。将 U 淋洗 量定为2、4、6mL,按2.2节条件实验中得到的Pb、Sr 淋洗条件来进行试验,考察在2mol/L 硝酸体系下不 同淋洗体积对 U 的去除效果。实验结果表明: 当淋 洗体积为 2mL 时, Pb、Sr 洗脱液中的 U 含量约为 7µg, 而经4mL 和6mL 2mol/L 硝酸淋洗后, Pb、Sr 洗 脱液中的 U 含量相近,均为0.8µg 左右。采用质谱 测量 Pb、Sr 同位素丰度比值时,需要将 Pb、Sr 回收 液转化为2%硝酸体系,并将其浓缩为1mL,以满足 质谱测量 Pb、Sr 的浓度和纯度要求。质谱测量结果 显示:0.8µg/mLU的信号值约为5V,低于10V(法 拉第杯测量上限),满足了测量要求;而7µg/mLU 的信号值则明显大于10V。因此,将4mL 2mol/L 硝 酸作为U的最佳淋洗体积。

2.4 实际铀矿浓缩物样品中的铀与铅锶分离

由于混合标准溶液中 U 含量(0.5mg)与实际铀 矿浓缩物中 U 含量相距甚远,由 2.3 节得到的 U 淋洗体积,未必适用于铀矿浓缩物中大量 U 的去 除。因此,在分离目标元素 Pb、Sr 之前,需首先考察 4mL 2mol/L 硝酸对铀矿浓缩物样品中 U 的去除效 果,验证流程的可行性。

取 50mg 标准铀矿浓缩物样品,经浓硝酸溶解、 调节酸度后上柱,测量发现:经 4mL 2mol/L 硝酸淋 洗后,Pb、Sr 回收液中的 U 含量虽然从 mg/mL 级降 至 μg/mL 级,但其信号值依然远远大于 10V,在此 U 浓度下进行 Pb、Sr 同位素丰度比测量将产生严重 的基体效应,使得测量结果存在偏差。

因此,采用铀特效吸附树脂 UTEVA 与 Eichrom Sr 树脂联用的方式进行 U 与 Pb、Sr 的有效分离,即 先按 2.2 节的淋洗条件进行分离,再将 Pb、Sr 洗脱 液经过 UTEVA 树脂去除 U。

2.5 铀矿浓缩物标准样品中的铅锶分离

用天平称取 600mg 铀矿浓缩物标准样品(含 3µg 的 Pb、Sr)进行溶解,按上述制定的分离流程对 铀矿浓缩物样品进行试验,将洗脱液浓缩至 1mL,分 別测量 U、Pb、Sr 含量。结果表明:6 次平行试验所 得到的 Pb、Sr 平均回收率均为 90% 左右,洗脱液中 的 U 含量均 < 500ng,表明该分离方法能很好地去 除铀矿浓缩物中大量 U 基体,实现微量 Pb、Sr 的连 续分离。与 Varga 等^[15]实验结果相比(Pb、Sr 回收 液中 U 含量分别为 47μg 和 1.8μg),本研究建立的 分离方法对 U 的去除效果明显更优,显著降低了因 U 含量过高引起的基体效应,避免了对仪器造成 污染。

2.6 实际铀矿浓缩物样品中的铅锶溯源研究

称取 X、Y 两种铀矿浓缩物样品各 400mg 进行 溶解,按 2.2~2.4 节中的分离流程进行试验,将洗 脱液浓缩至 1mL,分别测量 Pb、Sr 同位素丰度比,测 定结果见表 5。采用数据显著性差异方法,对 X 和 Y 的²⁰⁸ Pb/²⁰⁴ Pb、²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb、²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 和⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 的平均值进行分析,结果发现:来自于 X 和 Y 两个 地 区 的²⁰⁸ Pb/²⁰⁴ Pb、²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb、²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 和 ⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr值均存在显著性差异(P < 0.05, n = 4),表 明铀矿浓缩物中 Pb、Sr 同位素丰度比反映出不同地 区地质中 Pb、Sr 同位素组成特征,能为核法证中铀 矿浓缩物溯源研究提供地理定位信息。

表 5 实际铀矿浓缩物样品中 Pb、Sr 同位素丰度比

Table 5 Isotope abundance ratio of Pb and Sr in actual uranium ore concentrate sample

样品编号	$^{208}\mathrm{Pb}/^{204}\mathrm{Pb}$	$^{207}{\rm Pb}/^{204}{\rm Pb}$	$^{206}{\rm Pb}/^{204}{\rm Pb}$	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
X1	39.16	17.09	46.53	0.71683
X2	39.18	17.02	46.84	0.71685
X3	39.09	16.92	46.34	0.71683
X4	39.92	17.06	46.87	0.71693
平均值	39.34	17.02	46.64	0.71686
RSD(%)	0.3	0.4	0.6	0.007
Y1	38.207	15.596	18.019	0.71892
Y2	38.219	15.613	17.968	0.71903
Y3	38.181	15.628	18.022	0.71888
Y4	38.247	15.624	18.011	0.71890
平均值	38.214	15.615	18.005	0.71893
$\mathrm{RSD}(\ \%\)$	0.07	0.09	0.14	0.010

3 结论

本研究利用 Eichrom Sr 树脂对 Pb、Sr 的特效吸附性,通过优化实验,确定了其最佳淋洗条件;进而采用 Eichrom Sr 树脂与 UTEVA 树脂联用方式,实现了铀矿浓缩物中微量 Pb、Sr 与大量铀基体的分离。结果表明:经过优化的分离流程对 Pb、Sr 回收率均大于 90%,Pb、Sr 洗脱液中的铀含量低于 500ng,分离效果好于目前所见国内外文献报道,满足了后续

ICP-MS对 Pb、Sr 精准测量的需求。利用该方法对 两种实际铀矿浓缩物样品进行了分离和测量,数据 显示来自不同地区的铀矿浓缩物中 Pb、Sr 同位素存 在较大差异,能够区分不同产地的铀矿浓缩物,表明 Pb、Sr 同位素丰度比可作为一种地理溯源判据。

本研究建立的铀矿浓缩物中微量 Pb、Sr 的分离 方法,为我国铀矿浓缩物中 Pb、Sr 同位素丰度数据 库的建立提供了技术支撑。

4 参考文献

[1] 郭晓兵.奥巴马政府核安全外交的特点及未来走势 [J].现代国际关系,2016(3):9-13.

Guo X B. Characteristics and prospective tendency of Obama administration's nuclear security diplomacy[J]. Modern International Relations, 2016(3):9-13.

- Keegan E, Kristo M J, Colella M, et al. Nuclear forensic analysis of an unknown uranium ore concentrate sample seized in a criminal investigation in Australia [J].
 Forensic Science International, 2014, 240 (3): 111 – 121.
- [3] 孙境蔚,于瑞莲,胡恭任,等.应用铅锶同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析[J].环境科学,2017,38(4):1566-1575.

Sun J W, Yu R L, Hu G R, et al. Assessment of heavy metal pollution and tracing sources by Pb & Sr isotope in the soil profile of woodland in Quanzhou [J]. Environmental Science, 2017, 38(4):1566 – 1575.

 [4] 王华,石振家,刘萱,等.大连典型滩涂养殖区菲律宾 蛤仔体内 Pb 含量及溯源[J].海洋环境科学,2014,33 (1):78-82.

Wang H, Shi Z J, Liu X, et al. Concentration and pollution sources of lead in Ruditapes Philippinarum in Dalian typical coastculture areas [J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(1):78 – 82.

- [5] 孙慧,毕如田,郭颖,等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析[J]. 环境科学学报,2018,38(2):704-714.
 Sun H, Bi R T, Guo Y, et al. Source apportionment analysis of trace metal contamination in soils of Guangdong Province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantia,2018,38(2):704-714.
- [6] 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,等.泉州市大气降尘中金属 元素污染特征及来源解析[J].环境科学,2016,37
 (8):2881-2888.

Zhang Z W, Hu G R, Yu R L, et al. Characteristics and source apportionment of metals in the dustfall of Quanzhou city[J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2881 – 2888. [7] 胡恭任,于瑞莲,郑志敏.铅稳定同位素在沉积物重金 属污染溯源中的应用[J].环境科学学报,2013,33
(5):1326-1331.
Hu G R,Yu R L,Zheng Z M. Application of stable lead isotopes in tracing heavy-metal pollution sources in the

sediments [J]. Acta Scientiae Circumstantia, 2013, 33 (5):1326 – 1331.

- [8] 李雪泓,赵强,王茜,等.²¹⁰Pb分析方法在成都大气气 溶胶中的应用[J].四川环境,2017,36(4):142-146. Li X H, Zhao Q, Wang Q, et al. Application of ²¹⁰Pb analysis method in aerosol determination of Chengdu [J]. Sichuan Environment,2017,36(4):142-146.
- [9] 王朝辉,张亚婷,闵伟红,等.水稻品种对大米产地溯 源判别正确性的影响[J].吉林农业大学学报,2017, 39(1):113-119.
 Wang C H, Zhang Y T, Min W H, et al. Effects of rice varieties on accuracy of rice origin discrimination [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2017, 39(1): 113-119.
- [10] 李向辉,陈云堂,吕晓华,等.利用土壤 Sr Pb 同位素
 差异性判别山药原产地研究[J].核农学报,2018,
 32(3):515-522.

Li X H, Chen Y T, Lü X H, et al. Application of Sr-Pb isotopic difference of soils in Yam origin identification [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32 (3):515-522.

[11] 王利超,胡文瑄,王小林,等. 白云岩化过程中锶含量 变化及锶同位素分馏特征与意义[J]. 石油与天然气 地质,2016,37(4):464-472.
Wang L C, Hu W X, Wang X L, et al. Variation of Sr content and ⁸⁷Sr/⁸⁶ Sr isotope fraction ation during dolomitization and their implications [J]. Oil & Gas Geology,2016,37(4):464-472.

- [12] 尚海军,陈维民,张耀选,等. 新疆阿尔泰克因布拉克 铜锌矿区闪长岩锆石 U - Pb 年龄及地质意义[J]. 西北地质,2017,50(4):59-69.
 Shang H J, Chen W M, Zhang Y X, et al. Zircon U-Pb dating of diorite from the Keyinbulake Cu-Zn deposit in Altay, Xinjiang and its geological implications [J]. Northwest Geology,2017,50(4):59-69.
- [13] 曹亮,段其发,张权绪,等.扬子陆块北缘冰洞山铅锌 矿床闪锌矿 Rb - Sr 定年及其地质意义[J].矿物岩石 地球化学通报,2016,35(6):1280-1289.
 Cao L, Duan Q F, Zhang Q X, et al. Rb-Sr dating of sphalerites from the Bingdongshan Pb-Zn deposit in the northern margin of the Yangtze Block and its geological significance [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,2016,35(6):1280-1289.

- Balboni E, Jones N, Spano T, et al. Chemical and Sr isotopic characterization of North America uranium ores: Nuclear forensic applications [J]. Applied Geochemistry, 2016,74:24 - 32.
- [15] Varga Z, Wallenius M, Mayer K, et al. Application of lead and strontium isotope ratio measurements for the origin assessment of uranium ore concentrates [J]. Analytical Chemistry, 2009, 81 (20):8327-8334.
- [16] Švedkauskaite-LeGore J, Mayer K, Millet S, et al. Investigation of the isotopic composition of lead and of trace elements concentrations in natural uranium materials as a signature in nuclear forensics [J]. Radiochimica Acta,

2007,95(10):601-605.

- [17] Deniel C, Pin C. Single-stage method for the simultaneous isolation of lead and strontium from silicate samples for isotopic measurements [J]. Analytica Chimica Acta, 2001,426(1):95 - 103.
- [18] 王强,薛晓锋,赵静.质谱检测技术在蜂蜜溯源分析中的应用[J].中国农业科技导报,2013,15(4): 42-47.
 Wang Q, Xue X F, Zhao J. Application of mass spectrometry detection technology in Honey traceability analysis [J]. Journal of Agricultural Science and

Technology, 2013, 15(4): 42-47.

Application of Eichrom Sr Resin to the Separation and Enrichment of Lead and Strontium in Uranium Ore Concentrates

XU Zhuo, LI Li-li^{*}, ZHU Liu-chao, ZHAO Xing-hong, HUANG Sheng-hui, ZHAO Li-fei (Department of Radiochemistry, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Uranium ore concentrates were selected as the study object, and the separation of lead and strontium from uranium under different conditions has been researched.
- (2) The combination of Eichrom Sr resin and UTEVA resin can effectively reduce uranium content in lead and strontium eluent. The uranium content was lower than the reported value of 48.8 µg.
- (3) A preliminary source investigation based on the abundance of lead and strontium isotopes in the actual uranium ore concentrates has been studied.
- (4) The separation method provides technical support for the establishment of the database of lead and strontium isotope abundance ratios in uranium ore concentrates.



ABSTRACT

BACKGROUND: The traceability study of uranium ore concentrates plays an important role in nuclear forensics. By measuring the abundance ratios of lead and stontium isotopes, the results can provide some geographical indication information for traceability.

OBJECTIVES: To achieve the separation of large amounts of uranium from trace lead and strontium and to establish a set of methods for separating lead and strontium from uranium ore concentrate, while providing technical support for the establishment of a lead and strontium isotopes database in uranium ore concentrate.

METHODS: Based on Eichrom Sr resin's adsorption properties for lead and strontium, the main factors (acidity, current velocity and volume) affecting the recovery of lead and strontium were optimized by orthogonal testing. The best washing conditions have been determined. The combination of UTEVA resin and Eichrom Sr resin can effectively reduce uranium content in lead and strontium eluent and thus reduce the matrix effect.

RESULTS: The results show that the recovery of lead and strontium is more than 90% and the uranium content in lead and strontium eluent is less than 500 ng, an improvement on the reported value of 48.8μ g.

CONCLUSIONS: The actual uranium ore concentrate samples were measured by this method. The results show that the lead and strontium isotope abundance ratios can be used as the geographical traceability criteria for uranium ore concentrates, providing a technique for the future establishment of lead and strontium isotope databases for uranium ore concentrates.

KEY WORDS: Eichrom Sr resin; uranium ore concentrates; lead; strontium; matrix effect