

# 冠醚萃取色层法分离环境水样品中<sup>90</sup>Sr

唐秀欢, 张继红, 李 华, 杨永青

西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

**摘要:**为改进环境水样品<sup>90</sup>Sr 的分离方法,在冠醚萃取法基础上将冠醚萃取液涂在硅藻土支撑体上,研究了冠醚浓度、载体量、洗脱液体积等参数对 Sr 元素分离的影响,建立了环境水样品中<sup>90</sup>Sr 冠醚萃取色层法。实验表明,冠醚浓度、载体量及洗脱液体积参数优化结果分别为 0.89 mol/L、100 mg 和 200 mL,参数优化后,该方法首次使用时对环境水样品 Sr 的化学回收率达 90% 以上,满足环境水样品低水平<sup>90</sup>Sr 常规分离分析需要。

**关键词:**环境监测;冠醚;<sup>90</sup>Sr;萃取色层法

中图分类号:R145 文献标志码:A 文章编号:0253-9950(2013)02-0106-06

doi:10.7538/hhx.2013.35.02.0106

## Separation of <sup>90</sup>Sr in Environmental Water Samples by Crown Ether Extraction Chromatography

TANG Xiu-huan, ZHANG Ji-hong, LI Hua, YANG Yong-qing

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

**Abstract:** In environmental samples <sup>90</sup>Sr is one of the most important radionuclides generated in nuclear fission process. To improve the separation of <sup>90</sup>Sr from environmental water samples, the solvent containing crown ether was spreaded on the diatomite, the influence of parameters such as crown ether concentration, carrier mass, eluant volume etc on <sup>90</sup>Sr separation were studied based on former crown ether extraction method, and the crown ether extraction chromatography for <sup>90</sup>Sr separation was established. The experimental results show that the optimal crown ether concentration, <sup>90</sup>Sr carrier and eluant volume are 0.89 mol/L, 100 mg and 200 mL respectively. Through parameters optimization, the chemical recovery rate of Sr is over 90% when a new such chromatographic column is used. This ether extraction chromatography is satisfied with the conventional requirement for low-level <sup>90</sup>Sr separation and analysis in environmental water samples.

**Key words:** environmental monitoring; crown ether; <sup>90</sup>Sr; extraction chromatography

放射性污染治理、核事故应急监测、辐射环境质量评价等方面都需要了解环境样品中<sup>90</sup>Sr 的比活度。因而准确、快速分析环境中低水平<sup>90</sup>Sr 的

技术和方法是人们研究的热点之一<sup>[1]</sup>。目前,环境样品中<sup>90</sup>Sr 放化分析方法主要有三类:发烟硝酸法、离子色谱法、萃取色层法。发烟硝酸沉淀法

是测定<sup>90</sup>Sr的经典方法,但该方法步骤繁多,分析周期长。离子交换法<sup>[2]</sup>虽相对成熟、稳定,但在分离过程中需要狭窄的pH条件,容易造成分离柱的堵塞。萃取色层法主要有HDEHP法和冠醚萃取色层法。HDEHP法需要测量<sup>90</sup>Y活度<sup>[3]</sup>,而且探测效率降低,影响测量结果。如果将<sup>90</sup>Sr从大量基体中分离出来后不再进行<sup>90</sup>Sr与<sup>90</sup>Y分离,直接测量其混合活度或者其他Sr同位素的活度,分离分析过程相对简便快捷。刘扬等<sup>[4]</sup>将萃取色层法和发烟硝酸法相结合用于土壤中<sup>90</sup>Sr的测定,分析步骤相对简便,节省试剂。Horwitz等<sup>[5]</sup>报导了一种Sr特效树脂,将冠醚制成萃取色层树脂可在一定的硝酸浓度范围内定量吸附Sr而与其它元素分离,Rodriguez等<sup>[6]</sup>则利用该树脂成功地分离了中低活度放射性废物中的<sup>90</sup>Sr。该萃取色层法吸附、解吸条件简单,且易于实现自动和快速分离,目前已作为标准方法被欧美国家采用<sup>[7]</sup>。二环己基-18-冠醚-6对Sr具有较好的萃取效果,广泛用于放射性废液中除去<sup>90</sup>Sr的处理,能够将铯同大多数干扰元素分离。Tormos等<sup>[8]</sup>将二环己基-18-冠醚-6用于测定核试验和核事故造成的大面积污染土壤和植物中的<sup>90</sup>Sr;杨志红等<sup>[9]</sup>建立二环己基-18-冠醚-6的亚快化分离装置,自动分离裂变产物中的<sup>91</sup>Sr;叶维玲等<sup>[10]</sup>采用正辛醇作为稀释剂、二环己基-18-冠-6和异丙氧基杯[4]-冠-6分别作为萃取Sr、Cs的萃取剂,进行Sr、Cs的共萃取性能研究。本课题组也曾研究了二环己基并-18-冠醚-6对Sr的萃取性能<sup>[11]</sup>。为克服萃取法的缺点,将二环己基并-18-冠醚-6萃取液涂在硅藻土支撑体上,研究冠醚浓度、载体量、洗脱液体积对分离Sr元素的影响,拟建立环境水样品中<sup>90</sup>Sr冠醚萃取色层法,以满足常规环境监测的要求。

## 1 实验方法

### 1.1 试剂及仪器

**1.1.1 试剂** SrCl<sub>2</sub>,分析纯,天津市纵横兴工贸有限公司化工试剂分公司,配制铯载体溶液(约100 g/L);硝酸,分析纯,西安市长安县西新精细化工厂,配制浓度6 mol/L、1.6 mol/L;氨水,分析纯,中国医药(集团)上海化学试剂公司;结晶碳酸铵,分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;无水乙醇,分析纯,西安市三浦精细化工厂;硅藻土,上海市奉贤奉诚试剂厂;二氯二甲基硅烷、氯

仿,分析纯,西安化学试剂厂;1,1,2,2-四氯乙烷,分析纯,中国医药(集团)上海化学试剂公司;二环己基-18-冠醚-6(DCH18C6),分子式C<sub>20</sub>H<sub>36</sub>O<sub>6</sub>,相对分子质量372.50,清华大学核能技术设计研究院生产,纯度大于95%。

**1.1.2 仪器** VISTA-MPX电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES),美国Varian公司;LKB Wallac 1414双管复合型液闪谱仪,芬兰Wallac公司;DHG-9070A恒温干燥箱,上海一恒科技;SHZ-D(Ⅲ)循环水真空泵,河南巩义市英峪予化仪器厂;AE100分析天平,瑞士梅特勒-托利多有限公司,感量0.1 mg;φ10 mm×150 mm、φ12 mm×180 mm色层柱,下部带有G3烧结板,订制。

**1.1.3 统计学软件** 采用SPSS 13.0统计软件进行统计学分析,回收率显著性分析采用独立样本t检验,其中方差齐性检验为Levene检验。

### 1.2 实验步骤

**1.2.1 样品预处理** 取1.0 mL Sr载体溶液加入4 L水样中,加热到约50℃,用氨水调节pH=8~9,搅拌下每升水加入8 g碳酸铵,继续加热至将近沸腾,取下冷却,静置10 h<sup>[3]</sup>。定量抽滤沉淀,1.6 mol/L硝酸分2次洗涤,将SrCO<sub>3</sub>沉淀溶解并过滤,得到约40~50 mL的待分离溶液。

**1.2.2 色层柱制备** 将硅藻土烘干,净化处理,取12 g硅藻土与60 mL 10%二氯二甲基硅烷的氯仿溶液混合,搅拌至氯仿挥发完全,在100℃下烘干;取上述硅烷化处理过的10 g硅藻土担体,加入一定浓度的7.6 mL DCH18C6四氯乙烷溶液,搅拌后得到色层粉。用去离子水将色层粉制成浆状液,转入色层柱中,并用平头玻璃棒轻轻压紧,制成一定高度柱床的色层柱,柱头用玻璃棉覆盖,用50 mL 1.6 mol/L HNO<sub>3</sub>预平衡色层柱。

**1.2.3 样品萃取色层分离** 将待分离溶液上柱,待流尽时加入1.6 mol/L HNO<sub>3</sub>淋洗液,最后加入去离子水淋洗反萃Sr元素。淋洗流速控制在1 mL/min左右。将淋洗液收集于烧杯中,氨水溶液pH=8~9,加入5 mL饱和碳酸铵溶液,加热至近沸,冷却至室温,过滤,用水和无水乙醇各10 mL洗涤沉淀。沉淀烘干、冷却、称重,计算化学回收率。将称重后的碳酸铯用5 mL 6 mol/L硝酸溶解,定量转移至闪烁瓶,放置14 d以上。

**1.2.4 Sr相对含量测量** 采用ICP-AES测量淋洗组分中Sr元素的相对含量。取每10 mL淋

洗液组分中的 1 mL 于 100 mL 容量瓶,加入 0.4 mL 1.6 mol/L HNO<sub>3</sub>,去离子水定容至 100 mL;ICP-AES 检测器测量 Sr 元素的 430.554 nm 谱线强度,确定每个 10 mL 组分的 Sr 相对含量。

**1.2.5 放射性测量** 使用液体闪烁谱仪测定样品中<sup>90</sup>Sr 的活度。用国家放射性一级计量站提供的<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 平衡源,测量液闪谱仪效率,选定测量给出的最优值:27.50%。<sup>90</sup>Sr 的测量计数区域选定为 280~1 000 道。每个样品测量约 4 000 s。水样中<sup>90</sup>Sr 测定结果的计算公式为:

$$A_w = \frac{(n_x - n_b) \cdot J_0}{2 \times 60 E_t V Y_{Sr} J}$$

式中: $A_w$ ,水样中<sup>90</sup>Sr 的放射性活度浓度,Bq/L; $n_x$ ,试样计数率, $\text{min}^{-1}$ ; $n_b$ ,空白计数率, $\text{min}^{-1}$ ; $E_t$ ,<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 平衡体的探测效率; $V$ ,水样取样体积,L; $Y_{Sr}$ ,锶的化学回收率;60,min 与 s 的换算;2,净计数来自<sup>90</sup>Sr 和<sup>90</sup>Y 两者的贡献; $J_0$ ,标定测量仪器的探测效率时,所测得的<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 参考源的计数率, $\text{min}^{-1}$ ; $J$ ,测量样品时,所测得的<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y 参考源的计数率, $\text{min}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品预处理

<sup>90</sup>Sr 富集过程采用了载体加入和沉淀静置法,最后用酸溶解沉淀得到上柱液,该法是 GB 6766 的样品预处理过程之一,比较适合萃取色层方法的样品制备。为了控制色层柱的进样量,所用酸溶液的体积不宜过大,在溶解过程中酸与沉淀反应而损失,减小了酸的浓度。研究表明<sup>[11]</sup>,样品 1~2 mol/L 酸浓度不会影响冠醚对 Sr 的萃取。取某水库水为样本,对环境水样品的沉淀量进行估算,以 1~2 mol/L 数据外推酸的用量。预处理浓缩得到的沉淀用 1.6 mol/L 酸溶解,上柱分离,将样品流出液和杂质洗涤液收集,再收集所需的 Sr 组分,分别进行沉淀、烘干、称量,两平行样结果分别为:0.761 0 g、0.753 3 g。以 0.761 0 g 保守假设沉淀均为 CaCO<sub>3</sub>,所需酸的

物质的量为 0.015 2 mol,40 mL 1.6 mol/L 硝酸溶解后溶解液的酸浓度为 1.22 mol/L,满足样品酸浓度为 1~2 mol/L 的要求。

### 2.2 分离条件优化

分离条件需要探索优化的参数有:(1)色层粉消耗量;(2)冠醚的 1,1,2,2-四氯乙烷固定液浓度及装载量;(3)淋洗体积(淋洗曲线);(4)对实际水样品的适应性。

**2.2.1 色层粉消耗量**  $\phi 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  色层柱工作体积为 12 mL,实验所得每两根色层柱所用色层粉及固定液消耗量列于表 1。 $\phi 12 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  色层柱工作体积为 20 mL,消耗量可按比例增大。

**2.2.2 固定液浓度及装载量** 配制了 0.1、0.5、0.89 mol/L 三种浓度 DCH18C6 四氯乙烷固定液,装载于  $\phi 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  柱中,每个浓度点设 2 个平行数据点。以 200 mg Sr 载体溶液为分离对象,80 mL 去离子水为淋洗液,分离后 Sr 化学回收率列于表 2。由表 2 可知,在萃取剂固定液装载量一定的条件下,萃取剂固定液浓度越高,Sr 回收率越高,因此,采用 0.89 mol/L 作为萃取剂固定液浓度,同时外推至浓度为 0 mol/L,则可认为硅藻土对 Sr<sup>2+</sup> 离子没有吸附的干扰。 $\phi 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  柱的空白体积为 12 mL,硅藻土色层粉的装载量约为 5 g,色层柱的萃取容量是固定的。在以重量法测量化学回收率为基础的分析方法中,载体量一般为 100 mg。以 60、100、200 mg 载体为分离对象,考察装载量对分离效果的影响,结果示于图 1。由图 1 可见,在  $\phi 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  色层柱上,60 mg 载体分离的化学回收率最高,由于样品中 Sr 的质量较大,特定体积固定液无法全部萃取,容易形成 Sr 的漏穿,造成以 200 mg、100 mg Sr 为载体时,回收率降低。但在以 100 mg Sr 为载体时,Sr 的化学回收率达到了 80%。基于重量法测量的精度以及与其它方法的可比性考虑,选择 100 mg Sr 为载体。为了保证 Sr 的高回收率,设计了更大尺寸的色层柱: $\phi 12 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ ,每根色层柱工作体积为 20 mL,0.89 mol/L 冠醚固定液使用量为 7 mL。

表 1 每两根  $\phi 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  色层柱的各种消耗量

Table 1 Various consumptions for every two  $\phi 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  chromatographic columns

四氯乙烷(Tetrachloroethane)	冠醚(Crown ether)		硅藻土(Diatomite)
8 mL	0.1 mol/L	0.45 mol/L	0.89 mol/L <sup>1)</sup>
	0.301 3 g	1.355 9 g	2.687 0 g

注(Notes):1) 0.89 mol/L 为接近饱和的浓度(0.89 mol/L is close to saturated concentration)

表 2 固定液浓度对回收率的影响

Tabel 2 Dependence of concentration of fixation fluids on recovery rates

固定液浓度(Concentration of fixation fluid)/(mol · L <sup>-1</sup> )	回收率(Recovery rate)/%
0.1	9.4
	9.1
0.5	44
	39
0.89	65
	64

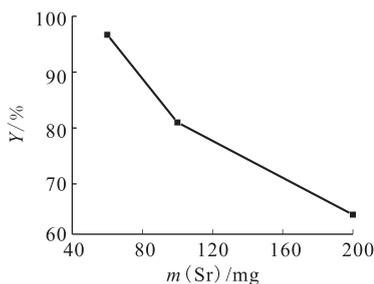
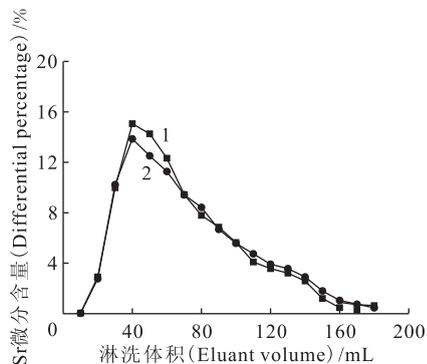


图 1 Sr 载体量对回收率的影响

Fig. 1 Effect of Sr carrier mass on recovery rate

**2.2.3 淋洗体积** 根据以上分离条件优化结果,以  $\phi 12 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  色层柱为分离柱,  $0.89 \text{ mol/L}$  冠醚为固定液,  $100 \text{ mg}$  Sr 载体为分离对象,  $70 \text{ mL}$   $1.6 \text{ mol/L}$  硝酸为杂质淋洗液,  $180 \text{ mL}$  去离子水为淋洗液,进行色层分离。收集每  $10 \text{ mL}$  的淋洗液组分,定量取  $1 \text{ mL}$  淋洗液,定容于  $100 \text{ mL}$  容量瓶中,以去离子水为空白,用 ICP-AES 分析每  $10 \text{ mL}$  的淋洗液中 Sr 的归一化含量,描绘淋洗曲线。实验使用两根色层柱, Sr 的相对含量微分曲线和积分曲线平行结果示于图 2、3。由淋洗微分曲线可以看出,淋洗组分浓度最大值出现在第 4~5 次  $10 \text{ mL}$  体积之间,去离子水对该色层体系具有良好的淋洗效果;而经过 15 次  $10 \text{ mL}$  体积淋洗后,后面的淋洗液 Sr 浓度趋向于零,积分归一化含量也趋向平衡。

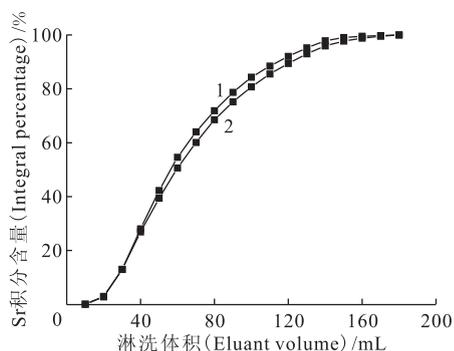
**2.2.4 对实际水样品的适应性** 环境水样为 2010 年上下半年取样所得样品。根据辐射环境监测方案,历年环境水样取样点有 5 处: XH、XHD、SKS、WHS、BHS。根据优化实验的结果,分离采用  $\phi 12 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  色层柱,  $100 \text{ mg}$  Sr 载体,  $70 \text{ mL}$   $1.6 \text{ mol/L}$  硝酸杂质淋洗液,淋洗液体积  $200 \text{ mL}$ ,上下半年实验间隔共 4 个月。实际样品的 Sr 萃取分离回收率结果列于表 3。往年离子交换法测量时<sup>90</sup>Sr 放射分析流程的回收率列于



1—柱 1(Column 1), 2—柱 2(Column 2)

图 2 Sr 归一化含量的微分淋洗曲线

Fig. 2 Differential elution curve of Sr whose concentration was normalized



1—柱 1(Column 1), 2—柱 2(Column 2)

图 3 Sr 归一化含量的积分淋洗曲线

Fig. 3 Integral elution curve of Sr whose concentration was normalized

表 4。由表可知,上半年的化学回收率略高于下半年的化学回收率,但均值均高于 90%;该结果与理论色层粉装载量分析结果较为一致,且同一种样品的化学回收率平行性很好,虽然不同样品之间有较大的差距,这可能与样品本身所带杂质离子浓度有关,有的回收率大于 100%,这可能与实际样品本底中 Sr 的含量、实验误差等原因有关。表 4 数据表明,离子交换法(国家标准方法)不容易实现较高的回收率,且稳定性较差,对比可见,冠醚萃取色层法具有较高的回收率和稳定性,满足了 Sr 分离分析的精度要求,可以用于常规的环境水样品 Sr 的分离提纯。

**2.2.5 色层柱重用性** 由于萃取色层法属于液液色谱,固定液吸附在硅藻土担体上,受淋洗液冲刷时固定液容易流失,几次重复使用后容易造成色谱穿透,原因可能是固定液流失造成容量下降,也可能是杂质离子的萃取造成固定液的中毒。

杨志红等<sup>[9]</sup>制备的色层柱使用 2 次以后就会发生穿透现象,因而每次使用前均重新装柱。实验中,分离去离子水样品时具有 5 次上柱记录,第 5 次的回收率在 80% 以上,而研究实际水样品时每根色层柱均有 4 次使用记录,回收率大多数在 90% 以上,最小达到 73%。而且色层柱自装柱后放置 4 个月,上下半年两次淋洗时环境温度相差较大,还依然保持较高的回收率。从简单的回收率均值

分析看,下半年的回收率比上半年低 4%,考虑到实验误差等原因,使用 SPSS 软件对两组回收率数据进行独立样本  $t$  检验,结果列于表 5。由表 5 可见,上下半年的两组回收率方差检验结果在 0.05 水平上是齐性的( $P=0.071$ ),而在方差齐性下双尾  $t$  检验的显著性概率为 0.487,不能得出上下半年回收率具有显著差别的结论。因此,制备的色层柱至少可以重复使用 4 次。

表 3 实际水样品 Sr 化学回收率  
Table 3 Chemical recovery rate of Sr real samples

时段 (Experiment time)	样品 (Samples)	回收率 (Recovery rate)/%	时段 (Experiment time)	样品 (Samples)	回收率 (Recovery rate)/%
2010 上半年(First half of 2010)	BHS-1	90	2010 下半年(Second half of 2010)	BHS-1	85
	BHS-2	90		BHS-2	89
	XHX-1	98		XHX-1	99
	XHX-2	98		XHX-2	113
	WHS-1	104		SKS-1	96
	WHS-2	98		SKS-2	111
	XHD-1	103		WHS-1	91
	SKS-1	104		WHS-2	73

表 4 往年离子交换法<sup>90</sup>Sr 放化分析流程回收率

Table 4 Process recovery rate of <sup>90</sup>Sr radiochemical analysis by ion exchange method in the past years

监测时间 (Monitor time)	回收率均值 (Mean of recovery rate)	监测时间 (Monitor time)	回收率均值 (Mean of recovery rate)
2005	-	2007 上半年(First half of 2007)	82%
	46%		55%
	59%		82%
2006	77%	2007 下半年(Second half of 2007)	79%
	68%		78%
	99%		100%

表 5 回收率独立样本  $t$  检验的结果

Table 5 Results of independent sample  $t$ -test

Levene 方差齐性检验 (Levene's test for equality of variances)		均值 $t$ 检验 ( $t$ -test for quality of means)				
$F$	$P$	$t$	自由度 (Degree of freedom)	$P$ (两尾) (2-tailed)	均值差 (Mean difference)	备注(Note)
3.8	0.071	0.71	14	0.487	0.036 7	方差齐(Equal variances assumed)
-	-	0.71	9.5	0.492	0.036 7	方差不齐(Equal variances not assumed)

### 2.3 放射性测量

采用切仑科夫计数法测量<sup>90</sup>Sr活度。<sup>90</sup>Sr在放置过程中会产生子体<sup>90</sup>Y,由于环境中放射性活度较低,应放置14 d,待形成衰变平衡后再进行测量。测量时以标准<sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y平衡源刻度仪器效率,以经过相同分离流程步骤的去离子水为空白,并通过空白计数估算最低探测限。使用西安脉冲堆附近环境样品为测量对象,以离子交换法为比对。实验结果表明,在95%置信水平上,2010年上下半年实际环境水样品的<sup>90</sup>Sr放射性活度浓度均约在本底 $10^{-2}$  Bq/L范围内,结果与离子交换法所得一致。冠醚萃取色层法进一步优化,可使用标准环境水样品、通过实验室间比对实验或加入一定量活度<sup>90</sup>Sr来完成。

### 3 结论

(1) 建立了分离环境水样品中<sup>90</sup>Sr的冠醚萃取色层法;

(2) 方法优化的参数为:色层柱 $\phi 12\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ ,冠醚浓度 $0.89\text{ mol/L}$ ,Sr载体 $100\text{ mg}$ ,杂质淋洗液 $70\text{ mL } 1.6\text{ mol/L}$ 硝酸,淋洗液 $200\text{ mL}$ 去离子水;

(3) 对环境样品具有良好的适应性,首次装柱使用时Sr化学回收率在90%以上;

(4) 制备的色层柱在环境监测中至少可以重复使用4次。

该方法可快速、准确地进行环境中低水平<sup>90</sup>Sr的活度分析,满足了环境监测的常规要求,同时在放射性环境治理以及核事故应急监测等方面也具有重要的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 党磊,吉艳琴.低水平<sup>90</sup>Sr的分析方法研究进展[J].核化学与放射化学,2010,33(3):129-144.
- [2] 李利华,沙连茂,赵敏,等.GB 6765—86 水中锶-90放射性化学分析方法-离子交换法[S].1986.
- [3] 沙连茂,郭琨,王治惠,等.GB 6766—86 水中锶-90放射性化学分析方法-二-(2-乙基己基)磷酸萃取色层法[S].1986.
- [4] 刘扬,顾明杰.发烟硝酸-萃取色层法测定土壤中的<sup>90</sup>Sr[J].湿法冶金,2001,20(1):44-46.
- [5] Horwitz E P, Chiarizia R, Dietz M L. A Novel Strontium-Selective Extraction Chromatographic Resin[J]. Solvent Extr Ion Exch, 1992, 10(2): 313-336.
- [6] Rodriguez M, Suhrez J A, Espartero A G. Separation of Radioactive Strontium by Extraction Using Chromatographic Resin[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A, 1996: 348-352.
- [7] ASTM D5811-2008 Standard Test Method for Strontium-90 in Water[S]. US: ASTM, 2008.
- [8] Tormos J, Jouve A, Revy D, et al. A Rapid Method for Determining Strontium-90 in Contaminated Samples of Soil and Plant[J]. J Envir Radioact, 1995, 27(3): 193-206.
- [9] 杨志红,丁有钱,张生栋,等.<sup>91</sup>Sr亚快化分离方法的研究[J].核化学与放射化学,2007,29(1):1-7.
- [10] 叶维玲,王建晨,何千舸.二环己基-18-冠醚-6/异丙氧基杯[4]冠-6-正辛醇共萃取Sr和Cs[J].核化学与放射化学,2009,31(3):167-172.
- [11] 杨永青,万俊生,马燕,等.二环己基-18-冠-6对锶的萃取[J].核化学与放射化学,2007,29(4):204-209.