文章编号: 0254 - 5357(2007)01 - 0004 - 05

国土资源地质大调查分析测试技术专栏

电感耦合等离子体质谱法测量铼和锇同位素比值的质量分馏校正

杨胜洪[1,2], 屈文俊[1*], 杨 刚[1,2], 杜安道[1], 陈江峰[2]
(1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;
2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 用Re标准溶液测定出X Series - 7电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)检测器的死时间为43 ns。由于Re和Ir的对数分馏系数线性相关,可以用Ir对Re进行在线分馏校正。利用配制的Re同位素比值标准溶液检验该方法,大多数校正值对标准值的相对偏差在±0.1%以下。ICP-MS测量时,Os的分馏系数与中位质量数成正比,采用由迭代方法得到的样品和稀释剂混合物的同位素比值($^{192}Os/^{188}Os$)$_{mix}$作为标准化值对其他Os同位素比值进行分馏校正。用已知Os同位素比值的标准溶液对该方法进行检验,结果表明,经校正后,大多数校正值与标准值的相对偏差在±0.3%以下。上述Re-Os同位素分馏校正方法将改善用ICP-MS进行Re-Os定年时的精密度和准确度。

关键词: 质量分馏校正; 电感耦合等离子体质谱法; 铼; 锇
中图分类号: O611.7; O657.63 **文献标识码**: A

The Correction of Mass Fractionation in the Measurement of Rhenium and Osmium Isotope Ratios by ICP-MS

YANG Sheng-hong[1,2], *QU Wen-jun*[1*], *YANG Gang*[1,2], *DU An-dao*[1], *CHEN Jiang-feng*[2]
(1. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The dead-time of the detector of inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) is 43 ns obtained by measuring Re standard solution. Since there is a liner correlation between isotopic fractionation factors of Re and Ir, Ir can be used to correct Re isotope fractionation. The test by measuring Re standard solution suggests that the relative deviations between corrected and standard values are, in most cases, less than ±0.1%. The isotopic fractionation factors of Os are proportional with the middle-mass of the isotopic pairs in the ICP-MS measurement. In this study, the Os isotope ratio of the mixture of the sample and spike Os ($^{192}Os/^{188}Os$)$_{mix}$, obtained by iteration method is used as the normalization value to correct the isotope fractionation of other isotope ratios of Os. The test by measuring known Os isotopic solution suggests that the relative deviations between corrected and the reference values are less than ±0.3% in most cases. The correction method for Re-Os isotope fractionation presented by this paper will improve the precision and accuracy of the Re-Os dating by using ICP-MS.
Key words: mass fractionation correction; inductively coupled plasma-mass spectrometry; rhenium; osmium

收稿日期: 2006-03-27; **修订日期**: 2006-10-08
基金项目: 国土资源地质大调查资助项目(200020190118 - 04)
作者简介: 杨胜洪(1981 -),男,重庆石柱人,硕士研究生,地球化学专业。
通讯作者: 屈文俊(1964 -),男,湖北汉阳人,研究员。E-mail:quwenjun03@163.com。

All rights reserved. http://www.ykcs.ac.cn

近年来,Re-Os 同位素体系在地质定年和示踪研究中得到广泛应用,而电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)是测量 Re、Os 同位素组成的常用方法,与负热电离质谱法(N-TIMS)相比,其优势是方便快捷和成本较低;不足之处是 ICP-MS 的质量分馏比 N-TIMS高,N-TIMS 的质量分馏一般小于 0.1%,而 ICP-MS 常常会达到 1% ~2%。这给 Re、Os 同位素比值测定以及最终的年龄结果带来不可忽视的误差,所以必须进行分馏校正。

ICP-MS 检测器死时间的误差对同位素比值的测定同样会带来较大误差,但在以前工作中并没有引起足够的重视,本实验对仪器死时间做了精确测定。

关于 ICP-MS 测量中 Re 和 Os 同位素分馏校正前人[1]用一定比值的同位素标准溶液作外标校正,其比值与同位素稀释法最佳稀释比相匹配,取得较好的效果;但是,外标法一定程度上受仪器稳定性的制约。Chu 等[2]提出用不同元素做分馏校正的方法,实现了在线分馏校正,例如用$^{179}Hf/^{177}Hf$(同位素比,下同)来校正$^{173}Yb/^{171}Yb$。梁细荣等[3]在多接收器等离子体质谱(MC-ICPMS)中采用$^{193}Ir/^{191}Ir$对$^{187}Re/^{185}Re$在线质量分馏校正,但文中并没有给出具体校正方法。本文尝试用 Ir 来监测仪器分馏状态,实现对$^{187}Re/^{185}Re$的在线质量分馏校正。

文献[4-5]讨论了 N-TIMS 中 Os 同位素分馏的校正方法;但与 N-TIMS 相比,ICP-MS 是正离子发射,而且其分馏特点也不相同。在 N-TIMS 中,同一元素的对数分馏系数 β 是相同的;而在 ICP-MS 中,同一元素的不同同位素对的 β 值却是不相同的。Hirata[6]首先提出了这个问题,认为分馏系数 β 与分子同位素和分母同位素的平均质量数即中位质量数成正比。梁细荣等[7]证明了这一点。本文针对 ICP-MS测定 Os 同位素的特点,采用迭代的方法,实现内标校正。

1　实验部分

1.1　标准溶液制备

稀释剂^{185}Re金属粉和^{190}Os金属粉均为美国橡树岭国家实验室(ORNL)产品,按文献[8]处理稀释剂。

普通 Ir 标准溶液:$^{193}Ir/^{191}Ir$标准值为 1.683 0。

普通 Re 标准溶液:$^{187}Re/^{185}Re$标准值为1.674 0。配制浓度分别为 1 μg/L、2.5 μg/L、4 μg/L、7 μg/L 和 10 μg/L 的系列溶液,用作死时间(Dead time)的测定。另外,用该标准溶液和普通 Ir 标准溶液配制成不同比例的混合溶液FL-1、FL-2和FL-3,对应的 Ir/Re 质量比分别为 5、1 和 0.2,Ir 和 Re的浓度为 2 ~10 μg/L。

Re 同位素比值标准溶液:由普通 Re 与稀释剂^{185}Re混合而成,经过 N-TIMS 反复标定,其$^{187}Re/^{185}Re$为 0.492 3。用该溶液与普通 Ir 溶液配制成三份不同质量比的混合溶液 FL-4、FL-5 和 FL-6,对应的 Ir/Re 质量比分别为 5、1 和 0.2,Ir 和Re 的浓度为 2 ~5 μg/L。

Os 同位素比值标准溶液(UK):其同位素组成及含量经过 N-TIMS 标定,^{187}Os、^{188}Os、^{190}Os 和^{192}Os 的同位素丰度分别为 4.051%、12.91%、25.73% 和 39.90%,Os 含量为 19 347 μg/L。分别称取三份不同质量 UK 溶液,加入适量^{190}Os稀释剂,装入 Caruis 管,在 230 ℃加热 12 h,使其达到同位素平衡,得到FL-7、FL-8 和 FL-9 三份 Os 同位素比值标准溶液,通过二元混合计算可以得出它们的同位素比值。

1.2　仪器及分析条件

X Series-7 电感耦合等离子体质谱仪(美国热电公司)。测量条件见表 1。

表 1　ICP-MS 测量条件

Table 1　Instrumental parameters of ICP-MS

参数	设定值	参数	设定值
取样锥孔径	1.0 mm	雾化气(Ar)流量	0.84 L/min
截取锥孔径	0.7 mm	辅助气(Ar)流量	0.70 L/min
RF 入射功率	1 350 W	停留时间	15 ms/点
RF 反射功率	0.5 W	测量方式	跳峰,3 点/u
冷却气(Ar)流量	13 L/min	扫描次数	200

1.3　分析方法

用 ICP-MS 测定配制的 Dead time 系列普通 Re 标准溶液的^{185}Re和^{187}Re计数,精密度(RSD)小于 0.5%;测定 Ir-Re 混合溶液 FL-1 ~FL-6 的 Ir 同位素比值($^{193}Ir/^{191}Ir)_m$和($^{187}Re/^{185}Re)_m$,RSD 小于 0.5%;测定三份 Os 同位素标准溶液 FL-7、FL-8 和FL-9的 Os 同位素比值$^{192}Os/^{188}Os$、$^{192}Os/^{190}Os$和$^{187}Os/^{188}Os$。测定 Re 时,用质量数 192 监测 Os;测定 Os 时,用质量数 185 监测 Re。

2　结果与讨论

2.1　检测器死时间校正

电子倍增器在脉冲方式工作,且在高计数率的情况下,检测器获得的计数比实际到达检测器的离子数要少,这种现象主要是检测器的死时间所致[9]。在同位素分析中,为了获得较好的精密度

All rights reserved. http://www.ykcs.ac.cn

和准确度,一般要求足够高的计数率,由此可能会使同位素比值的测定受到严重影响,因此必须对死时间进行校正。死时间校正公式为:

$$C_{corr} = C_{obs}/(1 - C_{obs} \times \tau)$$ [9]

式中,C_{corr}为经过死时间校正后的同位素计数值;C_{obs}为仪器死时间设定为零时观测到的同位素的计数值;τ 为检测器死时间。主要步骤[7]为:对 Dead time 系列溶液测定的^{185}Re 和^{187}Re 计数,按 0、10、20、30、40、50、60、70 ns,由上述公式作死时间校正;然后作同位素比值归一化,将校正后的 Re 同位素比值除以标准值 1.674 0;以归一化的同位素比值作为纵坐标,校正所用的死时间作为横坐标作图,各浓度直线的相交点对应的时间即为需要确定的死时间(图 1)。本实验测定死时间结果为 43 ns。

死时间的测定不可能完全准确,所以即使经过死时间校正,也会存在一定误差,特别是当计数比较大时。而在测定比值的时候,分子和分母都会受到影响,所以,如果比值越接近 1,最后给比值带来的误差会由于相互抵消而减小。假定死时间的误差为 5 ns,经过上面公式计算,如果测定的同位素比值分别为 0.2、0.5 和 0.8,要求比值的偏差在 0.1% 以下,那么分母同位素计数的上限值分别为 200 000、400 000 和 1 000 000。本实验中,计数都控制在 400 000 以下。

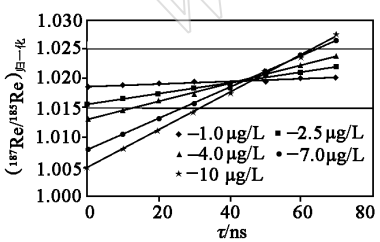

图 1　检测器死时间测定

Fig. 1　Measurement of the dead-time

2.2　Re 同位素分馏校正

2.2.1　Re 分馏校正原理

质量分馏校正有线性规律、指数规律和对数规律。本文采用对数规律。

$$\beta = \ln(R_m/R_t)/\ln(M_A/M_B)$$ [3]　　(1)

$$R_c = R_m(M_B/M_A)^{\beta}$$　　(2)

式中,β 为质量分馏系数;M_A和 M_B为同位素质量数;R_m为质量数为 M_B和 M_A的同位素比值的测定值;R_t为理论值;R_c为校正值。Re 只有两个同位素,^{187}Re 和^{185}Re,无法直接用内标法作分馏校正。在本实验中,采用$^{193}Ir/^{191}Ir$ 来校正 Re 的同位素分馏。

首先要找到 Ir 与 Re 分馏系数的相关性。不同的仪器分馏状态下,同时测定普通 Re 标准溶液和普通 Ir 标准溶液的混合试剂 FL-1、FL-2 和FL-3,得到$^{193}Ir/^{191}Ir$ 和$^{187}Re/^{185}Re$。由于其同位素比值的理论值都是已知的,分别为 1.683 0 和 1.674 0,由式(1)可分别算出 Ir 和 Re 的分馏系数 $\beta(^{193}Ir/^{191}Ir)$和 $\beta(^{187}Re/^{185}Re)$,然后以 $\beta(^{187}Re/^{185}Re)$对$\beta(^{193}Ir/^{191}Ir)$作图。

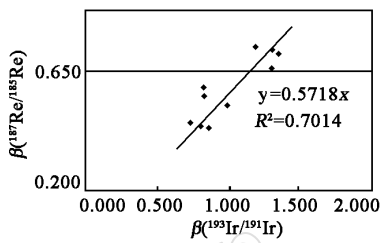

图 2　Re 和 Ir 分馏系数相关性

Fig. 2 Correlation between the fractionation factors of Re and Ir

从图 2 中可以看出,分馏系数 $\beta(^{187}Re/^{185}Re)$与$\beta(^{193}Ir/^{191}Ir)$有正相关性:

$$\beta(^{187}Re/^{185}Re) = 0.5718\beta(^{193}Ir/^{191}Ir)$$　　(3)

测定样品时,在样品测定溶液中加入适量普通 Ir 标准溶液,同时测定$^{193}Ir/^{191}Ir$ 和$^{187}Re/^{185}Re$,计算出 Ir 的分馏系数 $\beta(^{193}Ir/^{191}Ir)$,再由式(3)计算出 Re 的分馏系数 $\beta(^{187}Re/^{185}Re)$,将测定值 $(^{187}Re/^{185}Re)_m$和 $\beta(^{187}Re/^{185}Re)$代入式(2),就可以求出校正值。

2.2.2　测定

用同位素稀释法测定 Re 含量时,根据最佳稀释比计算,$^{187}Re/^{185}Re$ 测定值应控制在 0.2 ~ 0.8。兼顾质谱测定精度的要求,本实验将该比值定为 0.5。所配制的 Re 同位素比值标准溶液的$^{187}Re/^{185}Re$ 经 N-TIMS 标定,为 0.492 3。用该同位素比值标准溶液来检验上述校正方法的可靠性,结果见表 2。从结果可以看出,测定值与标准值的相对偏差(RE)在 +0.3% ~ +0.9%,测定值都高于理论值,显然是一种系统误差。校正以后,Ir/Re 质量比为 2.5 和 1 的大多数相对偏差在 ±0.1% 以下;而 Ir/Re 质量比为 0.4的有两个相对偏差较大,在 ±0.2% 左右。校正以后,不仅相对偏差的绝对值减少,而且相对于标准值有正有负,表现为偶然误差的特点,可见这种校正是合理的、正确的。本实验证明,在加入 Ir 时,Ir/Re 质量比应控制在 1 ~ 2.5 效果更好。

All rights reserved. http://www.ykcs.ac.cn

表 2　Re 同位素标准溶液测定及计算结果①

Table 2　The measurement and calculation results of Re isotope ratio standard solution

样品编号	$\beta(\frac{^{193}Ir}{^{191}Ir})$	$^{187}Re/^{185}Re$ 测定值	$^{187}Re/^{185}Re$ 校正值	$RE_{测}$/%	$RE_{校}$/%	质量比 $\frac{m(Ir)}{m(Re)}$
FL－4	1.302	0.4960	0.4920	0.75	－0.060	2.5
	1.309	0.4958	0.4918	0.71	－0.101	2.5
	1.244	0.4961	0.4923	0.77	0.000	2.5
FL－5	1.185	0.4965	0.4929	0.85	0.122	1.0
	0.479	0.4939	0.4925	0.32	0.040	1.0
	0.587	0.4942	0.4924	0.38	0.020	1.0
FL－6	1.150	0.4955	0.4920	0.65	－0.060	0.4
	1.236	0.4969	0.4932	0.93	0.183	0.4
	0.893	0.4938	0.4911	0.30	－0.244	0.4

① 相对偏差(RE)以$^{187}Re/^{185}Re=0.4923$为标准计算。

2.3　Os 同位素分馏校正

2.3.1　ICP-MS 中 Os 同位素的分馏特点

测定 Os 同位素比值标准溶液,可以得到不同同位素比值的对数分馏系数β。然后用分馏系数为纵坐标、中位质量数为横坐标作图,得到直线(图3)。从图中可以看出,每次测定得到的直线的截距不相同,但斜率却很接近。在下文的分馏校正计算中,只关心斜率的值,所以,用两次测定各分馏系数的平均值作图得到式(4),进行下文的计算。当然这种近似处理会给计算结果带来一定误差,但由于斜率本身的值很小,也就是不同的同位素对的分馏系数相差不大,所以由此造成的误差不会超过0.05%。

$$\beta(M_1/M_2)=0.025\times(M_1+M_2)/2-3.5413 \quad (4)$$

式中,M_1 和 M_2 分别代表两个不同的 Os 同位素。

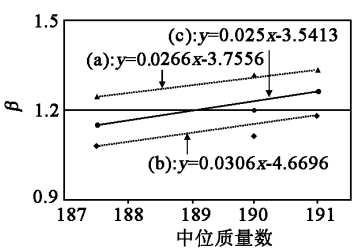

图 3　Os 同位素分馏系数 β 与中位质量数的关系

Fig. 3 The relationship between Os isotope fractionation factor β and the middle-mass

(a)和(b)—代表不同测定条件;(c)—(a)和(b)平均值。

在 Os 同位素稀释法计算中,$\beta(^{192}Os/^{188}Os)$与$\beta(^{192}Os/^{190}s)$和$\beta(^{187}Os/^{188}Os)$的关系是必须知道的,通过式(4),得到:

$$\beta(^{192}Os/^{190}Os)=\beta(^{192}Os/^{188}Os)+0.025\times(191-190) \quad (5)$$

$$\beta(^{187}Os/^{188}Os)=\beta(^{192}Os/^{188}Os)+0.025\times(187.5-190) \quad (6)$$

2.3.2　校正原理

在没有加稀释剂的情况下,可以用$^{192}Os/^{188}Os$的 Nier 值作为标准化值,得到$^{192}Os/^{188}Os$的分馏系数β,再由式(5)和式(6),得到其他的同位素比值的分馏系数,然后进行分馏校正。

但在加了稀释剂之后,$^{192}Os/^{188}Os$的值发生了改变,简单的内标校正已不可行。不过,由于稀释剂中^{192}Os和^{188}Os的丰度很小,加稀释剂后,$^{192}Os/^{188}Os$与 Nier 值差异不会太大,所以本实验可以用迭代的方法,求出加过稀释剂以后的$(^{192}Os/^{188}Os)_{mix}$,然后用它作为标准化值进行内标校正。具体步骤如下。

(1)用含样品和稀释剂混合物的测定值$(^{187}Os/^{188}Os)_m$近似代表样品的$^{187}Os/^{188}Os$计算样品的 Os 同位素组成。

(2)分馏校正:先假定混合物的$(^{192}Os/^{188}Os)_{mix}$为 Nier 值3.0892,用它作为标准化值,求出分馏系数β。

$$\beta\left(\frac{^{192}Os}{^{188}Os}\right)=\ln\left[\frac{(^{192}Os/^{188}Os)_m}{(^{192}Os/^{188}Os)_{mix}}\right]\Big/\ln\left(\frac{192}{188}\right)$$

由式(5)和式(6),得到分馏系数$\beta(^{192}Os/^{190}Os)$和$\beta(^{187}Os/^{188}Os)$。由所得的分馏系数以及测定值,根据对数定律算出校正值$(^{192}Os/^{190}Os)_C$和$(^{187}Os/^{188}Os)_C$。

(3)根据校正值$(^{192}Os/^{190}Os)_C$以及样品和稀释剂的 Os 同位素丰度,计算样品中 Os 和稀释剂中 Os 的摩尔比(χ)。

$$\chi\left(\frac{N}{S}\right)=\frac{\left(\frac{^{192}Os}{^{190}Os}\right)_S-\left(\frac{^{192}Os}{^{190}Os}\right)_C}{\left(\frac{^{192}Os}{^{190}Os}\right)_C-\left(\frac{^{192}Os}{^{190}Os}\right)_N}\times\frac{(^{190}Os)_S}{(^{190}Os)_N} \quad (7)$$

式(7)中,S 为稀释剂;N 为样品;$(^{190}Os)_S$为稀释剂中^{190}Os的丰度;$(^{190}Os)_N$为样品中^{190}Os的丰度。

(4)将校正值$(^{187}Os/^{188}Os)_C$扣除稀释剂后,得到样品的同位素比值$(^{187}Os/^{188}Os)_N$为:

$$\left(\frac{^{187}Os}{^{188}Os}\right)_N=\frac{\left(\frac{^{187}Os}{^{188}Os}\right)_C\times\left[\chi\left(\frac{N}{S}\right)\times(^{188}Os)_N+(^{188}Os)_S\right]-(^{187}Os)_S}{(^{188}Os)_N\times\chi\left(\frac{N}{S}\right)}$$

(5)据步骤(3)算出的样品与稀释剂摩尔比以及样品和稀释剂同位素丰度,计算加入稀释剂后样品的$(^{192}Os/^{188}Os)_{mix}$。

$$\left(\frac{^{192}Os}{^{188}Os}\right)_{mix}=\frac{(^{192}Os)_N\times\chi\left(\frac{N}{S}\right)+(^{192}Os)_S}{(^{188}Os)_N\times\chi\left(\frac{N}{S}\right)+(^{188}Os)_S}$$

All rights reserved. http://www.ykcs.ac.cn

将步骤(4)得到的$(^{187}Os/^{188}Os)_N$代替步骤(1)中的$(^{187}Os/^{188}Os)_m$,步骤(5)得到的同位素比值$(^{192}Os/^{188}Os)_{mix}$代入步骤(2)中,然后重复步骤(3)~(5),与上一次迭代计算后的$(^{192}Os/^{188}Os)_{mix}$比较,当在误差允许范围内一致时,迭代即结束;否则,再一次迭代计算,如此循环。

(6)当迭代计算结束后,根据最后得到的$\chi\left(\frac{N}{S}\right)$计算样品中总 Os 和普通 Os 的含量。

2.3.3 Os 同位素标准溶液测定及计算结果

由 ICP-MS 测量 FL-7、FL-8 和 FL-9 的 Os 同位素组成,得到$(^{192}Os/^{188}Os)_m$、$(^{192}Os/^{190}Os)_m$、$(^{187}Os/^{188}Os)_m$,由 2.3.2 节所述迭代方法计算出校正值。将测定值和校正值分别与标准值比较(表3),可以看出,校正以前,实测值$^{192}Os/^{190}Os$对计算值相对偏差为 +1.15% ~ +1.63%,实测值$^{187}Os/^{188}Os$对计算值的相对偏差为 -0.39% ~ -0.88%。不难看出,ICP-MS 测定 Os 同位素组成时发生较大分馏,且偏离方向一致,表现出系统误差。而经过校正以后,$^{192}Os/^{190}Os$对计算值的相对偏差为 -0.08% ~ +0.18%;$^{187}Os/^{188}Os$与计算值的相对偏差为 -0.32% ~ +0.23%。校正值对计算值的相对偏差明显减小,且偏离方向随机分布,表现为偶然误差的特征,说明本实验进行的校正方法是有效的,达到了 Re-Os 同位素定年要求。

表3　Os 同位素比值标准溶液测定及计算结果①

Table 3　The measurement and calculation results of Os isotope ratio standard solution

溶液编号	$^{187}Os/^{188}Os$			$RE_{测}$/%	$RE_{校}$/%
	计算值	测定值	校正值		
FL-7	0.3086	0.3090	0.3085	0.13	-0.03
FL-7	0.3086	0.3069	0.3086	-0.55	0
FL-8	0.3077	0.3065	0.3084	-0.39	0.23
FL-8	0.3077	0.3053	0.3071	-0.78	-0.19
FL-9	0.3072	0.3045	0.3062	-0.88	-0.32
溶液编号	$^{192}Os/^{190}Os$			$RE_{测}$/%	$RE_{校}$/%
	计算值	测定值	校正值		
FL-7	0.7376	0.7480	0.7398	1.41	0.30
FL-7	0.7376	0.7496	0.7389	1.63	0.18
FL-8	0.5574	0.5646	0.5571	1.29	-0.05
FL-8	0.5574	0.5650	0.5577	1.36	0.05
FL-9	0.4952	0.5009	0.4948	1.15	-0.08

① 相对偏差以计算值为标准。$RE_{测}=\frac{测定值-计算值}{计算值}\times100$;

$RE_{校}=\frac{校正值-计算值}{计算值}\times100$。

3　结语

(1)在 Re 的测定液中加入适量 Ir,控制 Ir/Re 质量比为 1~2.5,可以实现 Re 同位素组成测定的在线分馏校正。

(2)Os 不同的同位素比值对分馏系数不一样,与中位质量数成正比。利用迭代的方法求得稀释剂和样品混合物的$(^{192}Os/^{188}Os)_{mix}$,由此得到该同位素对的分馏系数。再由 Os 的同位素对的分馏系数与中位质量数的正比例关系,求得所有要求分馏校正的同位素对各自的分馏系数,可以实现内标分馏校正,其校正效果明显。

4　参考文献

[1] 屈文俊,杜安道. 电感耦合等离子质谱法测定辉钼矿中 Re、Os 含量质量分馏效应的校正[J]. 质谱学报,2004,25(增刊):181-182.

[2] Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf Isotope Ratio Analysis using Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: An Evaluation of Isobaric Interference Corrections[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*,2002,17(12):1567-1574.

[3] 梁细荣,李杰,漆亮,等. 多接收器等离子体质谱精确测定铼含量及其同位素丰度[J]. 岩矿测试,2005,24(1):1-6.

[4] 郑磊,支霞臣,靳永斌. 负热电离质谱法测量 Os 同位素组成的质量分馏校正[J]. 质谱学报,2004,25(4):193-197.

[5] 杨刚,陈江峰,杜安道. Re-Os 和 Pt-Os 同位素体系在金属矿床的研究和应用[D]. 合肥:中国科学技术大学博士学位论文,2005.

[6] Hirata T. Lead Isotopic Analysis of NIST Standard Reference Materials using Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Coupled with a Modified External Correction Method for Mass Discrimination Effect[J]. *Analyst*,1996,112:1407-1141.

[7] 梁细荣,韦刚健,李献华,等. 利用 MC-ICPMS 精确测定$^{143}Nd/^{144}Nd$和 Sm/Nd 比值[J]. 地球化学,2003,32(1):91-96.

[8] 杜安道,何红蓼,殷宁万,等. 辉钼矿的铼-锇同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报,1994,68(4):339-347.

[9] 李冰,杨红霞. 电感耦合等离子体质谱原理和应用[M]. 北京:地质出版社,2005:178-179.

All rights reserved. http://www.ykcs.ac.cn