

新太古代球粒陨石型对流上地幔：河北遵化 豆荚状铬铁矿的 Os 同位素组成

夏琼霞 支霞臣* 李江海 黄雄南

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026; 北京大学地质系, 北京 100871. * 联系人, E-mail: xczhi@ustc.edu.cn)

摘要 豆荚状铬铁矿是蛇绿岩方辉橄榄岩中特征性的地幔单元, 具有低 Re 高 Os 含量的特性, 能够抵抗变质、蚀变和风化作用对其 Os 同位素组成的影响. 豆荚状铬铁矿 Os 同位素组成的测量值可以代表其形成时的初始 Os 同位素组成, 为认识大洋岩石圈的形成和演化提供重要证据. 本文报道了河北遵化新太古代蛇绿混杂岩带中 7 个豆荚状铬铁矿全岩的 Re-Os 含量和 Os 同位素组成, Re 含量为 0.019~0.128 ng/g, Os 含量为 8.828~354.0 ng/g, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值为 0.11003~0.11145. 3 个 Os 含量>300 ng/g 的块状铬铁矿矿石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 平均值为 0.11026 ± 0.00005 , 在 2.6 Ga 时的 γ_{Os} 为 -0.12 ± 0.06 , 表明新太古代对流上地幔的 Os 同位素组成是球粒陨石型的. 这是迄今为止报道的最古老的蛇绿岩豆荚状铬铁矿的 Os 同位素组成.

关键词 Os 同位素组成 球粒陨石型 对流上地幔 新太古代 豆荚状铬铁矿

对流上地幔的 Os 同位素组成和演化是一个重要而颇有难度的科学问题, 关系到地球内部铂族元素(PGE)的分布和地球增生演化的方式. 从深海橄榄岩、MORB 及其中玻璃和硫化物的 Os 同位素组成可以获得现代对流上地幔的 Os 同位素组成.

深海橄榄岩是提取 MORB 后残留的对流上地幔的最上部物质, 其 Os 同位素组成反映了 MORB 源区的性质. 由于深海橄榄岩具有较高的 Os 含量和较低的 Re/Os 比值, 其 Os 同位素组成受海水蚀变的影响较小. 但现有测量结果表明深海橄榄岩 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值的 变化范围为 0.120~0.129, 平均值为 0.1247^[1-4]. 表明现代对流上地幔的 Os 同位素组成是亏损型的, 是长期亏损 Re 造成的, 这与现代对流上地幔具有亏损的 Sr, Nd 同位素特征相一致.

MORB 是来源于对流上地幔的物质, MORB 及其 中玻璃和硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值变化范围为 0.127~0.2^[2,5,6], 比深海橄榄岩更富集 ^{187}Os . 由于 MORB 的 Os 含量 < 10 pg/g, Os 同位素组成易受扰动, 如高放射成因 Os ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} \approx 1.0$) 的海水蚀变影响、MORB 高 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值 (100~5000)^[7] 的原位衰变, 都将导致 Os 同位素比值的增高. 因此 MORB 甚至其中的玻璃和硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值通常不能代表现代对流上地幔的 Os 同位素组成.

根据地幔橄榄岩捕虏体和造山带橄榄岩的 Os 同位素组成分析, 推断原始上地幔 (PUM) $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比

值的现代值为 0.1296 ± 0.0008 ^[8].

蛇绿岩代表仰冲在陆壳上的古老海洋岩石圈残片, 其地幔橄榄岩单元的 Os 同位素组成反映了古老对流上地幔的 Os 同位素特征. 蛇绿岩中伴生的豆荚状铬铁矿主要产于地幔和下地壳的纯橄岩透镜体中, 豆荚状铬铁矿的 Os 含量高, Re/Os 比值低, 形成后由 Re 原位衰变形成的 ^{187}Os 数量极少. 因洋底蚀变和仰冲作用, 蛇绿岩的硅酸盐部分几乎都遭受了严重的蛇纹石化作用, 可能导致 Re-Os 同位素体系的开放^[3], 但是豆荚状铬铁矿能够抵抗蛇纹石化和俯冲板片来源的流体或熔体对其 Os 同位素组成的影响, 保存了形成时的 Os 同位素组成. 不同时代的蛇绿岩豆荚状铬铁矿是研究对流上地幔 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值长期演化的最好的样品^[9]. Walker 等人^[9]报道了 50~900 Ma 时段 18 个地区的蛇绿岩豆荚状铬铁矿的 Os 同位素组成, 得到对流上地幔 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的现代值为 $0.12809\pm0.00085(2\sigma)$, 与 PUM 现代值^[8]相似. 在 51 个样品中, 有 68% 的数据点落在球粒陨石型对流上地幔演化线附近. 芬兰东部早元古代 Outokumpu 蛇绿岩^[10]和芬兰北部早元古代 (1.97 Ga) Jormua 蛇绿混杂岩^[11]中豆荚状铬铁矿的 Os 同位素组成, 都具有球粒陨石特征. 因此可以推断, 自早元古代到显生宙对流上地幔的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 长时演化是符合球粒陨石模式的.

最近河北遵化、辽西建平等地发现了新太古代蛇绿岩, 引起了国内外学术界的关注和争议^[12-17]. 尽管

古老蛇绿岩记录普遍残缺不全,完整剖面很难保存,但是该区出露的豆荚状铬铁矿得到了2002年北京Penrose会议和2003年北京Inter-Ridge会议与会者的广泛认可,因而遵化蛇绿岩豆荚状铬铁矿为研究新太古代对流上地幔的Os同位素组成提供了宝贵的样品.李江海等人^[16]、黄雄南等人^[18]、陈征等人^[19]系统地研究了遵化豆荚状铬铁矿的物质成分、结构构造和形成过程,为厘定新太古代蛇绿岩提供了充分证据.本文报道了遵化新太古代蛇绿岩豆荚状铬铁矿的Re-Os含量和Os同位素组成,为研究新太古代对流上地幔的Os同位素组成提供了一个观察实例.

1 地质概况和采样

华北新太古代蛇绿岩在遵化构造带上呈带状和香肠构造分布,从宽城东南部至遵化西北的兴旺寨地区,东西宽约20 km,北东向延伸达80 km,主要以0.2~100 m大小不同的构造透镜体出现在剪切变形的黑云斜长片麻岩中,主要岩石类型包括蛇纹岩、纯橄岩、方辉橄榄岩、辉石岩、辉长岩、辉长-辉石岩、闪长岩和豆荚状铬铁矿.遵化蛇绿混杂岩带的豆荚状铬铁矿矿体的形状和大小变化很大,有层状、透镜状、杆状和不规则状,厚度在10 m~1 cm之间变化,但外部都有一层纯橄岩包壳,与豆荚状铬铁矿的典型产状一致^[20],在遵化西北的毛家厂、珠岭、绿石沟、阎王台地区,北部的大河局地区和东部的山王庄、松棚营地区都有出露.本文的7个豆荚状铬铁矿样品采自遵化西北部,1个样品(01552)采自珠岭,6个样品采自绿石沟(图1).绿石沟铬铁矿主要以块状矿石为主,

结构以浸染状、网孔状和致密状为主.珠岭矿体规模较小,以脉状、小型豆荚状(<10 cm)、褶皱构造和糜棱状构造为主,结构以豆壳状、浸染状、网孔状和致密状为主,相当部分铬铁矿发生强烈剪切变形¹⁾.

遵化铬铁矿尖晶石富铬,电子探针分析表明具有高铬、低钛的特征,Cr₂O₃含量通常大于50%,Cr值(Cr/(Cr+Al))一般大于0.80,在TiO₂-Cr₂O₃图中,遵化铬铁矿的数据全部落在蛇绿岩范围内^[19].遵化铬铁矿的铂族元素(PGE)球粒陨石标准化丰度模式表现为明显的负斜率分布,Pt组铂族元素(PPGE)相对于Ir组铂族元素(IPGE)亏损,与阿曼、新克里多尼亚、希腊以及中国藏北东巧、藏南罗布莎等地典型的蛇绿岩豆荚状铬铁矿的类似¹⁾.

2 分析方法

Re-Os同位素分析在中国科学技术大学地球和空间科学学院Re-Os同位素地球化学实验室完成,分析方法详见文献[21~23].精确称量2 g左右全岩粉末(<200目)装入Carius管,在冷冻状态下依次加入Os,Re稀释剂、3 mL 12 N HCl和6 mL 15 N HNO₃,密封后装入不锈钢套,在230℃加热18小时,冷却后将Carius管放入超声波振荡仪振荡10分钟,使样品与混合酸充分接触,再在230℃加热18小时.Os的分离提纯采用两次蒸馏法.开管后先用小型蒸馏装置提取Os,用高纯N₂气将OsO₄从样品溶解液中吹出,用高纯高浓HBr吸收,使OsO₄还原为OsBr₆²⁻^[24].后用微蒸馏法纯化Os^[25],最后将含Os溶液浓缩至1~2 μL,用负离子热电离质谱法(NTIMS)测定^[26,27].Re的

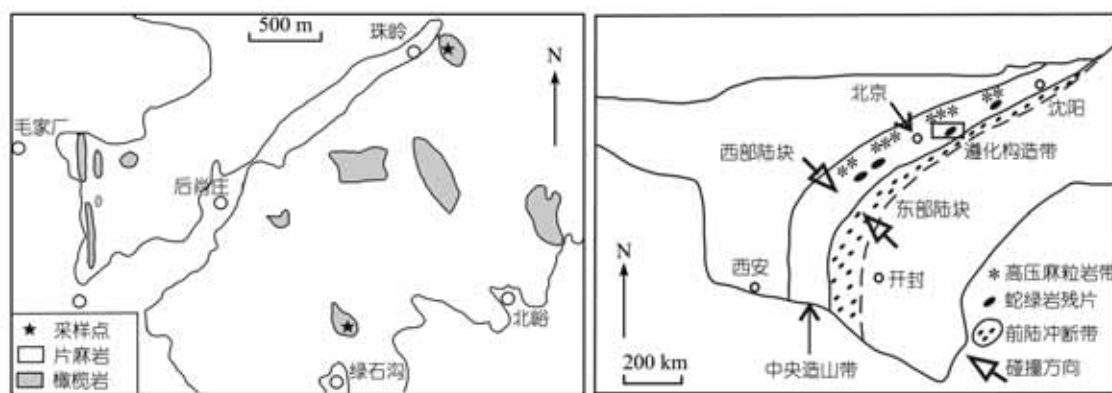


图1 遵化构造带新太古代蛇绿混杂岩带地质简图以及样品分布(据文献[18, 19])

右图中小方框代表左图位置

1) 黄雄南. 冀东新太古代豆荚状铬铁矿与华北早期板块构造过程. 北京大学博士学位论文, 2003

提取和纯化用AG1×8 型阴离子交换树脂,依次用 3 mL 0.8 N, 10 mL和 3 mL 0.8 N HNO₃ 清洗树脂. 将分离Os后的残液在 115 °C 蒸干,加 5 mL 0.4 N HNO₃ 加热溶解,溶液离心 30 分钟,将清液上柱. 用 6 mL和 3 mL 0.8 N HNO₃ 淋洗交换柱,用 5 mL 8 N HNO₃ 洗脱 Re. 洗脱液在 115 °C 电热板上蒸干,加 1 mL 2% HNO₃ 溶解,用ID-SN-ICPMS 测定Re^[28].

Re 的测定采用南京大学地球科学系的 Finign MAT Element 型 ICP-MS 仪器,¹⁸⁵Re/¹⁸⁷Re 比值的测量精度为 1%左右. Os 同位素测定采用中国科学技术大学地球和空间科学学院的 Finign MAT262 质谱仪,¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 的测量精度优于 0.04%, Os 同位素测量值都经过了质量分馏校正和氧同位素组成校正¹⁾. 全流程 Re、Os 本底分别为 2pg 和 5pg, Os 本底较高,但相对铬铁矿的高含量 Os 仍可忽略, Os 空白的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值为 0.17, 表 1 的数据都经过了空白校正.

3 结果与讨论

3.1 分析结果

遵化豆荚状铬铁矿样品的Re、Os含量和Os同位素数据见表 1, Os含量的变化范围分别为 8.828~354.0 ng/g, Re含量为 0.019~0.128 ng/g, Os含量与文献中报道的类似样品的变化范围相似, Re含量处于文献报道值的较低部分^[9~11](图 2), ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os的变化范围为 0.11003~0.11145, ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os比值为 0.0007~0.0121, 大大低于PUM的现代值 0.435(图 3)^[29]. 在最近的“华北克拉通构造演化”工作会议上, 美国圣路易斯大学

的 T. Kusky教授提供给我们的遵化豆荚状铬铁矿 Re-Os同位素数据如下: Re为 0.037~0.178 ng/g, Os为 5.201~40.08 ng/g, ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os为 0.10969~0.11202, ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os为 0.0074~0.0292(Kusky T, 私人交流), 可见采自同一地区两套不同样品的分析结果是相似的. 根据本文样品组的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os比值得到Re亏损模式年龄 t_{RD} 为 2.45~2.64 Ga, 通常认为最老的 t_{RD} 最接近于蛇绿岩的实际形成年龄^[30], 本文的结果表明豆荚状铬铁矿形成时间为新太古代.

从图 2 可以看出, 遵化铬铁矿的Re含量偏低, 其中 3 个含铬铁矿蛇纹岩(样号 01552, 01577, 01579)的全岩分析结果表明烧失量(LOI)>12%, Fe₂O₃/FeO(质量比)>5%²⁾, 显示了严重的蛇纹石化和蚀变作用, 可能导致Re的丢失, 使Re/Os比减小^[31]. 由于蛇绿岩形

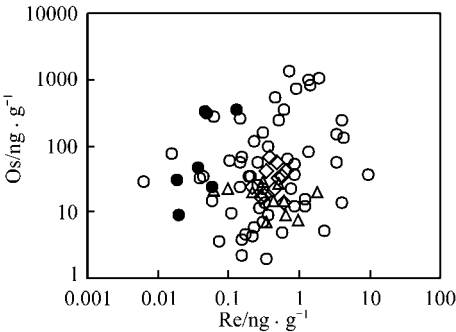


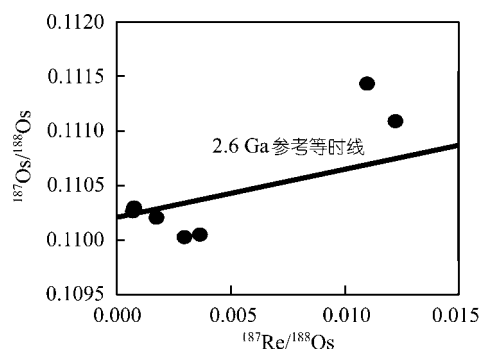
图 2 蛇绿岩铬铁矿的 Re、Os 含量分布图
空心圆圈引自文献[9], 空心三角引自文献[10], 空心三角引自文献[11], 实心圆圈为本文研究的遵化铬铁矿数据

表 1 河北遵化豆荚状铬铁矿全岩的 Re-Os 同位素数据

岩石类型	样号	Re/ng · g ⁻¹	Os/ng · g ⁻¹	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	(¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os) _i ^{a)}	t_{RD} ^{b)}	γ_{Os} ^{c)}
含铬铁矿 蛇纹岩	01552	0.020±2	8.828	0.11145±6	0.0107	0.11097	2.45	+0.57
	01577	0.019±2	31.26	0.11003±3	0.0029	0.10990	2.64	-0.40
	01579	0.035±1	47.43	0.11006±1	0.0035	0.10989	2.64	-0.40
	02543-2	0.060±2	24.01	0.11110±1	0.0121	0.11056	2.50	+0.20
块状铬铁矿 矿石	02543-1	0.128±1	354.0	0.11021±1	0.0017	0.11013	2.62	-0.19
	02542	0.046±5	326.9	0.11027±1	0.0007	0.11024	2.61	-0.10
	LWH	0.049±2	315.7	0.11030±1	0.0007	0.11027	2.61	-0.07
	平均值 ^{d)}			0.11026		0.11021	2.62	-0.12
σ				0.00005		0.00006	0.006	0.06

a) (¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os)_i表示时间 $t = 2.6$ Ga时样品的初始Os同位素组成. 计算公式为: (¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os)_i = ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os - ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os × (e ^{λt} - 1), $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ [31], $t = 2.6 \text{ Ga}$. b) $t_{RD} = 1/\lambda \times \text{Ln}((^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}) / (^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}_{(0)} + 1)$, t_{RD} 单位为Ga. 式中 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os₍₀₎ = 0.1296±0.0008^[8], ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os₍₀₎ = 0.435±0.005^[29]. c) $\gamma_{Os} = ((^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i / ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{\text{S(CHON)}} - 1) \times 100$, 其中 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os_{S(CHON)}} = 0.1296 - 0.435 × (e ^{λt} - 1), $t = 2.6 \text{ Ga}$. d) 为 3 个块状铬铁矿矿石的平均值

1) 郑磊, 支霞臣, 靳永斌. NTIMS 法测量 Os 同位素组成的质量分馏校正. 质谱学报(待刊)
2) 见 2588 页脚注

图3 遵化豆英状铬铁矿的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$

成后 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值受到扰动, 因而原位衰变校正后的 Os 同位素组成不能代表铬铁矿形成时的初始值。但是 3 个块状铬铁矿矿石由于 Os 含量很高(>300 ng/g), 对于可能受到的扰动影响的抵抗力最大, 同时很小的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值使原位衰变校正很小, 所以它们的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值可以作为体系形成时的初始 Os 同位素比值。3 个样品的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 平均测量值为 $0.11026 \pm 0.00005(\sigma)$, 2.6 Ga 时的 $\gamma_{\text{Os}} = -0.12 \pm 0.06(\sigma)$ 。

3.2 遵化蛇绿岩形成时间的制约

遵化蛇绿岩的形成时间目前尚无直接的同位素定年结果, 但是从其围岩的形成时间和区域构造历史, 可以对蛇绿岩的形成时间予以制约。遵化蛇绿混杂岩带的几处围岩已有锆石 U-Pb 法测得了形成年龄, 如陶军山英云闪长质片麻岩为 $2560 \pm 6/-4$ Ma, 秋花峪英云闪长质片麻岩为 2561 Ma^[32], 王厂奥长花岗质片麻岩为 $2501 \pm 19/-17$ Ma¹⁾; 石人沟黑云母片麻岩为 $2576 \pm 29/-23$ Ma, 它们代表了蛇绿岩置换时间的下限, 因为它们均被蛇绿岩混杂带切割。石人沟红色花岗岩侵位于蛇绿岩混杂带内, 为碰撞造山后产物, 由锆石 U-Pb 法测到形成年龄为 2400 ± 15 Ma^[33], 代表了蛇绿岩混杂带形成年龄的上限。从上述同位素年龄及其区域构造可以限定, 遵化蛇绿岩侵位于 2.5 Ga 前后, 根据威尔逊循环, 洋壳从形成到俯冲的时间不超过 200 Ma, 因此可以认为蛇绿岩的形成时间为 2.5~2.7 Ga, 属新太古代。

3.3 对流上地幔 Os 同位素组成的长期演化

图 4 表示了对流上地幔 Os 同位素组成的球粒陨石型演化。其中 A 代表全球 18 个地区的蛇绿岩豆英状铬铁矿的初始 Os 同位素组成范围^[9], 除 2 个样品外, 数据点基本上都在演化线附近, 全部样品的平均

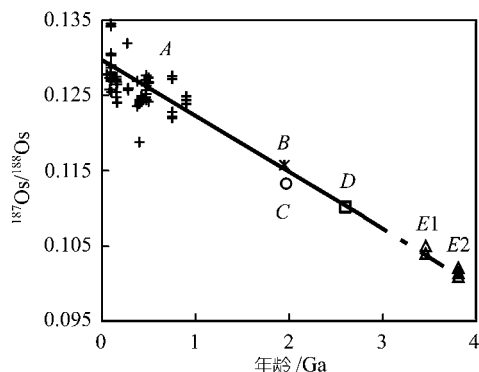


图4 对流上地幔 Os 同位素组成的演化

十字形引自文献[9], 空心圆圈引自文献[10], 星号引自文献[11], 空心三角引自文献[29], 空心方块为本文研究的遵化铬铁矿数据。直线表示对流上地幔 Os 同位素组成的球粒陨石型演化线, 参数为 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(0)} = 0.1296 \pm 0.0008$ ^[8], $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}_{(0)} = 0.435 \pm 0.005$ ^[29], $= 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ ^[31], 其中实线部分表示有蛇绿岩豆英状铬铁矿样品证实的, 虚线部分表示尚无蛇绿岩豆英状铬铁矿样品证实的

γ_{Os} 为 -0.6 ± 1.9 。B 是芬兰北部 Jormua 蛇绿混杂岩豆英状铬铁矿的初始 Os 同位素组成的平均值^[11], 各个样品间的 Os 同位素组成变化较大, 显示了源区的不均一性, 除了 4 个异常点外, 其余样品的平均 $\gamma_{\text{Os}} = +0.4 \pm 1.5$ 。C 是芬兰东部 Outokumpu 早元古代蛇绿岩豆英状铬铁矿的初始 Os 同位素组成的平均值^[10], 其 γ_{Os} 为 -1.6 ± 0.5 。另外, 从芬兰北部 1.9 Ga 的 Nuttio 蛇绿岩中分离的 1 个铬铁矿的 γ_{Os} 为 -1.3 , 也是球粒陨石型的(未图示)^[9]。

图 4 中 D 是本文报道的遵化新太古代蛇绿岩豆英状铬铁矿中 3 个块状铬铁矿矿石的初始 Os 同位素组成, 它将证实对流上地幔 Os 同位素组成呈球粒陨石型演化的起始时间, 从文献中报道的 2.0 Ga 提前至 2.6 Ga。关于更早期的对流上地幔 Os 同位素组成的性质有待于新的发现予以阐明。但是关于古老地幔具有球粒陨石型 Os 同位素特征已有报道, 如从澳大利亚西部 3.46 Ga Pilbara 科马提岩中分离的 2 个铬铁矿的初始 γ_{Os} 为 $+1.17$ 和 $+0.2$ (图 4, E1), 从格林兰西南 3.8 Ga 尖晶石相橄榄岩中分离的橄榄石、尖晶石和低 Re/Os 的全岩得到的初始 γ_{Os} 分别为 $+0.92$, $+0.23$ 和 -0.27 (图 4, E2), 都显示了早期地幔的球粒陨石型 Os 同位素特征, 但 Pilbara 科马提岩代表深部地幔, 格林兰橄榄岩代表深海橄榄岩, 与形成蛇绿岩豆英状铬铁矿的对流上地幔的环境不同^[29]。

1) 河北省地质矿产局区域地质调查队, 1988, 1:5 万下板城幅、峪耳崖幅、太平寨幅区域地质调查报告

4 结论

不同时代蛇绿岩豆荚状铬铁矿的 Os 同位素组成记录了对流上地幔 Os 同位素组成的长期演化。遵化新太古代蛇绿岩中 3 个高 Os 含量的铬铁矿矿石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值变化范围为 0.11021~0.11030, 平均值为 0.11026 ± 0.00005 , 2.6 Ga 时 γ_{Os} 为 -0.12 ± 0.06 , 为认识新太古代对流上地幔 Os 同位素组成和演化提供了新的观察实例, 它是迄今为止所报道的最古老的蛇绿岩豆荚状铬铁矿的 Os 同位素组成, 表明新太古代以来对流上地幔 Os 同位素组成的演化是球粒陨石型的。

致谢 中国科学技术大学地球与空间科学学院 Re-Os 同位素地球化学实验室秦协、郑磊、孟庆等在实验中给予第一作者很大的帮助, 在 NTIMS 法测量 Os 同位素实验中得到中国科学技术大学地球与空间科学学院彭子成教授的悉心指导和帮助, 在 ICP-MS 测 Re 同位素实验中得到南京大学地球科学系高剑峰老师的帮助, 在本文修改过程中中国科学技术大学地球与空间科学学院郑永飞教授和西北大学高山教授提供了宝贵的意见, 在此一并表示衷心的感谢。本工作受国家自然科学基金(批准号: 40173009, 49873005)、国家重点基础研究发展规划项目(G1999075503)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-107)资助。

参 考 文 献

- Martin C E. Osmium isotope characteristics of mantle-derived rocks. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 1421~1434[DOI]
- Roy-Barman M, Allegre C J. $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ ratios of mid-ocean ridge basalts and abyssal peridotites. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 5043~5054[DOI]
- Snow J, Reisberg L. Os isotope systematics of the MORB mantle: results from altered abyssal peridotites. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 133: 411~421[DOI]
- Brandon A D, Snow J E, Walker R J, et al. ^{190}Pt - ^{186}Os and ^{187}Re - ^{187}Os systematics of abyssal peridotites. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 177: 319~335[DOI]
- Schiano P, Birck J L, Allegre C J. Osmium-strontium-neodymium-lead isotopic covariations in mid-ocean ridge basalt glasses and the heterogeneity of the upper mantle. *Earth Planet. Sci Lett*, 1997, 150: 363~379[DOI]
- Roy-Barman M, Wasserburg G J, Papanastassiou D A, et al. Osmium isotopic composition and Re-Os concentrations in sulfide globules from basaltic glasses. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 154: 331~347[DOI]
- Shirey S B, Walker R J. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 423~500[DOI]
- Meisel T, Walker R J, Irving A J, et al. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: A global perspective. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65: 1311~1323[DOI]
- Walker R J, Prichard H M, Ishiwatari A, et al. The osmium isotope composition of convecting upper mantle deduced from ophiolite chromites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66(2): 329~345[DOI]
- Walker R J, Hanski E J, Vuollo J, et al. The Os isotopic composition of Proterozoic upper mantle: Evidence for chondritic upper

- mantle from the Outokumpu ophiolite, Finland. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 141: 161~173[DOI]
- Tsuru A, Walker R J, Kontinen A, et al. Re-Os isotopic systematics of the Jormua Ophiolite Complex, NW Finland. *Chem Geol*, 2000, 164: 123~141[DOI]
- Kusky T, Li J H, Tucker B. The Archean Dongwanzi Ophiolite complex, North China Craton. *Science*, 2001, 292: 1142~1145[DOI]
- Zhai M G, Zhao G C, Zhang Q, et al. Is the Dongwanzi complex an Archean ophiolite? *Science*, 2002, 295: 923a[DOI]
- Li J H, Kusky T, Huang X N. Archean podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélange, North China Craton: A record of early oceanic mantle processes. *GSA Today*, 2002, 12(7): 4~11
- 李江海, 牛向龙, 陈征, 等. 辽西豆荚状铬铁矿的发现及其意义. *岩石学报*, 2002, 18(2): 187~192
- 李江海, 牛向农, 黄雄南, 等. 豆荚状铬铁矿: 古大洋岩石圈残片的重要证据. *地学前缘*, 2002, 9(3-4): 235~246
- 张旗, 倪志耀, 翟明国. 关于冀东太古宙蛇绿岩的几个问题. *地学前缘*, 2003, 10(4): 429~436
- 黄雄南, 李江海, 牛向龙, 等. 新太古代大洋岩石圈地幔的显微变形探讨——以遵化蛇绿混杂岩带为例. *自然科学进展*, 2003, 13(5): 495~501
- 陈征, 李江海, 黄雄南, 等. 豆荚状铬铁矿豆状结构成因机制探讨. *地学前缘*, 2004, 11(1): 215~233
- Thayer T P. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Gulemen-Soridag district. *Turkey Econ Geol*, 1964, 59: 1497~1524
- Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry*, 1995, 67 (13): 2136~2141
- 靳永斌, 支霞臣, 孟庆, 等. 大别山北部饶拔寨超镁铁岩体的形成时代: Re-Os 同位素法定年. *科学通报*, 2003, 48(24): 2560~2565
- 孟庆, 郑磊, 夏琼霞, 等. 镁铁-超镁铁岩-钼-钨同位素体系分析方法. *岩矿测试*, 2004, 23(2): 92~96
- Nägler T F, Frei R. "Plug in" Os distillation. *Schweiz. Mineral Petrogr Mitt*, 1997, 77: 123~127
- Birck J L, Roy-Barman M, Capmas F. Re-Os isotope measurements at the femtomole level in natural samples. *Geostandards Newsletter*, 1997, 21: 19~27
- Creaser R A, Papanastassiou D, Wasserburg G J. Negative thermal ion mass spectrometry of osmium, rhenium, and iridium. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 397~401[DOI]
- Volkening, Walczyk T, Heumann K G. Osmium isotopes ratio measurements by negative thermal ionization mass spectrometry. *Int J Mass Spectrom Proc*, 1991, 105: 147~159[DOI]
- Morgan J W, Golightly D W, Dorrzapf Jr A F. Methods for the separation of rhenium, osmium and molybdenum applicable to isotope geochemistry. *Talanta*, 1991, 38: 259~265[DOI]
- Bennett V C, Nutman A P, Esat T M. Constraints on mantle evolution from $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ isotopic compositions of Archean ultramafic rocks from southern West Greenland (3.8 Ga) and Western Australia (3.46 Ga). *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66(14): 2615~2630[DOI]
- Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, et al. Os, Sr, Nd, and Pb isotope systematics of southern African xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 1583~1595[DOI]
- Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group A, A, and B iron meteorites. *Science*, 1996, 271: 1099~1102
- 王启超, 张少卿, 齐鸿烈, 等. 冀东太古宙变质岩原岩性质及花岗质岩体的成因分析. *河北地质情报*, 1995(2): 1~12
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 华北陆台早前寒武纪重大地质事件. 北京: 地质出版社, 1992. 1~10

(2004-06-10 收稿, 2004-08-09 收修改稿)