

上地幔 Os 同位素组成的演化^{*}

支霞臣, 秦 协

中国科学院壳幔物质和环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

摘要: Re-Os 同位素体系为研究地幔的成分—结构—演化提供了新的地球化学示踪和定年的工具。上地幔 Os 同位素组成的球粒陨石模型是 Re-Os 体系用于地幔物质定年的基础, 尤其在采用 Re 亏损模式年龄和 Os 同位素代理等时线年龄时。综合了铁陨石和各类球粒陨石、地幔橄榄岩包体和蛇绿岩豆荚状铬铁矿的 Re-Os 同位素体系研究的近期成果, 为认识对流上地幔 Os 同位素组成的演化提供了制约。对河北遵化蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩的研究, 获得新太古代(2.5 Ga)时形成豆荚状铬铁矿的对流上地幔的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os=0.1102, 与球粒陨石型模式的一致。文献中常用的球粒陨石模式的参数如下: 地球形成时(4.558 Ga)初始值¹⁸⁷Os/¹⁸⁶Os 为 0.09531, 现代值分别采用碳质球粒陨石的¹⁸⁷Os/¹⁸⁶Os 比值为 0.1270 和原始上地幔(PUM)的¹⁸⁷Os/¹⁸⁶Os 比值为 0.1296, PUM 与普通球粒陨石和顽火球粒陨石的¹⁸⁷Os/¹⁸⁶Os 比值接近。

关键词: 对流上地幔; Re-Os 同位素体系; 球粒陨石型; 蛇绿岩豆荚状铬铁矿; 地幔橄榄岩包体。

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2006)01-0023-08

收稿日期: 2005-10-23

Evolution of Os Isotopic Compositions in the Upper Mantle

ZHI Xia-chen, QIN Xie

CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The Re-Os isotope system is a new technique of geochemical dating and tracing, specially in the basic subject of the composition-structure-evolution of the earth's mantle. The chondritic model of the evolution of Os isotope compositions in the upper mantle is the important background of Re-Os isotope dating for the mantle-derived materials, especially using Re depleted model age and Os proxy isochron methods. The comprehensive studies of various meteorites, mantle-derived peridotitic xenoliths and ophiolitic podiform chromites offered strong constraints on the evolution of Os isotope compositions in the convective upper mantle. We offer the Os isotope composition of convective upper mantle in the Late Archean, based on ophiolitic podiform chromitites from Zunhua, Hebei Province, which is 0.1102. This is consistent with the chondritic model. The parameters of the chondrite model in common use are: the initial osmium isotope ratio is 0.09531 at 4.558 Ga; the present osmium isotope ratios are 0.1270 of carbonaceous chondrite and 0.1296 of the primitive upper mantle respectively. The latter is similar to that of ordinary and enstatite chondrites.

Key words: convective upper mantle; Re-Os isotopes; chondritic model; ophiolitic podiform chromites; mantle xenoliths.

0 引言

近 10 年来 Re-Os 同位素体系在地球科学中的应用范围越来越广, 成功的研究实例越来越多 (Shirey and Walker, 1998; Carlson, 2005), 已经成

为地球科学中重要的定年和示踪的手段。由于 Re-Os 同位素体系的特点, 它在研究地幔的地球化学示踪和地质年代学中具有独特的优越性 (Pearson, 1999; Meisel, *et al.*, 2001), 尤其为认识大陆岩石圈地幔形成和演化的时间和过程提供了重要的信

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40473008; 40572036)。

作者简介: 支霞臣(1942—), 男, 教授, 地球化学专业。E-mail: xczhi@ustc.edu.cn

* 本文据作者在中国矿物岩石地球化学学会第十届学术年会分组会报告改写。

息. 至今, 对于全球各大洲的古老克拉通和环克拉通地区的陆下岩石圈地幔(SCLM)作了大量的 Re-Os 同位素体系的研究, 发表了大量的高质量的数据(Foster *et al.*, 1996; Carlson, 2005). 在 SCLM 的 Re-Os 同位素定年方法中, 除了同位素年代学中惯用的等时线和模式年龄方法外, 常常采用 Re-Os 同位素体系特有的 Re 亏损模式年龄(Walker *et al.*, 1989)和代理等时线方法(Reisberg and Lorand, 1995). 采用这 2 种方法定年的重要基础之一, 是关于地幔中 Os 同位素组成的长时演化, 在实际工作中研究者们主要采用上地幔 Os 同位素组成的球粒陨石型演化模式. 本文叙述与球粒陨石模式有关的一些内容.

1 Re-Os 的基本地球化学性质

Re、Os 是强亲铁元素族(HSE)的成员, 属于该族的元素还有 Ru、Rh、Pd、Ir、Pt 和 Au. 除 Pd 和 Au 外, 这些元素都是耐熔元素(refractory), 在太阳系早期太阳成分的气体冷却过程中, 在 10^{-2} kPa 压力下它们的凝聚温度为 1 859~1 400 K. 在此条件下最早凝聚的固相有 Ca 和 Al 的氧化物和硅酸盐相, 伴随有大量的稀土(REE)、Zr、Hf 和 Sc 等微量元素赋存在上述的固相里, 这些元素称为耐熔亲石元素(RLE). 与此同时, 耐熔亲铁元素 W、Os、Ir 等在高温下形成多组分合金, 也赋存在氧化物和硅酸盐相中(Palme and Jones, 2004), Re 和 Os 的凝聚温度分别为 1 819 和 1 814 K(Walker *et al.*, 1988). 代表太阳系早期原始物质的 C1 碳质球粒陨石中 Re 和 Os 含量分别为 39.5×10^{-9} 和 506×10^{-9} (Palme and O'Neill, 2004), 太阳星云与陨石中 Os 丰度比值为 0.97 (Palme and Jones, 2004). Re 和 Os 等 HSE 在地球增生和早期分异过程中, 优先进入地核, 地核中 Re-Os 丰度分别为 230×10^{-9} 和 $2 800 \times 10^{-9}$ (McDonough, 2004), 是 C1 碳质球粒陨石的 5~6 倍. 由于 Re-Os 等 HSE 的金属铁/硅酸盐熔体之间的分配系数大于 10^4 (Carlson, 2005), 在地球早期地核-地幔分异过程中 Re-Os 等 HSE 几乎全部进入地核, 按核-幔之间 HSE 平衡分配计算, 地幔中的 HSE 丰度远远低于实际观测的结果. 现在地幔中的 HSE 含量是在地球增生的晚期地核最终形成后, 陨石物质作为“后增薄层(late veneer)”加入地幔的结果(Morgan, 1985). 原始地幔(PM)的

Re 和 Os 丰度分别为 0.32×10^{-9} 和 3.4×10^{-9} (Palme and O'Neill, 2004), 比球粒陨石的低 2 个数量级. 后增薄层的陨石物质的数量相当于早期地幔物质的 1% (Morgan, 1985). 当不存在金属铁时, HSE 主要进入硫化物中, Re 的硫化物/硅酸盐分配系数为 $10^2 \sim 10^3$, Os 的为 10^4 , 远高于 Re (Roy-Barman *et al.*, 1998). 地幔中 Re-Os 等 HSE 主要赋存在硫化物、合金和铂族元素矿物(PGM)中 (Birck and Allegre, 1994; Shirey and Walker, 1998), 部分 Re 可能存在于硅酸盐矿物中 (Righter and Hauri, 1998). 地幔部分熔融时, Os 是相容元素残留于地幔, Re 是中等不相容元素部分进入熔体相, 地壳的 Re 和 Os 丰度为 0.19×10^{-9} 和 0.041×10^{-9} (Rudnick and Gao, 2004), 因而壳-幔分异造成了它们的 Re/Os 比值有很大的差异. 时间的推移造成壳-幔的 Os 同位素组成 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$) 有很大的差异, 地幔的比值低于地壳的比值, 成为壳-幔物质良好的示踪剂 (Allegre and Luck, 1980). 板块俯冲作用使地壳物质进入地幔, 影响地幔深部 Os 同位素组成的演化. 研究地幔 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的演化是非常有意义的课题. 它关系到地球增生、核-幔-壳分异和地壳物质重循环等地球动力学过程, 关系到 Re-Os 同位素体系的定年, 是 Re-Os 同位素的地球化学研究的基础之一.

2 上地幔 Os 同位素组成演化的球粒陨石模型

20 世纪 80 年代初, 当时 Re-Os 分析的探测限为 10^{-6} , 那时对地幔的 Re-Os 体系的认识主要来自对陨石的研究, 尤其对铁陨石的研究, 它们具有较高的 Re 和 Os 丰度. 对不同类型的铁陨石的分析获得了它们的形成年龄和初始 Os 同位素组成. 由 5 个铁陨石和 1 个石陨石中分离的金属相拟合等时线 (Luck *et al.*, 1980), 获得年龄 $T = (4 580 \pm 210)$ Ma 和初始 Os 同位素比值 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 为 0.805 ± 0.011 , 重新计算得到 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.096 4$ ($^{186}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.119 848 \pm 0.000 008$); 后来又增加了 2 个铁陨石、1 个中铁陨石和 9 个不同类型球粒陨石分离的金属相得到的初始值 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os} = 0.805 \pm 0.006$ (Luck and Allegre, 1983), 相当于 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.096 4$. 与此同时开始地幔 Os 同位

素组成演化的直接研究, 由不同时代的砂矿中锇铱矿(Os, Ir)的 Os 同位素组成和铁陨石的初始值构成演化线, 获得了代表地幔的现在值 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1246$, $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os} = 0.378$. 表观上这种线性演化应当是封闭体系中单阶段演化的特征(Allegre and Luck, 1980). 20 世纪 80 年代末对 6 类碳质球粒陨石的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ — $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 同位素等时线(Walker and Morgan, 1989)与铁陨石的等时线(Luck *et al.*, 1980; Luck and Allegre, 1983)基本一致, 初始值 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os} = 0.802 \pm 0.049$, $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os} = 3.0 \sim 3.5$. 与地幔的对应值一致, 表明地幔的 Os 同位素演化具有球粒陨石的性质. 对于不同类型球粒陨石的 Os/Re 比值的研究, 表明地幔的 Os/Re 比值与 C3O、C3V、E4、E5 和 E6 族球粒陨石的相同, $\text{Os}/\text{Re} = 11.8$, 相当于 $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os} = 0.406$ (Morgan, 1985).

20 世纪 90 年代以后, 由于 NTIMS 方法测定 Re-Os 同位素比值获得了成功, 大大地提高了测定精度和降低了检测限, 达到 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 水平, Re-Os 同位素地球化学研究无论在广度和深度上都有了长足进展. 对于各类陨石的 Re-Os 同位素作了更为细致的研究, 发表了更多的高水平成果(Smoliar *et al.*, 1996; Shen *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 1998, 2002; Becker *et al.*, 2001; Walker *et al.*, 2002; Cook *et al.*, 2004). 铁陨石是太阳系演化早期从球粒陨石硅酸盐分离的 Fe-Ni 金属, 按照它们的结构和微量元素含量可以分成 13 组, 每一组都被认为形成于不同的母体, 其中 10 组为“岩浆型铁陨石”, 代表了不同母体的核, 在几乎封闭体系中分离结晶形成的; 另外 3 组为“非岩浆型铁陨石”, 不代表母体的核. 在岩浆型铁陨石中 II AB 型和 III AB 型是数量最多的(Krot *et al.*, 2004). 铁陨石在太阳系形成的最初 20 Ma 内从球粒陨石硅酸盐中分凝, 对 II AB 型和 III AB 型铁陨石作了许多 Re-Os 同位素体系研究获得了太阳系的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 组成, 为了解上地幔的初始值提供制约(Smoliar *et al.*, 1996; Shen *et al.*, 1996; Cook *et al.*, 2004). 根据 Cook *et al.* (2004) 详细研究 36 块铁陨石的结果(表 1), 由不同类型的铁陨石组获得的太阳系平均 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 0.095, 与早年的结果 0.0964 在误差范围内是一致的.

Walker *et al.* (2002) 详细地研究了 47 个球粒陨石, 包括 14 个碳质球粒陨石(CC)、19 个普通球粒陨石(OC)和 14 个顽火球粒陨石(EC)的 Re-Os 同

表 1 铁陨石的 Re-Os 年龄和 Os 同位素初始值(Cook *et al.*, 2004)

Table 1 Re-Os isotope age and initial ratio of various irons

陨石组(样品数)	初始值和误差	斜率和误差	年龄(Ma)	MSWD
高一Os II AB(4)	0.09549(35)	0.07889(70)	4558±39	2.6
低一Os II AB(9)	0.09503(94)	0.0791(13)	4569±73	14
II AB(全部)(13)	0.09538(58)	0.07869(83)	4546±46	17
高一Os III AB(10)	0.09591(57)	0.0780(10)	4506±56	12
低一Os III AB(5)	0.09554(59)	0.07837(82)	4529±46	24
III AB(全部)(15)	0.09576(31)	0.07816(51)	4517±28	17
约克角陨石雨(5)	0.0952(11)	0.0793(23)	4579±130	0.9

表 2 球粒陨石的 Re-Os 同位素体系(Walker *et al.*, 2002)

Table 2 Re-Os isotope system of various chondrites

类型	样数	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}(\sigma)$	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}(\sigma)$	Re/Os(σ)
CC	14	0.1262±0.0006	0.392±0.015	0.0814±0.0031
OC	19	0.1283±0.0017	0.422±0.025	0.0874±0.0027
EC	14	0.1281±0.0004	0.421±0.013	0.0876±0.0052

CC. 碳质球粒陨石; OC. 普通球粒陨石; EC. 顽火球粒陨石.

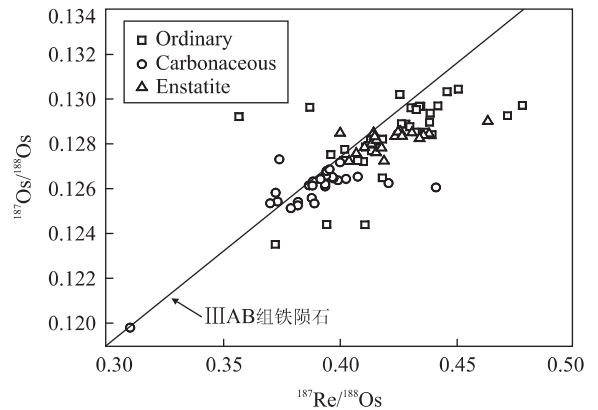


图 1 3 类球粒陨石的 Re-Os 同位素体系与 III AB 组铁陨石的比较(Walker *et al.*, 2002)

Fig. 1 Comparison of Re-Os isotope system between various chondrites and III AB irons

位素体系, 结果表明: OC 和 EC 的性质比较相近, 而 CC 组与 OC 和 EC 两组有明显的差别(表 2). 由于球粒陨石形成后体系的开放行为, 或在母体上受到冲击而发生重结晶或挥发作用, 或陨落到地球上受到蚀变或金属锈蚀作用导致 Re-Os 含量变化(Walker *et al.*, 2002), 其 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 的关系比铁陨石的要复杂. 铁陨石可以获得很好的等时线(Cook *et al.*, 2004), 而球粒陨石在有限的变化范围内明显偏离等时线, 如参考 III AB 组的等时线(图 1). 根据陨石的 Re-Os 同位素体系研究, 由铁陨石得到陨石形成时的 Os 同位素组成的初始值, 由球粒陨石得

到陨石现在 Os 同位素组成,以此作为地幔 Os 同位素组成的演化模式。

3 对流上地幔 Os 同位素组成的现代值

20 世纪 90 年代以后由于含量 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 级 Re-Os 分析方法的改进,可以通过直接分析各种地幔来源的地质样品,研究地幔 Os 同位素组成的演化。例如,对于深海橄榄岩、基性火山岩中橄榄岩包体和蛇绿岩中的地幔橄榄岩等代表洋下和陆下上地幔的直接样品和 MORB、OIB 等代表上部地幔和深部地幔的间接样品的研究,可以了解现代地幔的 Os 同位素的组成。对于地质历史中的各种基性岩、超基性岩、科马提岩、绿岩带、蛇绿岩等幔源地质样品的研究,可以了解古代地幔的 Os 同位素组成,从而了解地幔中 Os 同位素组成随时间的演化。

现有测量结果表明深海橄榄岩 AP (abyssal peridotite) $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值的变化范围较大,为 0.116~0.17,其中大部分样品集中在 0.120~0.129,平均值为 0.124 7 (Martin *et al.*, 1991; Snow *et al.*, 1994; Roy-Barman and Allegre, 1994; Snow and Reisberg, 1995; Brandon *et al.*, 2000; Standish *et al.*, 2002),常常将 0.125 作为标准判别 AP 的新鲜与否,高于 0.125 的被认为是受到海水蚀变的结果。大洋中脊玄武岩 MORB 及其中分离的玻璃和硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值变化范围为 0.127~0.2 (Roy-Barman *et al.*, 1998; Schiano *et al.*, 1997),通常大于 0.135,比 AP 的范围更大更富集 ^{187}Os 。一般认为由于 MORB 的 Os 含量低 ($<10 \times 10^{-9}$),Os 同位素组成易受海水蚀变, MORB 中 Re/Os 比值大,原位衰变的影响使 MORB 的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值较高。因而 MORB 的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 大于 0.135,而新鲜的 AP 的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 小于 0.125,两者之间存在不连续,称为 Os 同位素间隙(gap)。这种情形与同位素地球化学的基本原理相悖。通常认为 AP 是 MORB 提取后的残余地幔,在地幔的温度、压力和时间尺度地幔熔融形成的熔体和残余固体之间同位素应该达到平衡,即 MORB 与 AP 形成时的同位素初始比值是相同的。最近,采用原位激光熔融电感耦合等离子质谱(LA-MC-ICPMS)测定 AP 中的硫化物的 Os 同位素组成

(Alard *et al.*, 2005),发现 AP 中的两种成因的岩浆型硫化物具有两类 Re-Os 同位素体系:一类岩浆型硫化物具有低 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值,另一类岩浆型硫化物具有高 $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os} - ^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值,而 AP 全岩样品表现为两类硫化物的混合特征,那些高放射性的硫化物 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 大于 0.128 5,高达 0.167。表明在 MORB 和 AP 之间不存在 Os 同位素间隙(Alard *et al.*, 2005)。

4 原始上地幔(PUM)Os 同位素组成的现代值

基性火山岩中的地幔橄榄岩包体是研究地幔成分、结构和演化的直接样品之一。通常认为它们代表了饱满地幔经过不同程度的部分熔融作用后的残余物质,其中易熔的玄武质组分含量变化代表了部分熔融的程度。这种理念就是 Re-Os 同位素体系中运用代理等时线法的基础 (Reisberg and Lorend, 1995)。根据全球各大洲基性火山岩中地幔橄榄岩包体的 Os 同位素组成与全岩的 Al_2O_3 含量之间的线性关系,在原始地幔的 Al_2O_3 含量处(如 Al_2O_3 含量=4.2%)推断原始上地幔(PUM) $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值的现代值为 $0.129 0 \pm 0.000 9$ (Meisel *et al.*, 1996)和 $0.129 6 \pm 0.000 8$ (Meisel *et al.*, 2001)。后者结果已被学术界广泛接受,它与球粒陨石的 Os 同位素组成比较,表明它与 OC 和 EC 组球粒陨石的 Os 同位素组成平均值相似,不同于 CC 组球粒陨石(图 2)。据此认为地幔的后增薄层的陨石为 OC

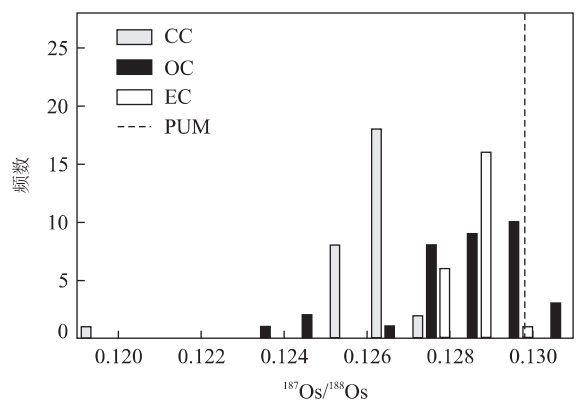


图 2 原始上地幔和球粒陨石的 Os 同位素组成 (Walker *et al.*, 2002)

Fig. 2 Comparison of Os isotopic compositions between PUM and chondrites

和 EC 组球粒陨石。

5 对流上地幔 Os 同位素组成的演化方程

对流上地幔 Os 同位素演化采用下列方程描述:

$$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_0 + ^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}(e^{\lambda t} - 1).$$

公式中各项参数在文献中有不同的取值, 目前普遍使用 ^{187}Re 衰变常数 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Smoliar *et al.*, 1996; Shen *et al.*, 1996), 上地幔 Os 同位素组成的现代值 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 有几个不同的数值如 0.127 0 (Luck and Allegre, 1983; Walker and Morgan, 1989; Shirey and Walker, 1998), 此值接近于 CC 平均值 0.126 2 (Walker *et al.*, 2002), 或 $0.129 0 \pm 0.000 9$ (Meisel *et al.*, 1996), 或 $0.129 6 \pm 0.000 8$ (Meisel *et al.*, 2001), 此值接近于 OC 和 EC 的平均值 0.128 3 和 0.128 1 (Walker *et al.*, 2002). $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值也有不同的数值如 0.401 86 (Shirey and Walker, 1998), 此值接近于 CC 的平均值 0.392 (Walker *et al.*, 2002), 或 0.435 ± 0.005 (Bennett, 2004), 此值接近于 OC 和 EC 的平均值 0.422 和 0.421 (Walker *et al.*, 2002). 地球年龄为 4.558 Ga, 当时 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 的初始值为 0.095 31 (Shirey and Walker, 1998), 此值接近于 II AB 和 III AB 铁陨石的平均值 0.095 38 和 0.095 76 (Cook *et al.*, 2004). 由上列参数, 对于不同的历史时间 (t) 计算, 可以获得当时对流上地幔的 Os 同位素组成 $(^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os})_0$.

6 对流上地幔 Os 同位素组成的演化——蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩和铬铁矿的证据

蛇绿岩代表了仰冲在陆壳上的古老海洋岩石圈残片, 一个发育完整的蛇绿岩通常包括了地幔橄榄岩杂岩、镁铁—超镁铁质堆晶杂岩和镁铁质火山岩杂岩等, 在蛇绿岩的壳—幔过渡带常常发育有岩浆成因的豆荚状铬铁矿. 蛇绿岩地幔橄榄岩和豆荚状铬铁矿单元的 Os 同位素组成可以反映它们形成时对流上地幔的 Os 同位素特征. 尤其是蛇绿岩豆荚状铬铁矿, 其 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; 而且它对洋底

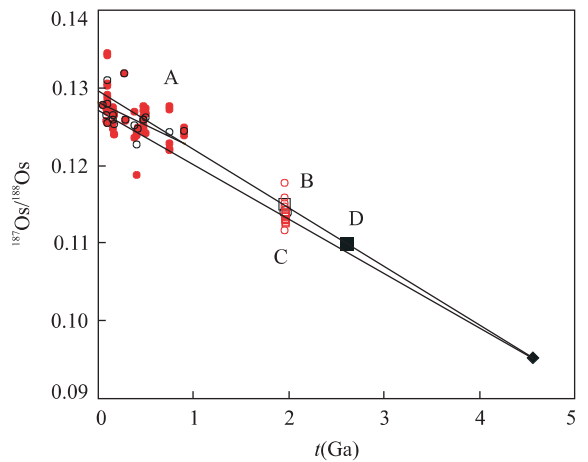


图 3 由蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩和铬铁矿获得的对流上地幔 Os 同位素组成的演化

Fig. 3 Evolution of Os isotope compositions in convective upper mantle derived from ophiolitic podiform chromitites and chromites

蚀变和后期构造活动对 Re-Os 体系影响的抵抗力最强, 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. 目前已有的研究结果, 如 Walker *et al.* (2002) 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, 拟合 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值 (Y) 对年龄 (T) 的线性方程为 $Y = 0.128 09 (\pm 0.000 85) - 0.005 8 (\pm 0.001 9) \times T$ (括号内的误差为 2σ), 获得对流上地幔 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的现代值为 $0.128 09 \pm 0.000 85 (2\sigma)$, 介于球粒陨石的 CC 组和 EC+OC 组的结果之间, 与 PUM 现代值相似 (图 2). 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 (图 3). 对更古老的样品研究, 如芬兰东部早元古代 (1.97 Ga) Outokumpu 蛇绿岩 (Walker *et al.*, 1996)、芬兰北部早元古代 (1.95 Ga) Jormua 蛇绿混杂岩 (Tsuru *et al.*, 2000). 其中, 来源于对流地幔的, 形成后保持为封闭体系的样品, 它们的 Os 同位素组成落在球粒陨石型对流上地幔演化线附近 (图 3).

图 3 表示了不同年龄的蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩和铬铁矿的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值, 其中地幔的初始值为铁陨石获得的初始值, 地幔的现代值采用 (1) PUM 的现代值 (Meisel *et al.*, 2001), EC 和 OC 组球粒陨石的平均值与此接近 (Walker *et al.*, 2002, 图 2); (2) CC 组球粒陨石的平均值. 连接地幔初始值和现代值的直线代表了球粒陨石演化模式. A 表示

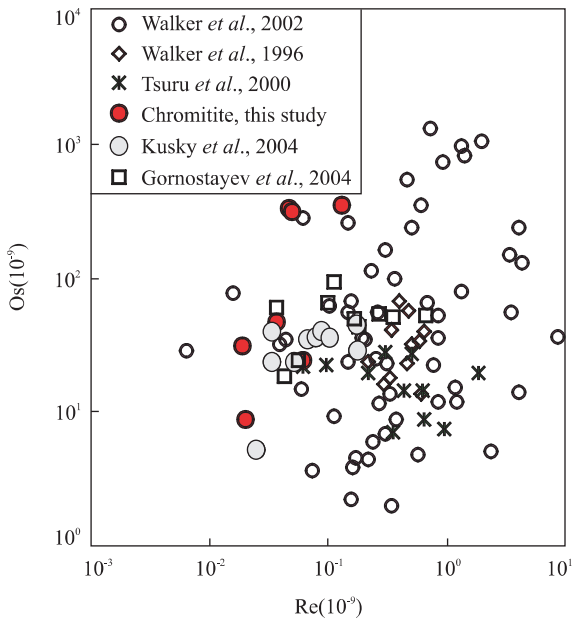


图 4 蛇绿岩豆荚状铬铁矿和铬铁矿岩的 Re-Os 元素丰度
Fig. 4 Re and Os abundances of ophiolitic podiform chromitites and chromites

Walker *et al.* (2002) 报道的数据和拟合的线性回归线; B 表示 Walker *et al.* (1996) 报道的数据; C 表示 Tsuru *et al.* (2000) 报道的数据; D 表示 Xia *et al.* (2004) 报道的遵化的数据. A、B、C、D 数据分布呈一级近似, 蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩和铬铁矿的 Os 同位素组成具有球粒陨石特征, 因此可以推断, 自晚太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.

我们对河北遵化新太古代 (2.5 Ga) 蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩的 Os 同位素组成作了研究 (Xia *et al.*, 2004). 下面介绍有关研究的一些资料.

图 4 是蛇绿岩豆荚状铬铁矿或铬铁矿岩的 Re-Os 丰度, 其中实心圆圈是我们测定的河北遵化蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩的数据 (Xia *et al.*, 2004), 稍大的空心圆圈是文献报道的同一地区不同样品中分选的蛇绿岩豆荚状铬铁矿的结果 (Kusky *et al.*, 2004). 两套数据的 Re 含量范围基本一致, 而 Os 含量前者较后者的稍高. 不过它们都在文献上的结果范围内, 只是两者的 Re 含量都在文献报道的范围的偏低部分.

图 5 表明了河北遵化蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩 (Xia *et al.*, 2004) 和铬铁矿 (Kusky *et al.*, 2004) 的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值的变化范围很小, 难以获得高精度的等时线, 不过大部分样品分布在

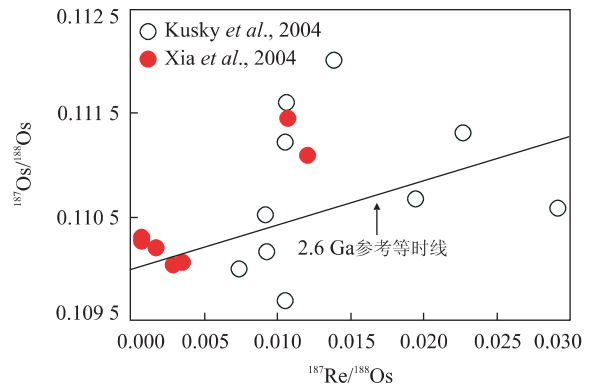


图 5 河北遵化新太古代蛇绿岩豆荚状铬铁矿岩和铬铁矿的 Re-Os 同位素体系

Fig. 5 Re-Os isotope systematics of Late Archean ophiolitic podiform chromitites and chromites from Zunhua, Hebei Province

2.6 Ga 参考等时线周围, 少数样品偏离较远. 在我们的研究中有 3 个块状铬铁矿矿石的 Os 含量都高于 300×10^{-9} , Os 同位素组成的平均值 $= 0.11021 \pm 0.00006 (2\sigma)$, 获得 Re 亏损模式年龄为 2.6 Ga.

由于地幔内部对流状态的不同和随时间的演化, 对于地幔的 Os 同位素组成和演化可以从更多的地球物质的信息反演. 如由 OIB 了解现代深部地幔, 由古老的科马提岩了解古代深部地幔等. 关于深部地幔和更古老的 (如新太古代以前的) 地幔的 Os 同位素特征下面举例示意. 古老的科马提岩通常认为它来源于深部地幔相当于现代的地幔柱 (plume), 对科马提岩 Re-Os 体系研究, 如加拿大 Ontario 省 Munro Township 太古代科马提岩一组 12 个全岩样品得到等时线年龄为 (2.65 ± 0.09) Ga, 初始值 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os} = 0.873 \pm 0.035$, 在误差范围内落在球粒陨石地幔演化线上 (Walker *et al.*, 1998). 澳大利亚西部晚太古代绿岩地体的科马提岩, 其中赋存富 Ni-Cu-PGE 的硫化物矿床, 20 多个硫化物矿石和科马提岩中由 13 个含岩浆硫化物样品和非矿化的科马提岩构成等时线, 得出年龄为 (2706 ± 36) Ma, 初始值 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.10889 \pm 0.00035$, $\gamma_{\text{Os}}(T) = -0.10 \pm 0.32$, Os 同位素组成具球粒陨石特征 (Foster *et al.*, 1996). 关于古老地幔的 Os 同位素特征, 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 (Bennet *et al.*, 2004), 具有球粒陨石型 Os 同位素特征. 目前获得的最古老的地质样品, 格林兰西南 3.8 Ga Itsaq 片麻岩杂岩中的尖晶石相橄榄岩, 它代

表了古老深海橄榄岩, 从中分离的橄榄石、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, 显示了早期地幔的 Os 同位素具有球粒陨石型的特征(Bennett *et al.*, 2004).

7 结论

根据陨石、地幔橄榄岩包体和蛇绿岩豆荚状铬铁矿等的 Re-Os 同位素体系的研究, 目前认为对流上地幔的 Os 同位素组成的演化总体上符合球粒陨石模型, 尤其在显生宙之前.

References

- Alard, O., Luguet, A., Pearson, N. J., et al., 2005. In situ Os isotopes in abyssal peridotites bridge the isotopic gap between MORB and their source. *Nature*, 436: 1005—1008.
- Allegre, C. J., Luck, J. M., 1980. Osmium isotopes as petrogenetical tracers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 48: 148—154.
- Becker, H., Morgan, J. W., Walker, R. J., et al., 2001. Rhenium-osmium systematics of calcium-aluminum-rich inclusions in carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65: 3379—3390.
- Bennett, V. C., 2004. Compositional evolution of the mantle. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treatise of Geochemistry*, 2. Elsevier-Pergamon, Oxford, 493—519.
- Birck, J. L., Allegre, C. J., 1994. Contrasting Re/Os magmatic fractionation in planetary basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 124: 139—148.
- Carlson, R. W., 2005. Application of the Pt-Re-Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology. *Lithos*, 82: 249—272.
- Chen, J. H., Papanastassiou, D. A., Wasserburg, G. J., 1998. Re-Os systematics in chondrites and the fractionation of the platinum group elements in the early solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62 (19/20): 3379—3392.
- Chen, J. H., Papanastassiou, D. A., Wasserburg, G. J., 2002. Re-Os and Pd-Ag systematics in group III AB iron and in pallasites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66(21): 3793—3810.
- Cook, D. L., Walker, R. J., Horan, M. F., et al., 2004. Pt-Re-Os systematics of group II AB and III AB iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68(6): 1413—1431.
- Foster, J. G., Lambert, D. D., Frick, L. R., et al., 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archean nickel ores from uncontaminated komatiites. *Nature*, 382: 703—706.
- Gornostayev, S. S., Walker, R. J., Hanski, E. J., et al., 2004. Evidence for the emplacement of ca. 3.0 Ga mantle-derived mafic bodies in the Ukrainian Shield. *Precambrian Research*, 132: 349—362.
- Krot, A. N., Keil, K., Goodrich, C. A., et al., 2004. Classification of meteorites. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treatise of geochemistry*, 1. Elsevier-Pergamon, Oxford, 83—128.
- Kusky, T. M., Li, J. H., Raharimahefa, T., et al., 2004. Re-Os isotope chemistry and geochronology of chromite from mantle podiform chromitites from the Zunhua ophiolitic melange belt, NW China; Correlation with the Dongwanzi ophiolite. In: Kusky, T. M., ed., *Precambrian ophiolites and related rocks*. Elsevier, 275—282.
- Luck, J. M., Allegre, C. J., 1983. ^{187}Re - ^{188}Os systematics in meteorites and cosmochemical consequences. *Nature*, 302: 130—132.
- Luck, J. M., Birck, J. L., Allegre, C. J., 1980. ^{187}Re - ^{188}Os systematics in meteorites: Early chronology of the solar system and age of the galaxy. *Nature*, 283: 256—259.
- McDonough, 2004. Compositional model for the earth's core. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treatise of geochemistry*, 2. Elsevier-Pergamon, Oxford, 547—568.
- Meisel, T., Walker, J. R., Morgan, J. W., 1996. The osmium isotopic composition of the earth's upper mantle. *Nature*, 383: 517—520.
- Meisel, T., Walker, R. J., Irving, A. J., et al., 2001. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: A global perspective. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65 (8): 1311—1323.
- Morgan, J. W., 1985. Osmium isotope constraints on earth's late accretionary history. *Nature*, 317: 703—705.
- Palme, H., Jones, A., 2004. Solar system abundances of the elements. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treatise of geochemistry*, 1. Elsevier-Pergamon, Oxford, 41—62.
- Palme, H., O'Neill, H. St. C., 2004. Cosmochemical estimates of mantle composition. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treatise of geochemistry*, 2. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1—38.
- Pearson, D. G., 1999. Age of continental root. *Lithos*, 48: 171—194.
- Reisberg, L. C., Lorand, J. P., 1995. Longevity of subcontinental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs. *Nature*, 376: 159—162.

Richter, K., Hauri, E. H., 1998. Compatibility of rhenium in garnet during mantle melting and magma genesis. *Science*, 280:1737-1741.

Roy-Barman, M., Wasserburg, G. J., Papanastassion, D. A., et al., 1998. Osmium isotope compositions and Re-Os concentrations in sulfide globules from basaltic glasses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 154:331-347.

Rudnick, R. L., Gao, S., 2004. Composition of the continental crust. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treatise of geochemistry*, 3. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-64.

Shirey, S. B., Walker, R. J., 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 26:423-500.

Shen, J. J., Papanastassiou, D. A., Wasserburg, G. J., 1996. Precise Re-Os determinations and systematics of iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(15):2887-2900.

Smoliar, M. I., Walker, R. J., Morgan, J. W., 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A and IV B iron meteorites. *Science*, 271:1099-1102.

Tsuru, A., Walker, R. J., Kontinen, A., Pe, 2000. Re-Os isotopic systematics of 1.95 Ga Jormua ophiolite complex, northeastern Finland. *Chem. Geol.*, 164:123-141.

Walker, R. J., Carlson, R. W., Shirey, S. B., et al., 1989. Os, Sr, Nd and Pb isotopic systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53:1583-1595.

Walker, R. J., Hanski, E., Vuollo, J., et al., 1996. The Os isotopic composition of Proterozoic upper mantle: Evidence for chondritic upper mantle from the Outokumpu ophiolite, Finland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 141:161-173.

Walker, R. J., Horan, M. F., Morgan, J. W., et al., 2002. Comparative ¹⁸⁷Re-¹⁸⁸Os systematics of chondrites: Implications regarding early solar system processes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66(23):4187-4201.

Walker, R. J., Morgan, J. W., 1989. Rhenium-osmium isotope systematics of carbonaceous chondrites. *Science*, 243:519-522.

Walker, R. J., Shirey, S. B., Stecher, O., 1998. Comparative Re-Os, Sm-Nd, and Rb-Sr isotope and trace element systematics for Archean komatiite flow from Munro Township, Abitibi Nelt, Ontario. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 31:97-105.

Xia, Q. X., Zhi, X. C., Li, J. H., et al., 2004. Chondritic osmium isotopic composition of Late Archean convective upper mantle: Evidence from Zunhua podiform chromitites, Hebei, North China. *Chinese Science Bulletin*, 49(23):2515-2520.

《地球科学——中国地质大学学报》

2006 年 第 31 卷 第 2 期 要目预告

渐新世初大冰期事件:南大西洋 ODP1265 站的记录	拓守廷等
珠江口盆地深水区地层压力演化与油气运移模拟	石万忠等
东营凹陷牛庄砂岩透镜体油气藏微观充注机理	郝雪峰等
鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界砂岩储层“酸性+碱性”叠加溶蚀作用与 储层质量主控因素	王 京等
流动单元划分新方案及其在临南油田的应用	胡文瑄等
塔北地区志留系典型油气藏古油水界面恢复	姜振学等
东营凹陷砂岩透镜体油气成藏机理及有利区预测	张 俊等
井资料高分辨率层序地层学	谢寅符等
反硝化条件下河岸渗滤过程中苯胺的降解	吴耀国等
超声波沉淀法制备纳米蓝粉 CaAl ₂ O ₄ :Eu ²⁺	杨应国等