

43-46

Re-Os 同位素体系理论及其应用^①

吴福元 孙德有

(长春科技大学地球科学学院, 长春, 130061)

p597

摘要 由于 Re, Os 独特的地球化学性质, Re-Os 同位素体系可以用来确定特定矿床的形成年龄, 特别为金属矿床形成时代的研究开辟了新的途径。同时, 由于 Re, Os 的元素相容性不同, 导致不同地球化学储源库具有不同的 Os 同位素特征, 特别是地壳和地幔具有截然不同的 Os 同位素特征, 据此可以用来讨论不同类型矿质和岩浆的来源。Os 同位素的示踪研究表明, 岩石圈地幔在大陆溢流玄武岩(CFB)的形成过程中起着重要的作用, 地幔柱的起源与核幔边界的地质演化有关。

关键词 理论 应用 Re-Os 同位素

分类号 P597

鍾一武, 同位素体系理论

1 Re-Os 同位素体系的基本理论

在自然界中, Re 有两种同位素: ^{185}Re 和 ^{187}Re ; Os 有 7 种同位素: ^{184}Os , ^{186}Os , ^{187}Os , ^{188}Os , ^{189}Os , ^{190}Os , ^{192}Os , 在上述同位素中, ^{187}Re 通过 β 衰变形成 ^{187}Os : $^{187}\text{Re} \rightarrow ^{187}\text{Os} + \beta$ 。据此, 我们可列出如下方程: $x(^{187}\text{Os})_t = x(^{187}\text{Os})_0 + x(^{187}\text{Re})(e^{\lambda t} - 1)$ 。式中: $x(^{187}\text{Os})_t$ 代表样品现今所具有的 ^{187}Os 含量; $x(^{187}\text{Os})_0$ 代表样品在形成时(t)的初始 ^{187}Os 含量。在早期的研究中, 一般采用 ^{186}Os 为标准化, 即有如下 Re-Os 等时线方程: $[x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})]_t = [x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})]_0 + x(^{187}\text{Re})/x(^{186}\text{Os})(e^{\lambda t} - 1)$ 。 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})$ 的测定值按分馏系数 $x(^{192}\text{Os})/x(^{188}\text{Os}) = 3.08271$ 进行校正, 式中 λ 为 ^{187}Re 的衰变常数, 一般采用 $1.64 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ 。后来的研究发现, ^{186}Os 还可通过 ^{190}Pt 的 α 衰变产生, 尽管所形成的含量一般较低, 但为了避免引起不必要的误差, 现多改用以 ^{188}Os 为标准化参考, 即: $[x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_t = [x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_0 + x(^{187}\text{Re})/x(^{188}\text{Os})(e^{\lambda t} - 1)$ 。为便于讨论, 按 $x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os}) = 0.12035 x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})$ 进行换算。上述公式是现今 Re-Os 同位素体系定年的基础, 但在讨论有关壳幔演化时, 还涉及下述公式^[1]

$$\gamma_r(\text{Os}) = \{ [x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} / [x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} - 1 \} \times 100$$

$$T(\text{Os}) = 1/\lambda \cdot \ln \{ [x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} / [x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} + 1 \}$$

$$[x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} / \{ [x(^{187}\text{Re})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} + 1 \}$$

式中: $T(\text{Os})$ 为 Os 同位素模式年龄(其涵义与 Nd 模式年龄相当), 当 $[x(^{187}\text{Re})/x(^{188}\text{Re})]_{\text{CHUR}} = 0$ 时, $T(\text{Os})$ 记为 T_{RD} (Re 亏损年龄); $[x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} = [x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} - [x(^{187}\text{Re})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}}(e^{\lambda t} - 1)$, $[x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}}$ 和 $[x(^{187}\text{Re})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}}$ 为现今球粒陨石或原始地幔值: $[x(^{187}\text{Re})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} = 0.40$, $[x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})]_{\text{CHUR}} = 0.12753$; 或 $[x(^{187}\text{Re})/x(^{186}\text{Os})]_{\text{CHUR}} = 3.3$, $[x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})]_{\text{CHUR}} = 1.06$ 。

2 不同地质-地球化学储源库的 Os 同位素特征

Re, Os 是亲铁、亲硫的耐熔元素, 主要富集在地幔中。相对而言, Re 是中等不相容元素, 而 Os 是强相容元素。因此, 当地幔发生部分熔融时, Re 将富集在熔体之中, 由此导致地壳和地幔 $x(\text{Re})/x(\text{Os})$ 比值及有关同位素成分的显著差异^[2,3](图 1)。

2.1 地壳的 Os 同位素特征

地壳相对富集 Re, 其放射性成因的 Os 同位素含量较高, 由此导致其具有较高的 $x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})$ 比值。目前确定出大陆上地壳的 $x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})$ 平均值为 1.2~1.3[大致相当于 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})$ 为 10~11]。根据上地壳的平均存留年龄,

① 教育部优秀年轻教师基金资助项目和国家自然科学基金资助项目(49872031)成果

第一作者简介: 吴福元, 男, 1962 年 8 月生, 教授, 主要从事岩石学与地球化学教学与研究工作

收稿日期: 1998-10-15

编辑: 禹华珍

确定的 $x(^{187}\text{Re})/x(^{186}\text{Os})$ 值为 48 左右 [$x(^{187}\text{Re})/x(^{186}\text{Os})=400$]。对于下地壳的 Os 同位素特征,目前还无确切的认识。有限地区的研究显示下地壳 Os 含量较高(为上地壳的 1~2 倍),Re 含量较低(为上地壳的一半左右)^[5,6],由此导致放射性成因 Os 的含量也较低[为上地壳的 1/2~1/3,大致相当于 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})=0.8$]。

2.2 地幔的 Os 同位素特征^[2,3]

原始地幔 它的 Os 同位素研究相对较为困难,由此导致不同研究者所得出的 Os 同位素数值差别较大。目前通过对熔体亏损的上地幔捕虏体的研究,推算出未分异的原始地幔的 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})$ 值为 $0.129\ 0 \pm 0.000\ 9$, 其 $x(^{187}\text{Re})/x(^{186}\text{Os})$ 值为 0.428,与顽火辉石或普通球粒陨石的值基本相同^[7],但这一值与其他学者得出的球粒陨石或原始地幔值略有差异。

岩石圈地幔 目前积累的资料还难以勾画出不不同类型岩石圈地幔的 Os 同位素特征,但已有的研究结果多显示岩石圈地幔曾有过熔体亏损的历史,从而造成其 Re 的含量较低,其 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})$ 值约为 0.125 [即 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})$ 值约为 1.0, 或 $\gamma_t(\text{Os})$ 为接近零的负值],比原始地幔略低。但也发现有些岩石圈地幔的 Os 同位素具有富集特点^[8]。

亏损地幔 目前通过对大洋中脊玄武岩(MORB)及相应地幔岩的研究揭示^[2,9,10],其亏损地幔值比原始地幔值略低, $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os}) = 0.124\ 6 \pm 0.001\ 4$ [或 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})$ 值约为 1.04]^[8]。但不同地区有所差别,如北大西洋和印度洋的亏损地幔属 Os 富集型,可能为地壳物质的混染所致。

下地幔 对下地幔 Os 同位素特征的了解多是间接的,由洋岛玄武岩(OIB)确定的下地幔 Os 同位素比值^[3]是 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os}) > 0.13$ [或 $x(^{187}\text{Os})/x(^{186}\text{Os})=1.1$, $x(^{187}\text{Re})/x(^{186}\text{Os})=4.1$],但近来的研究显示 OIB 的 Os 同位素变化较大^[11,12]。

3 Re-Os 同位素在地质学上的应用

3.1 Re-Os 同位素在成矿研究方面的应用

(1)成矿时间的 Re-Os 同位素定年 在早期的 Re-Os 同位素成矿定年过程中,主要采用 Re,Os 含量较高的辉钼矿来进行定年^[13],我国学者在这方面也进行了一定的工作^[14]。随着技术的发展, 10^{-9} 级 Re,Os 含量的测定已成为可能,因此现在可以用常见的硫化物矿物或全岩来进行定年。如对智利的贱金属硫化物矿床、Sudbury 矿床和 Stillwater 矿床

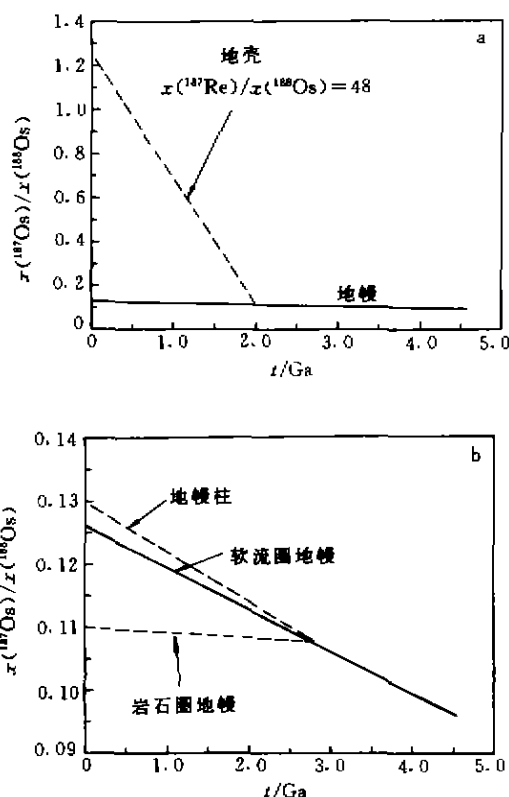


图1 不同类型壳幔储源库的 Os 同位素特征

Fig.1 The Os isotopic characteristic of different geochemical reservoir

等^[15~17]。但是,Os 同位素给出的年龄同时需要有其方法的年龄资料支持,因为后期的热液活动有时可以使 Os 同位素发生重置,因此 Os 同位素的封闭温度是目前值得研究的问题。

(2)成矿物质来源的 Os 同位素制约 这方面的研究主要集中在 Cu-Ni 硫化物矿床。通过对这些矿床的研究,可得出如下结论:①这些矿床在形成过程中,大多具有多种岩浆参与的特点^[16];②矿床在形成过程中有大量壳源物质的贡献^[17];③流体在成矿过程中起着举足轻重的作用^[15]。

3.2 岩浆物质来源的 Os 同位素制约

近代地球化学研究已使我们能够对岩浆的物质来源和岩浆形成过程进行可靠的分析。但对地幔来源的岩石成因过程的判定仍存在一些不确定性,但这正是 Os 同位素的优势所在,因为不同的地幔源区在 Os 同位素上有着明显的差别(图 2),同时,Os 同位素对地幔交代作用并不敏感。如关于大陆溢流玄武岩(CFB)的物质源区问题,南非 Karoo 溢流玄武岩的 Os-Nd 同位素研究表明^[20],该玄武岩是地幔柱和大陆岩石圈共同作用的结果;对西伯利亚溢流

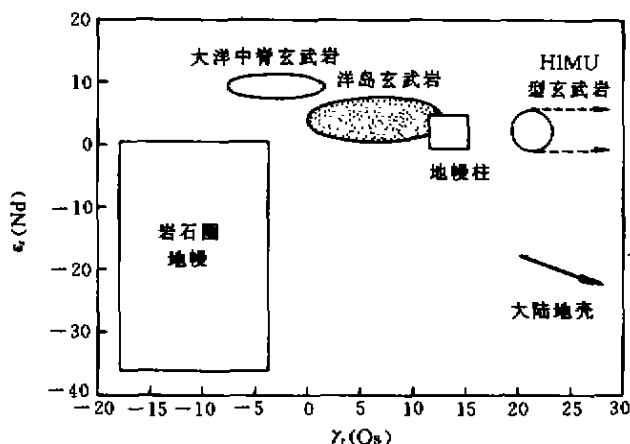
图2 不同类型玄武岩的Os-Nd同位素特征^[18,19]

Fig. 2 The Os-Nd isotopic variation of different type of basalt

玄武岩的研究显示,地幔柱源区在该区岩浆形成过程的早期起着重要的作用,但随着时间的推移,岩石圈地幔的地位越来越重要^[21]。研究还显示,大陆溢流玄武岩中某些富集组分的来源应与俯冲地壳的再循环或地壳混染有关^[22]。在洋岛玄武岩的研究中,一个重要的问题是这些岩石中不同类型富集组分的来源,Os同位素的研究使人们对这一问题有了比以前更为清楚的认识^[2,3,11,12,23]。

3.3 壳幔的地球化学演化

(1)大陆岩石圈地幔的形成时代 岩石圈地幔的形成时代目前一般通过Os同位素的模式年龄或Re亏损年龄来加以确定,如对南非卡普瓦尔、俄罗斯西伯利亚、美国怀俄明克拉通岩石圈地幔形成时代的认识都是其它同位素方法所不能得到的^[2,18,24,25]。近几年来,造山带岩石圈地幔的形成时代又成为研究的热点^[19,26,27],并通过 $x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})$ 比值与 Al_2O_3 和 MgO 含量的相关性提出了岩石圈模式年龄计算的新方法,海洋岩石圈地幔的研究也受到注意。

(2)地幔柱的起源 地幔柱的起源是地学界争论的重要科学问题。研究认为^[28],地球外核的 $x(\text{Re})/x(\text{Os})$ 比值至少比球粒陨石上地幔要大20%以上,由此导致外核的 $x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})$ 比值比球粒陨石至少大8%。研究显示不少地幔柱的 $x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})$ 比值比球粒陨石大5%~20%,因此地幔柱可能来源于核幔边界。岩石圈具有较低的 $x(^{187}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})$ 比值,不可能成为地幔柱的主要物质源区。针对有人认为地幔柱起源于670 km的不连续面及其附近,并受到再循环地壳物质的影响,已有学者提出运用 $x(^{186}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})$ 比值对此进行判定^[29],只是目前积累的 $x(^{186}\text{Os})/x(^{188}\text{Os})$ 资料还

相当有限^[30],相信随着研究的进一步深入,对地幔柱的起源问题会有一个明确的回答。

(3)壳幔相互作用 这方面的工作突出体现在俯冲带的壳幔相互作用研究上,对美洲Cascade和日本岛弧地区俯冲带中上地幔橄辉岩的Os-Nd同位素研究表明,其亏损地幔受到5%~15%俯冲板片的混染^[30]。这一研究不仅为利用Os同位素研究壳幔相互作用问题提供了新的思路,同时也表明Os同位素在特定性质的流体中有一定的活动性,而先前认为Os同位素在流体交代作用过程中不会发生变化的观点需要重新认识和修正。

综上所述,Re-Os同位素体系不仅仅是一种定年的工具,更重要的是,它在确定金属矿床的形成时代和大陆岩石圈地幔的形成演化方面,显示出其它方法所无法替代的优越性;Os同位素与其它同位素体系的联合可对岩石及矿床形成的物质来源及形成过程进行更准确的示踪。这一特点决定了该方法对讨论我国的有关地质问题有着很强的实用性,我国东部新生代玄武岩的广泛发育以及所暗示的岩石圈减薄机理是Os同位素发挥其特长的重要领域,金川、红旗岭等Cu-Ni矿床的Os同位素研究不仅将为该区的进一步找矿提供新的约束参数,而且将会深化现有的成矿理论,为世界地球科学的发展作出新的贡献。

参考文献

- 1 Walker R J, Carlson R W, Shirey S B et al. Os, Sr, Nd, and Pb isotope systematics of Southern African peridotite xenoliths: implications for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, 53: 1583-1595
- 2 Martin C E. Osmium isotopic characteristics of mantle-derived rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, 55: 1421-1434
- 3 Martin C E, Esser B K, Turekian K K. Re-Os isotopic constraints on the formation of mantle and crustal reservoirs. *Australia J. Earth Sci.*, 1991, 38: 569-576
- 4 Esser B K, Turekian K K. The osmium isotopic composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57: 3093-3104
- 5 Saal A E, Rudnick R L, Ravizza G E et al. Re-Os isotope evidence for the composition, formation and age of the lower continental crust. *Nature*, 1998, 393: 58-61
- 6 Esperanca S, Carlson R W, Shirey S B et al. Dating crust-mantle separation: Re-Os isotopic study of mafic xenoliths from central Arizona. *Geology*, 1997, 25: 651-654
- 7 Meisel T, Walker R J, Morgan J W. The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle. *Nature*, 1996, 383: 517-520
- 8 Pearson D G, Shirey S B, Carlson R W et al. Re-Os, Sm-Nd and Rb-Sr isotope evidence for thick Archean lithospheric mantle beneath the Siberia craton modified by multistage metasoma-

- tism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 959—977
- 9 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: 5 043—5 054
 - 10 Pegram W J, Allegre C J. Osmium isotopic compositions from oceanic basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1992, 111: 59—68
 - 11 Reisberg L C, Zindler A, Marcantonio F et al. Os isotope systematics in ocean island basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, 120: 149—167
 - 12 Roy-Barman M, Allegre C J. $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ in oceanic island basalts: tracing oceanic crust recycling in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, 129: 145—161
 - 13 Suzuki K, Lu Q, Shimizu H et al. Reliable Re-Os age for molybdenite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57: 1 625—1 628
 - 14 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇等. 华北地台钨(铜)矿床成矿年代学研究. *矿床地质*, 1996, 15: 365—373
 - 15 Freyrier C, Ruiz J, Chesley J et al. Re-Os isotope systematics of sulfides from felsic igneous rocks: application to base metal porphyry mineralization in Chile. *Geology*, 1997, 25: 775—778
 - 16 Dickin A P, Richardson J M, Crocket J H et al. Osmium isotope evidence for a crustal origin of platinum group elements in the Sudbury nickel ore. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, 56: 3 531—3 537
 - 17 Marcantonio F, Zindler A, Reisberg L et al. Re-Os isotopic systematics from the Stillwater complex, Montana, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57: 4 029—4 037
 - 18 Nagler T H F, Kramers J D, Kamber B S et al. Growth of continental lithospheric mantle beneath Zimbabwe started at or before 3.8 Ga: Re-Os study on chromites. *Geology*, 1997, 25: 983—986
 - 19 Reisberg L C, Lorand J P. Longevity of subcontinental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs. *Nature*, 1995, 376: 159—162
 - 20 Ellam R M, Carlson R W, Shirey S B. Evidence from Re-Os isotopes for plume-lithosphere mixing in Karoo flood basalt genesis. *Nature*, 1992, 359: 718—721
 - 21 Horan M F, Walker R J, Fedorenko V A et al. Osmium and neodymium isotopic constraints on the temporal and spatial evolution of Siberian flood basalt sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 5 159—5 168
 - 22 Chesley J T, Ruiz J. Crust-Mantle interaction in large igneous provinces: implications from the Re-Os isotope systematics of the Columbia River flood basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, 154: 1—11
 - 23 Bennett V C, East T M, Norman M D. Two mantle-plume components in Hawaiian picrites inferred from correlated Os-Pb isotopes. *Nature*, 1996, 381: 221—224
 - 24 Carlson R W, Irving A J. Depletion and enrichment history of subcontinental lithospheric mantle: an Os, Sr, Nd and Pb isotopic study of ultramafic xenoliths from the northwestern Wyoming craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 126: 457—472
 - 25 Pearson D G, Shirey S B, Carlson R W et al. Stabilisation of Archean lithospheric mantle: A Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from the Kaapvaal craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, 134: 341—357
 - 26 McBride J S, Lambert D D, Greig A et al. Multistage evolution of Australian subcontinental mantle: Re-Os isotopic constraints from Victorian mantle xenoliths. *Geology*, 1996, 24: 631—634
 - 27 Meisel T, Melcher F, Tomascak P et al. Re-Os isotopes in orogenic peridotite massifs in the eastern Alps, Austria. *Chem. Geol.*, 1997, 143: 217—229
 - 28 Walker R J, Morgan J W, Horan M F. Osmium-187 enrichment in some plumes: evidence for core-mantle interaction? *Science*, 1995, 269: 819—822
 - 29 Brandon A D, Walker R J, Morgan J H et al. Coupled ^{186}Os and ^{187}Os evidence for core-mantle interaction. *Science*, 1998, 280: 1 570—1 573
 - 30 Brandon A D, Creaser R A, Shirey S B et al. Osmium recycling in subduction zone. *Science*, 1996, 272: 861—864

THEORY AND APPLICATIONS OF Re-Os ISOTOPIC SYSTEM

Wu Fuyuan Sun Deyou

(College of Earth Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130061)

Abstract Re-Os isotopic system is a widely used method in earth science researches since 1990's, the unique characteristics of Re-Os isotope make it possible to determine the age of some special kinds of ore deposits, especially the age of metallic ore deposit. At the same time, the different incompatibilities of Re and Os result in the variation of different geochemical reservoirs, for example, the evident Os isotopic difference between the crust and the mantle, which can be used to discussing the origin of different ore deposits and magmas. The studies show that the lithosphere plays an important role in the generation of continental flood basalt(CFB), and the mantle plume is related to the evolution of core-mantle evolution.

Key words theory, application, Re-Os, isotope