1993, 363: 543~ 545

- 38 Chung K, Kim H J, Ne H S, et al. Abnormalities of sympathetic innervation in the area of an injured peripheral nerve in a rat model of neuropathic pain. *Neurosci Lett*, 1993, 162: 85~ 88
- 39 Chung K, Lee B H, Yoon Y W, et al. Sympathetic sprouting in the dorsal root ganglion of the injured peripheral nerve in a rat neuropathic pain model. *J Comp Neurol*, 1996, 376: 421~ 352
- 40 Chen Y, Michaelis M, Janig W, et al. Adrenoreceptor subtype mediating sympathetic sensory coupling in injured sensory neurons. *J Neurophysiol*, 1998, 76: 3721~ 3730
- 41 Devor M. Corticosteroids suppress ectopic neural discharge originating in experimental neuroma. *Pain*, 1985, 22: 127~ 137
- 42 Levine J D, Taiwo Y O, Collins S D, et al. Noradrenaline hyperalgesia is mediated through interaction with sympathetic postganglionic neuron terminals rather than activation of primary afferent nociceptors. *Nature*, 1986, 323: 158~ 160
- 43 Gonzales R, Goldyne M E, Taiwo Y O, et al. Production of hyperalgesia by sympathetic postganglionic neurons. *J Neurochem*, 1989, 53: 1595~ 1598
- 44 Glazer S, Portnoy R K. Systemic local anesthetics in pain control. *Journal of Pain and Symptom Management*, 1991, 6: 30~ 39
- 45 Fields H L, Rowbotham M C, Devor M. Excitability blockers: anticonvulsants and low concentration local anesthetics in the treatment of chronic pain. In: Dickenson A H, Besson J M eds. *Handbook of Experimental Pharmacology, the Pharmacology of Pain*. Heidelberg: Springer Verlag, 1997, 93~ 116
- 46 Kalso E, Tramer M R, McQuay H J, et al. Systemic local anaesthetic type drugs in chronic pain: a systematic review. *Euro J Pain*, 1998, 2: 3~ 14
- 47 Devor M, Wall P D, Catalan N. Systemic lidocaine silences ectopic neuroma and DRG discharge without blocking nerve conduction. *Pain*, 1992, 48: 261~ 268

(1999-04-19 收稿, 1999-08-02 收修改稿)

Re-Os 同位素体系和大陆岩石圈地幔定年

支霞臣

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 第三世界科学院中国科技大学地球科学和天文学高级研究中心,
中国科技大学化学地球动力学研究实验室, 合肥 230026)

摘要 陆下岩石圈地幔(SCLM)定年一直是地幔研究中一个倍受关注的问题, 因为利用常用的亲石元素同位素体系, 如 Rb-Sr, Sm-Nd, U-Th-Pb 等很难获得岩石圈的形成年龄. Re-Os 同位素体系作为亲铁元素, 是 SCLM 定年的理想方法. 这里综述了利用 Re-Os 同位素体系进行 SCLM 定年研究的最新进展.

关键词 Re-Os 同位素体系定年 陆下岩石圈地幔 幔源橄榄岩 Re 亏损模式年龄 铝等时年龄

大陆岩石圈地幔(SCLM)是岩石圈的组成部分, 它以莫霍面为界, 下伏于地壳. 它也是地幔的组成部分, 上复于软流圈, 为地幔的顶部. 通常认为在力学、热学和化学性质上, SCLM 是地壳-地幔的过渡层, 它在对流地幔-岩石圈地幔-地壳系统的相互作用和演化中起重要作用. 研究 SCLM 的成分、结构、形成和演化是当今固体地球科学的前沿热点之一.

以地球化学的观点, 在自然界主要有 3 类地质样品: 阿尔卑斯型构造橄榄岩; 金伯利岩中

的幔源橄榄岩包体;碱性玄武岩中的幔源橄榄岩包体等,是来源于 SCLM 的直接标本.自本世纪 60 年代后期,开展大规模全球性的地幔地球化学研究以来,对于 SCLM 样品也作了大量的地球化学工作,包括常量元素,REE 等微量元素,和 Rb-Sr, Sm-Nd, U-Th-Pb, Lu-Hf, 稀有气体和氧等同位素体系的研究,取得了丰硕成果,极大地丰富了对 SCLM 的认识^[1~3].但是,对于 SCLM 年龄(或形成时代)研究的重大突破却是最近几年的事,是由 Re-Os 同位素体系成功地用于 SCLM 样品定年而实现的^[4~17].众所周知,正确的地质年龄的测定对于研究地质体的演化历史无疑是极为最重要的.

1 Re 和 Os 元素丰度

Re 和 Os 元素分别位于元素周期表中第六周期的第七族和第八族.根据 Goldschmidt 元素地球化学性质分类,两者都是亲铁元素^[18].当太阳系中具有球粒陨石性质的星子吸积形成原始地球后,因地核和地幔的分异,形成主要由 Fe-Ni 金属构成的地核时,Re 和 Os 元素优先进入地核中去.因此与球粒陨石相较,原始地幔中亲 Fe 元素 Re 和 Os 高度亏损,据估计原始地幔中 Re 和 Os 元素的球粒陨石标准化丰度仅为 3.5×10^{-3} ^[19],它们在地球物质中的丰度通常为 $10^{-9} \sim 10^{-12}$.Birck 和 Allegre 报道了太阳系中球粒陨石和各种分异物质中 Os 的元素丰度和 Re/Os 比值,其中地外物质,包括球粒陨石及其分异的铁陨石、玄武质无球粒陨石和月岩中 Os 的丰度变化范围很大($10^{-12} \sim 10^{-4}$),但是它们的 Re/Os 比值几乎稳定在 10^{-1} .而地球物质和火星陨石(SNC)中 Os 的丰度较低为 $10^{-12} \sim 10^{-9}$,变化范围小于地外物质,但是它们的 Re/Os 比值变化很大,高达 4 个数量级($10^{-2} \sim 10^2$),并且它们的 Re-Os 丰度呈现明显的负相关性,与地外物质有显著差异.因而,在海岛玄武岩、洋中脊玄武岩和科马提岩中 Re 的丰度大于 Os,而在幔源的橄榄岩包体中 Os 的丰度大于 Re^[20].由于在地球表面,与地幔有关的地质样品中 Re 和 Os 元素的低丰度,使得测定它们的含量和同位素组成有很大的难度.

2 Re-Os 同位素体系和分析方法

Os 有 7 种同位素:¹⁸⁴Os(0.02%),¹⁸⁶Os(1.58%),¹⁸⁷Os(1.60%),¹⁸⁸Os(13.3%),¹⁸⁹Os(16.2%),¹⁹⁰Os(26.4%)和¹⁹²Os(41.0%).Re 有两种同位素:¹⁸⁵Re(37.40%)和¹⁸⁷Re(62.60%).括号内的数字为同位素习用丰度^[21].其中¹⁸⁷Re 是放射性同位素,经 β 衰变生成¹⁸⁷Os. β 粒子的最大能量为 2.65 Kev,仅仅是⁸⁷Rb 衰变的 β 粒子最大能量 275 keV 的 1%.它给精确测定¹⁸⁷Re 的衰变常数(或半衰期)带来了困难.目前普遍采用的衰变常数是由实验法获得的,即在 1 kg 纯的高铷酸里加入¹⁹⁰Os-¹⁹²Os 同位素示踪剂,放置两年后,测量放射成因的¹⁸⁷Os 的增长,得到半衰期为 $(42.3 \pm 1.3) \text{ Ga}$,相当于衰变常数为 $1.64 \times 10^{-11} / \text{a}$ ^[22,23].最近报道了由 ④A 型岩浆成因铁陨石获得的新结果, $\lambda = (1.666 \pm 0.017) \times 10^{-11} / \text{a}$ ^[24].

由于 Re, Os 元素的第一电离势很高,分别为 7.88 和 8.7 eV^[25],在常用的热电离质谱的温度条件下 Re, Os 原子难以形成正离子,必须探索其他的电离方法.尽管 60 年代初,采用气体 OsO₄ 形式电离来分析 Os 同位素,但是精度极低,对 200 ng 纯放射成因 Os,精度仅为 10%^[26].经过长时间的探索,采用更高的能量使原子 Os 电离.直到 80 年代初,提出了几种使用比较特殊设备的分析方法,其中包括:二次离子质谱(SIMS)^[27],加速器质谱(AMS)^[28],共振电离质谱(RIMS)^[29],激光消融质谱(LAMS)^[22],感应耦合等离子源质谱(ICPMS)^[30].特别是 90 年代初,采用常用的热电离方法使 Os 化合物分子形成负离子,即负离子热电离法(N-

TIMS),成功地用于 Re-Os 同位素的质谱测定^[31~33].它标志着 Re-Os 同位素地球化学研究进入了新阶段,像其他常用的同位素体系一样,被广泛应用于研究矿床成因、岩浆形成、地幔演化和天体演化.大量的研究成果如雨后春笋般地破土而出,近几年来发表了 20 多篇关于 Re-Os 同位素体系研究的高水平论文.在 1996, 1997 和 1998 年 Goldschmidt 国际地球化学讨论会上, Re-Os 同位素体系是最热门的话题之一,发表了 60 多篇论文摘要. Re-Os 同位素体系成为地球化学研究的热点,尤其在地幔化学地球动力学的前沿领域, Re-Os 同位素体系是一种新的强有力的研究工具.

Carius 管熔样方法^[34]是 1995 年以来,继负热电离质谱技术(N-TIMS)之后, Re-Os 分析技术的又一重大突破,它成功地解决了样品与稀释剂的同位素不平衡问题,并且显著地降低了全流程空白,是进一步拓展 Re-Os 同位素体系应用范围的重要基础^[34].传统的 Re-Os 同位素化学分离方法的主要困难是:(1)样品与稀释剂的同位素平衡问题:由于 Os 分离提纯采用氧化蒸馏的办法,当样品 Os 与稀释剂处于不同价态时,很容易造成样品与稀释剂间的同位素不平衡.(2)空白问题:传统的 Re-Os 化学流程中使用了 Na₂O₂, H₂SO₄ 及 CrO₃, K₂Cr₂O₇ 等不易纯化的试剂,由于大多数地质样品的 Re, Os 含量很低($10^{-9} \sim 10^{-12}$ g/g),空白问题十分突出,使 N-TIMS 的优越性得不到发挥. Carius 管熔样方法是解决上述问题的有效方法.首先, Carius 管熔法采用 HNO₃ 作氧化剂,易于纯化,大大降低空白;其次, Carius 管熔法将样品与稀释剂密封在耐压玻璃管内,在高温下用浓 HNO₃ 充分氧化,可以有效地消除样品与稀释剂间的同位素不平衡问题.自 1995 年 Carius 管熔样技术成功地应用于超低含量($10^{-9} \sim 10^{-12}$ g/g)地质样品的 Re-Os 同位素测定,大大拓展了 Re-Os 同位素体系的应用范围.近期提出用液体溴分离提取 Os 的方法^[35]代替了耗时的蒸馏提取 Os 的流程,缩短了分析周期.同时降低了本底,对于 0.5 g 样品而言,空白 Os= 0.06 pg, Re= 0.5 pg.但是溴是有毒气体,使用时必须有严格的防护措施.

Os-Os 法^[36](¹⁸⁷Os-¹⁸⁶Os, ¹⁸⁷Os-¹⁸⁸Os)是一种高精度的测年技术.它扩大了 Re-Os 体系的应用领域,是 Os 同位素分析技术的一次重要进步.用这种方法可以简单通过测定 Os 同位素,同时获得 Re/Os 比值和 Os 同位素组成,从而克服了许多目前困扰 Re-Os 同位素地球化学研究的常规 Re-Os 分析技术的实验困难:样品不均一性问题得到解决;也不需要测定 Re-Os 的绝对含量,稀释剂与样品 Os 同位素不平衡的问题和 Pt 带中 Re 空白高的问题都迎刃而解;年龄的测定精度主要取决于 Os 同位素测定精度.一般说来样品的 Re/Os 比值越高,中子照射¹⁸⁵Re 和¹⁸⁷Re 后获得的¹⁸⁶Os 和¹⁸⁸Os 相对量就越大,分析精度就越高^[36].尹庆柱等人^[36]成功地将此法用于澳大利亚矿化花岗岩的辉钼矿定年.

3 SCLM 的 Re-Os 同位素体系定年

在 SCLM 的形成和演化的研究中,长期以来没有合适的同位素体系可以测定其形成年龄.常用的 Sm-Nd, Rb-Sr 和 U-Th-Pb 体系,对于幔源橄榄岩往往不能给出形成年龄.因为它们都是亲石元素,在壳-幔演化中表现为不相容性.在残留地幔中呈亏损特征,而易受后来的显性或隐性地幔交代作用的影响,改变原始的含量和同位素组成. SCLM 的形成和稳定主要由软流圈物质通过岩浆作用,熔体分凝最终构成地壳,残余的软流圈物质逐趋冷却形成稳定的 SCLM.反映岩浆作用的主要元素成分在 SCLM 中呈规律性变化,如玄武质成分(Fe, Al, Ca,

Na等)减小, Mg, Ni, Cr等组分相应增加. 按理, 在SCLM中不相容微量元素应呈亏损特征. 但是, 无论在造山带橄榄岩还是幔源橄榄岩包体中, 常常表现为不相容主量元素亏损与不相容微量元素富集的解耦现象. 这是著名的地幔橄榄岩A-B组分模式^[37]的实际观测基础, 它反映了地幔交代作用的普遍性. 正是地幔交代作用的扰动, 常用的Sm-Nd, Rb-Sr和U-Thr-Pb同位素体系的母子体元素的含量和子体同位素组成, 常常与表征岩浆作用的主量元素含量变化之间没有相关性. 因而, 这些常用的同位素体系不能测定SCLM的岩浆作用时间, 在理想条件下可能给出地幔交代作用的时间. 甚至源于SCLM深部的金刚石中包裹的石榴石矿物的Sm-Nd, Rb-Sr法定年也存在同样的问题^[38~40].

Re-Os同位素体系与这些常用同位素体系不同, Re-Os元素在天体化学演化中表现为亲铁耐熔性质. 在壳-幔演化中, Os是相容元素, 富集在残留地幔中; Re是中等不相容元素, 富集在液相中. 从而造成幔-壳中的Re/Os比值有很大的差异, 随着时间的演化, 两者具有明显不同的Os同位素组成, 成为很好的地球化学示踪剂^[41]. 尤其Os是相容元素, 在地幔中的含量大大高于地壳, 可达3个数量级^[20], 幔源橄榄岩中的Os有较强的抗地幔交代作用影响的潜力. 在下面的叙述中可看到, 最近的研究表明, 橄榄岩包体中的显性和隐性交代作用以及碳酸盐熔体交代作用都不影响Re-Os法测定岩浆作用时间, 即SCLM的形成年龄^[15, 17]. 这正是Re-Os法的特点所在.

3.1 克拉通地区大陆根的年龄

Walker等人^[14]于1989年首先采用RIMS方法, 研究南非Kaapvaal克拉通核部, Jagersfontein, Northern Lesotho和Premier金伯利岩中的12个橄榄岩包体, 包括低温(< 1 200 °C)和高温(> 1 200 °C)橄榄岩样品. Os含量 $(1.10 \sim 6.86) \times 10^{-9}$, Re为 $(0.092 \sim 1.28) \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os} = 0.905 \sim 1.070$, 除2个样品外都低于现代的地幔值. 由7个样品的Re-Os等时年龄得出该区大陆岩石圈地幔的形成年龄为2.4 Ga, 说明SCLM的古老性, 改变了以往认为该区高温橄榄岩代表软流圈, 而低温橄榄岩代表岩石圈的观点. 尽管低温橄榄岩表现出Nd-Sr同位素和REE等不相容微量元素的富集特征, 但是它们的Os同位素却是亏损的特征. 古老的SCLM物质是晚太古宙地幔部分熔融后的残余体, Nd-Sr同位素和不相容微量元素的富集是后来的地幔交代作用造成的. 根据太古宙地幔部分熔融作用的特点, Walker等人^[4]提出了Re亏损模式年龄的概念, 假定在熔体提取后, 残余地幔的Re含量趋近于零, 所以它与现在测量的Re/Os同位素比值无关, 提供熔体提取年龄的最小估计.

近年来采用了新的N-TIMS方法研究南非Kaapvaal克拉通地幔橄榄岩包体的Re-Os同位素体系. Pearson等人^[8]对南非Kaapvaal克拉通Jagersfontein, Premier和Northern Lesotho (包括Mothae, Thaba Putsoa和Lighobong等)等地金伯利岩中的24个橄榄岩包体作了研究. 其中Os含量 $(0.019 \sim 9.20) \times 10^{-9}$, 3个样品 $\text{Os} < 1 \times 10^{-9}$; Re含量 $(0.015 \sim 1.03) \times 10^{-9}$, 2个样品 $\text{Re} > 0.135 \times 10^{-9}$; 23个样品 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.10614 \sim 0.12572$, 低于原始地幔的现代值. 根据包体的Re亏损模式年龄, 表明该区SCLM的形成和稳定时间不小于3.5 Ga(图1). 不同时代金伯利岩中的橄榄岩包体的研究表明该区SCLM的形成与地幔分异和陆壳形成是同时的. 并且长期以来保持稳定, 元古代和中生代的两次地幔热柱(mantle plume)事件, 在岩石圈地幔底部引起的构造-热侵蚀, 并没有造成岩石圈地幔的显著减薄而返回对流地幔. 采自Premier金伯利岩的一个低温石榴石橄榄岩包体(FRB1350), 石榴石-斜方辉石-单斜辉石的Sm-Nd等时年龄

$t = (1\,150 \pm 41)\text{Ma}$, 与寄主岩金伯利岩的侵位年龄 $(1\,179 \pm 41)\text{Ma}$ 相同. Nd 同位素初始比值 $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = 0.7$, 与原始地幔相同. 但是它的 Re 亏损模式年龄为 2.2Ga .

图1 南非 Kaapvaal 克拉通和周围金伯利岩中幔源橄榄岩包体的 Re 亏损模式年龄

P 表示 Premier, F 表示 Finsch, NL 表示北 Lesotho, J 表示 Jagersfontein, FL 表示 Fam Lowrensia, R 表示 East Griqualand

引自文献[8]

Olive 等人^[15]对北 Lesotho 一个 90Ma 侵位的小火山角砾岩筒 Matsoku 中产出的幔源包体作了详细研究. 7 个样品中 3 个为常见的粗粒橄榄岩; 3 个组合包体, 2 个有辉石岩脉, 1 个是有钛铁矿-金红石-金云母-硫化物 (IRPS) 实性交代矿物组合的橄榄岩脉; 1 个辉石岩包体有少许 IRPS 组合脉. 橄榄岩包体和组合包体中的围岩橄榄岩, Os 含量 $(0.92 \sim 2.90) \times 10^{-9}$, Re 含量 $(0.10 \sim 0.18) \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.114\,2 \sim 0.124\,5$, 具有 IRPS 实性交代矿物组合的橄榄岩脉 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.117\,3$, 都低于原始地幔的现代值, 最老的 Re 亏损模式年龄 2.2Ga . 辉石岩包体和组合包体中的辉石岩脉, Os 含量更低 $(0.12 \sim 0.50) \times 10^{-9}$, Re 含量较高 $(0.14 \sim 0.75) \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.152\,1 \sim 0.148\,0$ 具有明显的富集特征, Re-Os 体系的参考等时线年龄为 90Ma . 橄榄岩的元古宙的模式年龄说明了 SCLM 的古老性. 橄榄岩中的显性地幔交代作用对 Re-Os 体系无显著影响. 而地幔里迁移熔体中的堆积相辉石岩的形成是 SCLM 形成和稳定后的地质事件.

此外, 还研究了西伯利亚克拉通和怀俄明克拉通地幔橄榄岩包体的 Re-Os 同位素体系^[4, 9, 10], 获得了两个克拉通地区的 SCLM 形成年龄分别是 3.2Ga ^[10], $(2.7 \sim 2.9)\text{Ga}$ ^[4], 证明了 SCLM 年龄的古老性及其与上覆地壳年龄的耦合性.

3.2 造山带橄榄岩的年龄

对于造山带橄榄岩的 Re-Os 体系作了许多研究. 从非洲摩洛哥的 Beni Bousera, 到欧洲西班牙南部的 Ronda, 法国南部比利牛斯的 Lherz, 西阿尔卑斯的 Lanzo, 东阿尔卑斯的 Baldissero 等一些著名的橄榄岩杂岩体, 以及瑞士和奥地利境内阿尔卑斯造山带橄榄岩透镜体等都有研究报道^[5, 11~13, 16], 对于橄榄岩的成因、形成时间以及后来的演化, 从 Re-Os 同位素体系研

究给予制约. 特别是 Reisberg 等人^[5, 11] 对于世界上最大的造山带二辉橄榄岩体, 西班牙南部 Ronda 超镁铁杂岩体的 Re-Os 同位素体系研究, 12 个橄榄岩样品 Os 含量为 $(2.5 \sim 6.7) \times 10^{-9}$, Re 含量为 $(0.02 \sim 0.71) \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 为 0.98~1.12, 除了一个样品外, 都低于原始地幔的现代值. 给出 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 参考等时线年龄为 (1.17 ± 12) Ga. 发现 $^{187}\text{O}/^{188}\text{O}$ 比值与主量元素含量 Al_2O_3 和样品的 MG 值等有极好的线性相关性, 由 $^{187}\text{O}/^{188}\text{O}$ - Al_2O_3 相关线的截距, 得出软流圈地幔 Os 同位素模式年龄 1.3 Ga, 代表 SCLM 的形成时代. 原文作者用几种独立方法得出了相同的结果, 证明了它的合理性和地质意义. $^{187}\text{O}/^{188}\text{O}$ - Al_2O_3 相关性定年方法用于法国东比利牛斯的几个橄榄岩体, 包括著名的 Lherz 橄榄岩, 也得出了合理的结果, 该区 SCLM 的形成时代为 2.3 Ga. 19 个橄榄岩样品的 Os 含量为 $(2.11 \sim 5.95) \times 10^{-9}$, Re 含量为 $(0.013 \sim 0.370) \times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 为 0.114 2~0.129 5, $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 与 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 的相关性很差, 表明 Re 含量已受后期作用的扰动, 但是 $^{187}\text{O}/^{188}\text{O}$ - Al_2O_3 的相关性很好, 可以用于模式年龄计算^[11]. 图 2 说明对西班牙 Ronda 和法国东比利牛斯橄榄岩的研究结果. 有人称 $^{187}\text{O}/^{188}\text{O}$ - Al_2O_3 的相关性为铝等时年龄 (Alumichron), 不过, 实质上它还是一种模式年龄.

图2 西班牙南部 Ronda ((a) 和 (b)), 法国东 Pyrenean ((c) 和 (d)) 橄榄岩 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与 Al_2O_3 和 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 的相关性

(a) 和 (b) 中 ■——块状橄榄岩, ◇——富含石榴石薄层, △——富含尖晶石薄层; (c) 和 (d) 中: □——采自 Fontete Rouge, ○——采自中-西 Pyrenean, ■——采自东 Pyrenean. 引自文献[11]

3.3 碱性玄武岩中包容的橄榄岩包体的年龄及其意义

新生代碱性玄武岩中常常包含丰富的尖晶石相橄榄岩, 对这类样品的 Re-Os 同位素体系

的研究报道很少. 最近对澳大利亚东南部新火山岩省新生代玄武岩中的尖晶石橄榄岩包体 Re-Os 体系的详细研究^[14, 17], 表明太古代后地体的 SCLM 也是古老的和长期稳定的. Handler 等人^[17]在南澳大利亚州 Gambier 山和维多利亚州 Shadwell, Noorat, Leura 和 Porndon 诸山采集了 22 个尖晶石相橄榄岩包体, 代表了澳大利亚前寒武纪地盾以东, WNW-ESE 向 220 km 长的 SCLM 剖面. 其中包括无含水矿物相的尖晶石二辉橄榄岩 12 个, 方辉橄榄岩 1 个, 含有金云母、磷灰石、韭闪石和黑云母等不同显性交代矿物组合的尖晶石二辉橄榄岩和方辉橄榄岩包体 9 个. 用 Carius 管-N-TIMS 法测定了包体的 Re-Os 含量和同位素组成, Re 含量($0.003 \sim 0.137$) $\times 10^{-9}$, Os 含量($1.25 \sim 3.68$) $\times 10^{-9}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 $0.115\,62 \sim 0.127\,86$. 包体中 Re-Os 同位素体系主要受地幔的熔体提取作用控制, Os 同位素组成呈亏损特征, 隐性地幔交代作用(以高 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 表征)和碳酸盐显性地幔交代作用对 Re-Os 同位素体系无显著影响. 由 Re-Os 同位素体系的软流圈地幔模式年龄, 表明该区岩石圈地幔有 3 个亏损时期分别为 1 960 Ma(Re-Os 等时年龄为 $(1\,959 \pm 100)$ Ma, Os 同位素初始比值 $\chi_{\text{Os}} = +0.2 \pm 0.1$), 800~1 000 Ma 和 < 500 Ma, 由西向东变得年轻. 该区的 SCLM 自元古代以来的三阶段演化, 并与上覆地壳演化耦合, 为该区大地构造演化提供了新模式. 此外, 美国西南部的 Kilbourne Hole, 加拿大的 Cordillera, 德国的 Dreiser Weiher 和蒙古的 Tariat 等地的尖晶石相橄榄岩包体也有初步的 Re-Os 同位素体系研究, 也证实了 Os 同位素组成与常量成分的相关性以及 SCLM 的古老性和稳定性^[13].

4 中国东部幔源橄榄岩包体 Re-Os 同位素体系定年研究

中国东部大陆由南而北近 5 000 km 范围内准连续地出露新生代玄武岩, 在碱性玄武岩中含有丰富的幔源橄榄岩包体. 其中以尖晶石相二辉橄榄岩为主, 此外, 有方辉橄榄岩, 纯橄岩等. 它们是研究 SCLM 的最直接样品之一. 自 80 年代以来, 对幔源橄榄岩包体进行了深入的地质学、矿物学、岩石学研究^[42, 43], 但是对于 REE 等微量元素和 Sr-Nd-Pb 等同位素地球化学研究较少^[44, 45]. 有关包体的年代学研究更是稀少. 已经发表的结果, 如: 华北地块汉诺坝地区 6 个橄榄岩样品的 Sm-Nd 同位素体系得出的“表观等时线年龄”为 1 Ga^[45]; 东北地块锡林浩特和阿巴嘎地区 13 个橄榄岩样品的 Sm-Nd 同位素体系得出的“表观等时线年龄”为 1.6 Ga^[46]; 华南地块明溪地区 3 个橄榄岩包体的 Sm-Nd 同位素体系得出的“表观等时线年龄”是 1 Ga^[47]; 扬子地块六合地区 5 个橄榄岩包体的 Sm-Nd 同位素体系得出的“表观等时线年龄”是 1 Ga^[48]. 这些“年龄”的地质含义尚不清楚, 显然它们不能代表这些地区 SCLM 的形成时间. 观测结果表明 Sm-Nd 同位素体系不能测定 SCLM 的年龄, 迫切需要开展 Re-Os 同位素体系的定年研究.

国内对 Re-Os 同位素体系定年研究起步晚投入单位少, 尚处于初级阶段. 其中杜安道等人^[49~51]率先开展了用等离子质谱做辉钼矿的 Re-Os 同位素体系定年研究, 并用于矿床地质学研究, 发表了一批研究成果.

孙卫东等人^[52, 53]率先开展了用 N-TIMS 法测定岩石中 Os 同位素组成研究. 在此基础上将建立国际上通用的 Carius 管-N-TIMS 法^[34]和溴法^[35], 用于测定岩石中微量($10^{-9} \sim 10^{-12}$)的 Re-Os 含量和 Os 同位素组成.

国内对于大陆岩石圈地幔样品的 Re-Os 同位素体系研究仅有初步探索, 如对下扬子地区

的尖晶石橄榄岩包体和皖东玄武岩少量样品测定了 Os 同位素组成^[54~56]. 其中对江苏六合盘石山 6 个尖晶石二辉橄榄岩包体, 用 N-TIMS 法测量的结果表明 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 0.124 1~0.129 4, 除 1 个样品外, 都低于原始地幔的现代值, 呈亏损特征, 并且与常量元素(如 Al_2O_3 , MgO) 的变化高度相关(图 3). 根据 Os 与常量元素相关的模式年龄计算, 该区的 SCLM 年龄可能为晚太古代到早元古代, 表明岩石圈地幔的古老性. 根据岩石圈地幔与地壳稳定年龄的耦合性, 可以推测下扬子地区也可能存在未出露的古老结晶基底, 这与地球物理和大地构造研究结论^[57]相一致. 关于下扬子地区岩石圈地幔 Re-Os 同位素体系定年的工作还在进行中, 不久将报道更加精确的年龄结果.

图3 江苏六合盘石山尖晶石二辉橄榄岩 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与主量元素关系(a)及模式年龄(b)

引自孙卫东等人^[55]

总之, SCLM 的 Re-Os 同位素体系定年为研究大陆根的形成时间和形成速率; 对流地幔-岩石圈地幔-地壳的相互作用和演化过程; 大陆地幔在构造-热事件和化学侵蚀中的稳定性; 地幔岩石圈和地壳年龄的耦合性; 地球早期分异和大陆核形成等科学问题提供重要的制约. 具有重要的科学理论意义. 同时, 应当看到幔源样品中的 Re, Os 含量极低, 在残余橄榄岩中 Re 含量甚至低到 10^{-12} 级, 而在熔体相中 Os 含量甚至低到 10^{-12} 级, 给分析测试带来许多困难. 必须建立低本底的样品分解处理, Re-Os 分离纯化和质谱测量等一整套流程, 建立国际上通用的 Carius 管-N(TIMS 方法和液体溴分离提纯新方法. 国内的同行们尚需努力克服困难, 方能实现 Re-Os 同位素体系在地质地球化学研究中的广泛应用.

致谢 在本文写作过程中得到了中国科学院地质研究所岩石圈构造演化开放实验室周新华研究员、中国科学技术大学地球和空间科学系彭子成和陈道公教授以及孙卫东同志的许多帮助, 在此向他们表示由衷的感谢. 本工作为国家自然科学基金(批准号: 498373005, 49733110)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Menzies M A. Continental Mantle. Oxford: Clarendon Press, 1990. 1~ 184
- 2 Basu A, Hart S. Earth Processes: Reading the Isotopic Code. Washington DC, Am Geophys Union, 1996. 1~ 429
- 3 Hofmann A W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. Nature, 1997, 385: 219~ 229
- 4 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 formation of the continental mantle. <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-22-2362>

- tions for the chemical evolution of subcontinental mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 1583~ 1595
- 5 Reisberg L, Allegre C J, Luck J M. The Re-Os systematics of Ronda ultramafic complex of southern Spain. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 105: 196~ 219
- 6 Carlson R W, Irving A J. Depletion and enrichment history of subcontinental lithospheric mantle: An Os, Sr, Nd and Pb isotopic study on ultramafic xenoliths from the northwestern Wyoming Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 126: 457~ 472
- 7 Pearson D G. Constraints on lithospheric mantle evolution from Re-Os isotope studies of xenoliths. *Journal of Conference Abstracts*, 1996, 1(1): 452
- 8 Pearson D G, Carlson R W, Shirey S B, et al. Stabilization of Archean lithospheric mantle: A Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from the Kaapvaal craton. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 134: 341~ 1357
- 9 Pearson D G, Shirey S B, Carlson R W, et al. Re-Os, Sm-Nd, Rb-Sr isotope evidence for thick Archean lithospheric mantle beneath the Siberian craton modified by multistage metasomatism. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(5): 959~ 977
- 10 Pearson D G, Snyder G A, Shirey S B, et al. Archean Re-Os age for Siberian eclogites and constrains on Archean tectonics. *Nature*, 1995, 374: 711~ 713
- 11 Reisberg L, Lorand J P. Longevity of subcontinental mantle lithosphere from osmium isotope systematics in orogenic peridotite massifs. *Nature*, 1995, 376: 159~ 162
- 12 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
- 13 Meisel T, Walker R J, Morgan J W. The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle. *Nature*, 1996, 383: 517 ~ 520
- 14 McBirde 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 (7): 631~ 634
- 15 Olive V, Ellam R M, Harte B. A Re-Os isotope study of ultramafic xenoliths from the Matsoku kimberlite. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 150: 129~ 140
- 16 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
- 17 Handler M R, Bennert V C, East T M. Os isotopic systematics of variably metasomated southeast Australian xenoliths. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 151: 61~ 75
- 18 Goldschmidt V M. *Geochemistry*. London: Oxford University Press, 1954. 1~ 730
- 19 Sun S S. Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 1982, 46: 179~ 192
- 20 Birck J L, Allegre C J. Contrasting Re/Os magmatic fractionation in planetary basalts. *Earth Plant Sci Lett*, 1994, 124: 139~ 148
- 21 Tuli J K. Nuclear Wallet Cards, National Nuclear Data Center. New York: Brookhaven National Laboratory, 1985. 38~ 40
- 22 Lindner M, Leich D A, Borg R J, et al. Direct laboratory determination of the ^{187}Re half-life. *Nature*, 1986, 320: 246~ 248
- 23 Lindner M, Leich D A, Russ G B, et al. Direct laboratory determination of the half life of ^{187}Re . *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 1597~ 1606
- 24 Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. *Science*, 1996, 271: 1099~ 1102
- 25 Weast R C, Astle M J, Beyer W H. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC Press, 1986. 568~ 581
- 26 Hirt B, Tilton G R, Herr W, et al. The half-life of ^{187}Re . In: Geiss J, Goldberg N D, eds. *Earth Sciences and Meteoritics*. Amsterdam: North Holland Publishing Co, 1963. 273~ 280
- 27 Luck J M, Birck J L, Allegre C J. ^{187}Re - ^{187}Os systematics in meteorites: early chronology of the solar system and the age of the galaxy. *Nature*, 1980, 283: 156~ 159
- 28 Fehn U, Teng R, Elmore D, et al. Isotopic composition of osmium in terrestrial samples determined by accelerator mass spectrometry. *Nature*, 1986, 323: 707~ 709
- 29 Walker R J, Fassett J D. Isotopic measurement of sub-nanogram quantities of rhenium and osmium by resonance ionization mass spectrometry. *Anal Chem*, 1986, 58: 2923~ 2927

- 30 Lichte F E, Wilson S M, Brooks R R, et al. New methods for the measurement of osmium isotopes applied to New Zealand boundary shale. *Nature*, 1986, 322: 816~ 817
- 31 Volkening J, Walczyk T, Heumann K G. Osmium isotope ratio measurements by negative thermal ionization mass spectrometry. *Int J Mass Spectrom Proc*, 1991, 105: 147~ 159
- 32 Walczyk T, Hebeda E H, Heumann K G. Osmium isotope ratio measurements by negative thermal ionization mass spectrometry (NTIMS). *Fres J Anal Chem*, 1991, 341: 537~ 541
- 33 Creaser R A, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. Negative thermal ion mass spectrometry of osmium, rhenium and iridium. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 397~ 401
- 34 Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low-blank Re-Os analysis. *Anal Chem*, 1995, 67: 2136~ 2141
- 35 Birk J L, Roy Barman M, Capmas F. Re-Os isotopic measurements at the Femtomole level in nature samples. *Geostandards Newsletter*, 1997, 20(1): 19~ 27
- 36 Yin Q Z, Jagoutz E, Verkhovskiy, et al. ^{187}Os - ^{186}Os and ^{187}Os - ^{188}Os method of dating: an introduction. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57: 4119~ 4128
- 37 Frey F A, Green D H. The mineralogy, geochemistry and origin of lherzolite inclusions in Victorian basanites. *Geochim Cosmochim Acta*, 1974, 38: 1023~ 1059
- 38 Richardson S H. Latter-day origin of diamonds of eclogitic paragenesis. *Nature*, 1986, 322: 623~ 626
- 39 Richardson S H. Age and early evolution of the continental mantle. In: Menzies M A, ed. *Continental Mantle*. Oxford: Clarendon Press, 1990. 55~ 65
- 40 Richardson S H, Gurney J J, Erlank A J, et al. Origin of diamonds in old enriched mantle. *Nature*, 1984, 310: 198~ 202
- 41 Allegre C J, Luck J M. Osmium isotopes as petrogenetic and geological tracers. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 48: 148~ 154
- 42 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社, 1987. 1~ 490
- 43 池际尚主编. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩). 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. 1~ 277
- 44 Song Y, Frey F A. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, Eastern China: Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim Cosmochim Acta*. 1989. 53: 97~ 113
- 45 刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1992. 1~ 427
- 46 Deng F L, Macdougall J D. Proterozoic depletion of the lithosphere recorded in mantle xenoliths from Inner Mongolia. *Nature*, 1992, 360: 333~ 336
- 47 黄婉康, 王俊文, Basu A R, 等. 福建石榴石二辉橄榄岩 REE 及 Pb, Sr, Nd 同位素研究. *地球化学*, 1992, 21(2): 102~ 113
- 48 陈道公, 支霞臣, 李彬贤, 等. 江苏盘石山二辉橄榄岩包体 Nd, Sr, Pb 同位素特征. *地球化学*, 1994, 23(3): 245~ 253
- 49 何红蓼, 杜安道, 邹晓秋, 等. 铼-钨同位素的等离子体质谱测定及其在辉钼矿测年中的应用. *岩矿测试*, 1993, 12(3): 161~ 165
- 50 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 等. 辉钼矿的 Re-Os 同位素地质年龄测定方法研究. *地质学报*, 1994, 68: 339~ 347
- 51 杜安道, 孙亚莉, 邹晓秋, 等. 等离子体质谱铼-钨同位素测年法研究及其应用. *岩矿测试*, 1996, 15(4): 263~ 268
- 52 孙卫东, 彭子成, 方家骏, 等. 负热电离质谱技术(NTIMS)在钨同位素测定中的应用. *质谱学报*, 1997, 18(2): 7~ 15
- 53 孙卫东, 彭子成, 王兆荣, 等. 多氧化物质谱测定中的氧同位素校正问题. *质谱学报*, 1997, 18(3): 1~ 6
- 54 支霞臣, 郑永飞, 杜安道, 等. 苏皖地区新生代玄武岩和幔源橄榄岩包体的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 比值. *科学通报*, 1996, 41(3): 245~ 247
- 55 孙卫东, 彭子成, 支霞臣, 等. N-TIMS 法测定盘石山橄榄岩包体的钨同位素组成. *科学通报*, 1997, 42(21): 2310~ 2313
- 56 孙卫东, 支霞臣, 彭子成, 等. 原始上地幔的钨同位素组成. *科学通报*, 1998, 43(17): 1866~ 1869
- 57 程裕淇主编. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1994. 371~ 372

(1999-05-20 收稿, 1999-07-16 收修改稿)