

湘黔下寒武统铂族元素来源与矿化年龄的 Re-Os 同位素制约*

李胜荣** 肖启云 申俊峰 孙 丽 刘 波 阎柏琨

(中国地质大学地球科学与资源学院, 岩石圈构造与深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要 华南下寒武统黑色岩系底部页岩层富含有色金属、贵金属、稀有元素、分散元素和放射性元素, 称“多元素富集层”。为了厘定其中贵金属的来源和矿化年龄, 对黔北中南村、湘西柑子坪和三分采集的 6 件样品进行了 Re 和 Os 含量及同位素测定。Re-Os 基本呈正消长关系。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 相关系数为 0.99856, 在 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 协变图上, 6 个点均匀分布, 与 542 ± 11 Ma 拟合等时线高度吻合, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 0.84 ± 0.12 。结果表明, Re 和 Os 等元素的定位年龄为 542 ± 11 Ma, 与其所在层的地层学年龄一致; 湘黔地区“多元素富集层”的形成具有高度的等时性; 同一地区“多元素富集层”中不同物质在形成时间上的差异没有超出 Re-Os 年龄拟合所允许的误差范围; 黑色岩系成岩期显微脉体的形成与“多元素富集层”的形成没有明显的时间间隔或没有造成 Re-Os 同位素组成的明显变化; 玄武岩质地壳可能是湘黔地区下寒武统“多元素富集层”中 Re 和 Os 以及其他铂族元素和微量元素的最主要供给源。

关键词 寒武系底部 黑色岩系 Re-Os 同位素 年龄 物质来源 湘黔地区

湘黔地区下寒武统底部是一重要的界线事件层, 在该界线层中富集了如 Ni, Mo, Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt 等多种有用元素和 Cd, Se, Tl, Rb, Cs 等多种稀有、分散元素及 U 和 Th 等放射性元素, 称为“多元素富集层”。由于其中元素性质的“双峰”特征, 长期以来, 对该界线事件的性质和矿化物质来源一直众说纷纭, 提出过多种成因模式, 比较典型的模式有“海底热泉-地外物源说”^[1], “陆源-海底热泉说”^[2]和“表生淋滤说”(陈南生, 1995, 私人交流)。

笔者在对湘黔地区下寒武统黑色岩系发育区的地质地球化学特征进行了较详细的野外调查和室内研究基础上, 发现在多元素硫化物富集层上、下均有热水成因硅质岩发育^[3]; 并存在下硅质岩层-硫化物层-上硅质岩(碳酸盐)层的空间结构特征, 是一般热液矿床普遍出现的早期石英阶段-中期硫化物阶段-晚期石英碳酸盐阶段这一时间结构特征的反映^[1]; 其中的稀土元素^[4]、微量元素^[1]和贵金属元素^[5]均指示与海底热水活动有关。笔者根据已有阶段成果, 认为在早寒武世以前, 黑色岩系发育区深部即已隐伏有“双峰式岩浆岩”, 海底热水通过深部循环对流, 汲取了岩浆岩中的“双峰式元素”, 经热卤水溢流或喷流在海底沉积, 形成多元素富集层^[1]。

2001-08-27 收稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49873013, 40073012)

** E-mail: llsr@263.net

1) 李胜荣. 湘黔地区下寒武统黑色岩系金银铂族元素地球化学研究. 中国科学院地球化学研究所博士后研究报告. 1994

笔者所提出的认识中, 还有一些关键的成矿要素, 如成矿年龄问题和物质来源问题, 除了已有的资料外, 尚须补充其他方面的证据, 尤其是同位素方面的证据, 才更有说服力.

20 世纪 80 年代, 伴随等离子质谱 ICP-MS、二次离子质谱 SIMS、共振电子质谱 RIMS、加速器质谱 AMS 和负离子热电离质谱 NTIMS 等测试技术的迅速发展和 ¹⁸⁷Re 半衰期(42.3Ga)的精确测定^[6], ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os 衰变体系在地质年代学^[7, 8]、地球化学^[9]、地幔作用及地壳-地幔相互作用^[10, 11]研究中得到应用, 尤其是为含辉钼矿矿床和铂族元素矿床的年代学研究提供了强有力的工具, 受到矿床学界的强烈关注^[12-15]. 黑色页岩中的 Re-Os 同位素研究也已有许多重要成果^[16, 9].

Horan 等^[17]曾对湘黔地区下寒武统黑色页岩中的硫化物层做过 Re-Os 同位素研究. 但是, (1) Horan 等的 6 个等时线样品点中, 有 4 个高度集中, 年龄拟合线与样点分布误差较大; (2) Horan 等的 Re-Os 同位素体系以 ¹⁸⁶Os 作标准, 而 Walker 等^[18]发现, ¹⁸⁶Os 峰在质谱测定中会受到钨峰的干扰, 且 ¹⁸⁶Os 还是 ¹⁹⁰Pt-¹⁸⁶Os 同位素体系的产物, 故进行 Re-Os 同位素研究时, 近来采用 ¹⁸⁸Os 而不是 ¹⁸⁶Os 作标准; (3) Re-Os 同位素数据不但可以解决地质年代学问题, 而且可以提供物质来源的信息. Horan 等只进行了年代学研究, 未对 Re-Os 同位素数据进行物质来源探讨.

鉴于此, 本文对湘黔地区下寒武统的多元素富集层重新采样进行 Re-Os 同位素研究, 以期为准厘定 PGE 等多元素富集的年龄和来源提供新的证据.

1 地质背景及样品特征

分别在贵州遵义中南村、湖南张家界柑子坪和三岔下寒武统“多元素富集层”采集 Re-Os 同位素样品 6 个(图 1, 2).

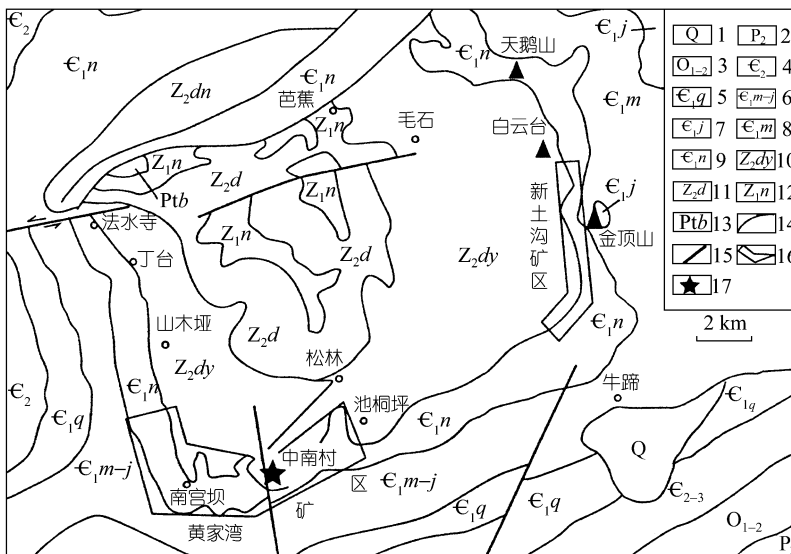


图 1 中南村地区地质略图

- 1. 第四系, 2. 上二叠统, 3. 中、下奥陶统, 4. 中寒武统, 5~9. 下寒武统 (5. 清虚洞组, 6. 明心寺组与金顶山组并层, 7. 金山组, 8. 明心寺组, 9. 牛蹄塘组), 10~12. 震旦系 (10. 灯影组, 11. 陡山沱组, 12. 南沱组), 13. 下元古界板溪群, 14. 地层界线, 15. 断层, 16. 镍铂矿区, 17. 采样点

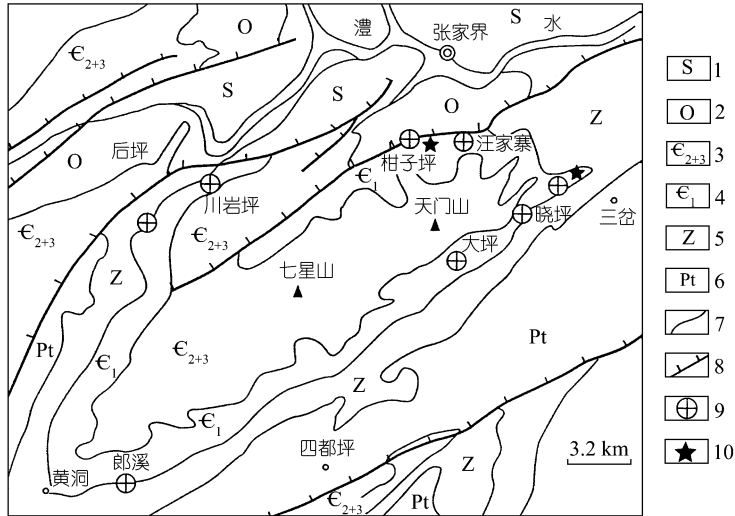


图 2 柑子坪-三岔地区地质略图

1. 志留系, 2. 奥陶系, 3. 中、上寒武统, 4. 下寒武统, 5. 震旦系, 6. 下元古界板溪群, 7. 地层界线, 8. 断层, 9. 镍钼矿区, 10. 采样点

中南村样品点剖面由下而上为: 震旦系白云岩及古风化壳层, 寒武系黑色含磷质结核重晶石岩(0~0.2 m), 寒武系黑色磷块岩(0.5~1 m), 寒武系黑色硅质岩(0~0.2 m), 寒武系“多元素富集层”(0.2~0.3 m), 寒武系“多元素矿化”黑色页岩(1~2 m), 寒武系黑色页岩(>20 m), 现代风化壳。中南村“多元素富集层”黑色页岩矿石有两种。一种以“硫钼矿”为主, 矿石呈暗黑色, 具同成分内碎屑, 碎屑呈不规则薄片状, 片度多在 1~2 cm。显微镜下“硫钼矿”为胶状结构, 电子探针分析 S 21.64%, Mo 26.5%, 其他 5.38%, 总量 58.39%, 为一胶体矿物。样品 ZN-10 即采自此种矿石。另一种矿石以黄铁矿为主, 呈暗灰色-浅铜黄色构成的杂色, 浸染状或块状构造。黄铁矿集合体构成的块体为透镜状或层状, 透镜体或层的厚度可达 12 cm。浸染状黄铁矿多为 0.2~0.3 mm 的立方体, 透镜体中的黄铁矿多为 0.2~0.3 mm 的他形晶。样品 ZN-02 和 ZN-03 采自此种矿石。

柑子坪样品点剖面由下而上为: 震旦系白云岩及古风化壳层, 寒武系重晶石岩层(0~0.3 m); 寒武系磷质硅岩(0~0.4 m), 寒武系“多元素富集层”(0.1~0.5 m), 寒武系“多元素矿化”黑色页岩(1~2.5 m), 寒武系黑色页岩(>30 m), 现代风化壳。该采样点“多元素富集层”黑色页岩矿石中含薄层或纹层状黄铁矿集合体和羟磷灰石质结核, 黄铁矿薄层或纹层断续分布, 构成内碎屑, 羟磷灰石质结核主要为鲕状(大小约 0.1~0.3 cm), 少数为豆状(0.4~0.8 cm)。显微镜下也可见胶状“硫钼矿”构成的内碎屑。样品 GZP4-2 采于该层。

三岔样品点剖面由下而上为: 震旦系白云岩及古风化壳层, 寒武系含炭硅质磷块岩层(0.3~0.5 m), 寒武系含炭磷质硅岩(0.15~0.4 m), 寒武系含磷质结核“多元素富集层”(0.2~0.3 m), 寒武系“多元素矿化”黑色页岩(0.5~1 m), 寒武系黑色页岩(>6 m), 现代风化壳。该处“多元素富集层”特征与柑子坪样品点相似, 但其羟磷灰石质结核主要为豆状和枣粒状, 少数为鲕状和芒果状(大小约为 0.1~20 cm)。样品 SC-20 和 SC-04 即采于该层。

2 化学处理流程及测试条件

(1) 酸溶分解样品 将定量称取的样品小心加至 Carius 管底部. 将 Carius 管置于 -50°C ~ -60°C 酒精冰浴中, 再将适量称取的 Re 和 Os 混合稀释剂用 4 mL 浓 HNO_3 及 22 mL 浓 HCl 转移至 Carius 管中. 待 Carius 管中的液体结冰后, 将 Carius 管管口封闭, 并在室温下回温后, 套入钢管中, 放入烘箱逐步加热至 230°C , 保温 8 h 后将其恢复至室温.

(2) 蒸馏 Os 打开 Carius 管, 将其中液体转入蒸馏瓶中, 加超纯水 30 mL, 在 $105 \sim 110^{\circ}\text{C}$ 蒸馏 50 min, 蒸出的 OsO_4 用水吸收(此为一次蒸馏吸收液). 将一次蒸馏残液倒入 50 mL 小烧杯中待处理. 再将一次蒸馏吸收液转入蒸馏瓶中进行二次蒸馏, 蒸出的 OsO_4 用 HBr 吸收(此为二次蒸馏吸收液). 将二次蒸馏吸收液转入 Teflon 小尖底杯中, 在电热板上加热浓缩至 20 μL , 取浓缩液加入氧化剂 CrO_3 进行微蒸馏, 微蒸馏温度为 $60 \sim 80^{\circ}\text{C}$, 时间为 3.5 h, 用 NTIMS 测 Os.

(3) 萃取 Re 将一次蒸馏残液置入 120°C 电热板加热近干, 加少量水赶酸, 在碱性条件下 (20% NaOH 10 mL) 用丙酮萃取 Re 弃去水相, 加热除有机相后用少量 0.8 mol HNO_3 赶 Os, 最后加 5 mL 0.8 mol HNO_3 溶解残渣, 再经阴离子交换柱处理后用 NTIMS 测 Re.

(4) 测试仪器 中国科学院地质与地球物理研究所 MAT-262NTIMS.

3 测试结果

将本文和 Horan 等^[17]对湘黔地区黑色岩系中的“多元素富集层”样品及加拿大 Yukon 地区黑色岩系中的“硫化物富集层”样品 Re 和 Os 的组成及其同位素测试数据一并列入表 1. 由于目前有关地壳、地幔、地核和陨石的 Os 同位素仍只有原来的以 ^{186}Os 为标准的数据, 为了便于对比, 表中将 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值乘以系数 8.3403(天然 ^{188}Os 和 ^{186}Os 的质量分数比值为 8.3403) 变换为 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 比值, 引用资料时仍依据原有的比值形式.

本文所测湘黔地区“多元素富集层”样品 Re 和 Os 含量与 Horan 等^[17]的结果大致吻合, 与加拿大 Yukon 地区“硫化物富集层”样品 Re 和 Os 的组成也基本相似. 不同地区各种岩性样品 Re 和 Os 的含量变化范围都较大, 而 Os 含量有随 Re 含量的增加而近乎正比例增加的趋势.

本文所测湘黔地区“多元素富集层”样品 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 比值的范围为 1026.691 ~ 10100.1, 平均 6069.9; $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 变化范围为 16.355 ~ 96.664, 平均 62.081. Horan 等^[17]所测湘黔地区 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 为 6780 ~ 9359, 平均 7733; $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 为 63.40 ~ 94.87, 平均 72.83. 二者基本吻合. 加拿大 Yukon 地区 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 为 5491.54 ~ 25440.76, 平均 12305.637; $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 为 17.35 ~ 159.9, 平均 72.280. 显然, Yukon 地区的 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 值比湘黔地区的大, 而 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 则基本相当.

按本文所测湘黔地区“多元素富集层”样品数据(表 1)投绘 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 协变图(图 3), 进一步计算“多元素富集层”样品年龄($542 \pm 11\text{Ma}$)和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值(0.84 ± 0.12). 结果表明, 本次研究所选 6 个样品的投点相关系数高达 0.99856, 与拟合等时线高度吻合. 与 Horan 等^[17]的等时线图(图 4)比较, 本文所得的年龄数据应当更为可靠.

4 讨论

4.1 年代学问题

由贵州遵义和湖南张家界下寒武统黑色岩系“多元素富集层”中的富硫钼矿层、稠密浸染

表 1 贵州、湖南和加拿大 Yukon 黑色页岩及硫化物层的 Re 和 Os 含量及同位素比值^{a)}

样品号	岩性	产地	样重/g	Re/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Os/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$	模式年龄/Ma
ZN10*	富硫钼矿层	贵州	0.20292	7.835(1)	77.77(4)	1211(2)	10100.1	11.59(3)	96.66408	530(6)
ZN02*	稠密浸染状黄铁矿层	中南村	0.20058	1.0032(2)	12.010(3)	866.6(5)	7227.704	8.976(7)	74.86253	561(8)
ZN03*	块状黄铁矿层		0.10013	0.0887(1)	1.355(1)	560.3(9)	4673.07	6.09(2)	50.79243	560(11)
GZP4-2*	条带状硫化物层	湖南	0.20031	3.8559(3)	42.222(9)	979.2(4)	8166.822	9.529(8)	79.47472	530(7)
SC20*	富磷质结核	柑子坪	0.20093	16.537(1)	233.00(3)	626.5(1)	5225.198	6.515(1)	54.33705	541(10)
SC04*	硫化物层	湖南	0.10114	0.21459(3)	10.40(2)	123.1(2)	1026.691	1.961(5)	16.3553	544(36)
SC1A		三岔		6.720(12)	65.90(12)		9253.(28)		81.44(16)	
SC1F				2.916(6)	32.74(6)		7485.(22)		68.77(12)	
TES12				0.8959(16)	10.55(2)		7030.(21)		68.58(13)	
TES8A	硫化物层	贵州天鸭山		1.704(3)	18.69(4)		7236.(22)		63.40(13)	560 (平均)
GZP4E				10.280(20)	108.9(2)		9359.(28)		94.87(18)	
GZP5I		湖南柑子坪		5.550(10)	65.62(12)		6780.(20)		64.64(12)	
DP4A14		湖南大坪		15.030(30)	176.7(4)		7009.(21)		68.21(12)	
90-N20	Ni 硫化物层			33.1601(60)	210.9(4)		18060.(80)		119.7(2)	
90-N1A				19.310(40)	106.3(2)		25440.(76)		161.1(3)	
90-N05	页岩	加拿大		0.1396(3)	1.663(16)		5491.(54)		41.19(15)	360
90-N21		Yukon 地区		0.517(1)	2.46(1)		18780(100)		79.29(40)	(平均)
90-N23A	无矿硫化物层			0.0155(5)	0.221(11)		3510.(170)		16.65(16)	
90-N23B	页岩			0.05033(10)	0.939(18)		2700.(55)		17.35(10)	

a) 带*为本文分析数据, 括号内为标准偏差 σ , 由国家地质实验测试中心柱安道等测试. 其他数据据文献[17], 负离子热电质谱测定, 括号内数据表示未尾数字的不确定性. 为了比较, 把本文的数据 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$

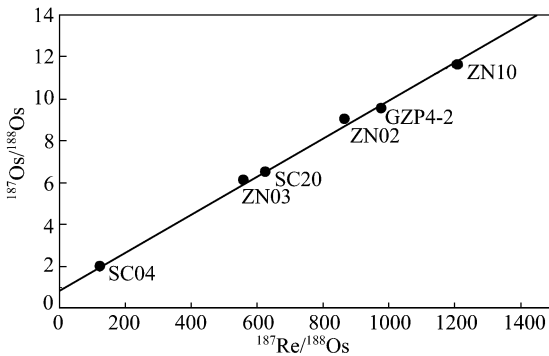


图 3 贵州、湖南下寒武统黑色岩系多元素富集层 Re-Os 等时线

等时线年龄为 $542(\pm 11)\text{Ma}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 $0.84(\pm 0.12)$

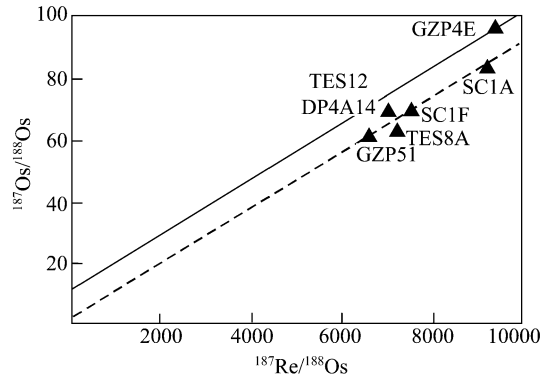


图 4 贵州、湖南下寒武统黑色岩系多元素富集层 Re-Os 等时线(据文献[17])

实等时线年龄为 590Ma , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 12; 虚等时线年龄为 560Ma , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 1

状黄铁矿层、块状黄铁矿层、条带状硫化物层和富磷质结核硫化物层样品分析所得最佳拟合等时线年龄为 $542 \pm 11\text{Ma}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.84 ± 0.12 (转换成 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 为 7.006)。Horan 等^[17]的数据点主要落在 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 初始比值为 1 的 560Ma 参考等时线附近。根据数据点与等时线的拟合程度, 将 $542 \pm 11\text{Ma}$ 作为多元素富集的年龄可能较为合理。

从样品所在剖面的层序来看, 震旦系与寒武系“多元素富集层”之间尚有寒武系磷块岩层和重晶石岩层, 因此“多元素富集层”中矿化年龄 $542 \pm 11\text{Ma}$ 应与其所在层的地层学年龄一致。

若根据遵义“多元素富集层”样品点 ZN02, ZN03 和 ZN10 拟合等时线, 与根据张家界样品点 SC04, SC20 和 GZP4-2 拟合等时线, 两者将近于完全重合(图 3)。这说明, 尽管贵州遵义和湖南张家界在地理位置上相隔达 400 多千米, 其下寒武统黑色岩系中的“多元素富集层”的形成却具有高度的等时性。

同一地区“多元素富集层”中的不同样品, 如富硫钨矿样品与富黄铁矿样品及富磷质结核样品, 尽管它们在矿物组成、主量与微量元素方面存在明显区别, 但它们在形成时间上的差异并没有超出 Re-Os 年龄拟合所允许的误差范围。

笔者以前的研究表明, “多元素富集层”中存在不同矿物组成的微米级显微脉体, 这些脉体应是成岩期元素活化迁移的产物^[19]。从等时线的拟合结果来看, 成岩期显微脉体的形成与“多元素富集层”的形成没有明显的时间间隔或没有造成 Re-Os 同位素组成的明显变化。

4.2 物质来源问题

Re 和 Os 均为亲铁元素, 但两者的地球化学性质却有明显差异。在壳幔作用过程中, Re 显示非相容性而富集于地壳(以玄武岩为代表), 而 Os 则显示相容性相对富集于地幔(以橄榄岩为代表)。因此, 在地质历史演化过程中, 尽管地壳的 Re/Os 比值可因 ^{187}Re 通过 β -衰变形成 ^{187}Os 而发生明显的变化, 但一般均在 $10 \sim 10^3$ 的高值范围; 地幔的低 Re 特征可保持基本稳定, 其 Re/Os 比值仅为 0.1 左右^[20]。

根据表 1 中本文数据, 湘黔地区下寒武统“多元素富集层”样品的 Re/Os 比值范围为

20.63 ~ 100.75, 平均 72.11. 这一结果意味着, 玄武岩质地壳可能是湘黔地区下寒武统“多元素富集层”中 Re 和 Os 以及其他 PGE 和微量元素的最主要供给源.

研究表明, 陨石及地幔的 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 比值均为 3.2, 而现代地幔 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 比值为 1.055^[18]; 地壳中的 Os 较之 Re 亏损甚大, 以致 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 比值约为 400, 对平均年龄为 2Ga 的地壳来说, 现代 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 平均比值为 10 左右^[21].

据表 1 可知, 湘黔地区下寒武统黑色岩系和 Yukon 地区含 PGE 黑色岩系中放射成因 ^{187}Os 和 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 值都远远超过陨石、地幔甚至地壳. 但与小喜马拉雅构造带的黑色岩系相应值^[16]十分接近. 看来, 湘黔地区黑色岩系的铂族元素等物质应主要为地壳来源, 地外物质通过撞击地球而直接提供贵金属等成矿物质的可能性不大, 但不排除地外物质撞击地球为多元素富集所提供的动力学条件.

5 结论

(1) 湘黔地区下寒武统黑色岩系“多元素富集层”中 Re, Os 以及其他铂族元素和微量元素的定位年龄为 542 ± 11 Ma, 与其所在地层的地层学年龄一致.

(2) 贵州遵义和湖南张家界在地理位置上相隔达 400 多千米, 其下寒武统黑色岩系中的“多元素富集层”的形成却具有高度的等时性.

(3) 同一地区“多元素富集层”中的硫钼矿、黄铁矿、磷质结核等不同物质在形成时间上的差异没有超出 Re-Os 年龄拟合所允许的误差范围.

(4) 黑色岩系成岩期显微脉体的形成与“多元素富集层”的形成没有明显的时间间隔或没有造成 Re-Os 同位素组成的明显变化.

(5) 玄武岩质地壳可能是湘黔地区下寒武统“多元素富集层”中 Re 和 Os, 其他铂族元素和微量元素的最主要供给源.

致谢 在野外工作期间, 得到中国科学院地球化学研究所高振敏研究员、罗泰义博士、杨竹森博士等的大力支持, 国家地质实验测试中心杜安道研究员等精心测试了样品, 谨向他们表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 1 Fan Delian, Yang Ruiying, Huang Zhongxiang. The Lower Cambrian black shale series and the iridium anomaly in south China. In: Developments in Geoscience, Contribution to 27th International Geological Congress, Moscow, 1984. 215 ~ 224
- 2 Coveney Jr R M, Mourowchick J B, Grauch R I, et al. Gold and platinum in shales with evidence against extraterrestrial sources of metals. *Chemical Geology*, 1992, 99: 101 ~ 114
- 3 Li Shengrong, Gao Zhenmin. Silicalites of hydrothermal origin in the lower Cambrian black rock series of south China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1996, 15(2): 113 ~ 120
- 4 李胜荣、高振敏. 湘黔地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征——兼论海相热水沉积岩稀土模式. *矿物学报*, 1995, 15(2): 225 ~ 229
- 5 李胜荣, 高振敏. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(2): 169 ~ 174
- 6 Linder M, Leich D, Russ G P, et al. Direct determination of the half-life of ^{187}Re . *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 1597 ~ 1606
- 7 Horan M F, Morgan J W, Walker R J, et al. Rhenium-osmium isotope constraints on the age of iron meteorites. *Science*, 1992,

- 255: 1118 ~ 1121
- 8 Trivedi J R, Singh S K, Krishnaswami S. ^{187}Re - ^{187}Os in Lesser Himalayan sediments: Measurement techniques and preliminary results. *Proc Indian Acad Sci (Earth Planet Sci)*, 1999, 108(3): 179 ~ 187
 - 9 Ravizza G, Turekian K K. Application of ^{187}Re - ^{187}Os system to black shale geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 3257 ~ 3262
 - 10 Bennett V C. Two mantle-plume components in Hawaiian picrites inferred from correlated Os-Pb isotopes. *Nature*, 1996, 381(16): 221 ~ 224
 - 11 Burton K W, Bourdon B, Birk J L, et al. Osmium isotope variations in the oceans recorded by Fe-Mn crusts. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171: 185 ~ 197
 - 12 Foster J G. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites. *Nature*, 1996, 382(22): 703 ~ 705
 - 13 Du A D, Mao J W, Zou X O. Re-Os dating of tungsten deposits accessory molybdenite at the Xiaoliugou in Nouth Qilian Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(Supp): 34
 - 14 Gao H T, Zhao D M, Qu W J, et al. Re-Os dating of Mo-deposits at Jinduicheng in Shaanxi Province by using negative thermal ionization mass spectrometry. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(Supp): 43
 - 15 Nieto J M, Jagoutz E. Osmium isotope evidence of extensive mining in historical times in the Iberian pyrite belt. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(Supp): 94
 - 16 Singh S K, Trivedi J R, Krishnaswami S. Re-Os isotope systematics in black shales from the Lesser Himalaya: Their chronology and role in the $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ evolution of seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(16): 2381 ~ 2392
 - 17 Horan M F, Morgan J W, Grauch R I, et al. Rhenium and osmium isotopes in black shales and Ni-Mo-PGE-rich sulfide layers, Yukon Territory, Canada, and Hunan and Guizhou provinces, China. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 257 ~ 265
 - 18 Walker R J, Morgan J W. Rhenium-osmium isotope systematics of carbonaceous chondrites. *Science*, 1989, 243: 519 ~ 522
 - 19 李胜荣, 高振敏. 贵州遵义下寒武统黑色页岩层钙质结核成核作用中元素的重新分配. 见: 彭汝明等主编. 地质地球化学研究. 贵阳: 贵州科技出版社, 1996. 72 ~ 77
 - 20 熊永良, 翟裕生. 铼-钨同位素体系、铂-钨同位素体系及二者的联合体系. *地球科学——中国地质大学学报*, 1994, 19(4): 519 ~ 527
 - 21 殷宁万, 黄典豪. 铼-钨同位素体系的研究现状及其在地质学中的应用. 国外矿床地质(铼-钨同位素地质应用专集), 1994(1): 1 ~ 11