

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

峨眉山大火成岩省中高 Os 苦橄岩的发现及地质意义

张招崇^{1,2)}, 王福生¹⁾, 曲文俊³⁾, 郝艳丽¹⁾, John J. MAHONEY⁴⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京, 100083; 3) 国家地质实验测试中心, 北京, 100037; 4) School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA

内容提要: 本文对峨眉山大火成岩省中苦橄岩及其共生的玄武岩进行了铂族元素(PGE)分析, 结果表明苦橄岩比玄武岩的 PGE 含量要高至少一个数量级, 并且具有明显高的 Os 含量, 不仅比熔融程度最高的科马提岩要高, 而且比原始地幔还要高, 另外, 还显示出超球粒陨石的 Os/Ir 比值(2.84~3.88)。其高的 Os/Ir 比值可能与岩浆上升过程中混入黑色页岩有关。部分熔融计算表明, 含有 0.01% 硫化物的原始地幔+0.5% 的外核在 7% 的熔融程度下, 然后又约 10% 的黑色页岩混染可以模拟原始岩浆的 PGE 含量。其 Os 含量及其他地球化学特征与其同时代的西伯利亚暗色岩系的相似性可能暗示了这两个大火成岩省来自于同一个起源于核-幔边界的超级地幔柱。另外, 还根据苦橄岩和玄武岩 PGE 的含量估算了该地区 PGE 的成矿潜力。

关键词: 铂族元素; 苦橄岩; 大火成岩省; 峨眉山

铂族元素(PGE)由于其高度的亲硫性质以及抗低温蚀变能力(Snow et al., 1998, 2000; Crocket, 2000), 所以越来越被广泛用于研究地球的形成、地核的形成、地幔分异和核-幔作用过程(Rehkämper et al., 1997; Brandon et al., 1998, 1999; Puchtel et al., 2000; Righter et al., 2000)。但是由于玄武岩是原始岩浆经历了复杂的分异过程的产物, 而 PGE 在这些过程中也会发生相应的分离过程, 所以玄武岩的 PGE 含量很难反映其源区特征(Rehkämper et al., 2000)。相比之下, 苦橄岩由于接近原始岩浆成分, 所以其 PGE 含量常被用来反演其源区特征和深部过程(Norman et al., 1999; Schaefer et al., 2000; Bennett et al., 2000)。

峨眉山大火成岩省已成为研究的热点, 但是有关其 PGE 的研究很少, 目前只有张成江等(1998)对峨眉山清音电站剖面的溢流玄武岩 PGE 数据的报道。最近, 笔者在云南丽江地区发现了三层苦橄岩(张招崇等, 2002), 并通过对其 PGE 含量的测定发现了世界上罕见的高 Os 苦橄岩, 在此报道这一结果, 并揭示其源区性质、深部过程以及 Cu-Ni-PGE 矿床的找矿意义。

1 采样位置

苦橄岩的产出特征以及岩相学特征我们已作过报道(张招崇等, 2004a), 在此只作简略的说明。新发现的苦橄岩产地有两处, 分别位于云南丽江县城南北, 距离约 26 km。两处的苦橄岩产出状况基本相似, 有三层喷出的苦橄岩, 呈夹层产于峨眉山玄武岩系的近底部位置(最底部为玄武质角砾岩和凝灰岩), 与其直接接触的是辉斑玄武岩, 并且接触界线清楚, 不呈渐变过渡关系(图 1)。在剖面的上部出现杏仁状玄武岩和无斑玄武岩。

2 PGE 分析方法和结果

铂族元素分析在国家地质实验测试中心进行。铂族元素的富集采用的是镍磺火试金-碲共沉淀的方法。分析过程简述如下: 10 g (200 目) 样品与 2g Ni₂O₃, 1.25 g 硫磺粉, 15 g Na₂CO₃, 20 g Na₂B₄O₇, 1 g SiO₂ 以及 1 g 面粉混匀后, 转入粘土坩埚中, 然后加入适量的 Os¹⁹⁰ 稀释剂(美国橡树岭国家实验室出品)。将坩埚置于 1200℃ 的试金炉中加热熔融 1.5 h。而后将熔融体转入特制铁模具中, 冷却后取

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40273020), 国家重点基础研究发展规划项目(编号 G1999043205)和国土资源部百名优秀青年计划项目资助成果。

收稿日期: 2004-07-28; 改回日期: 2005-03-17; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 张招崇, 男, 1965 年生, 教授。主要从事火成岩岩石学及地球化学的研究和教学工作。通讯地址: 100037, 北京百万庄大街 26 号, 中国地质科学院地质研究所。

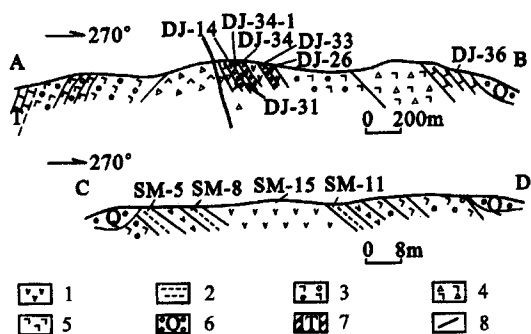


图1 云南丽江苦橄岩产出剖面

Fig. 1 Geological section of the occurrence of picrites in the Lijiang area, Yunnan province

上图位于丽江北;下图位于丽江南;1—苦橄质熔岩;2—辉斑玄武岩;3—杏仁状玄武岩;4—玄武质角砾岩;5—无斑玄武岩;6—第四纪砂砾岩;7—三叠纪灰岩;8—断裂

Upper: north Lijiang; Lower: south Lijiang; 1—picritic lava; 2—pyroxene-phyric basalt; 3—amygoidal basalt; 4—basaltic breccia; 5—aphyric basalt; 6—Quaternary sandstone and conglomerate; 7—Triassic limestone; 8—fault

出镍扣,将其粉碎后溶解于浓 HCl 中。加入碲共沉淀剂,加热使其凝聚后转入 Teflon 密闭溶样器中,加入 1 mL 王水,于 100°C 加热溶解 1 h。用 H₂O 稀释至 10 mL 后,然后用 ICP-MS (TJA PQ-EXCELL) 直接测量。本实验的全流程空白为:Ru、Ir、Pd、Os 小于 0.3 ng/g, Pt、Rh 小于 0.06 ng/g。表 1 所列的结果是测定值扣除全流程空白后的结果。实验所测定的标准参考物(GPT-4 和 GPT-7)的分析结果与推荐值吻合较好。为了检查所测定的数据的质量,我们对 1 个苦橄岩和 1 个玄武岩样品分别进行了两次测定,结果表明其精度较高(表 1)。

苦橄岩及其共生的玄武岩的 PGE 分析结果见表 1。苦橄岩和玄武岩的 IPGE (Os、Ir、Ru) 含量有明显区别,前者大致要高出一个数量级,而 PPGE (Rh、Pt、Pd) 含量则没有明显区别。本区玄武岩的 PGE 含量和清音剖面的玄武岩相似。本区苦橄岩的 PGE 含量总体上比玄武岩中的要高,但与科马提岩相比,除 Os 含量高外,其他元素要低。

从图 2 可以看出,苦橄岩 Os 的含量高于原始地幔, Pd 的含量基本接近,而其他元素则低于原始地幔。苦橄岩还显示出超球粒陨石的 Os/Ir 比值,为 2.84~3.88(表 1),这是本区苦橄岩 PGE 组成的一大特点。另外,清音剖面的玄武岩显

示出比苦橄岩更高的 Os/Ir 比值,其平均值达 5.56。

由图 3 可以看出,本区苦橄岩总体上比其他地区的苦橄岩和科马提岩的 Os 含量高,而与西伯利亚溢流玄武岩具有一定的相似性。

从图 4 可以看出, Cr 和 Ni 与 MgO 的含量呈正相关关系,表明岩浆的结晶分异作用受橄榄石和铬尖晶石控制。前人的研究表明, PGE 在铬尖晶石中具有高的分配系数 (Ellam et al., 1992; Horan et al., 1995),而在橄榄石中,对于 Os 和 Ir, 不同学者有不同的认识,有的得出大于 1 (Ellam et al., 1992),有的小于 1 (Rehkämper et al., 2000),但是 Pt 在橄榄石—熔体的分配系数近于 0。另外, Rehkämper 等 (2000) 认为 PGE 在橄榄石中有两种存在形式,一种是在硫化物中,后者呈微小的包裹体形式存在于橄榄石中;另一种分布在橄榄石的晶格中。由图 4 还可以看出,对于苦橄岩, Os 和 Ir 的含量与 MgO 基本上呈正相关,表明 Os 和 Ir 可能分布在橄榄石的晶格中,橄榄石的分离结晶作用导致了 Os 和 Ir 含量的降低。

3 地质意义讨论

3.1 源区特征

已有的研究表明,有的苦橄岩代表了原始岩浆成分,有的含有过剩的橄榄石,而有的则为演化的岩浆。笔者曾利用橄榄石—熔体平衡原理研究了本区的苦橄岩是否为原始岩浆,结果表明样品 SM-15 代表了原始岩浆成分,而 DJ-31 和 DJ-34-1 具有过剩的橄榄石堆积, DJ-26 为演化的岩浆 (张招崇等, 2003a; Zhang et al., 2004c)。

由表 1 和图 3 可以看出,本区苦橄岩具有异常高的 Os 含量, Schaefer 等 (2000) 将具有高 Os 含量的科马提岩归因于亏损 S 的地幔源区在高程度熔融

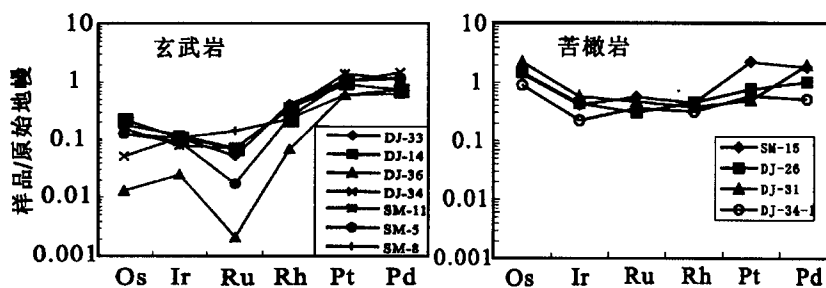


图2 峨眉山苦橄岩和玄武岩 PGE 原始地幔标准化图解

Fig. 2 Primitive-mantle normalised PGE patterns for ELIP and associated basalts
原始地幔值为假定 0.075 倍的球粒陨石值 (据 Bennett 等, 2000)

Primitive-mantle normalising values are assumed to be $0.075 \times C1$ chondrite as proposed by Bennett et al. (2000)

表 1 峨眉山大火成岩省中的苦橄岩及其共生岩石的 PGE 含量

Table 1 PGE concentrations of the picrites and associated lavas in the Emeishan large igneous province

样品号	岩石类型	Os(ng/g)	Ir(ng/g)	Ru(ng/g)	Rh(ng/g)	Pt(ng/g)	Pd(ng/g)	Ni($\times 10^{-6}$)	MgO(%)	Cr($\times 10^{-6}$)	Os/Ir
DJ-33	辉斑玄武岩	0.5	0.42	0.3	0.43	8.1	5.05	259	10.4	688	1.19
DJ-26	苦橄岩	5.4	1.9	1.7	0.50	5.4	4.50	967	18.1	2122	2.84
	平均	5.4	1.55	1.5	0.45	5.55	4.15				
DJ-36	无斑玄武岩	0.05	0.09	0.02	0.10	4.7	4.50	76.3	6.82	83.1	0.53
	平均	0.05	0.095	0.012	0.07	4.6	4.15				
DJ-31	苦橄岩	8.2	2.19	2.5	0.37	3.58	8.09	1272	24.9	2509	3.74
DJ-34	辉斑玄武岩	0.2	0.41	0.4	0.37	7.85	6.32	241	11.6	660	0.49
DJ-34-1	苦橄岩	3.3	0.85	1.9	0.31	4.28	2.10	1147	25	2262	3.88
DJ-14	辉斑玄武岩	0.7	0.46	0.4	0.36	7.18	3.17	174	10.3	750	1.52
SM-5	辉斑玄武岩	0.5	0.36	0.1	0.25	8.23	4.88	195	9.57	529	1.39
SM-8	辉斑玄武岩	0.9	0.42	0.8	0.24	4.52	3.24	254	9.88	893	2.14
SM-15	苦橄岩	5.1	1.48	3.2	0.44	16.4	7.42	945	21.4	2259	3.45
SM-11	辉斑玄武岩	0.6	0.30?	0.4	0.35	10.6	5.03	214	9.91	854	2.00
	清音剖面 14 个样品平均值 ^①	0.39	0.07	0.49	0.25	7.71	5.48				5.56
	C1 球粒陨石 ^②	486	481	712	134	990	560				1.01
	估算的外核 ^③	2280	2260	3340		4640	2630				1.01
	夏威夷苦橄岩 ^④	0.721	0.547	0.940		3.856	3.075				1.32
	Kostomuksha 科马提岩 ^⑤	1.641	1.592	4.051		8.190	9.525				1.03
	Ronda 橄榄岩(Spain) ^⑥	2.92	2.09	4.64	0.96		5.06				1.37
	华南黑色页岩 ^⑦	115.9	6.9	10.5		270	277				16.8

数据来源:① 张成江等(1998);② Anders 等(1989);③ 假定有 5.5% 的外核物质结晶(Puchtel et al., 2000);④ Puchtel 等(2000);⑤ Puchtel 等(2000);⑥ Lorand 等(2000);⑦ 根据李胜荣等(2000), 张光弟等(2002)和陈永清等(2003)数据计算。所有引用的数据均为平均值。

下的产物。但是值得注意的是,这些样品的 Os 含量一般在 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ 之间,比原始地幔的 Os 含量要低,所以亏损 S 的地幔源区在高程度部分熔融条件下可以形成相对较高的 Os 含量。而本区苦橄岩的 Os 含量则更高,比原始地幔中的还要高。由于 PGE 在地幔中是高度的相容元素(Keays, 1995), 所以对于原始地幔不管有多高的熔融程度,也产生不了比原始地幔更高 Os 含量的岩浆。比原始地幔具有更高 Os 含量的苦橄岩,可能有两种成因(Schaefer et al., 2000),一是堆积成因;另一是源区有地核物质的加入。因为地核中有很高的 Os 的含量(表 1),后一种则被认为是具有地幔柱成因苦橄岩源区的普遍特点(Walker et al., 1995; Pattou et al., 1996; Widom et al., 1996)。所以在排除堆积成因的前提下,另一种可能性就是有外核物质的加入。前已述及,样品 SM-15 代表了原始岩浆成分,该样品 Os 的含量达 5.1 ng/g,明显高于原始地幔,暗示其源区有地核物质的加入。

但是,值得注意的是,峨眉山苦橄岩有异常高的 Os/Ir 比值,其比值为 2.84~3.88,远远高于一般的苦橄岩和科马提岩,而外核的 Os/Ir 比值却是接近于 1 的(表 1),由此说明其高的 Os/Ir 比值不是由单

纯的外核物质加入引起的。

业已证明,导致 Os/Ir 比值变化的因素可能有四个方面,其一是测定过程中造成的,如 OsO_4 的挥发性,但是这只会造成 Os 的丢失,从而导致 Os/Ir 值的降低。第二种可能是苦橄岩中高含量的 Os 是由于岩浆中 ^{187}Re 的衰变形成 ^{187}Os 造成的(这可以在某些具有高 $^{187}Os/^{188}Os$ 和 Re/Os 的玄武岩和其他岩石中观察到)。尽管我们还没有分析苦橄岩 Re 的含量,一般而言,苦橄岩 Re 的含量是相当低的,并且考虑到峨眉山玄武岩只有 250 Ma,所以其放射性成因的 Os 还不足以导致如此高的 Os 含量。第三种可能是由于后期岩浆流体活动造成的,如西班牙的 Ronda 二辉橄榄岩由于岩浆流体的作用,造成了高的 Os/Ir 比值(Lorand et al., 2000),然而该地区的二辉橄榄岩也没有如峨眉山苦橄岩那样如此高的 Os/Ir 比值(1.37, 表 1),所以这种可能性似乎可以排除。第四种可能是岩浆遭受了黑色页岩的混染,因为黑色页岩普遍具有高的 Os/Ir 比值(Ravizza et al., 1997)。前人研究表明,黑色页岩通常富含有机碳和 S,并且具有高的 Re 和 Os 含量,由于高的 Re 含量导致了岩石中富含放射性成因的 Os,这样也就导致了高的 Os/Ir 比值(如 Hannigan et al., 1998;

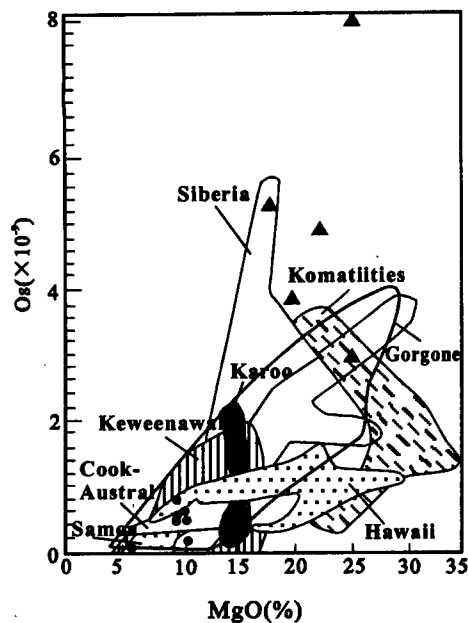


图3 全球各主要热点和溢流玄武岩区 Os 对 MgO 图解

Fig. 3 Os concentration vs. MgO for ELIP samples (dots)

- ▲—苦橄岩; ●—玄武岩; 其他地区的数据来自 Schaefer 等(2000)及其引用的文献
 ▲—Picrite; ●—basalt; others data are from Schaefer et al. (2000) and therein for several major hotspots and flood basalt province

Pierson et al., 2000; Jaffe et al., 2002; Lipinski et al., 2003)。据报道,在峨眉山玄武岩分布区也分布有黑色页岩,并且在黑色页岩中含有富金属层,这些富金属层同样也具有相当高的 PGE 含量,并且它们也具有高的 Os/Ir 比值和 Re 含量,其平均比值达 16.9(李胜荣等,2000;邢树文等,2002;张光弟等,2002;陈永清等,2003)。因此苦橄岩中高的 Os/Ir 比值有可能选择性地混染了这种岩石,而清音剖面中的玄武岩比丽江苦橄岩具有更高的 Os/Ir 比值则可能说明了其混染了更多的黑色页岩。

为了检验各种过程的可能性,我们在此对各种可能性进行理论模拟计算。这些可能性包括:① 原始地幔的部分熔融;② 原始地幔有外核物质的加入;③ 有外核物质加入的原始地幔的部分熔融,然后又被黑色页岩中的富金属层混染。

但是直至目前,有关 PGE 在地幔中的分配系数和赋存的矿物相均还不清楚,所以一些学者(如 Barnes et al., 1985, 1993; Rehkämper et al., 1999) 假定 PGE 只赋存于硫化物或者合金中(Os, Ir, Ru), 这些相的相对比例可以决定 PGE 的熔融行为。因此我们在此假定地幔中 PGE 只存在于硫化

物中,并且 D 在熔融中为常数。结合稀土模拟结果,其部分熔融程度为 7%(张招崇等,2004a),这样我们在此假定其部分熔融程度为 7%。

首先,假定原始岩浆是由含 0.01% 硫化物的原始地幔熔融形成的或者原始地幔含 0.5% 的外核物质(假定核的分异为 5.5%,Puchtel et al., 2000) 加入的原始地幔熔融形成的。由图 5 可以看出,由原始地幔部分熔融形成的原始熔体的 Os 含量大大低于峨眉山苦橄岩的 Os 含量,而有外核物质加入的原始地幔熔融如果保证 Os 的含量与实际观察值相同,则其他 PGE 含量大大高于观察值(图 5, 曲线 A),所以这两种可能性可以排除。然后,我们检验是否由原始地幔熔融的熔体被黑色页岩所混染的可能性。如图 5 所示,尽管 Os, Ir 和 Ru 理论计算值和观察值接近,但是其 Pt 和 Pd 含量要大大高于观察值(曲线 B),所以这种可能性也可排除。相比之下,包含有 0.01% 硫化物的原始地幔在有 0.5% 的外核物质加入条件下的熔融所形成的熔体,然后又遭受大约 10% 的黑色页岩的混染所形成岩浆,其所有的 PGE 含量(曲线 C)正好与观察值吻合。当然,这不是唯一的可能性,但这种可能性是不能排除的,所以从这点来看,峨眉山地幔柱可能起源于核-幔边界。

如图 3 所示,本区苦橄岩的 Os 含量与西伯利亚的苦橄岩具有一定的相似性。已有的研究表明(Xu et al., 2001; 张招崇等,2003b, 2004b),其 Sr, Nd, Pb 同位素和微量元素特征与西伯利亚 Traps 也具有一定的相似性,这暗示了两个形成时代相近的大火成岩省可能来自于同一源区。目前已有多方面的证据表明,峨眉山大火成岩省的形成与地幔柱活动有关(何斌等,2003; Zhang et al., 2004c);而对西伯利亚大火成岩省的研究也表明,其形成也与地幔柱有关,而且其 Os 同位素还暗示了地幔柱起源于核-幔边界(Horan et al., 1995)。从全球的角度看,峨眉山、西伯利亚和 Panjal Traps 等 3 个大火成岩省均形成于二叠系—三叠系的边界附近,因此,就自然引出这样一个问题,即这 3 个大火成岩省的形成是否与同一个起源于核-幔边界附近的超级地幔柱有关,亦即它们起源于同一个来自于核-幔边界的超级地幔柱,这个超级地幔柱正像 Arndt(2000)的地幔柱模式那样在上升到岩石圈底部时分支成一系列“柱脉”(plumelets)? 并且二叠纪—三叠纪之交的全球生物大规模绝灭和这个超级地幔柱活动有关? 遗憾的是,印度 Panjal Traps 几乎没有地球化学资料,所以无法作出结论性的回答,但峨眉山和西伯利亚大火

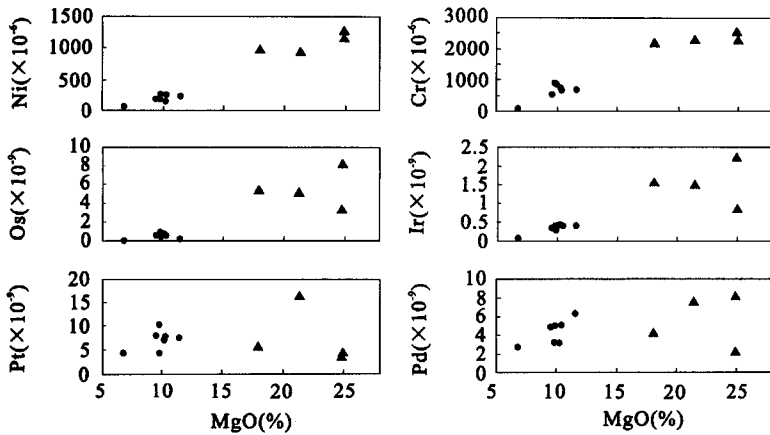


图 4 MgO 对亲硫元素变异图解
Fig. 4 Variation diagrams of MgO vs. siderophilic elements

▲—苦橄岩; ●—玄武岩
▲—Picrite; ●—basalts

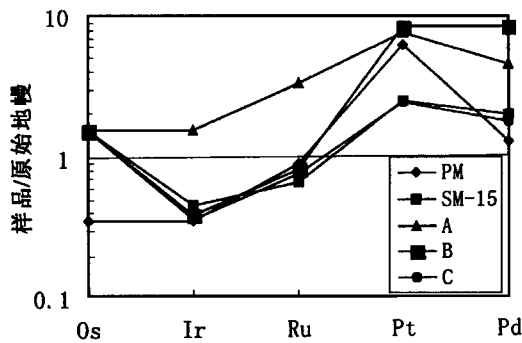


图 5 各种条件下形成的原始地幔 PGE 标准化曲线
Fig. 5 Calculated PGE concentrations of a melt formed by 7% partial melting of estimated primitive-mantle containing 0.01% of sulfides (PM)

图中包含有 0.01% 硫化物的原始地幔的 7% 部分熔融 (PM), 源区有 0.5% 外核 (分异程度 5.5%) 物质加入 (A); 原始地幔的熔体被 10% 的黑色页岩富金属层的混染 (B); 源区有 0.5% 外核 (分异程度 5.5%) 物质加入熔融形成的熔体, 然后又被 10% 的黑色页岩富金属层的混染 (C); 黑色页岩富金属层的 PGE 含量和文献出处见表 1。分配系数数据 Fleet 等 (1996)

Addition of 0.5% of differentiated outer core metal to PM yields a melt with pattern (A); the PM melt contaminated by 10% black shale yields pattern (B). Pattern (C) represents the 10% of black shale-contaminated melt formed assuming 0.5% of differentiated outer core metal in the source region. The PGE pattern of the primitive picrite sample (SM-15) is shown for comparison. The PGE partition coefficients between sulfide and melt are from Fleet et al. (1996), and the carrier phases of PGE in the mantle are assumed to be sulfides

成岩省在地球化学特征上包括 PGE 确实有一定的可比性。当然, 要回答上述问题, 还有许多工作要做。

3.2 Cu-Ni-PGE 矿床的成矿潜力分析

众所周知, 在大陆溢流玄武岩省中的层状岩体中发现了大型的 Cu-Ni-PGE 矿床, 如西伯利亚大火

成岩省的 Noril'sk。在峨眉山大火成岩省中已发现了类似的矿床, 如金山、杨柳坪、白马、力马河等, 但规模要小得多。

Keays (1995, 1997) 认为形成大型的 Cu-Ni-PGE 矿床需要三个必要条件, 其一是存在大规模的岩浆喷发和侵入活动; 其二是原始岩浆形成以及上升到高位岩浆房后 S 不饱和, 因为 S 饱和会使硫化物在早期析出而分散, 并且同时会因为 PGE 极强的亲硫性而使 PGE 发生分散; 其三为在高位岩浆房中岩浆由 S 不饱和变为 S 饱和的岩浆。对于峨眉山大火成岩省, 第一个条件肯定满足。第二个条件从上述模拟计算结果可知,

源区含硫较低, 因此其部分熔融形成的原始岩浆也应该是 S 不饱和的。对于第三个条件, 要使岩浆从 S 不饱和变为饱和, 有几个途径均可达到, 如外来 S 的加入, 与饱和 S 岩浆的混合以及 SiO₂ 的加入等 (Brooks et al., 1999)。由于本区在二叠纪前存在大量的海相沉积岩, 所以 S 源比较丰富, 加之峨眉山玄武岩的地球化学特征指示一些玄武岩明显受地壳的同化混染作用 (张招崇等, 2003b), 所以这个条件也能满足。因此由此分析, 峨眉山大火成岩省区具有 Cu-Ni-PGE 矿床的成矿潜力。

Lightfoot 等 (1997) 在分析西格棱兰大火成岩省的 PGE 成矿潜力时, 认为溢流玄武岩比苦橄岩 PGE 含量低, 是因为 PGE 随硫化物析出的结果, 并由此估算了其找矿潜力。在此我们采用相似的方法来估算峨眉山地区的 PGE 矿床成矿潜力。峨眉山大火成岩省苦橄岩的体积约 7 km³。假定熔岩的平均密度为 2.7 g/cm³, 溢流玄武岩 PGE 的平均含量为 14.39 × 10⁻⁶, 原始岩浆 PGE 的含量采用样品 SM-15 中 PGE 的含量 (34.04 × 10⁻⁶), 由此可以大致估算出有 370 吨 PGE 随硫化物析出。考虑到苦橄岩的实际体积可能要大得多, 所以我们这个估算应是比较保守的估算, 因此峨眉山大火成岩省具有形成大型 Cu-Ni-PGE 矿床的成矿潜力, 值得进一步进行该类型的找矿工作。

参 考 文 献

陈永清, 夏庆霖, 刘红光. 2003. 滇东 Pt-Pd-Cu 含矿建造地球化学特征及其含矿性分析. 中国地质, (30): 225~234.
何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 2003. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布. 地质学报, 77(2): 194~202.

- 李胜荣,高振敏. 2000. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪. 中国科学, 30(2): 169~174.
- 邢树文,孙景贵,刘洪文. 2002. 高碳黑色页岩型铂族元素矿床的成矿性探讨. 地质与勘探, 38(2): 17~21.
- 张成江,李晓林. 1998. 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征. 岩石学报, 14: 297~304.
- 张光弟,李九玲,熊群尧,仵锋,曾明果. 2002. 贵州遵义黑色页岩铂族金属富集特点及富集模式. 矿床地质, 21(4): 377~386.
- 张招崇,王福生. 2002. 峨眉山大火成岩省中发现二叠纪苦橄岩. 地质论评, 48(4): 448.
- 张招崇,王福生. 2003a. 一种判别原始岩浆的方法——以苦橄岩和碱性玄武岩为例. 吉林大学学报(地球科学版), 33: 130~134.
- 张招崇,王福生. 2003b. 峨眉山大火成岩省 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学特征及其对源区的约束. 地球科学, 28(4): 431~439.
- 张招崇,王福生,郝艳丽,等. 2004a. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束. 地质学报, 78(2): 171~180.
- 张招崇,王福生,郝艳丽, John J Mahoney. 2004b. 峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省地球化学特征的比较及其成因启示. 岩石矿物学杂志, 24(1): 12~20.
- Anders E, Grevesse N. 1989. Abundances of the elements; Meteoritic and solar. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 53: 197~214.
- Arndt N. 2000. Hot heads and cold tails. *Nature*, 407: 458~461.
- Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chem. Geol.*, 53: 303~323.
- Barnes S J, Picard C P. 1993. The behaviour of platinum-group elements during partial melting, crystal fractionation, and sulphide segregation; An example from the Cape Smith Fold Belt, northern Quebec. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 303~323.
- Bennett V C, Norman M D, Garcia M O. 2000. Rhenium and platinum group element abundances correlated with mantle source components in Hawaiian picrites; sulphides in the plume. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 183: 513~526.
- Brandon A D, Walker R J, Morgan J W, et al. 1998. Coupled ^{186}Os and ^{187}Os evidence for core-mantle interaction. *Science*, 280: 1570~1573.
- Brandon A D, Norman M D, Walker R J, et al. 1999. ^{186}Os - ^{187}Os systematics of Hawaiian picrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 174: 25~42.
- Brooks C K, Keays R R, Lambert D D, et al. 1999. Re-Os isotope geochemistry of Tertiary picritic and basaltic magmatism of East Greenland; constraints on plume-lithosphere interactions and the genesis of the Platinova reef, Skaergaard intrusion. *Lithos.*, 47: 107~126.
- Chen Y Q, Xia Q L, Liu H G. 2003. Geochemistry of Pt-Pd-Cu-hosted formations and its potential of mineralization. *Geology in China*, 30: 225~234 (in Chinese with English abstract).
- Crocket J H. 2000. PGE in fresh basalt, hydrothermal alteration products, and volcanic incursions of Kilauea volcano, Hawaii. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 64: 1791~1807.
- Ellam R M, Carlson R W, Carlson S B. 1992. Evidence from Re-Os isotopes for plume-lithosphere mixing in Karoo flood basalt genesis. *Nature*, 359: 718~721.
- Hannigan R, Peucker E B. 1998. Weathering of black shales as sources of radiogenic Os in sea water. In: Geological Society of America, 1998 annual meeting. Abstracts with Programs-Geological Society of America. 30: 7, P 223. Geological Society of America (GSA). Boulder, CO, United States.
- He B, Xu Y G, Xiao L, Wang K, et al. 2003. Mechanism and spatial distribution of the Emeishan large igneous province; new evidence from sedimentary strata. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 194~202 (in Chinese with English abstract).
- Horan M F, Walker R J, Fedorenko V A, et al. 1995. Osmium and neodymium isotopic constraints on the temporal and spatial evolution of Siberian flood basalt sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 5159~5168.
- Jaffe L A, Peucker E B, Petsch S T. 2002. Mobility of rhenium, platinum group elements and organic carbon during black shale weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 198: 339~353.
- Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits. *Lithos.*, 34: 1~18.
- Keays R R. 1997. Requirements for the formation of giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits; the role of magma generation. *Transactions of the American Geophysical Union (EOS)*, 78: F799.
- Li S R, Gao Z M. 2000. Tracer of the sources of precious metals in the Lower Cambrian black rocks in Hunan and Guizhou provinces. *Science in China*, 30(2): 169~174 (in Chinese).
- Lightfoot P C, Hawkesworth C J, Olshefsky K, et al. 1997. Geochemistry of Tertiary tholeiites and picrites from Qeqertarsuaq (Disko Island) and Nuussuaq, West Greenland with implications for the mineral potential of comagmatic intrusions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 128: 139~163.
- Lipinski M, Warning B, Brumsack H J. 2003. Trace metal signatures of Jurassic/Cretaceous black shales from the Norwegian Shelf and the Barents Sea. In: Meyers P A, Negri A, eds. Paleoclimatic and paleoceanographic records in Mediterranean sapropels and Mesozoic black shales. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 190: 459~475.
- Lorand J P, Schmidt G, Palme H, Kratz K L. 2000. Highly siderophile element geochemistry of the Earth's mantle; new data for the Lanzo (Italy) and Ronda (Spain) orogenic peridotite bodies. *Lithos.*, 53: 149~164.
- Norman M D, Garcia M O. 1999. Primitive magmas and source characteristics of the Hawaiian plume; petrology and geochemistry of shield picrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168: 27~44.
- Pattol L, Lorand J P, Gros M. 1996. Non-chondritic platinum-group element ratios in the Earth's mantle. *Nature*, 379: 712~715.
- Pierson W A C, Reisberg L, France L C. 2000. The Os isotopic composition of Himalayan river bedloads and bedrocks; importance of black shales. *Earth and Planetary Science Letters*, 176: 203~218.
- Puchtel I S, Humayun M. 2000. Platinum group elements in Kostomuksha komatiites and basalts; Implications for oceanic crust recycling and core-mantle interaction. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 64: 4227~4242.
- Ravizza G, Pyle D. 1997. PGE and Os isotopic analyses of single sample aliquots with NiS fire assay preconcentration. *Chem. Geol.*, 141: 251~268.
- Rehkämper M, Halliday A N, Barfod D, et al. 1997. Platinum-group element abundance patterns in different mantle environments. *Science*, 278: 1595~1598.
- Rehkämper M, Halliday A N, Alt J, Fitton J G, Zipfel J, Takazawa E. 1999. Non-chondritic platinum-group element ratios in oceanic mantle lithosphere; Petrogenetic signature of melt percolation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 172: 65~81.
- Rehkämper M, Halliday A N, Fitton J G, et al. 2000. Ir, Ru, Pt and

References

- Pd in basalts and komatiites; New constraints for the geochemical behavior of the platinum group elements in the mantle. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 63: 3915~3934.
- Righter K, Walker R J, Warren P H. 2000. Significance of highly siderophile elements and osmium isotopes in the lunar and terrestrial mantles. In: Righter K, Canup R M, eds. *Origin of the Earth and Moon*. University of Arizona Press, 291~322.
- Schaefer B F, Parkinson I J, Hawkesworth C J. 2000. Deep mantle plume osmium signature from the West Greenland Tertiary picrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 175: 105~118.
- Snow J E, Schmidt G. 1998. Constraints on earth accretion deduced from noble metals in the oceanic mantle. *Nature*, 391: 166~169.
- Snow J E, Schmidt G, Rampone E. 2000. Os isotopes and highly siderophile elements (HSE) in the Ligurian ophiolites, Italy. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 175: 119~132.
- Walker R J, Morgan J W, Horan M F. 1995. Osmium-187 enrichment in some plumes; evidences for core-mantle interaction? *Science*, 269: 819~822.
- Widom E, Shirey S. 1996. Os isotope systematics in the azores; Implications for mantle plume sources. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 142: 451~465.
- Xing S W, Sun J G, Liu H W. 2002. Review on minerogenesis of high carbon-bearing black shale-type platinum group element deposits. *Geology and Exploration*, 38(2): 17~21 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y, Chung S, Jahn B, et al. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Perian-Triassic Emeishan flood basalts in southern China. *Lithos.*, 58: 145~168.
- Zhang C J, Li X L. 1998. PGE geochemistry of the Emeishan basalt province. *Acta Petrologica Sinica*, 14: 297~304 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G D, Li J L, Xiong Q Y, Qi F, Zeng M G. 2002. Enrichment features and patterns of PGE metals in black shale from Zunyi area, Guizhou province. *Mineral Deposits*, 21(4): 377~386 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Wang F S. 2002. Discovery of the Permian picrites in the Emeishan large igneous province. *Geological Review*, 48(4): 448 (in Chinese).
- Zhang Z C, Wang F S. 2003a. A method for identifying primary magma—example for picrites and alkaline basalts. *Journal of Jilin University (Earth Science edition)*, 33: 130~134 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Wang F S. 2003b. Sr-, Nd- and Pb-isotopic characteristics of the Emeishan basalt province and discussion on their source region. *Earth Sciences*, 28(4): 431~439 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Wang F S, Hao Y L, et al. 2004a. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan Large Igneous Basalt Province and constraints on their source region. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 171~180 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Wang F S, Hao Y L, Mahoney J J. 2004b. Geochemical comparison of the Emeishan and Siberian large igneous provinces and implication for the petrogenesis. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(1): 12~20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Hao Y L, Wang F S, John J Mahoney. 2004c. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Emeishan continental flood basalts, Southwestern China; evidence for activity of mantle plume. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 40~51.

Discovery of High-Os Picrites in the Large Emeishan Igneous Province and Its Geological Significance

ZHANG Zhaochong^{1,2)}, WANG Fusheng¹⁾, Qü Wenjun³⁾, HAO Yanli¹⁾, John J. MAHONEY⁴⁾

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

2) *National Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083*

3) *Institute of Mineral and Rock Analyses, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

4) *School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA*

Abstract

We report concentrations of platinum group elements (PGE: Os, Ir, Ru, Rh, Pt and Pd) for picrite-basalt lavas of the large Emeishan igneous province. The absolute concentrations of Os in most of the Emeishan picrites are much higher than in komatiites, and in estimated primitive mantle. In addition, they have superchondritic Os/Ir ratios (2.84~3.88). The unusually high Os/Ir ratios suggest that the picritic magmas may have been contaminated by black shales. Modeling shows that a 7% partial melt of primitive mantle containing 0.01% of sulfides can account for the observed Os, Ir and Ru concentrations in the most primitive picrite if the melt is contaminated by 10% of black shale en route to the surface. The similarities in Os concentrations and other geochemical characteristics between the Emeishan province and Siberian Traps imply that they might be derived from a super-plume, which originated from mantle-core boundary. The large Emeishan igneous province has most of the features required to form Noril'sk-style Ni-Cu-PGE sulfide deposits; therefore, its potential for large magmatic sulfide deposits must be considered.

Key words: PGE; picrites; large igneous province; Emeishan