

文章编号: 1000-4734(2010)02-0207-08

黔西南碱性超基性脉岩的铂族元素地球化学

冯光英^{1,2}, 刘燊^{1*}, 苏文超¹, 冯彩霞¹, 王涛^{1,2}, 杨毓红^{1,2}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:黔西南出露大范围的碱性超基性脉岩, 其成因研究对了解该地区大规模的金矿形成具有重要意义。采用卡洛斯管同位素稀释法结合 ICP-MS 分析了黔西南 4 个岩区碱性超基性脉岩中的 Ni, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd 和 Cu 的含量。结果显示: 研究区脉岩铂族元素 (PGE) 的含量普遍较低, 原始地幔标准化 PGE 分布模式呈正斜率型; 并具有较高的 Cu/P 比值 (11903 ~ 60210)。综合对比研究表明, 研究区脉岩为地幔低程度部分熔融作用的产物, 原始岩浆具有硫不饱和的特征, 岩浆在上升过程中没有发生明显的硫化物分异, 但发生了一定程度的岩浆分离结晶。此外, 陇要脉岩可能经历了岩浆上升时铬铁矿的分离结晶作用。

关键词: PGE 超基性脉岩; 成因; 黔西南

中图分类号: P588.12; P595 文献标识码: A

作者简介: 冯光英, 女, 1983 年生, 博士研究生, 地球化学专业。E-mail: fengguangying98@163.com

黔西南地区分布有 20 多个卡林型金矿床 (如烂泥沟、丫他、板其、紫木幽、戈塘、水银洞、太平洞等), 年代学研究表明它们主要形成于 142 ~ 85.5 Ma 之间^[1-3], 这些广泛分布的金矿床被普遍认为与同期的岩浆活动存在密切关系^[6-7]。杨科佑等^[7]认为黔西南存在大规模的隐伏花岗岩体, 而且这些花岗岩为金成矿提供了热源和成矿物质。然而, 该认识还需要进一步的地球物理工作验证。另外, 虽然该地区存在一定规模的基性岩 (玄武岩) 出露^[2], 但从年代学和地层学来看, 这些玄武岩大多为晚古生代岩浆活动的产物, 是否有燕山期玄武岩的出露仍不得而知。研究区 (贞丰到紫云一带) 晚二叠-中三叠地层中出露大量的 (>40 个) 碱性超基性脉岩^[8-10], 它们主要沿普定-册阳断裂分布 (图 1) 而且被认为是可能的金矿来源^[1, 11-13]。虽然如此, 超基性岩石与金成矿之间的内在联系还没有得到充分的认识。因此, 有必要对这些脉岩的成因做详细的研究, 因为与金矿伴生的火成岩的成因研究对金成矿研究具有

重要意义^[14]。目前, 我们已对该地区某些脉岩进行了详细的年代学、矿物学和地球化学研究, 并取得了一定的成果性认识^[10], 然而, 对超基性岩成岩过程中的诸多问题 (如壳幔相互作用、部分熔融程度、分离结晶和硫化物分异等) 目前仍缺乏全面系统的认识。

铂族元素 (PGE) 各自存在于不同的地幔相中, 具有不同的地球化学行为, 在地质过程中可以发生分异, 所以能够用来灵敏地判别诸如地幔的部分熔融程度、岩浆的结晶分异和硫化物的分异等过程^[15-29]。同时, 镁铁-超镁铁岩相对其他类型的岩浆岩而言其 REE 含量较低而 PGE 含量较高, 所以 PGE 在研究这类岩石的成因和演化上具有不可替代的优势^[21, 23, 30]。因此, 本文选择黔西南白层、鲁容、阴河和陇要地区超基性脉岩为研究对象, 从 PGE 地球化学特征研究入手, 以期为该超基性岩的成因提供进一步依据。

1 地质背景和岩相学特征

黔西南地处扬子准地台西南缘与华南褶皱系右江褶皱带西延部分的接合部位^[31], 大部分地区属华南褶皱系右江褶皱带, 主要由元古代结晶基底组成, 上覆志留-三叠系浅海沉积相^[31-32], 区域上有若干深大断裂和断裂带贯穿该区。志留-三叠纪时期, 古苏格兰构造旋回之后该区下沉形成

收稿日期: 2009-10-29

基金项目: 国家 973 项目 (2007CB411402); 国家自然科学基金项目 (批准号: 40673029, 40773020); 西北大学大陆动力学国家重点实验室开放课题基金 (08LGD08)

* 通讯作者, E-mail: liushen@vip.syg.ac.cn

巨大的盆地, 充填巨厚的志留系, 石炭系, 二叠系和三叠系沉积地层。其中二叠系和三叠系地层被认为是黔西南弥散性分布的金矿的原始源区^[2]。侏罗系和白垩系沉积物也在该区零星分布^[32]。志留系地层包括黑色页岩、灰岩、白云岩、粘土质灰岩、硅质灰岩和深海或者中海相泥灰岩; 石炭系沉积地层主要包括浅灰色灰岩和砂岩、深灰或者黑色灰岩和燧石岩; 上二叠统地层包括钙质粉砂岩、粉砂岩、页岩和灰岩; 下二叠统地层由白云质灰岩、白云岩、燧石岩、泥灰岩和页岩组成; 上三叠统地层包括黏土岩、钙质黏土岩、砂岩和粉砂岩; 中三叠统地层包括泥灰岩、页岩和灰岩; 而下三叠统地层主要由含生物碎片灰岩、白云岩、角砾岩、

页岩、粉砂岩和砂质页岩组成。

除大量的沉积岩外, 晚古生代基性(玄武岩、辉绿岩)和酸性火山岩(凝灰岩)以及燕山期碱性超基性岩脉在黔西南地区都有出露。从早石炭世到晚二叠世在该区西北部有若干玄武岩系列出露^[2, 32, 33]。同时, 基于石油勘探钻井、古地磁以及重力异常的研究, 在黔西南西部兴义地区发现大量的晚二叠世峨眉山玄武岩^[10], 峨眉山玄武岩主要包括玄武质熔岩、火山碎屑岩和角砾岩。晚二叠世辉绿岩出露相对较少, 燕山期碱性超基性岩脉^[10]主要侵位于下二叠统到中三叠统的地层中(图1)。另外, 杨科佑等^[7]认为在黔西南地区可能有大量的隐伏花岗岩体存在。

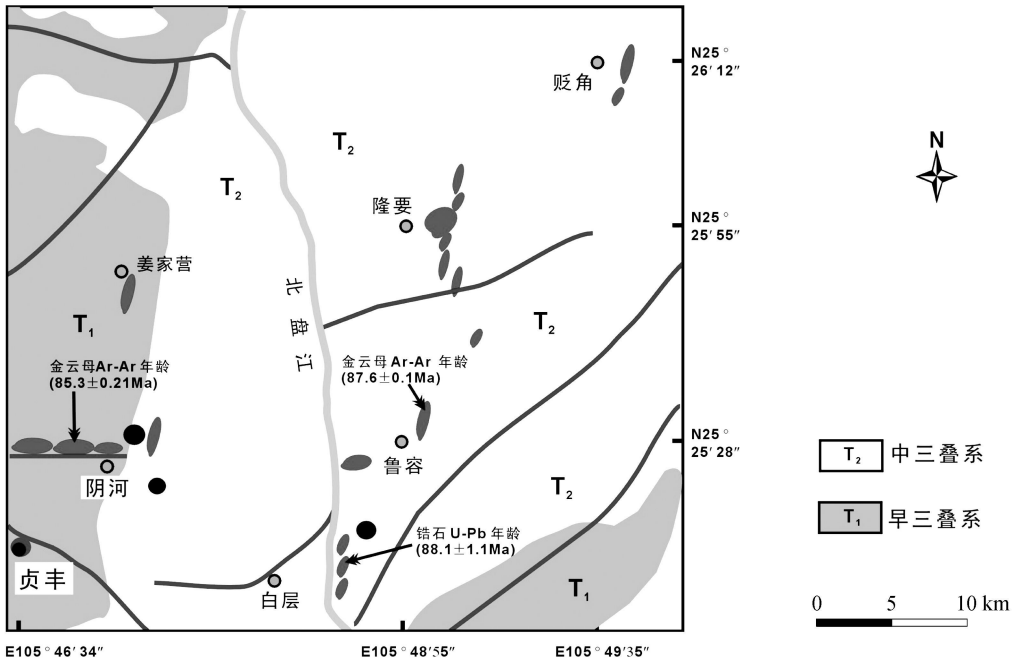


图 1 黔西南超基性岩脉分布图 (据 Liu 等, 2010)

Fig. 1. simplified geological distributions of the ultramafic dykes in southwestern Guizhou Province China (modified after Liu et al., 2010).

研究区碱性超基性岩主要产自黔西南的白层、阴河、鲁容和陇要地区(图1), 该地区大约有40多条超基性脉岩出露^[10], 其中有10多条同金矿存在联系^[2, 32]。这些超基性岩脉分别沿NE、SN和EW向侵位于下三叠统到中三叠统地层中(图1), 单个岩脉宽度为1.0~0.8米(最宽的部分)之间, 长30~10 km不等。所有样品都具有斑晶(35%~45%)结构, 斑晶主要为单斜辉石(30%~70%), 透辉石或次透辉石(0.5~2.0 mm), 金云母(10%~40%, 0.5~3.0 mm)和少

量的橄榄石(0~10%); 基质(55%~65%)主要包括细粒的(粒度<0.5 mm)透辉石、金云母、碳酸岩和少量的斜长石(如钙长石和钾长石)。副矿物包括铬铁矿、钛铁矿、磷灰石、金红石、榍石、霓石、霓辉石和方沸石。岩相特征显示研究区超基性岩岩石类型上应该为斑状金云母辉石岩。另外, 前期研究表明, 研究区超基性脉岩总体上应为一套碱性系列的岩石($K_2O + Na_2O = 4.29\% \sim 5.70\%$)^[10]。

2 样品分析

全岩铂族元素 (PGE)分析测试在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室电感耦合等离子体质谱仪 (Perkin-Elmer ELAN DRC-e 型 ICP-MS)上完成,分析精度优于 $\pm 10\%$ 。铂族元素测试采用同位素稀释 Carius tube 法,准确称取超基性岩样品 8 g 于卡洛斯管中,加入适量的 ^{101}Ru 、 105

Pd^{194} 、 Pt^{198} 、 Ir^{185} 、 Re 和 ^{190}O 稀释剂,同时加入 20 mL HNO_3 和 17 ~ 18 mL HCl 封闭卡洛斯管。在 320 °C 条件下加热 15 h 溶解样品。详细的分析流程见漆亮^[34]。实验流程的空白为 $\text{Pd} = 0.020 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Pt} = 0.011 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Ru} = 0.003 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Ir} = 0.003 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Rh} = 0.003 \times 10^{-9}$ 。标准样品 WPR-1 (橄榄岩)的推荐值和测量值在误差范围内一致 (表 1)。

表 1 黔西南碱性超基性岩脉的 PGE 含量

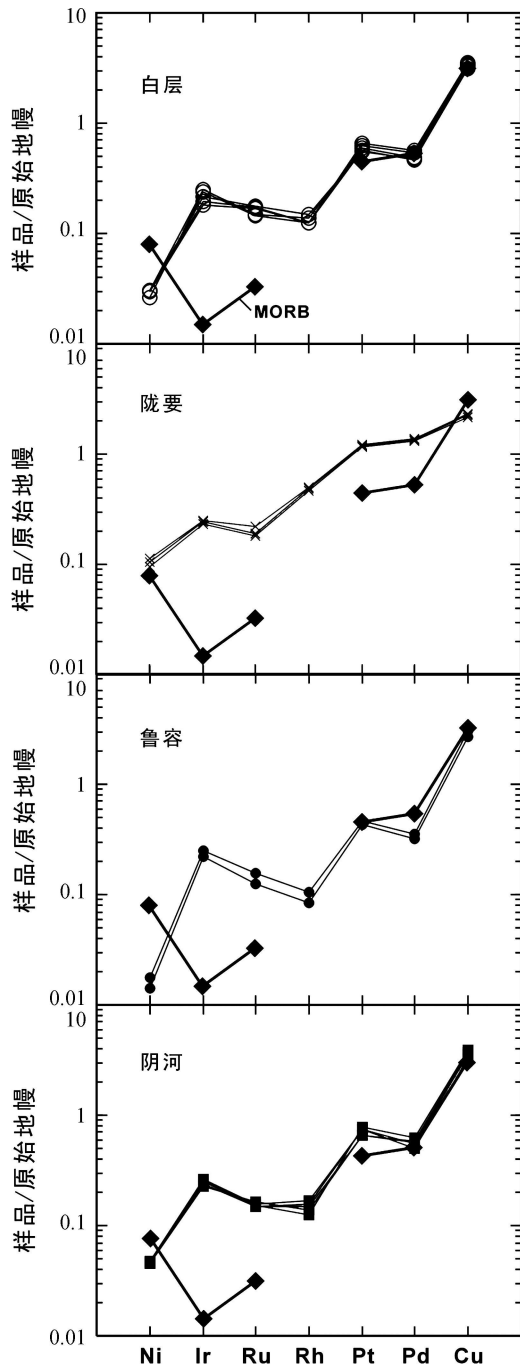
Table 1. PGE contents of alkaline ultramafic dykes from southwestern Guizhou Province, China

样品	$w_B/10^{-9}$					$w_B/10^{-6}$		Cu/Ni	Cu/Pd	Pd/Ir	Pt/Pd
	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Ni	Cu				
BC-1	0.61	0.84	0.12	4.35	2.17	59.8	95.8	1.60	44147	3.6	2.00
BC-2	0.82	0.73	0.12	3.92	1.85	52.7	87.9	1.67	47514	2.3	2.12
BC-3	0.73	0.89	0.14	3.87	1.92	59.9	92.5	1.54	48177	2.6	2.02
BC-4	0.86	0.74	0.13	4.17	1.94	61.9	93.2	1.51	48116	2.25	2.15
BC-5	0.67	0.86	0.12	4.61	2.29	61.8	99.7	1.61	43537	3.42	2.01
YH-1	0.81	0.75	0.14	4.59	2.24	93.2	99.7	1.07	44509	2.77	2.05
YH-2	0.78	0.83	0.13	4.62	2.32	91.8	103	1.12	44397	2.97	2.0
YH-3	0.86	0.75	0.15	5.18	1.98	91.1	92.9	1.02	46919	2.30	2.62
YH-4	0.9	0.79	0.16	5.21	2.23	96.5	99.6	1.03	44664	2.45	2.34
YH-5	0.87	0.77	0.12	5.44	2.52	93.7	108	1.15	42857	2.90	2.16
LY-1	0.83	0.96	0.46	8.32	5.36	212	63.8	0.30	11903	6.46	1.55
LY-2	0.8	0.91	0.44	8.18	5.24	189	60.5	0.32	11546	6.55	1.56
LY-3	0.86	1.1	0.48	8.52	5.53	226	65.1	0.35	11772	6.43	1.54
LR-1	0.76	0.62	0.08	3.01	1.28	28.4	75.6	2.66	59063	1.68	2.35
LR-2	0.85	0.78	0.10	3.26	1.43	35.7	86.1	2.41	60210	1.68	2.28
WPR-1(MV*) (N=6)	13.8±1.2	22.2±1.9	1.9±0.6	290±13	237±16						
WPR-1(RV*)	13.5	22	13.4	285	235						

3 PGE组成特征

4个岩区内超基性脉岩的 PGE分析结果 (表 1)表明,白层、阴河和鲁容 3个岩区的 PGE含量相似: $\text{Ir} = 0.61 \times 10^{-9} \sim 0.9 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Ru} = 0.62 \times 10^{-9} \sim 1.1 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Rh} = 0.08 \times 10^{-9} \sim 0.16 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Pt} = 3.01 \times 10^{-9} \sim 5.44 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Pd} = 1.28 \times 10^{-9} \sim 2.52 \times 10^{-9}$ 。相比之下,陇要地区超基性脉岩除 Ir ($0.8 \times 10^{-9} \sim 0.86 \times 10^{-9}$) 外其它元素含量都相对偏高 ($\text{Ru} = 0.91 \times 10^{-9} \sim 1.1 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Rh} = 0.44 \times 10^{-9} \sim 0.48 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Pt} = 8.18 \times 10^{-9} \sim 8.52 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Pd} = 5.24 \times 10^{-9} \sim 5.53 \times 10^{-9}$) 且具有高于原始地幔的 Pt/Pd 含量 (原始地幔, $\text{Pt} = 7.0 \times 10^{-9}$ 、 $\text{Pd} =$

4.0×10^{-9} ^[35])。4个岩区内超基性脉岩的 Ni/Cu 和 PGE原始地幔标准化配分曲线如图 2所示,所有岩区样品均显示出 IPGE (Ir/Ru) 相对 PPGE (Rh/P和 Pd) 亏损,相对平滑的左倾型 (正斜率型)。但陇要地区脉岩与其它 3个岩区脉岩仍存在一定差别: 陇要地区脉岩具有明显的负 Ru 异常,而其它岩区脉岩则表现出明显的 Rh 和 Pd 亏损特征 (图 2), 暗示他们在源区性质和成因上存在一定区别。另外,相对 MORB^[36], 陇要地区脉岩具有高的 Ir/Ru/P和 Pd含量,而其它 3个岩区脉岩具有高的 Ir和 Ru及一致的 Pt/Pd和 Cu 含量 (图 2)。



原始地幔数据引自 Barnes和 Major^[38];
MORB数据引自 Barnes和 Lindsley^[39]

4 讨论

4.1 硫化物分异及部分熔融

通常情况下, PGE分配受源区部分熔融程度和生成岩浆硫饱和程度控制^[15 37-41]。幔源岩浆中 PGE含量过低可能有 2 方面原因^[42]: ①岩浆上升过程中硫化物过早熔离, 带走了岩浆中的大部分 PGE; ②当地幔部分熔融程度较低时, 地幔中少量 PGE随着部分熔融过程进入岩浆, 绝大部分含量仍然保存在残留原始地幔中^[41], 结果是部分熔融岩浆中 PGE含量很低。从表 1 来看, 除陇要岩区超基性脉岩的 P 和 Pd 含量高于 MORB 外, 黔西南其它岩区超基性脉岩具有与 MORB 一致的 Pt、Pd 和 Cu 含量。我们前期研究认为黔西南碱性超基性脉岩为 MORB 型地幔部分熔融的产物^[10], 那么, 与 MORB 一致的 Pt、Pd 和 Cu 含量表明原始岩浆上升过程中没有发生明显的硫化物分异, 因为 Pt、Pd 和 Cu 含量变化主要受控于硫化物^[36 43]。陇要地区脉岩具有较高的 P 和 Pd 含量, 暗示该区脉岩在成因上, 如源区性质、部分熔融程度等, 可能与其它地区(白层、阴河和鲁容)脉岩存在一定差别。综上所述, 我们认为研究区超基性脉岩总体较低的 PGE 含量是较低的地幔部分熔融引起的, 该认识与我们前期研究结论(白层、阴河和鲁容地区超基性脉岩为地幔很低部分熔融程度 (<1%) 的产物)^[10] 相吻合。前人研究认为, 较低的部分熔融程度通常会引起 Rh、P 和 Pd 的富集以及 Pd/Ir 比值的增高^[44-45]。陇要地区脉岩具有相对较高的 Rh、P 和 Pd 含量以及 Pd/Ir 比值 (6.43~6.55) (表 1, 图 3b), 暗示它们来自更低程度的地幔部分熔融。而且, 我们近来通过对陇要地区超基性脉岩的岩石学和地球化学研究并结合模拟, 认为该区脉岩相对其它岩区(白层、阴河和鲁容)脉岩确实具有相对较低的部分熔融程度(作者未发表资料)。

4.2 硫饱和程度

Cu/Pd 比值是判断岩浆硫饱和度的有效工具^[46], 因为 Pd 在液态硫化物和硅酸岩浆中的分配系数 (约 3×10^4) 远远高于 Cu (约 4×10^3)。原始岩浆的 Cu/Pd 比值应该接近地幔值 (约 6300^[47]; 约 7000^[35]), 而硫化物饱和熔体中的 Cu/Pd 比值则大于地幔值。研究区超基性岩的

图 2 黔西南超基性岩脉原始地幔标准化图解
Fig. 2 Primitive mantle normalized PGE patterns of ultramafic dykes from southwestern Guizhou Province, China

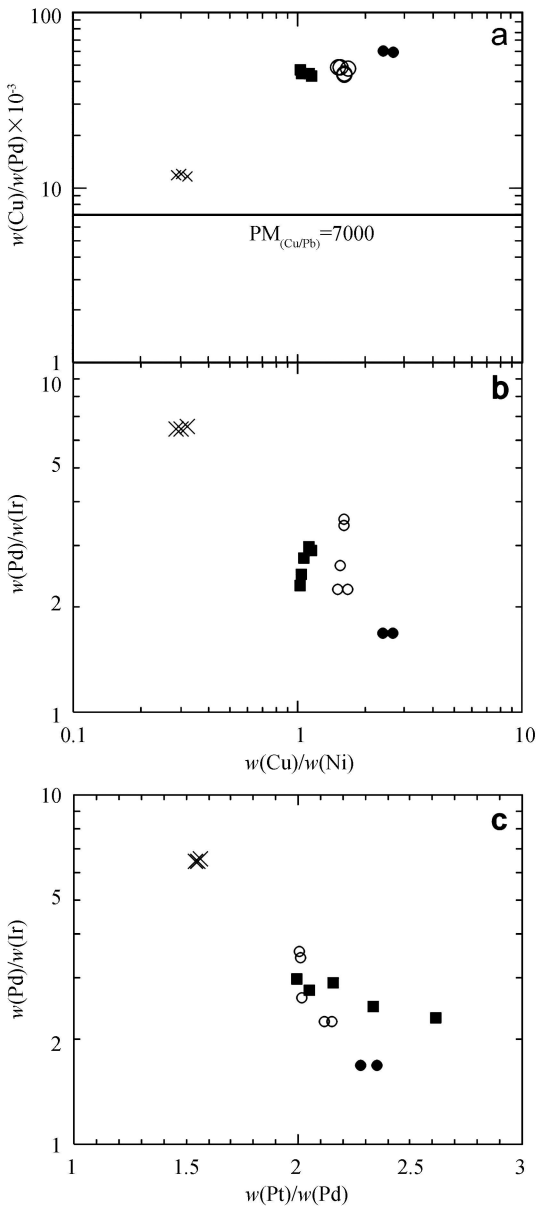


图 3 黔西南超基性岩脉 Cu/Ni - Cu/Pd Cu/Ni - Pd/Ir 以及 Pt/Pd - Pd/Ir 图解

Fig. 3. Cu/Ni vs Cu/Pd (a), Pd/Ir (b) and Pt/Pd vs Pd/Ir (c) diagrams showing the variations of ultramafic dykes from southwestem Guizhou Province, China.

Cu/Pd 比值 (11903 ~ 60210) (表 1; 图 3 a) 都远远大于 7000 暗示硫化物残留于源区或岩浆上升过程、分离结晶过程中存在硫化物熔离作用的影响^[41]。已有研究认为, 地幔中硫化物只在高程度部分熔融 (> 25%) 条件下才能完全溶解进入熔体^[20], 如果硫化物从岩浆中熔离出来将导致 Cu/Pd 比值的升高。如前所述, 研究区超基性脉岩总体上为地幔较低程度 (< 1%) 部分熔融的产物, 且原始岩浆在上升过程中没有发生明显的硫化物分异, 所以我们认为原始岩浆在部分熔融过程中

有少量硫化物残留于地幔源区。从而会引起原始岩浆中硫的不饱和。而且, 研究区超基性脉岩的 Cu/Pd 比值可与许多来自硫不饱和岩浆结晶的基性岩石相比较, 如峨眉山大火成岩省高-T 玄武岩: 金平 (Cu/Pd 19000 ~ 90000^[48]), 龙昂山 (Cu/Pd 8500 ~ 86000^[27]), 黑石头 (Cu/Pd 6700 ~ 45000^[27]) 和胶东地区基性脉岩 (Cu/Pd 8800 ~ 60718^[29])。以上分析研究并结合每个岩区脉岩一致的 Cu/Pd 比值 (表 1), 表明研究区碱性超基性脉岩同样来自 S 不饱和熔体的结晶。因为 Cu 和 Pd 在硫不饱和体系中都为不相容元素^[49]。另外, 陇要地区超基性脉岩具有相对其它岩区脉岩较低的 Cu/Pd 比值 (11903 ~ 11772 表 1; 图 3 a), 可能暗示了其成因上的差异。

4.3 结晶分异

在硫不饱和情况下, 基性—超基性岩浆分异过程中, IPGE (Ir, Ru) 是相容的, 而 PPGE (Rh, Pt 和 Pd) 是不相容的。但由于铂族元素在硫化物中的分配系数差别不大, 因此硫化物熔离不可能引起 IPGE 和 PPGE 的明显分异^[26]。而且前面的讨论表明, 原始岩浆上升过程中没有发生明显的硫化物分异。因此, 研究区超基性脉岩中 IPGE 和 PPGE 的明显分异 (图 2) 不可能来自硫化物的熔离, 而可能是地幔低程度部分熔融和/或岩浆演化过程中橄榄石、硫钨铁矿和/或 Os, Ir, Ru 合金以及铬铁矿分异的结果。已有研究表明白层、阴河和鲁容超基性脉岩为地幔低程度 (< 1%) 部分熔融的产物, 而且成岩过程中存在一定程度的橄榄石分离结晶作用^[10]。另外, Cu/Pd - Cu/Ni 之间正的相关关系以及 Pt/Pd - Pd/Ir 之间的负相关关系 (图 3 a, c) 进一步暗示研究区超基性脉岩成岩过程中存在橄榄石的分离结晶^[27, 41]。然而, 岩浆演化过程中是否存在铬铁矿的分异还需做进一步讨论。目前, 基性岩浆中硫钨铁矿和 Os, Ir, Ru 合金的结晶已经被实验岩石学所证实^[50, 54]。而早期快速结晶的硫钨铁矿和 Os, Ir, Ru 合金会附着在铬铁矿上^[55], 伴随铬铁矿的分异, 会导致 S 不饱和熔体中 IPGE 的亏损以及 PPGE 的富集^[28]。另外, 因为 Ru 在铬铁矿中为相容元素, 因此铬铁矿的结晶分异会引起 Ru 亏损和异常, 但从原始地幔标准化图解 (图 2) 来看, 除陇要地区脉岩外, 其它地区脉岩都不具有 Ru 的负异常特征, 暗示研究区超基性脉岩 (除陇要脉岩外) 在成岩过程中没有

发生明显的硫钨铁矿和/或 Os-Ir-Ru合金以及铬铁矿结晶分异。结合已有研究^[10],我们认为黔西南地区碱性超基性脉岩在成岩过程中整体主要经历了强烈的单斜辉石、橄榄石、含钛矿物(如金红石、钛铁矿、榍石)和磷灰石的分离结晶。硫钨铁矿和/或 Os-Ir-Ru合金以及铬铁矿的分离结晶可能发生在陇要岩区。

5 结 论

(1) 研究区超基性脉岩来自地幔低程度的部分熔融,原始岩浆都具有硫不饱和的特征,原始岩浆在上升侵位过程中没有发生明显的硫化物分异,但却经历了单斜辉石、橄榄石、含钛矿物(如,

金红石、钛铁矿、榍石)和磷灰石等矿物的强烈分离结晶。另外,陇要地区脉岩可能受到了一定程度的硫钨铁矿和/或 Os-Ir-Ru合金以及铬铁矿分异作用影响。

(2) 陇要地区与其它岩区超基性脉岩 PGE特征存在明显差异,可能暗示了它们在成因上(如,源区性质、部分熔融程度)存在一定的差别,但还需要进一步的研究验证。

致谢:感谢钟宏研究员对本文的审阅和提出的建设性修改意见,陶琰研究员、夏勇研究员和罗永达在野外工作中给予了帮助,漆亮研究员在实验中给予了指导和帮助,在此一并表示感谢!

参 考 文 献:

- [1] 朱赖民,刘显凡,金景福,等.滇黔桂微细浸染型金矿床时空分布与成矿流体来源研究[J].地质科学,1998,33(4):463-474.
- [2] Zhang X C, Spiro B, Halls C, et al. Sediment-hosted disseminated gold deposits in Southwest Guizhou, PRC: Their geochemical setting and origin in relation to mineralogical fluid inclusion and stable isotope characteristics [J]. International Geology Review, 2003, 45: 407-470.
- [3] 刘平,李沛刚,李克庆,等.黔西南金矿成矿地质作用浅析[J].贵州地质,2006,23(2):83-92.
- [4] Su W C, Hu R Z, Xia B, et al. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China [J]. Chemical Geology, 2008, 258: 269-274.
- [5] 夏勇,张瑜,苏文超,等.黔西南水银洞层控超大型卡林型金矿床成矿模式及成矿预测研究[J].地质学报,2009,83(10):1473-1482.
- [6] 曹鸿水.黔西南“大厂层”形成环境及其成矿作用的探讨[J].贵州地质,1991,1(1):5-12.
- [7] 杨科佑,陈丰,梅厚钧,等.滇黔桂地区微细浸染型金矿成矿条件和矿床预测研究[R].科研报告,1992.
- [8] 梅厚钧.西南暗色岩深渊分异两个系列的岩石化学特征与铁镍矿化的关系[J].地球化学,1973,(4):219-253.
- [9] 苏文超.扬子地块西南缘卡林型金矿床成矿流体地球化学研究[D].博士学位论文:中科院地球化学研究所,2005.
- [10] Liu S, Su W C, Hu R Z, et al. Geochronological and geochemical constraints on the Petrogenesis of alkaline ultramafic dykes from southwest Guizhou Province, SW China [J]. Lithos, 2010, 114: 253-264.
- [11] Zhu L M. A study on the relations between ultrabasic dykes and fine disseminated gold Guizhou Province as exemplified by Zimudang large-sized gold deposit [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1998, 17(4): 362-371.
- [12] Su W C, Qi L, Hu R Z. Preliminary investigations of platinum group elements in the Carlin-type gold deposits, southwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44: 152-153.
- [13] 苏文超,胡瑞忠,漆亮,等.黔西南卡林型金矿床流体包裹体中微量元素研究[J].地球化学,2001,30(6):512-516.
- [14] Wang L G, Yu Y M, McNaughton N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China from SHRIMP U-Pb zircon studies of granulites [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 275-291.
- [15] Bames S, Naldrett A J, Gordon M P. The origin of the fractionation of platinum group elements in terrestrial mafic as [J]. Chemical Geology, 1985, 53: 303-323.
- [16] Wainman D A, Kerrich R, Sun M. Noble metal abundances of Late-Archean (2.7 Ga) accretion-related shoshonitic lamprophyres, Superior Province, Canada [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 47-57.
- [17] Vogel D C, Keay R R. The petrogenesis and platinum group element geochemistry of the Newer Volcanic Province, Victoria, Australia [J]. Chemical Geology, 1997, 136: 181-204.
- [18] Majer W D, Bames S J. Platinum-group element in silicate rocks of the lower critical and main zones at union section, western Bushveld complex [J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 1647-1671.
- [19] Crocket J H. PGE in fresh basalt hydrotrematic alteration products and volcanic intrusions of Kilauea volcano, Hawaii [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 1791-1807.
- [20] Majer W D, Bames S J, Marsh J S. The concentrations of the noble metals in Southern African flood-type basalts and MORB: Implications

- for petrogenesis and magmatic sulfide exsolution [J. Contributions to Mineralogy and Petrology 2003 146: 44-61.
- [21] Crocket JH, Paul D K. Platinum-group elements in Deccan mafic rocks: A comparison of suites differentiated by Ir content [J. Chemical Geology 2004 208: 273-291.
- [22] Crocket JH, Paul D L. Platinum-group elements in igneous rocks of the Kutch rift basin, NW India: implications for the relationship with the Deccan volcanic province [J. Chemical Geology 2008 248: 239-255.
- [23] Lightfoot P C, Keays R R. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian Trap, Norilsk Region: Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores [J. Economic Geology 2005 100: 439-462.
- [24] 刘庆, 侯泉林, 周新华, 等. 大别造山带毛屋超镁铁岩的铂族元素研究 [J. 中国地质, 2007 34 (5): 808-814.
- [25] 刘庆, 侯泉林, 周新华, 等. 北大别白垩纪镁铁-超镁铁岩的铂族元素地球化学研究 [J. 中国地质, 2008 35 (5): 859-868.
- [26] 漆亮, 周美夫, 赵正, 等. 峨眉山玄武岩铂族元素地球化学 [J. 矿物学报, 2007 27 (增刊): 68-70.
- [27] Qi L, Christina W Y, Zhou M F. Controls on the PGE distribution of Permian Emeshan alkaline and peralkaline volcanic rocks in Longzihou shan, Sichuan Province, SW China [J. Lithos 2008 106: 222-236.
- [28] Qi L, Zhou M F. Platinum-group elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian Emeshan flood basalts in Guizhou Province, SW China [J. Chemical Geology 2008 248: 83-103.
- [29] Liu S, Hu R Z, Gao S, et al. Petrogenesis of Late Mesozoic mafic dykes in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton and implications for the foundering of lower crust [J. Lithos 2009 113: 621-639.
- [30] 储雪蕾, 孙敏, 周美夫. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学 [J. 岩石学报, 2001 17 (1): 112-122.
- [31] Huang T K. An outline of the tectonic characteristics of China [J. Eclogae Geologicae Helveticae 1978 71: 611-635.
- [32] 贵州省地矿局. 贵州省地质图 1:50万 [M]. 北京: 中国地图出版社, 1987.
- [33] 梅厚钧. 峨眉山玄武岩地球化学特征 [A]. IGCAS 年度报告 (1980-1981) [C]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1980 131-132.
- [34] 漆亮, 周美夫, 严再飞, 等. 改进的卡洛管溶样等离子体质谱法测定地质样品中低含量铂族元素及铼的含量 [J. 地球化学, 2006 35 (6): 667-674.
- [35] Bames S J, Majer W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids [J. Geological Association of Canada Short Course 1999 13: 69-106.
- [36] Bames S J, Lightfoot P C. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents [J. Economic Geology 2005 100th Anniversary Volume: 179-213.
- [37] Keays R R, Ross J R, Worrlich P. Precious metals in volcanic peridotite associated nickel sulfide deposits in Western Australia II: Distribution within the ores and the host rocks at Kambalda [J. Econ Geol 1981 76: 1645-1674.
- [38] Hamlyn P H, Keays R R, Cameron W E, et al. Precious metals in magnesian low-Ti lavas: implications for metallogenesis and sulfur saturation in primary magmas [J. Geochim Cosmochim Acta 1985 49: 1797-1811.
- [39] Hamlyn P H, Keays R R. Sulfur saturation and second-stage metals application to the Bushveld platinum metal deposits [J. Econ Geol 1986 81: 1431-1445.
- [40] Sun S S, Wallace D A, Hoatson D M, et al. Use of geochemistry as a guide to platinum group element potential of mafic ultramafic rocks: Examples from the west Pilbara Block and Hall's Creek Mobile Zone [J. Western Australia Precamb Res 1991 50: 1-35.
- [41] Keays R R. The role of komatiitic magmatism and S saturation in the formation of ore deposits [J. Lithos 1995 34: 1-18.
- [42] 孙赫, 秦克章, 李金祥, 等. 地幔部分熔融程度对东天山镁铁质-超镁铁质岩铂族元素矿化的约束-以图拉根和香山铜镍矿为例 [J. 岩石学报, 2008 24 (5): 1079-1086.
- [43] Prichard H M, Ixer R A, Lord R A, et al. Assemblages of platinum-group minerals and sulfides in silicate lithologies and chromite-rich rocks within the Shetland Pholite [J. Canadian Mineralogist 1994 32 (2): 271-294.
- [44] Crocket JH, Teuwa Y. Palladium, iridium and gold contents of mafic and ultramafic rocks drilled from the mid-Atlantic ridge: Leg 37 Deep Sea Drilling Project [J. Canadian Journal of Earth Sciences 1977 14: 777-784.
- [45] Alard Q, Giffin W L, Leonard J P. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulfides [J. Nature 2000 407: 891-894.
- [46] Bismann G E, Naldrett A J, Asif M, et al. Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian Traps in the Norilsk region, Russia [J. Geochim Cosmochim Acta 1993 57: 2001-2018.
- [47] Bames S J, Boyd R, Komeljusen A, et al. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulfide segregation on platinum-group elements: gold, nickel and copper: examples from Norway [A]. Prichard H M, Potts P J, Bowles J F W, et al. Geoplatinum 87 [C]. London: Elsevier 1988 113-143.
- [48] Wang C Y, Zhou M F, Qiu L. Permian flood basalts and mafic intrusions in the Jinping (SW China)-SongDa (northern Vietnam) district: Mantle sources, crustal contamination and sulfide segregation [J. Chemical Geology 2007 243: 317-343.
- [49] Bames S J, Picard C P. The behavior of platinum-group elements during partial melting, crystal fractionation and sulfide segregation: an example from the Capensh fold belt, northern Quebec [J. Geochimica et Cosmochimica Acta 1993 57: 79-87.

- [50] Hjemstra S A. The role of collectors in the formation of the Platinum deposits in the Bushveld Complex [J]. *The Canadian Mineralogist* 1979, 17: 469-482.
- [51] Meikle R K W. Platinum-group minerals in the middle group of chromitite layers at Marikana, Western Bushveld complex: indications for collection mechanisms and postmagmatic modification [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences* 1992, 29: 209-221.
- [52] Brennan J M, Andrews D. High-temperature stability of laurite and Ru₂O₃ in the presence of Ir and Au and their role in PGE fractionation in mafic magmas [J]. *Canadian Mineralogist* 2001, 39: 341-360.
- [53] Bockrath C, Ballhaus C, Holzheid A. Stabilities of laurite RuS₂ and monosulfide liquid solution at magmatic temperature [J]. *Chemical Geology* 2004, 208: 265-271.
- [54] Richter K, Campbell A J, Humayun M, Hervig R L. Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir and Au between Cr-bearing spinel, olivine, pyroxene and silicate melts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2004, 68: 867-880.
- [55] Stockman H W. Electron microprobe characterization of minute platinum-group mineral inclusions: Limits on accuracy [J]. *Scanning Electron Microscopy* 1984 (Part 3): 1097-1.

PGE Geochemistry of Alkaline Ultramafic Dykes in Southwestern Guizhou Province, China

FENG Guangying², LIU Shen¹, SU Wenchao¹, FENG Caixia¹, WANG Tao², YANG Yuhong²

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Studies on the petrogenesis of alkaline ultramafic dykes are helpful to understand the formation of the gold deposits widely distributed in southwestern Guizhou Province, China. The Platinum-group elements (PGE) are sensitive indicators of the petrogenesis (e.g., partial melting and silicate fractionation) of mafic ultramafic rocks. Thus in this paper contents of Ni, Cu and PGE (Ir, Ru, Rh, Pt and Pd) were measured by using isotope dilution (ID)-ICP-MS with an improved Carius tube. The studied samples are characterized by low PGE contents, high Cu/Pd (11903—60210) ratios and positive slope in the primitive mantle normalized patterns. Synthetic and comparative studies on the PGE indicate that the ultramafic rocks were derived from low-degree partial melting of the MORB-like mantle. These dyke rocks were formed by the crystallization of the S-unsaturated magma, which had not experienced obvious sulfide segregation. The primary magma of the ultramafic rocks, however, underwent extensive fractionation of clinopyroxene, olivine, Ti-bearing phases (e.g., rutile, ilmenite, titanite) and apatite prior to emplacement. In addition, the Longyao ultramafic dykes experienced differentiation of chromitite during primary magma ascent.

Key words PGE, ultramafic dykes, petrogenesis, Guizhou Province