

西藏达巴—休古嘎布绿岩带铂族元素的分布特征

黄圭成 徐德明 雷义均 雷天赐 李丽娟

(宜昌地质矿产研究所,湖北 宜昌 443003)

摘要:区内各岩体的地幔橄榄岩中 PGE 含量及分布型式有所差异。相对于原始地幔,拉昂错和东坡岩体的 PGE 含量没有显著异常,标准化分布曲线大致平坦,PPGE 与 IPGE 之间分馏不明显,总体特征与中国日喀则地区以及阿尔卑斯和东地中海地区的地幔橄榄岩相似。而当穷岩体的 PPGE 含量变化范围较大,出现 IPGE 与 PPGE 强分馏。单斜辉石岩脉的 PGE 含量及分布型式与地幔橄榄岩不同:Os、Ir、Ru、Rh 亏损而 Pt、Pd 富集,模式曲线向左倾斜,可能反映其较高程度部分熔融作用和熔体分离作用的产物。铬铁矿石的 PGE 含量较高,而且变化幅度大($19.7 \times 10^{-9} \sim 5526 \times 10^{-9}$),各样品 Σ PGE 平均值(729.33×10^{-9})是原始地幔的 25.6 倍。与原始地幔相比,Os、Ir、Ru、Rh 总体上表现为较强富集,Pt、Pd 富集与亏损并存。其标准化模式曲线较分散,曲线向右倾斜,IPGE 与 PPGE 分馏较强,多数样品呈现 Pt 负异常。这些特点与中国罗布莎、希腊、南斯拉夫以及塞浦路斯等世界各地蛇绿岩中的铬铁矿床类似。铬铁矿石的 PGE 含量与相应样品的 BMS 含量无相关性,PGE 不是主要赋存于 BMS 内。推测 PGE 主要以 PGM 的形式存在,具体矿物名称有待进一步发现与研究。

关键词:铂族元素;铬铁矿;蛇绿岩;达巴—休古嘎布;西藏

中图分类号: P618.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)01-0138-09

铂族元素(PGE)是高度亲铁的元素,也是亲硫元素,主要富集在地核,少量分布于地幔,在地壳中含量最低。在自然界中,PGE 除了呈自然元素、金属互化物和各种化合物的独立铂族矿物之外,还以类质同象(固溶体)的形式进入其他矿物的晶格或以离子吸附状态出现^[1]。最近十多年来,分析了大量地幔岩石样品的 PGE 含量,利用亲石痕量元素作为大陆地幔的地球化学示踪剂普遍受到重视^[2-6]。像 REE 一样,PGE 在有关火成岩成岩作用方面显示出独特的地球化学性质,其中 Os、Ir 和 Ru 即铱族元素(IPGE)是难熔的强相容元素,而 Rh、Pt 和 Pd 即钌族元素(PPGE)是弱相容元素且有更大的活动性^[7]。PGE 作为亲铁元素,在讨论全球尺度的地质作用过程,如核-幔分离、核-幔物质交换等过程提供了很大的潜力^[8]。PGE 从地幔向地壳迁移总是限定在经历过壳幔相互作用特殊的地球动力学位置上,由于元素之间熔点的差异,导致在演化过程中也随之产

生分异^[9]。因此 PGE 可以作为地球化学示踪剂,对岩石学特征和地幔源区的演化提供重要信息。

1 地质背景

达巴—休古嘎布蛇绿岩带位于西藏自治区西南部,呈近东西向展布长约 400 km,主要包括拉昂错、东坡、当穷和休古嘎布等岩体(群)。它们出露面积大,以规模较大的独立岩体(块)或多个小岩块成群产出,总体上岩石较为新鲜,蛇纹石化等蚀变较弱。蛇绿岩体由地幔橄榄岩组成(局部有少量辉绿岩、辉长岩、单斜辉石岩等岩脉侵入),主要岩石类型是方辉橄榄岩和纯橄榄岩,极少量二辉橄榄岩,缺少典型蛇绿岩剖面中的洋壳单元;其中拉昂错岩体和东坡岩体有明显的岩相分带^[10-11]。

拉昂错、东坡、当穷和休古嘎布岩体(群)内发现有众多的铬铁矿化点^[11],地表浅部的原生矿体规模较小,形态简单,呈透镜状(豆荚状)、短脉状、不规则

状。铬铁矿矿石构造以致密块状为主,少部分为浸染状,并有豆状构造出现。矿石中含有镍黄铁矿、针镍矿、黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿、六方硫镍矿等硫化物,以及铁镍矿(合金)等^[12]。这些矿物虽然数量少,颗粒细小,但是在光片中经常能见到。它们呈不规则形态分布于铬铁矿晶粒内部、晶粒之间、或脉石矿物中。其中镍黄铁矿最为常见,而且颗粒相对较大,最大的颗粒达到 1.5 mm。

2 蛇绿岩中的铂族元素

样品采集于拉昂错、东坡和当穷岩体,包括方辉

橄榄岩和纯橄榄岩,另有一个样品是拉昂错岩体纯橄榄岩相中的单斜辉石岩脉。这些样品都经过了薄片显微镜下观察研究,除了拉昂错岩体的两个方辉橄榄岩和一个纯橄榄岩有弱蛇纹石化以外,其他样品均新鲜无蚀变。橄榄岩类有不同程度的显微塑性变形,尤其是其中的橄榄石和辉石最为显著。而单斜辉石岩无明显变形,反映其演化历程不同。样品的 PGE 含量由国家地质实验测试中心用同位素稀释—等离子质谱法(ICP-MS)测定,相应的主要氧化物由宜昌地质矿产研究所岩矿测试实验室测定(表 1)。蛇绿岩的岩石化学特征笔者已做过详细描

表 1 蛇绿岩的铂族元素及主要氧化物含量

Table 1 PGE and major oxide contents of ophiolite

岩体	样号	岩性	Os/10 ⁻⁹	Ir/10 ⁻⁹	Ru/10 ⁻⁹	Rh/10 ⁻⁹	Pt/10 ⁻⁹	Pd/10 ⁻⁹	∑PGE/10 ⁻⁹	Pd/Ir	Pt/Pt*	SiO ₂ /10 ⁻²	TiO ₂ /10 ⁻²
		原始地幔	4.2	4.4	5.6	1.6	8.3	4.4	28.50	1.00	1.00		
拉昂错	P2-1	Hb	3.84	3.20	9.63	1.02	5.75	5.31	28.75	1.66	0.79	38.92	0.005
	P3-1	Hb	5.49	3.57	7.71	1.27	7.56	6.93	32.53	1.94	0.81	41.20	0.004
	P18-1	Hb	4.28	3.28	7.46	1.26	6.40	6.91	29.59	2.11	0.69	43.90	0.006
	DL609-1	Hb	6.30	3.79	9.25	1.22	6.54	4.70	31.78	1.24	0.87	44.36	0.004
	DL484-1	Hb	5.69	3.83	7.68	1.32	7.63	6.73	32.87	1.76	0.82	44.08	0.005
	DL601-3	Du	5.79	3.50	7.33	1.22	6.77	6.03	30.63	1.73	0.80	44.04	0.006
	DL418-1	Du	6.14	3.72	8.02	1.27	6.80	6.38	32.32	1.72	0.76	43.96	0.007
	DL54-1	Du	5.24	3.47	6.87	1.31	7.16	6.71	30.75	1.94	0.77	44.16	0.019
	DL85-1	Du	4.49	3.91	10.1	1.33	8.30	8.46	36.58	2.17	0.79	44.12	0.003
DL418-2	Pyr	0.69	0.31	2.77	0.20	13.0	53.3	70.27	171.94	1.27	53.62	0.009	
东坡	DD11-1	Du	4.99	2.88	5.56	1.11	7.15	4.83	26.51	1.68	0.99	44.50	0.012
	DD22-1	Du	1.99	3.70	8.05	1.19	6.70	4.70	26.33	1.27	0.91	44.50	0.004
	DD25-2	Du	2.65	3.14	6.29	1.04	5.74	4.71	23.57	1.50	0.83	44.37	0.006
	DD28-2	Hb	2.40	1.50	2.95	0.52	3.15	3.01	13.53	2.01	0.80	47.32	0.016
	DD65-2	Hb	4.77	3.22	7.04	1.23	7.70	6.03	29.98	1.87	0.91	45.82	0.002
	DD68-2	Hb	4.01	3.73	8.68	1.28	7.25	7.08	32.02	1.90	0.77	46.48	0.034
当穷	Dqc4-2	Hb	6.48	4.77	9.17	1.53	7.38	2.69	32.01	0.56	1.16	44.34	0.050
	Dqc1-1	Du	6.12	4.45	7.91	2.04	17.2	12.2	49.91	2.74	1.10	40.36	0.050
	Dqc9-3	Du	6.23	4.26	7.01	0.54	0.66	0.35	19.04	0.08	0.48	41.38	0.050
	样号	Al ₂ O ₃ /10 ⁻²	Fe ₂ O ₃ /10 ⁻²	FeO/10 ⁻²	MnO/10 ⁻²	MgO/10 ⁻²	CaO/10 ⁻²	Na ₂ O/10 ⁻²	Cr ₂ O ₃ /10 ⁻²	NiO/10 ⁻²	灼失/10 ⁻²	总量	Mg#
拉昂错	P2-1	1.72	3.12	4.43	0.11	37.72	2.04	0.12	0.446	0.252	11.56	100.49	91.8
	P3-1	1.20	4.69	3.78	0.11	38.4	1.23	0.12	0.490	0.285	8.62	100.17	91.2
	P18-1	1.00	2.31	6.26	0.13	43.42	1.08	0.07	0.531	0.294	0.24	99.26	91.9
	DL609-1	0.90	1.37	7.12	0.13	43.9	1.13	0.21	0.528	0.302	0.08	100.09	91.7
	DL484-1	1.29	1.64	6.29	0.13	43.3	1.74	0.22	0.521	0.287	0.04	99.60	92.4
	DL601-3	0.97	1.42	6.60	0.13	44.2	1.08	0.15	0.508	0.291	0.11	99.55	92.3
	DL418-1	1.02	1.92	6.64	0.13	43.4	1.39	0.22	0.510	0.310	0.06	99.63	91.9
	DL54-1	0.48	2.30	6.07	0.13	44.76	0.61	0.04	0.530	0.302	0.01	99.44	92.2
	DL85-1	1.04	3.36	5.58	0.13	41.53	1.09	0.01	0.505	0.294	2.35	100.04	91.3
DL418-2	1.28	2.02	2.78	0.12	21.61	17.47	0.099	0.624	0.083	0.32	100.06		
东坡	DD11-1	0.78	1.84	6.57	0.13	43.85	0.76	0.03	0.530	0.311	0.01	99.36	92.0
	DD22-1	1.12	2.24	6.51	0.13	43.83	1.19	0.01	0.520	0.300	0.01	100.40	91.7
	DD25-2	2.03	2.30	6.64	0.13	41.60	2.10	0.12	0.513	0.280	0.01	100.15	91.2
	DD28-2	3.61	2.11	4.76	0.12	33.40	7.33	0.12	0.793	0.249	0.14	99.99	91.6
	DD65-2	2.62	2.42	6.42	0.14	39.68	2.21	0.17	0.486	0.262	0.01	100.28	91.0
	DD68-2	3.10	2.63	5.81	0.14	37.42	2.98	0.13	0.641	0.267	0.07	99.74	90.9
当穷	Dqc4-2	0.97	2.68	5.65	0.12	43.6	0.75	0.16	0.084	0.290	0.38	99.25	92.2
	Dqc1-1	0.86	2.91	7.73	0.14	45.35	0.47	0.04	0.040	0.321	0.14	98.62	90.4
	Dqc9-3	0.41	0.99	4.00	0.06	51.45	0.55	0.14	0.005	0.687	0.16	99.92	95.8

注: Hb—方辉橄榄岩; Du—纯橄榄岩; Pyr—单斜辉石岩; Mg#=100Mg/(Mg+Fe²⁺); Pt/Pt*=Pt_N/(Rh_N×Pd_N)^{0.5}; 原始地幔值据参考文献[15]。

述^[12-14],这里不再赘述;需要指出的是,东坡岩体有3个方辉橄榄岩的SiO₂含量偏高,与在其薄片观察到极少量斜长石、岩石略偏基性的情况相符合。为了分析对比,将样品PGE含量利用原始地幔值^[15]标准化后,按照元素熔点降低、相容性降低的顺序排列绘制分布模式图(图1),同时将阿尔卑斯和东地中海地区蛇绿岩中地幔橄榄岩的PGE分布区域^[16-21]也标绘于图上。

从表1和图1看出,橄榄岩的PGE含量总体上变化范围小:∑PGE为 $13.53 \times 10^{-9} \sim 49.91 \times 10^{-9}$,平均 29.93×10^{-9} ;Os为 $1.99 \times 10^{-9} \sim 6.48 \times 10^{-9}$,平均 4.83×10^{-9} ;Ir为 $1.50 \times 10^{-9} \sim 4.77 \times 10^{-9}$,平均 3.55×10^{-9} ;Ru为 $2.95 \times 10^{-9} \sim 10.1 \times 10^{-9}$,平均 7.59×10^{-9} ;Rh为 $0.52 \times 10^{-9} \sim 2.04 \times 10^{-9}$,平均 1.20×10^{-9} ;Pt为 $0.66 \times 10^{-9} \sim 17.2 \times 10^{-9}$,平均 6.99×10^{-9} ;Pd为 $0.35 \times 10^{-9} \sim 12.2 \times 10^{-9}$,平均 5.76×10^{-9} ,Pd/Ir为1.24~2.17,平均1.76。相对于原始地幔,拉昂错和东坡岩体的PGE没有大的亏损或富集,PPGE

与IPGE之间分馏不明显,标准化分布曲线大致平坦,无显著异常,这与雅鲁藏布江蛇绿岩带中段日喀则地区的地幔橄榄岩^[22-23]相似,它们的分布曲线基本上都位于阿尔卑斯和东地中海地区蛇绿岩的变化范围之内,只是Pt负异常更弱一些。此外,东坡岩体中样号DD28-2的PGE含量偏低,可能与该样品中斜长石含量相对较高、岩石略偏酸性有关。当穷岩体的PPGE含量有较大的变化范围,其中样号Dqc1-1的Pt、Pd显著富集,相应的Pd/Ir比值也是区内最高;而样号Dqc9-3相反,出现Pt、Pd强亏损,IPGE与PPGE强分馏,标准化模式曲线向右倾斜,Pd/Ir比值为区内最低,这似乎与Mg#异常高(95.8)有关,更深层的原因尚待进一步探讨。拉昂错岩体单斜辉石岩的PGE含量与分布型式显然与地幔橄榄岩不同,Os、Ir、Ru、Rh亏损而Pt、Pd富集,IPGE与PPGE强分馏,标准化模式曲线向左倾斜,Pd/Ir比值为172,反映其形成演化不同。

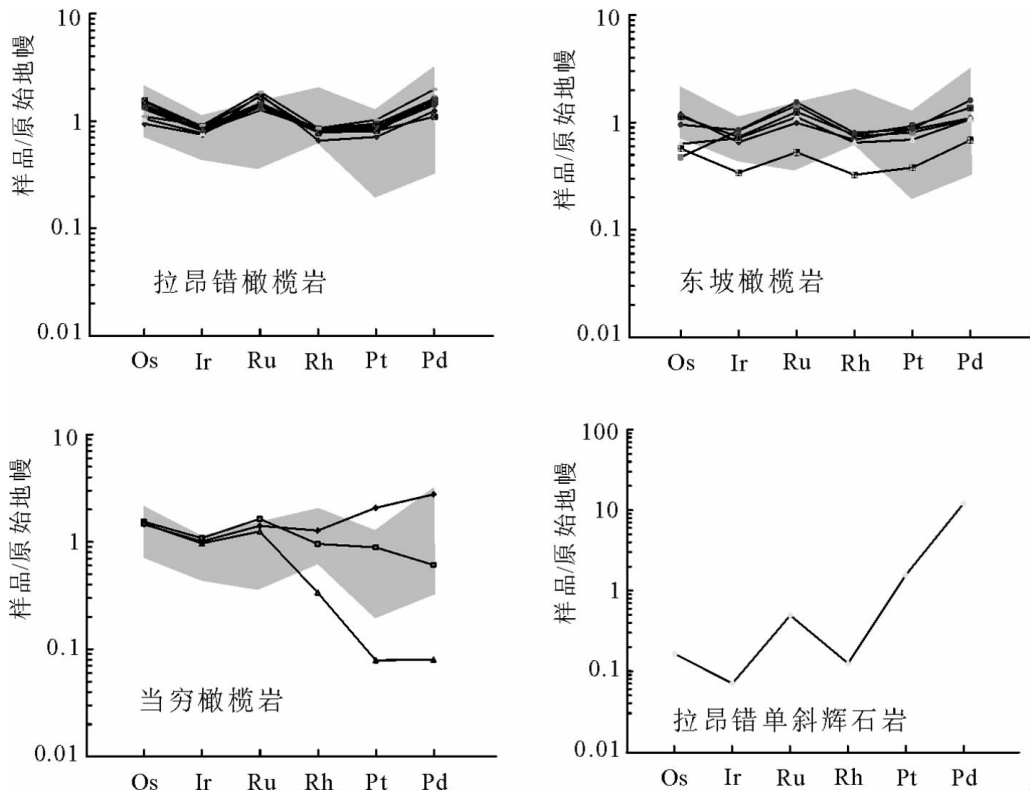


图1 达巴—休古嘎布地区橄榄岩类铂族元素原始地幔标准化模式图
灰色区域为阿尔卑斯和东地中海地区地幔橄榄岩

Fig.1 Primitive mantle-normalized PGE patterns of peridotite from Daba-Xiugugabu
The gray field in diagram signifies mantle peridotite from Alps and Eastern Mediterranean

3 铬铁矿中的铂族元素

铬铁矿石样品分别采自拉昂错、东坡、当穷和休古嘎布岩体(群)内的不同矿体(点),PGE 含量由国家地质实验测试中心用同位素稀释—等离子质谱法(ICP-MS)测定(表 2)。总体而言,铬铁矿石样品的 PGE 含量较高,变化幅度大,最高与最低值相差达到上百倍。全区 \sum PGE 为 $19.7 \times 10^{-9} \sim 5526 \times 10^{-9}$, 平均 729.33×10^{-9} , 是原始地幔的 25.6 倍;Os 为 $2.0 \times 10^{-9} \sim 897 \times 10^{-9}$, 平均 149.0×10^{-9} ;Ir 为 $3.07 \times 10^{-9} \sim 1059 \times 10^{-9}$, 平均 139.02×10^{-9} ;Ru 为 $7.21 \times 10^{-9} \sim 1887 \times 10^{-9}$, 平均 295.69×10^{-9} ;Rh 为 $0.9 \times 10^{-9} \sim 228 \times 10^{-9}$, 平均 30.41×10^{-9} ;Pt 为 $1.67 \times 10^{-9} \sim 918 \times 10^{-9}$, 平均 74.6×10^{-9} ;Pd 为 $1 \times 10^{-9} \sim 537 \times 10^{-9}$, 平均 40.50×10^{-9} 。与原始地幔相比,总体上 Os、Ir、Ru、Rh 表现为较强富集,而 Pt、Pd 富集与亏损并存;只有东坡岩体的样号 DD28-1 例外, \sum PGE 低于原始地幔,除了 Ru 略微富集,其余 5 个元素皆亏损。

拉昂错、东坡和当穷岩体的铬铁矿石 PGE 地幔标准化模式曲线有较大的分布范围(图 2-A、2-B、2-C), 总体向右倾斜,多数样品呈现 Pt 负异常和 IPGE 与 PPGE 较强分馏,只有 2 个样品(DL569-2 和 DD28-1)的曲线较为平坦。拉昂错矿石的 Pd/Ir 比值为 0.04~1.37, 平均为 0.46, Pt/Pt* 比值为 0.20~

1.51, 平均 0.61。东坡矿石的 Pd/Ir 比值为 0.08~0.76, 平均 0.25, Pt/Pt* 比值为 0.28~1.72, 平均 0.90。当穷矿石的 Pd/Ir 比值为 0.07~2.22, 平均 1.16, Pt/Pt* 比值为 0.20~1.09, 平均 0.48。而休古嘎布的 2 个样品模式曲线一致性很好(图 2-D), 都出现强烈的 IPGE 与 PPGE 分馏和 Pt 负异常, Pd/Ir 平均为 0.04, Pt/Pt* 值平均为 0.27;这与 Zhou Meifu, et al^[24]报道的雅鲁藏布江东段罗布莎铬铁矿的模式曲线甚为相似。

本区铬铁矿的 PGE 含量与原始地幔相比总体上富集,地幔标准化模式曲线的分布范围宽,曲线总体向右倾斜,有负斜率变化的趋势,IPGE 与 PPGE 有一定程度的分馏。笔者对比研究发现^[12],上述特点与 Economou Eliopoulos M^[25]报道的希腊、原南斯拉夫等地主要铬铁矿床,以及塞浦路斯的特罗多斯(Troodos)铬铁矿^[26]相似;也与前人研究^[18, 27-28]得出蛇绿岩中豆荚状铬铁矿的原始地幔标准化模式曲线特征基本一致。

4 讨论

已有的研究认为^[7, 22, 29-33],地幔部分熔融、结晶分异、地幔交代作用以及后期变质和蚀变作用对 PGE 分布产生影响。迄今为止,在地幔岩石中 PGE 的赋存形式尚不十分清楚。很多学者^[34-38]提出,地幔橄榄

表 2 铬铁矿石铂族元素含量
Table 2 PGE contents of chromitites

岩体	样号	Os/ 10^9	Ir/ 10^9	Ru/ 10^9	Rh/ 10^9	Pt/ 10^9	Pd/ 10^9	\sum PGE/ 10^9	Pd/Ir	Pt/Pt*
拉昂错	DL54-2	21.8	28.4	73.6	7.02	1.67	1.00	133.51	0.04	0.20
	DL85-2	13.4	8.06	29.2	3.05	3.11	4.18	60.98	0.52	0.28
	DL517-1	10.3	8.47	126	17.8	3.17	1.99	167.76	0.23	0.17
	DL569-2	4.02	4.44	9.64	1.56	14.6	6.07	40.27	1.37	1.51
	DL601-1	897	1059	1887	228	918	537	5526.00	0.51	0.84
	DL609-2	81.0	54.5	194	12.1	17.1	5.89	364.59	0.11	0.65
东坡	DD23-1	50.0	49.4	143	11.6	39.1	4.57	297.67	0.09	1.72
	DD25-1	852	758	1626	179	225	59.1	3698.10	0.08	0.70
	DD28-1	1.99	3.07	7.21	0.90	4.22	2.32	19.70	0.76	0.93
	DD54-1	16.2	14.7	73.0	6.40	7.34	2.39	119.98	0.16	0.60
	DD65-1	22.6	15.2	60.2	5.00	2.69	1.90	107.56	0.13	0.28
	DD68-1	88.7	43.7	188	6.44	32.9	12.8	372.58	0.29	1.16
当穷	Dqc1-2	8.80	6.79	34.6	2.97	22.7	14.8	90.66	2.18	1.09
	Dqc3-1	84.7	76.7	209	16.7	10.7	5.61	403.41	0.07	0.35
	Dqc4-1	126	90.8	227	14.4	14.0	16.6	488.07	0.18	0.29
	Dqc7-1	24.3	19.7	129	11.7	13.9	43.7	242.34	2.22	0.20
休古嘎布	DX7-2	220	159	173	12.6	7.08	4.51	575.46	0.03	0.30
	DX13-2	159	104	134	10.6	5.53	5.24	417.42	0.05	0.24

注: Pt/Pt* = Pt_N / (Rh_N × Pd_N)^{0.5}。

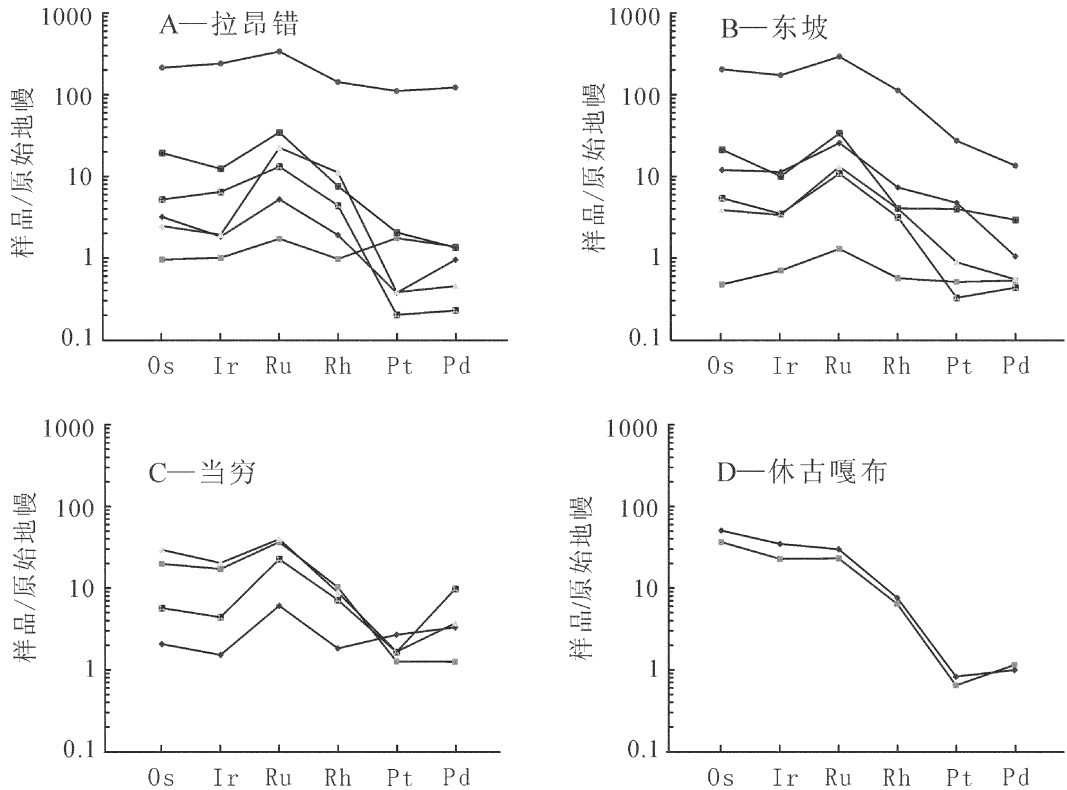


图 2 达巴—休古嘎布地区铬铁矿石铂族元素原始地幔标准化模式图

Fig.2 Primitive mantle-normalized PGE patterns of chromitites from Daba-Xiugugabu

岩中的 PGE 是主要以硫化物形式存在,部分以难熔相(如合金)形式存在。Mitchell 等^[34]研究发现,PGE 在地幔矿物中的富集顺序为:石榴石<橄榄石<斜方辉石<单斜辉石<尖晶石,但在所有地幔矿物中的 PGE 总含量少于全岩实测值,因此推断 60%~80%的 PGE 是以粒间硫化物形式存在,还有可能以合金形式存在。Luguet 等^[38]的最新研究成果揭示,法国 Lherz 岩体的强亏损尖晶石方辉橄榄岩主要矿物橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石的 PGE 含量总和比全岩少 30%,并且在不含贱金属硫化物(BMS)的方辉橄榄岩中发现少量微细粒的 Ru-Os±Ir 硫化物和 Pt-Ir±Os 合金,它们位于难熔矿物相颗粒间隙,约占岩石中 PGE 总量的 50%~100%。根据这些样品,将铂族元素矿物(PGM)解释为地幔熔融的残余物相,它们反映 BMS 在地幔高程度(23%~24%)部分熔融过程中被完全消耗了。

达巴—休古嘎布蛇绿岩带的地幔橄榄岩以方辉橄榄岩和纯橄榄岩为主,形成较大规模的纯橄榄岩相带,在纯橄榄岩内出现少量的辉石岩类、粗晶(伟

晶)辉长岩类脉岩,表明经历了较高级度的部分熔融作用和熔体分离作用。通过光学显微镜下观察,以及采用电子探针背散射扫描与分析,在总数达到数百个的方辉橄榄岩和纯橄榄岩薄片上,没有发现 BMS 或 PGM;因此,根据文献^[34-38]的研究成果推测,本区岩石可能经历了较高级度的部分熔融作用,BMS 已被消耗殆尽,而 PGM 或许有残余,但是因为太稀少、颗粒太微小且分布不均匀而没有被发现。当穷岩体纯橄榄岩的 IPGE 与 PPGE 出现较强分馏,PPGE 亏损或且略为富集,可能说明部分熔融作用导致熔点较低、相容性弱的 PPGE 分异进入熔体,样号 Dqc9-3 中的 PPGE 随熔体被带出而产生亏损,而样号 Dq1-1 中的 PPGE 已经活动并初步聚集但尚未被带出而造成含量有所增加。

世界各地产于蛇绿岩中的豆荚状铬铁矿矿石具有较高的 PGE 含量是一个普遍现象,而且其含量变化范围较大^[24-26]。最近几年的研究表明^[39-47],PGE 在铬铁矿石中主要以独立 PGM 形式存在,包括各种类型的硫化物和合金等,它们呈包裹体分布于铬铁

矿晶粒及其裂隙内。如西藏罗布莎的铬铁矿石中 PGM 主要为金属互化物(钌铱矿、钨钌矿、钌铱矿、粗铂矿、镍铁铱合金等)和硫化物(硫铱矿、硫钌钨矿、硫钨钌矿等),多以单晶体形式存在,粒度细小且不均匀,嵌布在铬铁矿晶粒中,可以通过重选回收^[40-42]。希腊的铬铁矿石中 PGM 有硫钌矿、硫钨矿、硫钌钨矿、硫钨铱矿、硫钨钨矿、硫钨铂矿、钨铂矿、硫镍钨铂矿和各种合金(Os-Ir-Ru、Os-Ir、Os-Rh-Ir-Fe、Pt-Ir-Fe 等)^[43-44],其中部分 PGM 是次生形成的,可能经历了从地幔软流圈的塑性变形至地壳内最终的碎性变形的长期多阶段演化^[44]。埃及的铬铁矿石中 PGM 有硫钌矿、硫钨铱矿、硫钨钨矿、硫钨钨矿、钨铂矿、钨钨矿,以及 Pt-Fe、Pd-Fe、Ir-Rh 合金等^[45];此外,矿石中还出现针镍矿、六方硫镍矿、镍黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿等 BMS,在这些 BMS 中 PGE 的含量很低。阿根廷 Pampea 蛇绿岩中铬铁矿石出现的 PGM 有硫钌矿、硫钨矿、硫钨铱矿、自然钨、自然铂,以及 Pt-Fe、Ir-Ru-Ti 等合金^[47]。

由于条件所限,笔者尚不能够采用电子探针分析等方法对达巴—休古嘎布蛇绿岩带铬铁矿石中的 PGE 赋存状态进行研究,而在光学显微镜下对光片详细观察没能识别出 PGM,因此 PGE 的赋存状态尚不清楚。然而,光片中普遍可见到少量 BMS,包括镍黄铁矿、针镍矿、黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿,以及铁镍矿(互化物)等,它们呈不规则粒状、集合体状分布于铬铁矿晶粒之间、内部、或粒间脉石矿物中。BMS 形成晚于铬铁矿。少量镍黄铁矿、针镍矿的电子探针分析结果显示其化学成分变化范围较大^[12],这与两者在光片中呈现反射色、反射率不均匀的现象一致。根据矿物成因关系以及化学成分变化等方面推测,BMS 在后期地质作用过程中受到了影响和改造。将铬铁矿石的 PGE 含量(表 2)与相应样品的光片中 BMS 含量进行对比及相关性研究,发现两者之间无相关性。例如样号 DL517-1、DL569-2、DL601-1、DD23-1、DD28-1 光片中 BMS 含量相对较高,但是仅样号 DL601-1 具有高的 PGE 含量,而样号 DL569-2、DD28-1 则是参加分析的样品中含量最低的。其他样品光片中 BMS 含量甚微,但是它们的 PGE 含量并不低,尤其样号 DD25-1 的含量很高。这些情况表明,铬铁矿石中的 PGE 不是主要赋存于 BMS 内。根据国际上有关铬铁矿床的最新研究成果^[39-47],推测达巴—休古嘎布蛇绿岩带铬铁矿中

的 PGE 主要应以 PGM 的形式存在,具体矿物名称有待进一步发现与研究。

5 结 论

达巴—休古嘎布蛇绿岩带各岩体的地幔橄榄岩中 PGE 含量及分布型式有所差异。相对于原始地幔,拉昂错和东坡岩体的 PGE 含量没有显著异常,PPGE 与 IPGE 之间分馏不明显,标准化分布曲线大致平坦,总体特征与西藏日喀则地区的地幔橄榄岩,以及阿尔卑斯和东地中海地区蛇绿岩相似。而当穷岩体的 PPGE 含量变化范围较大,出现 IPGE 与 PPGE 强分馏,这可能与部分熔融作用和熔体分离作用有关,详细的成因有待进一步研究。

单斜辉石岩脉的 PGE 含量及分布型式显然与地幔橄榄岩不同,可能反映其是较高程度部分熔融作用和熔体分离作用的产物。

铬铁矿石的 PGE 含量较高,各样品 \sum PGE 平均值(729.33×10^{-9})是原始地幔的 25.6 倍,而且变化幅度大($19.7 \times 10^{-9} \sim 5526 \times 10^{-9}$),最高与最低值相差达到上百倍。与原始地幔相比,Os、Ir、Ru、Rh 总体上表现为较强富集,Pt、Pd 富集与亏损并存。PGE 地幔标准化模式曲线有较大的分布范围,曲线向右倾斜,IPGE 与 PPGE 分馏较强,多数样品呈现 Pt 负异常。这些特征与中国罗布莎、希腊、原南斯拉夫、以及塞浦路斯等世界各地蛇绿岩中的豆夹状铬铁矿类似。铬铁矿石的 PGE 含量与相应样品的 BMS 含量无相关性,PGE 不是主要赋存于 BMS 内。根据国际上最新研究成果^[39-47],推测本研究区铬铁矿石中的 PGE 主要应以 PGM 的形式存在,具体矿物名称有待进一步发现与研究。

参考文献(References):

- [1] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984:343-359.
Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1984:343-359 (in Chinese).
- [2] Handler M, Bennett V C. Behaviour of platinum group elements in the subcontinental mantle of eastern Australia during variable metasomatism and melt depletion [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, 1999, 63:3597-3618.
- [3] Lorand J P, Pattou L, Gros M. Fractionation of platinum group element in the upper mantle: a detailed study in Pyrenean orogenic lherzolites [J]. *Petrol.*, 1999, 40:957-981.
- [4] Lorand J P, Alard O. Geochemistry of platinum-group elements in

- the sub-continental lithospheric mantle; in-situ and whole-rock analyses of some spinel peridotite xenoliths, Massif Central, France [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, 2001, 65:2789-2806.
- [5] Lee C-T A. Platinum-group element geochemistry of peridotite xenoliths from the Sierra Nevada and the Basin and Range, California [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66:3987-4005.
- [6] Lorand J P, Ambre Luguët, Olivier Alard, et al. Abundance and distribution of platinum-group elements in orogenic lherzolites; a case study in a Fontete Rouge lherzolite (French Pyrénées) [J]. *Chemical Geology*, 2008, 248:174-194.
- [7] Barnes, Sarah Jane, Naldrett A J, et al. The origin of the fractionation of Platinum-group elements in terrestrial magmas [J]. *Chem. Geol.*, 1985, 53:303-323.
- [8] Becker H, Horan M F, Walker R J, et al. Highly siderophile element compositions of the earth's primitive mantle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70:4528-4550.
- [9] Garuti G, Fershtater G, Bea F, et al. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results [J]. *Tectonophysics*, 1997, 276:181-194.
- [10] 黄圭成, 莫宣学, 徐德明, 等. 西藏西南部达巴-休古嘎布蛇绿岩带的形成与演化 [J]. *华南地质与矿产*. 2006, 87(3):1-9. Huang Guicheng, Mo Xuanxue, Xu Deming, et al. Origination and evolution of Daba-Xiugugabu ophiolite belt in the southwestern Tibet [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2006, 87(3):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [11] 黄圭成, 徐德明, 雷义均, 等. 西藏西南部达巴-休古嘎布蛇绿岩带铬铁矿的找矿前景 [J]. *中国地质*, 2007, 34(4):668-674. Huang Guicheng, Xu Deming, Lei Yijun, et al. Chromitite prospects in Daba-Xiugugabu ophiolite zone, southwestern Tibet [J]. *Geology in China*, 2007, 34(4):668-674 (in Chinese with English abstract).
- [12] 黄圭成. 西藏雅鲁藏布江西段蛇绿岩及铬铁矿研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2006. Huang Guicheng. Study on ophiolite and chromitite in Western Yarlung Zangbo, Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [13] 徐德明, 黄圭成, 雷义均. 西藏西南部休古嘎布绿岩的成因: 岩石学和地球化学证据 [J]. *大地构造与成矿学*. 2007, 31(4):490-501. Xu Deming, Huang Guicheng, Lei Yijun. Origin of the Xiugugabu ophiolite massif, SW Tibet: evidence from petrology and geochemistry [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(4):490-501 (in Chinese with English abstract).
- [14] 徐德明, 黄圭成, 雷义均. 西藏西南部拉昂错地幔橄辉岩的地球化学特征及其构造意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2008, 27(1):1-13. Xu Deming, Huang Guicheng, Lei Yijun. Geochemistry and tectonic significance of mantles from Laangcuo ophiolite massif, southwest Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27(1):1-13 (in Chinese with English abstract).
- [15] Barnes S J, Boyd R, Korneliusson A, et al. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: examples from Norway [C]//Prichard H M, Ports P J, Bowles J EW, Cribb S J (eds.). *Geo-Platinum 87*. Elsevier, London, 1988:113-143.
- [16] Lorand J E. Abundance and distribution of Cu-Fe-Ni sulfides, sulfur, copper and platinum-group elements in orogenic-type spinel lherzolite massifs of Aribge (Northeastern Pyrenees, France) [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1989, 93:50-64.
- [17] Prichard H M, Lord R A. Platinum and Palladium in the Troodos ophiolite complex [J]. *Cyprus. Can. Mineral.* 1990, 28:607-617.
- [18] Leblanc M, Platinum-group elements and gold in ophiolitic complexes: distribution and fractionation from mantle to oceanic floor [C]//Peters T J, et al. (editors). *Ophiolite Genesis and Evolution of the Oceanic Lithosphere*, Oman. Kluwer, Dordrecht, 1991:231-260.
- [19] Kostantopoulou G, Economou-Eliopoulos M. Distribution of platinum-group elements and gold within the Vourinos chromitite ores, Greece [J]. *Econ. Geol.*, 1991, 86:1672-1682.
- [20] Garuti G, Oddone M, Torres-Ruiz J. Platinum-group element in upper mantle rocks from the Ivrea Zone (Italy) and the Betico-Rifean Cordillera (Spain, Morocco). *Proc. Int. Field Conf. Symp. Petrology and Metallogeny of Volcanic and Intrusive Rocks of the Midcontinent Rift System, Duluth, Minn., August 19-September 1, 1995*:53-54.
- [21] Garuti G, Fershtater G, Bea F, et al. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results [J]. *Tectonophysics*, 1997, 276:181-194.
- [22] 喻亨祥, 夏斌, 梅厚钧, 等. 西藏大竹卡蛇绿岩中地幔橄辉岩铂族元素分布特征 [J]. *科学通报*, 2000, 45(22):2446-2452. Yu Hengxiang, Xia Bin, Mei Houjun, et al. Platinum-group elements distribution characteristic in mantle peridotite from Dazhuka ophiolite, Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(22):2446-2452 (in Chinese).
- [23] Chen Genwen, Xia Bin. Platinum-group elemental geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Xigaze ophiolite, southern Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32:406-422.
- [24] Zhou Meifu, Sun Min, Reid R, et al. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: A case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(4):677-688.
- [25] Economou-Eliopoulos M. Platinum-group element distribution in chromite ores from ophiolite complexes: implications for their exploration [J]. *Ore Geology Reviews.*, 1996, 11:363-381.
- [26] Anette Büchl, Gerhard Brüggemann, et al. Formation of podiform chromitite deposits: implications from PGE abundances and Os isotopic compositions of chromites from the Troodos complex,

- Cyprus [J]. *Chemical Geology*, 2004, 208:217-232.
- [27] Page N J, Engin T, Singer D A, et al. Distribution of platinum-group elements in the Bati kel chromite deposits, Guleman-Elazig area, Eastern Turkey[J]. *Econ. Geol.*, 1984, 79:177-184.
- [28] Talkington R W, Watkinson D H. Whole rock platinum-group element trends in chromite-rich rocks in ophiolitic and stratiform igneous complexes. In *Metallogeny of Basic and Ultrabasic rocks* (ed. Gallagher et al.); Symp. Vol. Inst. Min. Metall, 1986:427-440.
- [29] Crocket J H. Platinum-group elements in mafic and ultramafic rocks:Survey[J]. *Canadian Mineral*, 1979, 17:391-402.
- [30] 侯泉林, 柴之芳, 马配学, 等. 超镁铁岩中铂族元素的行为和规律[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1994, 2(2/3):222-230.
Hou Quanlin, Chai Chifang, Ma Peixue, et al. The behaviour of platinum-group elements (PGE) in ultramafic rock [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1994, 2(2/3):222-230 (in Chinese with English abstract).
- [31] 夏斌, 陈根水, 梅厚钧, 等. 西藏吉定蛇绿岩铂族元素地球化学及其对地幔过程的制约[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(7):578-585.
Xia Bin, Cen Genshui, Mei Houjun, et al. Platinum-group elements geochemical and its constraints for mantle processes from Jiding ophiolite, Tibet[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(7):578-585 (in Chinese).
- [32] Kepezhinskas P, Defant M, Widom E. Abundance and distribution of PGE and Au in the island-arc mantle:Implications for sub-arc metasomatism[J]. *Lithos.*, 2002, 60:113-128.
- [33] Giovanni Grieco, Alfredo Ferrario, Edmond A Mathez. The effect of metasomatism on the Cr-PGE mineralization in the Finero Complex, Ivrea Zone, Southern Alps [J]. *Ore Geology Reviews*, 2004, 24:299-314.
- [34] Mitchell R H, Keays R R. Abundance and distribution of gold, palladium and iridium In some spinel and garnet lherzolites: implications for the nature and origin of precious metal-rich intergranular components in the upper mantle [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1981, 45:2425-2442.
- [35] Hamlyn P R, Keays R R, Cameron W E. Precious metals in magnesian low-Ti lavas: implication for metallogenesis and sulfur saturation in primary magma[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49:1797-1811.
- [36] Lorand J P. Fractionation of PGE and gold in the upper mantle:a detailed study in Pyrenean orogenic lherzolites [J]. *J. Petrol.* 1999, 40:957-981.
- [37] Mecher F G, Thalhammer T V. The giant chromite deposits at Kempirsai, Ural: constraints from trace element (PGE, REE) and isotope data[J]. *Mineralium Deposta.*, 1999, 34:205-272.
- [38] Ambre Luguët, Steven B, Shirey, et al. Residual platinum-group minerals from highly depleted harzburgites of the Lherz massif (France) and their role in HSE fractionation of the mantle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71:3082-3097.
- [39] Edwards S J. Harzburgites and Refractory melts in the Lewis hills massif, Bay of Island ophiolite complex:the base-metals and precious-metals story[J]. *Can. Mineral*, 1990, 28:537-552.
- [40] 张浩勇, 巴登珠, 郭铁鹰, 等. 西藏自治区曲松县罗布莎铬铁矿床研究[M].拉萨:西藏人民出版社, 1996:79-85.
Zhang Haoyong, Ba Dengzhu, Guo Tiejun, et al. Study of Luobusha Typical Chromite Ore Deposit Qusong County, Tibet [M].Lasa: Xizang People's Publishing House, 1996:79-85(in Chinese).
- [41] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏蛇绿岩中不寻常的地幔矿物群[J]. *中国地质*, 2003, 30(2):144-150.
Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. An unusual mantle mineral group in ophiolites of Tibet [J]. *Geology in China*, 2003, 30(2):144-150 (in Chinese with English abstract).
- [42] 白文吉, Paul T Robinson, 方青松, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿中的铂族元素和贱金属合金 [J]. *地球学报*, 2004, 25(4):385-396.
Bai Wenji, Paul T Robinson, Fang Qingsong, et al. Platinum-group element and base metal alloy in podiform chromitite from Luobusha ophiolite, southern Tibet [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(4):385-396 (in Chinese with English abstract).
- [43] Grammatikopoulos T A, Kapsiotis A, Zaccarini F, et al. Investigation of platinum-group minerals (PGM) from Pindos chromitites (Greece) using hydroseparation concentrates[J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20:1170-1178.
- [44] Tsoupas G, Economou-Eliopoulos M. High PGE contents and extremely abundant PGE-minerals hosted in chromitites from the Veria ophiolite complex, northern Greece [J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33:3-19.
- [45] Ahmed Hassan Ahmed. Diversity of platinum-group minerals in podiform chromitites of the late Proterozoic ophiolite, Eastern Desert, Egypt: Genetic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 32:1-19.
- [46] Girardi V A V, Ferrario A, Correia C T, et al. A comparison of selected Precambrian Brazilian chromitites:Chromite, PGE-PGM, and Re/Os as parental source indicators [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2006, 20:303-313.
- [47] Proenza A, Zaccarini F, Escayola M, et al. Composition and textures of chromite and platinum-group minerals in chromitites of the western ophiolitic belt from Pampean Ranges of Córdoba[J]. *Argentina. Ore Geology Reviews*, 2008, 33:32-48.

Distribution characteristics of platinum-group elements in the Daba-Xiugugabu ophiolite zone, Tibet

HUANG Gui-cheng, XU De-ming, LEI Yi-jun, LEI Tian-ci, LI Li-juan

(Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003, Hubei, China)

Abstract: Platinum-group element (PGE) contents and distribution patterns of different mantle peridotites from ophiolite masses (blocks) are to some extent different. Relative to things of the primitive mantle, PGE in Langcuo and Dongpo masses don't show distinct anomalies. The curves of primitive mantle-normalized distribution patterns are approximately even, and there exists no strong fractionation between PPGE and IPGE. On the whole, the PGE characteristics are similar to those of mantle peridotites from Xigaze, Alps and Eastern Mediterranean regions. However, PPGE contents of Dangqiong masses vary in a wide range and don't show a strong fractionation between PPGE and IPGE. PGE contents and distribution patterns of clinopyroxenite dykes differ greatly from those of the mantle peridotite; Os, Ir, Ru and Rh are depleted whereas Pt and Pd are enriched. The pattern curve declines to the left. These characteristics suggest that clinopyroxenite dykes were probably formed by the high degree of partial melting as well as melting segregation. PGE contents of chromitite are high and vary in a very wide range of 19.7–5526 ppb. The average \sum PGE (729.33ppb) is equal to 25.6 times its value in primitive mantle. Os, Ir, Ru and Rh are enriched but Pt and Pd have experienced both enrichment and depletion as compared with their values in the primitive mantle. The pattern curves are scattered and decline to the right. There exists a strong fractionation between IPGE and PPGE, and Pt in most of samples assumes negative anomalies. These characteristics are similar to those of chromitite in ophiolites from China's Luobusha, Greece, Yugoslavia, Cyprus and some other regions in the world. PGE contents of chromitite are not related to base metal sulfides (BMS) contents in the same samples. PGE don't mainly exist in BMS. It is thought that PGE mostly occur in platinum-group element minerals (PGM), which remain to be investigated and found in future.

Key words: platinum-group element; chromitite; ophiolite; Daba-Xiugugabu; Tibet

About the first author: HUANG Gui-cheng, male, born in 1963, Ph.D and senior researcher, engages in the investigation and study of mineral deposit geology; E-mail: ychguicheng@cgs.gov.cn.