

云南朱布镁铁-超镁铁岩体地球化学特征 及成因机理探讨

马言胜^{1,2}, 陶 琰^{2*}, 朱 丹², 郝 义¹

(1. 有色金属华东地质勘查局 地球化学勘查与海洋地质调查研究院, 江苏 南京 210007; 2. 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)

摘 要: 云南朱布镁铁-超镁铁岩体赋存中型铜镍铂族元素矿床, 侵位于元谋群片岩和花岗片麻岩中, 岩体垂直分异明显, 自下而上为橄榄岩、橄辉岩、辉石岩、辉长岩等相带。矿体以底部“边缘矿”为主, 上部有呈透镜状产出的少量“上悬矿”。本文报道了朱布岩体主元素、微量元素、铂族元素(PGE)和 Sr-Nd 同位素组成新的测试结果。分析表明朱布岩体具有拉斑玄武质岩浆分异演化趋势, 富集 LREE 的分布模式, 弱的 Nb 异常和较明显的 Sr 负异常, 并与峨眉山大火成岩省(ELIP)苦橄岩相类似, 暗示两者可能存在成因上的联系。朱布岩体的铂族元素相对分布模式为“Pt-Pd”富集型, 原始地幔标准化曲线向左陡倾。较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.7096~0.7107)和较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-3.1~ -2.3), 表明朱布岩浆受到了地壳物质不同程度的混染。通过岩浆演化过程反演, 得出其母岩浆性质为苦橄质, 并估算地壳混染程度在 3%~20%之间, 发现在 R (岩浆与熔离硫化物的比例)值为 1000~5000 时比较吻合朱布样品中硫化物的实际测定值, 证实了朱布岩体可能为开放系统的岩浆房, 经过多级富集过程, 先熔出的硫化物从后续多期次岩浆中吸收了大量 PGE, 岩浆房中同时存在堆晶和岩浆演化, 分别形成了底层橄榄岩和上部的辉长岩, 中间过渡为橄辉岩和辉石岩。

关键词: 岩浆硫化物矿床; 峨眉山大火成岩省; 镁铁-超镁铁岩; 朱布

中图分类号: P595; P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2012)04-0359-12

Geochemical characteristics and genesis of the Zhubu mafic-ultramafic intrusion, Yunnan Province

MA Yan-sheng^{1,2}, TAO Yan^{2*}, ZHU Dan² and HAO Yi¹

1. Institute of Geochemical Exploration and Marine Geological Survey, ECE, Nanjing 210007, China;

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: The mineralized complex which host Zhubu medium-sized Cu-Ni-PGE deposit is a mafic-ultramafic intrusion, intruded the schists and granitic-gneisses of Yuanmou Group. This intrusion is vertically well differentiated with peridotite, olivine pyroxenite, pyroxenite and gabbros from bottom to the top. The ore bodies are mainly composed of “edge ores”, a few “suspended ores” which occur as lenses located at the upper part. This paper provided new test results on major elements, trace elements, platinum-group elements (PGE) and Sr-Nd isotopes for some rocks and ores in the intrusion. The major and REE elements of the rocks show a tholeiitic evolution trend. The samples enrich in LREE and indicate a marked and weak negative anomalies for Sr and Nb, respectively. The patterns of REE and trace elements are similar to those of picrites in Emeishan Large Igneous Province (ELIP), suggesting a genetic link between the Zhubu intrusion and picrites in ELIP. Primitive mantle normalized chalcophiles elements patterns of the Zhubu sulfide ores show enrichments in Pt and Pd compared to other elements. The higher $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.7096~0.7107) and the lower $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-3.1~ -2.3) show Zhubu magma

收稿日期(Received): 2011-03-24; 改回日期(Revised): 2012-03-11; 接受日期(Accepted): 2012-03-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q04-06); 国家自然科学基金(40973039, 40772059)

作者简介: 马言胜(1979-), 男, 博士、工程师, 主要从事岩浆硫化物矿床和矿产勘查研究。E-mail: mayansheng0904@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): TAO Yan, E-mail: taoyan@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891665

experienced variable degree of crustal contamination. The inversion of magma evolution show that the primary magma is a picritic melt. By estimation, the magma experienced 3%~20% crustal contamination. When the R factor (the mass ratio between silicate magma and sulfide liquid) fall into the range of 1000 to 5000, it is close to the actual measured value of the sulfide in Zhubu samples, indicate that it maybe a magma conduit in an open system. Successive pulses of new magma passing through the conduit and upgraded the previously segregated sulfide in PGE by a multistage upgrading process. The mineral cumulus and magma evolution also exit in the chamber, formed peridotite at the bottom and gabbros on the top, respectively, with pyroxenite and olivine-pyroxenite in between.

Key words: magmatic sulfide deposits; Emeishan Large Igneous Province; mafic-ultramafic rocks; Zhubu

0 引言

大规模幔源岩浆活动是地幔柱的典型特征,可形成具有重大资源意义的岩浆 Cu-Ni-PGE(铂族元素)矿床、V-Ti 磁铁矿矿床、铬铁矿矿床等,如南非 Bushveld 超大型 PGE-Cr-Fe-V-Ti 矿床、俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 超大型 Ni-Cu-PGE 矿床、澳大利亚 Kambalda 超大型 Ni-Cu 矿床等^[1-2],这些矿床的形成均与溢流玄武岩密切相关,多赋存在岩浆上升通道附近的镁铁-超镁铁质侵入体或科马提质火山岩中。

峨眉山大火成岩省(ELIP)是世界上几个主要大火成岩省之一,是晚古生代峨眉山地幔柱活动的产物^[3-5]。ELIP 中产出两类重要的岩浆矿床:与镁铁-超镁铁质层状侵入体有关的 V-Ti 磁铁矿矿床^[6-8]和与镁铁-超镁铁质小侵入体有关的 Ni-Cu-PGE 矿床^[9-21],后者可细分为以 PGE 为主的矿床,如金宝山 Pt-Pd 矿^[9-12];含较高 PGE 的岩浆硫化物矿床,如杨柳坪^[13-14]和朱布 Ni-Cu-PGE 矿床^[15-16];PGE 含量非常低的岩浆硫化物矿床,以白马寨镍矿^[17-19]和力马河镍矿^[20-21]最为典型。云南元谋地区朱布镁铁-超镁铁岩体赋存有中型 Pt-Pd 型矿床¹⁾,在岩石学和矿床学方面已积累了较丰富的资料,近年来一些学者逐步开展了地球化学方面的研究工作^[15,16,22,23],然而针对朱布岩体原始岩浆性质的定量界定、岩浆演化过程以及成岩成矿作用方面还有待进一步补充和完善,例如针对朱布岩体的原始岩浆性质还存在分歧和争议,岩浆在演化和上升过程中是否存在地壳混染,混染程度如何,硫化物熔离的机制和程度如何等等。本文拟报道朱布镁铁-超镁铁岩体的主元素、微量元素、

铂族元素(PGE)和 Sr-Nd 同位素组成新的测试结果,以期界定朱布岩体的原始岩浆性质,进一步深化和明确岩浆成因、演化和成岩成矿作用,丰富对峨眉山大火成岩省岩浆活动规律的认识并促进对其成矿作用的研究。

1 地质概况

朱布镁铁-超镁铁岩体侵位于元谋群片岩和花岗岩片麻岩中,呈椭圆形(图 1),南北长 750 m,东西宽 400 m,最大垂深 580 m,外接触带为 1 至数米宽的角岩带,内接触带为数米宽的混杂带。岩体垂直分异明显,自下而上为橄榄岩、橄辉岩、辉石岩、含长辉石岩、暗色辉长岩和中色辉长岩等相带,以橄榄岩相为主并分布于南端西侧及深部。岩石自变质作用强烈,多蛇纹石化、滑石化、透闪石化、阳起石化、绿泥石化。朱布岩体辉长岩及边缘闪长岩的锆石 U-Pb 年龄在 260 Ma 左右^[23],与峨眉山玄武岩年龄一致^[24]。

朱布矿床以底部“边缘矿”为主,上部有少量“上悬矿”,多呈透镜状产出,厚 1~4 m,最厚 15 m,延深达 600 m。矿石以斑杂状和稀疏浸染状为主,有用组分除了铜镍矿物外,铂族元素有砷铂矿、等轴碲铋矿、碲铋铂矿等矿物。矿石中 Cu 0.10%~0.44%(平均 0.22%); Ni 0.10%~0.30%(平均 0.23%); Pt 0.54 g/t(最高 4.43 g/t); Pd 0.34 g/t(最高 2.47 g/t)^[25]。据云南省地质局 1970 年 12 月提交和批准的元谋县朱布铂钯矿储量: Pt+Pd 5.9 t、Ni 15336 t、Cu 14497 t、Co 523 t、Fe 约 80 万 t、化肥用蛇纹岩矿石 6673 t,以及 Rh、Os、Ru、Au、Ag、Se、Te 等多种有价值元素。

2 采样和样品岩相学特征

分析样品均来自原采矿坑道,样品比较新鲜,

1) 云南省地质矿产局第三地质队,云南元谋朱布铂矿储量报告书,云南省地矿局,1970,16-17。

包括不同类型的各种岩石和矿石样品, 采样位置见图2。超镁铁岩样品有橄辉岩、橄辉岩、辉石岩; 镁铁岩样品包括浅色辉长岩和暗色辉长岩; 矿石样品为浸染状硫化物矿石。

橄辉岩一般为中粗粒单辉橄辉岩, 主要由贵橄辉石(Fo_{83-85})和普通辉石组成, 其次为古铜辉石、角闪石、黑云母及拉长石; 副矿物以含铬尖晶石为特征, 尚有钛铁矿、钛磁铁矿及磁铁矿。

橄辉岩为橄辉岩与辉石岩之间的过渡带, 结构与橄辉岩相似, 但长石罕见。

辉石岩呈细粒结构, 主要由普通辉石组成, 含少量橄辉石和古铜辉石, 副矿物为钛铁矿、钛磁铁矿等。

辉长岩可分为暗色和浅色辉长岩两种类型, 暗色辉长岩为中-粗粒结构, 主要矿物为普通辉石和斜长石, 次有角闪石和黑云母, 副矿物有钛铁矿、磷灰石、磁铁矿和黄铁矿, 以钛铁矿为最多。斜长石常

具原生带状构造, 为钠长石(An_5)、更长石(An_{11-23})。浅色辉长岩与暗色辉长岩相比斜长石增加, 并含少量石英, 斜长石为中长石, 常具环状结构。

浸染状硫化物矿石: 硫化物含量为 0.5%~2%, 集合体外形呈 2~5 mm 的斑点充填于造岩矿物间, 主要有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿等。

3 分析方法

用玛瑙研钵将样品粉碎成 200 目。主元素、稀土元素、微量元素均在中国科学院地球化学研究所分析, 主元素用 PW4400 型 X 荧光仪测定, 检测限为 30~50 $\mu\text{g/g}$, 分析精度优于 5%; 稀土元素、微量元素用 Finnigan MAT ELEMENT 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定, 对稀土元素检测下限为 0.~n pg/g, 分析精度优于 5%, 对微量元素分析精度优于

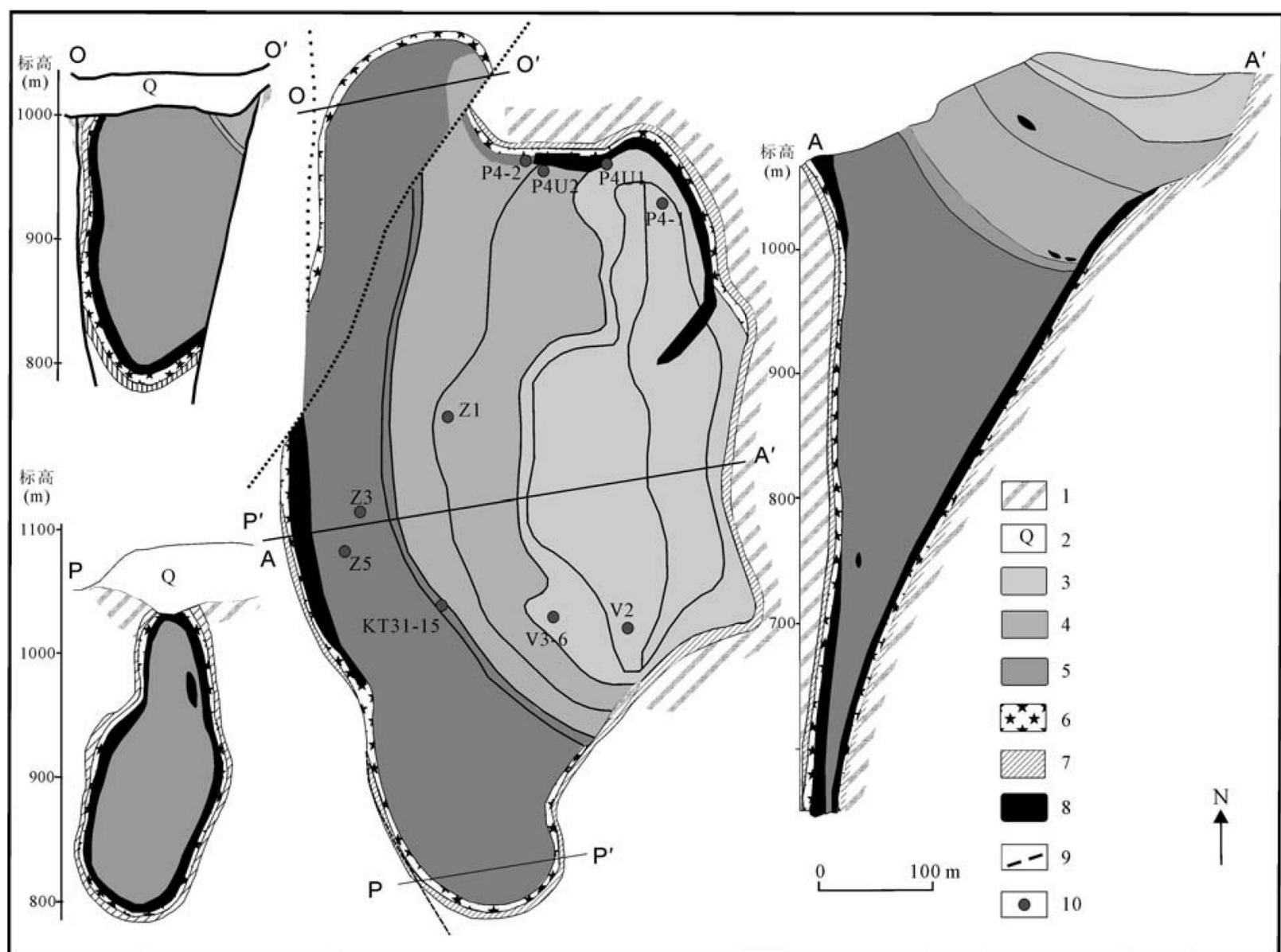


图1 朱布镁铁-超镁铁岩体地质图(底图据文献[15])

Fig.1 Geological map of the Zhubu mafic-ultramafic intrusion (modified from reference [15])

1-前震旦系变质岩; 2-第四系; 3-辉长-闪长岩; 4-辉石岩; 5-橄辉岩; 6-混染辉长岩; 7-角岩; 8-矿体; 9-断层; 10-采样位置及样品编号。

1-Pre-Sinian metamorphic rocks; 2-Quaternary; 3-gabbro-diorite; 4-pyroxenite; 5-peridotite; 6-contaminated gabbro; 7-hornfels; 8-orebodies; 9-fault; 10-sampling locations and sample numbers.

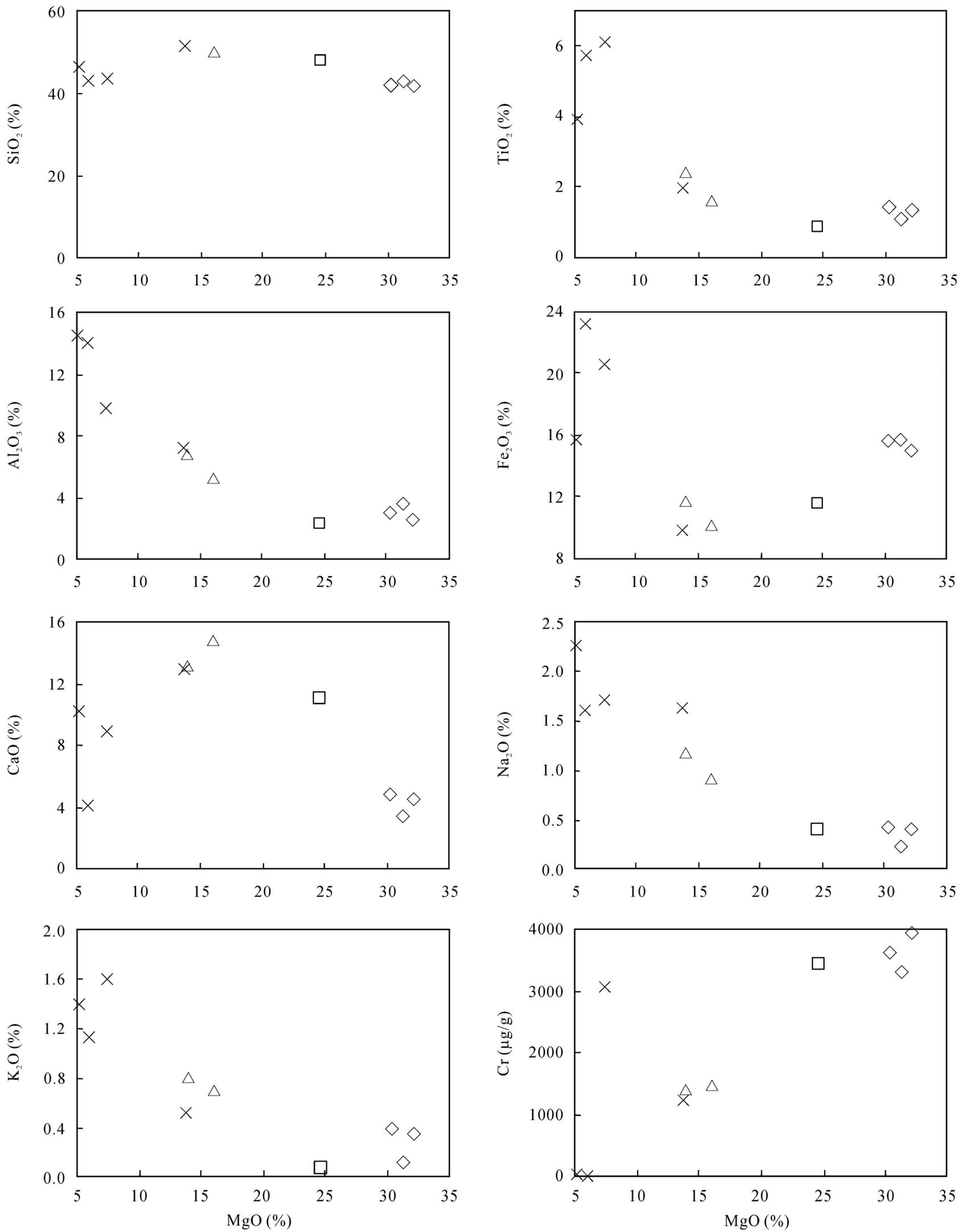


图 2 朱布岩体 Harker 图解

Fig.2 Harker diagram for the Zhubu intrusion

◇ 橄榄岩; □ 橄辉岩; △ 辉石岩; × 辉长岩。

◇ peridotites; □ olivine-pyroxenites; △ pyroxenites; × gabbros.

10%, 具体分析方法和流程见文献[26]。

铂族元素在国家地质实验测试中心测定, 分析方法及流程见陶琰等^[20], 仪器型号为等离子质谱Excel, 平均检出限: Os 为 0.007 ng/g, Ir 为 0.013 ng/g, Ru 为 0.02 ng/g, Rh 为 0.001 ng/g, Pt 为 0.026 ng/g, Pd 为 0.06 ng/g。

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所进行, 分析方法及流程与 Wang *et al.*^[18]所述相同。实验全流程空白 Rb = 50×10^{-11} g/g, Sr = 50×10^{-11} g/g, Sm = 7×10^{-11} g/g, Nd = 8×10^{-11} g/g。Rb、Sr、Sm 和 Nd 均采用双灯丝热表面电离源。分析过程中每次至少采集 100 组数据作平均。标样

NBS987 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710221 \pm 0.000013$; LA $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511849 \pm 0.000010$ 。

4 地球化学

4.1 主元素

朱布橄榄岩、橄辉岩等超镁铁岩有弱的蛇纹石化蚀变, 因此烧失量较大, 变化范围为 5.17%~8.85%。将原始分析结果按干体系校正后列于表 1。从表 1 可以看出, 各岩相带主元素含量变化较明显, SiO₂ 为 42.06%~51.67%, MgO 为 5.14%~32.11%, Al₂O₃/TiO₂ 为

表1 朱布岩体镁铁-超镁铁岩主元素(%)及微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果
Table 1 Major element (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) concentrations of the Zhubu intrusion

样品号 岩性	Z5 橄榄岩	Z3 橄榄岩	P4-2 矿体(橄榄岩)	KT31-15 橄辉岩	P4U2 辉石岩	Z1 辉石岩	V2 辉长岩	V3-6 暗色辉长岩	P4U1 矿体(暗色辉长岩)	P4-1 辉长岩
SiO ₂	42.06	42.39	43.11	48.24	50.91	50.59	46.72	51.67	43.70	43.42
TiO ₂	1.34	1.43	1.09	0.85	2.40	1.61	3.90	1.97	6.09	5.71
Al ₂ O ₃	2.62	3.04	3.64	2.35	6.79	5.26	14.49	7.25	9.83	14.02
Fe ₂ O ₃	14.97	15.63	15.66	11.52	11.73	10.14	15.72	9.83	20.53	23.18
MnO	0.16	0.16	0.10	0.13	0.18	0.17	0.18	0.17	0.23	0.20
MgO	32.11	30.30	31.28	24.58	13.93	16.01	5.14	13.7	7.41	5.94
CaO	4.45	4.76	3.40	11.10	13.19	14.82	10.16	12.96	8.83	4.04
Na ₂ O	0.41	0.42	0.23	0.40	1.18	0.91	2.27	1.63	1.71	1.61
K ₂ O	0.35	0.39	0.12	0.08	0.81	0.70	1.40	0.52	1.60	1.13
P ₂ O ₅	0.08	0.09	0.10	0.05	0.16	0.12	0.25	0.16	0.23	0.51
LOI	6.31	8.57	8.85	5.17	2.98	1.95	1.85	2.81	1.92	1.73
Total	98.53	98.61	98.74	99.31	101.26	100.34	100.24	99.85	100.17	99.77
Mg [#]	85	83	84	85	76	80	46	78	48	40
Ni	1254	1129	1738	939	323	324	16.4	247	1857	17.9
Cu	219	208	775	154	76.9	283	43.3	293	695	29.8
Cr	3934	3611	3301	3428	1385	1462	27.0	1217	3061	1.30
Rb	11.2	11.1	7.70	2.48	31.8	25.4	61.8	18.5	8.94	67.4
Ba	95.5	85.0	74.0	168	245	167	376	289	35.6	417
Sr	79.2	81.6	13.9	64.4	254	177	699	342	14.5	329
Y	6.35	7.66	8.88	7.40	20.0	16.0	25.7	21.0	6.60	24.8
Zr	63.8	82.8	90.3	38.4	166	95.8	236	161	57.0	101
Hf	1.73	2.16	2.37	1.14	4.76	2.89	6.47	4.53	1.43	3.62
Nb	7.50	8.59	9.63	3.93	16.9	10.7	25.8	17.9	8.69	33.9
Ta	0.54	0.59	0.63	0.29	1.28	0.69	1.81	1.18	0.57	2.60
Th	1.31	1.64	2.06	0.86	3.62	2.23	5.59	4.30	1.91	4.54
U	0.27	0.36	0.53	0.23	0.89	0.51	1.31	0.93	0.47	0.96
La	7.45	10.4	9.87	3.83	22.4	16.1	33.1	26.2	14.5	29.7
Ce	18.9	24.2	22.5	11.9	51.4	38.6	77.6	59.0	29.7	71.6
Pr	2.53	3.11	3.12	1.89	6.94	5.09	10.0	7.98	3.81	9.40
Nd	11.6	13.4	13.3	9.42	30.0	23.7	44.8	34.9	14.9	41.4
Sm	2.44	2.66	3.18	2.35	6.47	4.66	9.45	7.25	2.96	8.57
Eu	0.87	0.77	0.44	0.58	1.92	1.49	2.72	2.19	0.41	2.54
Gd	2.27	2.30	3.05	2.50	6.28	4.92	8.77	7.00	2.64	8.02
Tb	0.27	0.33	0.38	0.32	0.85	0.62	1.10	0.96	0.30	1.08
Dy	1.41	1.69	2.03	1.65	4.30	3.56	5.84	5.10	1.49	5.55
Ho	0.25	0.28	0.32	0.30	0.80	0.56	1.08	0.89	0.27	1.02
Er	0.59	0.87	0.92	0.74	2.05	1.58	2.69	2.25	0.71	2.55
Tm	0.09	0.10	0.10	0.09	0.26	0.14	0.33	0.29	0.09	0.31
Yb	0.54	0.73	0.86	0.57	1.58	1.18	2.09	1.78	0.51	1.91
Lu	0.06	0.09	0.10	0.07	0.23	0.20	0.27	0.24	0.07	0.25

1.61~3.72, $Mg^{\#}$ 值为 40~85, 反映出岩浆经历了连续演化。 $MgO/FeO = 0.37\sim 3.10$, 平均值 1.92, 属铁质-富铁质的镁铁-超镁铁岩。在 Harker 图解(图 2)上, 随着 MgO 含量的增高, Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 相应地减小; TiO_2 和 Fe_2O_3 (总铁)呈先下降再上升的趋势, 是辉长岩中含较多钛铁矿所致; SiO_2 变化不甚明显, 但 CaO 呈先上升后下降的趋势, 这是因为辉石岩主要由普通辉石($Ca_{39}Mg_{48}Fe_{14}$)组成, 比辉长岩和橄榄岩有更高的 CaO 含量所致。 Cr 与 MgO 呈明显的正相关关系, 表明铬铁矿和橄榄石同为早期结晶的矿物。在 TAS 图解中, 可以看出朱布岩石样品总体属于拉斑玄武岩系列(图 3)。

4.2 稀土元素和微量元素

朱布镁铁-超镁铁岩样品具有类似的稀土元素球粒陨石标准化模式特征, 曲线平直略微右倾, 与拉斑玄武岩的稀土特征非常相似^[4], 轻稀土富集, $(La/Yb)_N = 4.79\sim 20.27$ 。从辉长岩到辉石岩, 再到橄榄岩, 稀土总量逐渐降低; 辉长岩和辉石岩表现出弱的 Eu 负异常, 橄榄岩表现出弱的 Eu 正异常, 而矿体表现出明显的 Eu 负异常, 另外, 朱布样品表现出与峨眉山大火成岩省苦橄岩^[28]相似的稀土元素球粒陨石标准化模式特征(图 4)。

由朱布岩体的微量元素原始地幔标准化曲线(图 5)可看出, Rb 、 Ba 和 Sr 比其他元素变化幅度要大, 这很可能与蚀变过程中它们的强活动性有关。所有样品都有 Nb 弱负异常, 说明地壳物质参与了岩

浆过程; 岩体尤其是矿体还存在明显的 Sr 负异常, 可能与斜长石的析出有关。一些岩体和矿体中存在 Ti 的明显正异常, 是晚期结晶相局部钛铁矿的高度富集造成的。从整体上看, 朱布岩体的样品表现出强不相容元素的明显富集, 这是因为原始地幔产生部分熔融, 熔出一定比例的熔浆, 强不相容元素明显富集于熔体相中^[30], 而这些富集强不相容元素的熔体经过后期的分异演化和侵位作用可能形成了朱布岩体。另外, 朱布样品还表现出与 ELIP 中苦橄岩相类似的特征, 说明两者之间可能存在成因上的联系。

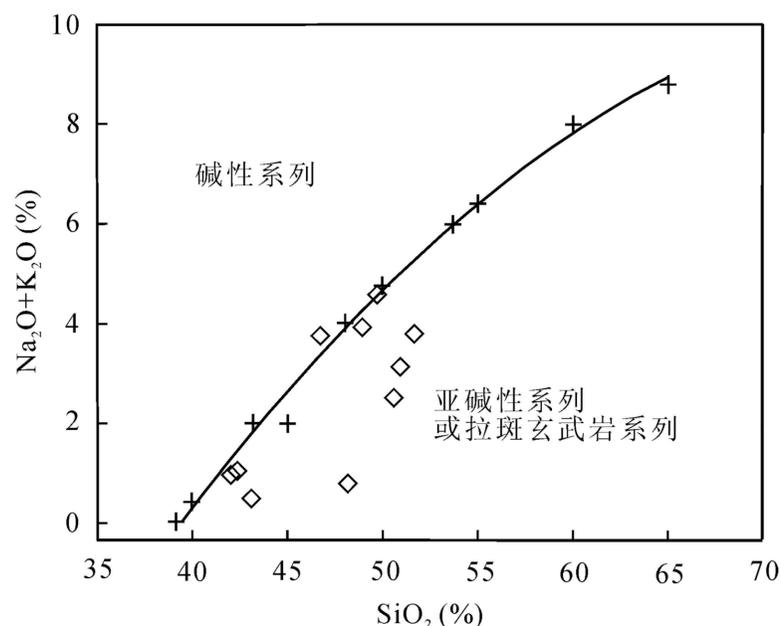


图 3 朱布镁铁-超镁铁岩 TAS 图解

Fig.3 TAS diagram for the Zhubu mafic-ultramafic rocks
图中◇表示朱布样品; +数据引自文献[27]。

◇ represents Zhubu samples; + represents data from reference [27].

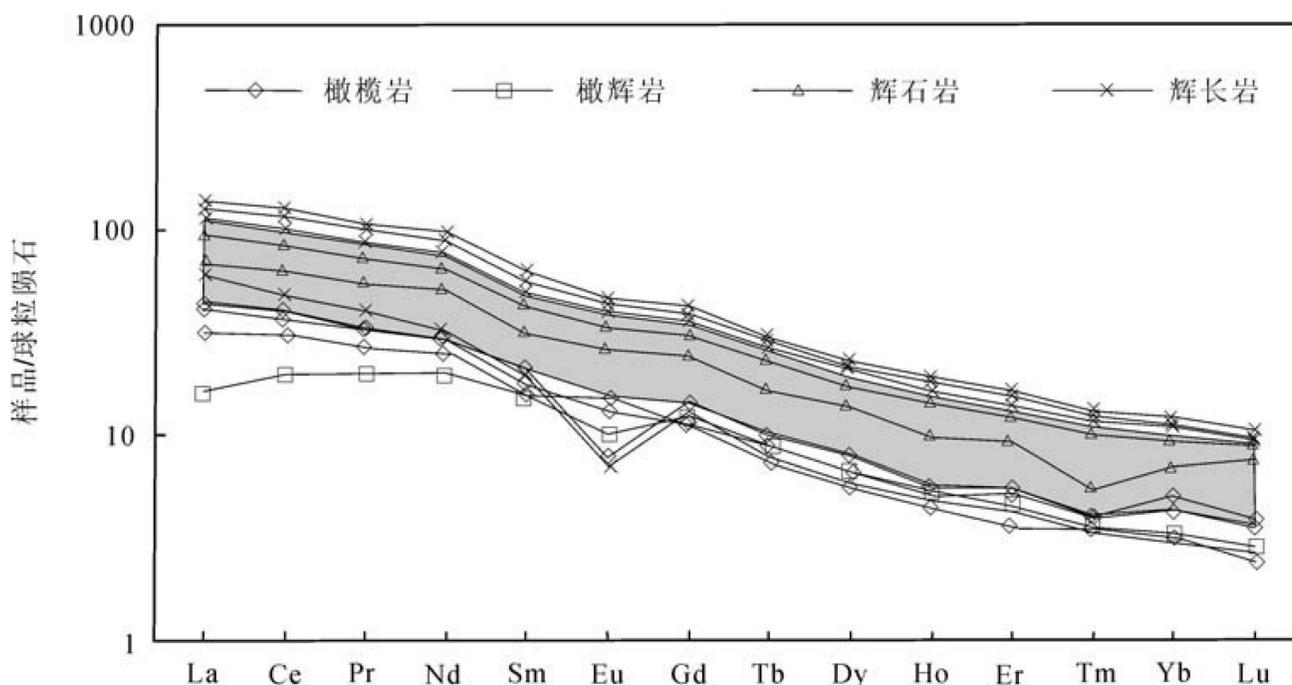


图 4 朱布岩体球粒陨石标准化稀土元素分布模式

Fig.4 Chondrite-normalized REE distribution patterns for the Zhubu intrusion
灰色区域表示峨眉山大火成岩省苦橄岩, 数据引自文献[28], 球粒陨石数据引自文献[29].
The gray areas show picrites in ELIP (from reference [28]), chondrite values from reference [29].

4.3 Cu、Ni、PGE 组成

据表 2, 矿体成矿元素以铂族元素为主, Cu、Ni 为辅。在铂族元素标准化分布模式上(图 6)可以看出, 朱布岩体的分布曲线不是很规则, 矿石样品中 PGE 相对于 Cu、Ni 富集, 反映了岩浆的多期侵入。一些样品表现为 Ru 的正异常, 这可能是样品中所含的铬铁矿造成的^[31-32]。Pd 与 Ir 是铂族元素中地球化学性质差异最大的元素, 其比值可表现出铂族元素的总体分异特征, 具有重要的成因意义。由表 2 可见, 朱布岩体不同类型岩石的 Pd/Ir 比值呈规律性变化, 由橄榄岩→辉石岩→辉长岩, Pd/Ir 比值逐渐增大, 暗示出铂族元素分异逐渐增强。但与国内外典型的 Cu-Ni-PGE 矿床^[33]相比, 朱布岩体的 Pd/Ir 比值还是偏低的, 这可能是由于岩浆经过了分离结晶作用,

早期结晶的铬铁矿中包裹了 IPGE 合金等^[31], 造成较低的 Pd/Ir 比值。

4.4 Sr-Nd 同位素

表 3 列出了朱布岩体的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成, 按岩体的侵位年龄 260 Ma 计算, 得到 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 的变化范围分别为 0.7096~0.7107 和 0.5121~0.5122, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -3.06~ -2.27, 从橄榄岩过渡到辉石岩, 再到辉长岩, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 逐渐增大(表 3)。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(图 7)中, 朱布岩体的数据形成了接近水平的趋势: 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值明显高于“地幔系列”岩石的相应比值, 这可能是蚀变过程中 Rb 和 Sr 的活动性引起的^[34]。朱布岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 数值与峨眉山大陆溢流玄武岩相当, 但初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值明显高于后者(图 7)。

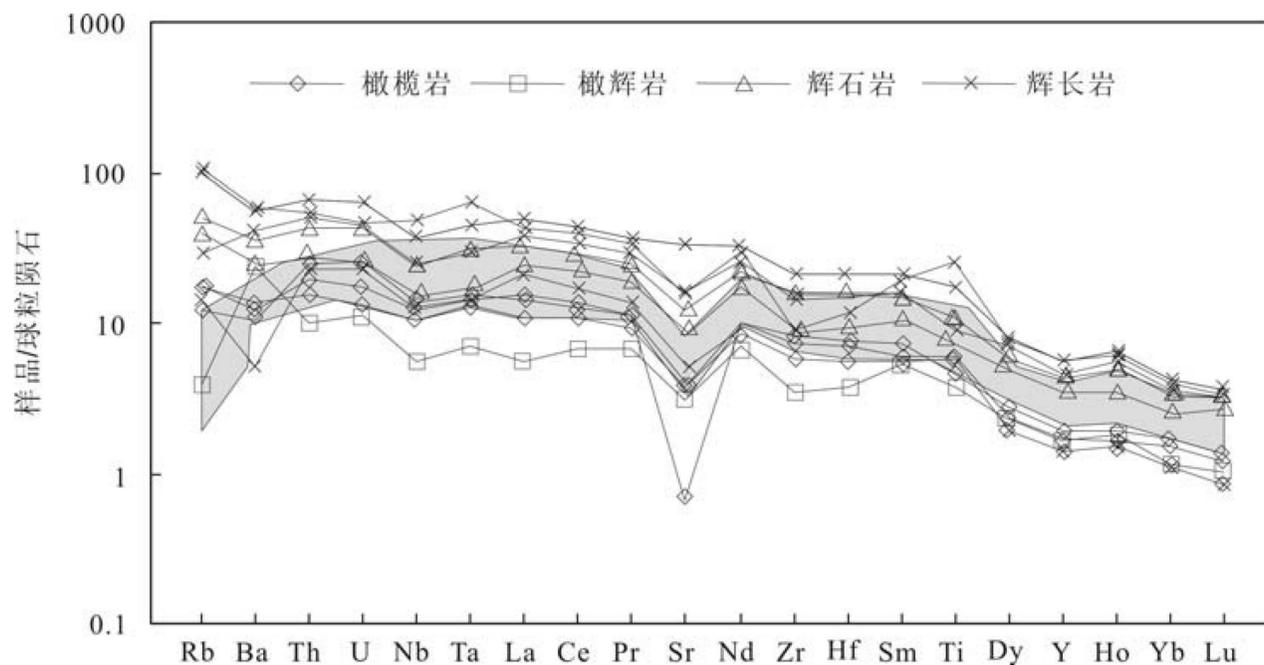


图 5 朱布镁铁-超镁铁岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig.5 Primitive mantle normalized trace element patterns for the Zhubu intrusion

灰色区域表示峨眉山大火成岩省苦橄岩(引自文献[28]), 原始地幔数据引自文献[29]。

The gray areas show picrites in ELIP (from reference [28]), primitive mantle values from reference [29].

表 2 朱布岩体中主要类型岩石及矿石的 Cu、Ni ($\mu\text{g/g}$)、PGE (ng/g)组成

Table 2 Cu, Ni ($\mu\text{g/g}$) and PGE (ng/g) for the rocks and ores of the Zhubu intrusion

样品号 岩性	Z5 橄榄岩	KT31-15 橄辉岩	P4U2 辉石岩	P4-1 辉长岩	P4-2 矿体(橄榄岩)	P4U1 矿体(暗色辉长岩)
Ni	1254	939	323	17.9	1738	1857
Os	2.79	0.81	0.63	0.06	15.3	17.4
Ir	1.68	0.44	0.24	0.08	23.9	37.8
Ru	4.37	0.24	0.45	0.34	12.0	16.3
Rh	0.57	0.21	0.05	0.03	11.9	17.8
Pt	17.6	6.27	0.92	0.47	658	970
Pd	7.06	5.61	2.19	1.21	376	505
Cu	219	154	76.9	29.8	775	695
Ni/Cu	5.73	6.10	4.20	0.60	2.24	2.67
Pd/Ir	4.20	12.75	9.13	15.13	15.73	13.36

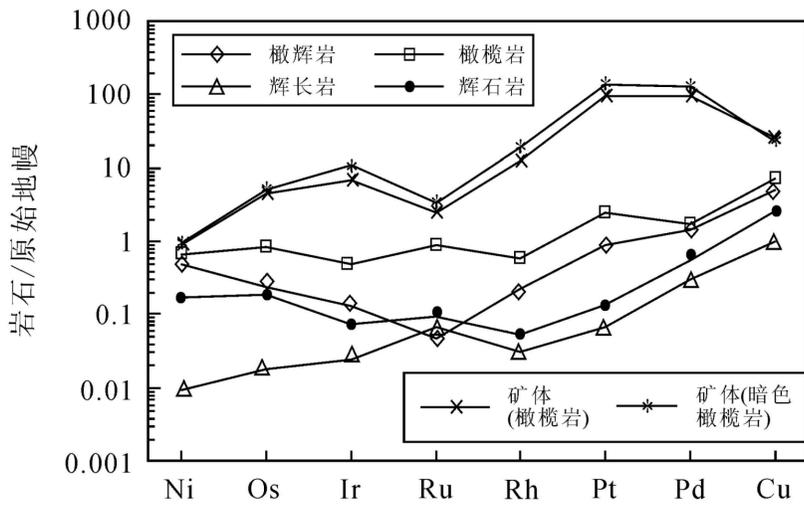


图 6 朱布岩体及矿体 Ni、Cu、PGE 组成的原始地幔标准化分布曲线

Fig.6 Mantle-normalized patterns of Ni-Cu-PGE for ores and barren rocks of the Zhubu intrusion
原始地幔 Ni、Cu、PGE 数据引自文献[29].

The contents of Ni, Cu and PGE in primitive mantle are from reference [29].

5 讨论

5.1 原始岩浆性质

ELIP 中含硫化物镁铁-超镁铁质岩体的岩浆一般源自相对难熔地幔源区的较高程度部分熔融,母质岩浆类似于低钛系列苦橄岩^[4],而朱丹等^[16]认为朱布岩体附近的一些细晶基性岩脉本身有高 MgO 或 Mg[#]特征,可代表朱布岩体的母岩浆,其地球化学特征与峨眉山高钛玄武岩相同。

从稀土元素球粒陨石标准化分布模式(图 4)可以看出,除 Eu 外,表现为近于平行的向右倾斜曲线,微量元素蛛状图上近于一致的曲线(图 5),以及非常

相似的高(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i、低 ε_{Nd}(t)值特征(图 7)均表明朱布岩体为同源岩浆结晶分异演化的产物。通常,对镁铁-超镁铁质岩体原始岩浆成分的估计以 Fe、Mg 在橄榄石与平衡岩浆中的分配系数为基础,根据橄榄石成分及岩体成分演化趋势进行估算^[35]。朱布橄橄榄岩中存在橄榄石堆晶现象及岩体中硫化物含量较低,满足估算条件^[33],根据张招崇等^[36]判别原始岩浆的方法,计算得到朱布母岩浆 MgO/FeO = 0.92,介于各岩石类型之间(0.37~3.10),借鉴陶琰等^[37]估算原始岩浆的方法,得到朱布熔体的 MgO = 12.4%, FeO = 13.5%, SiO₂ = 45.4%, CaO = 9.81%, Al₂O₃ = 7.80%。据 La Bas^[38]高镁质火成岩分类,属苦橄质岩浆。

5.2 地壳混染

朱布岩体强烈分异的稀土特征,相对低的 ε_{Nd}(t)值和高的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值表明源区岩浆遭到了地壳混染^[39]。(Nb/Th)_{PM} 常被用来指示 Nb 异常,而 (Th/Yb)_{PM} 是地壳混染的敏感指示剂。与 N 型洋中脊玄武岩(N-MORB)相比,朱布岩体的样品具有低(Nb/Th)_{PM} 比值、高(Th/Yb)_{PM} 比值,与较高度度的地壳混染一致(图 7)。通过假定岩石成分是由幔源岩浆和地壳混染物相互混合的产物,可以估计地壳混染程度。对于幔源端元,我们应用两种成分,其一是 N-MORB^[34],另一个 ELIP 中的苦橄岩^[28]。对于地壳端元,我们运用了朱布岩体的云英片麻岩围岩^[16]。结果发现苦橄岩作为地幔端元与朱布样品的数据产生了较好的拟合(图 8),从该模型也可以看出,朱布岩体的样品受到了较强的地壳混染,在 3%~20%之间。

表 3 朱布岩体 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成

Table 3 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions of the Zhubu intrusion

岩性编号	Z5	P4U2	V3-6	V2	P4-1
岩性	橄橄榄岩	辉石岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩
Rb (μg/g)	30.83	30.05	16.17	57.46	32.09
Sr (μg/g)	374.10	268.40	312.00	673.90	135.50
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.2371	0.3224	0.1493	0.2455	0.6824
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.710776	0.711394	0.711244	0.710499	0.713265
2σ	0.000010	0.000011	0.000011	0.000010	0.000012
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.709899	0.710201	0.710692	0.709591	0.710741
Sm (μg/g)	3.60	8.61	7.94	9.35	9.23
Nd (μg/g)	20.05	35.25	36.03	44.38	43.71
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1087	0.1479	0.1334	0.1275	0.1279
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512331	0.512416	0.512414	0.512393	0.512394
2σ	0.000015	0.000011	0.000011	0.000011	0.000011
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	0.512146	0.512162	0.512185	0.512175	0.512175
ε _{Nd} (t)	-3.06	-2.71	-2.27	-2.47	-2.46

注: ε_{Nd}(t)计算中 t 取 260 Ma。

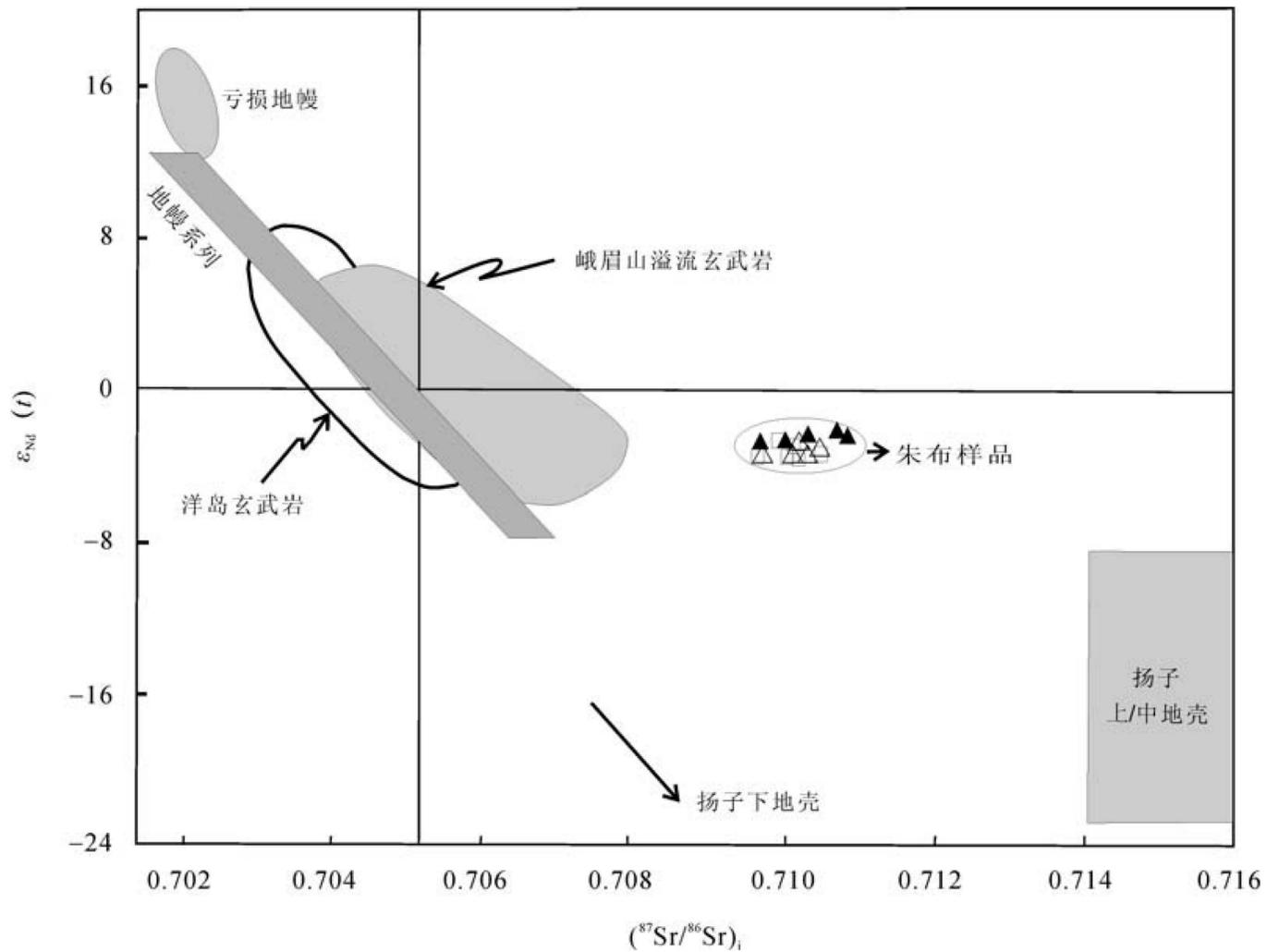


图 7 朱布岩体的 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解(底图据文献[23])

Fig.7 Plots of $\epsilon_{Nd}(t = 260 \text{ Ma})$ values versus initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios of rocks from Zhubu intrusion (modified from reference [23])

▲为本文数据; △引自文献[23]。

Data sources: ▲ this paper; △ from reference [23].

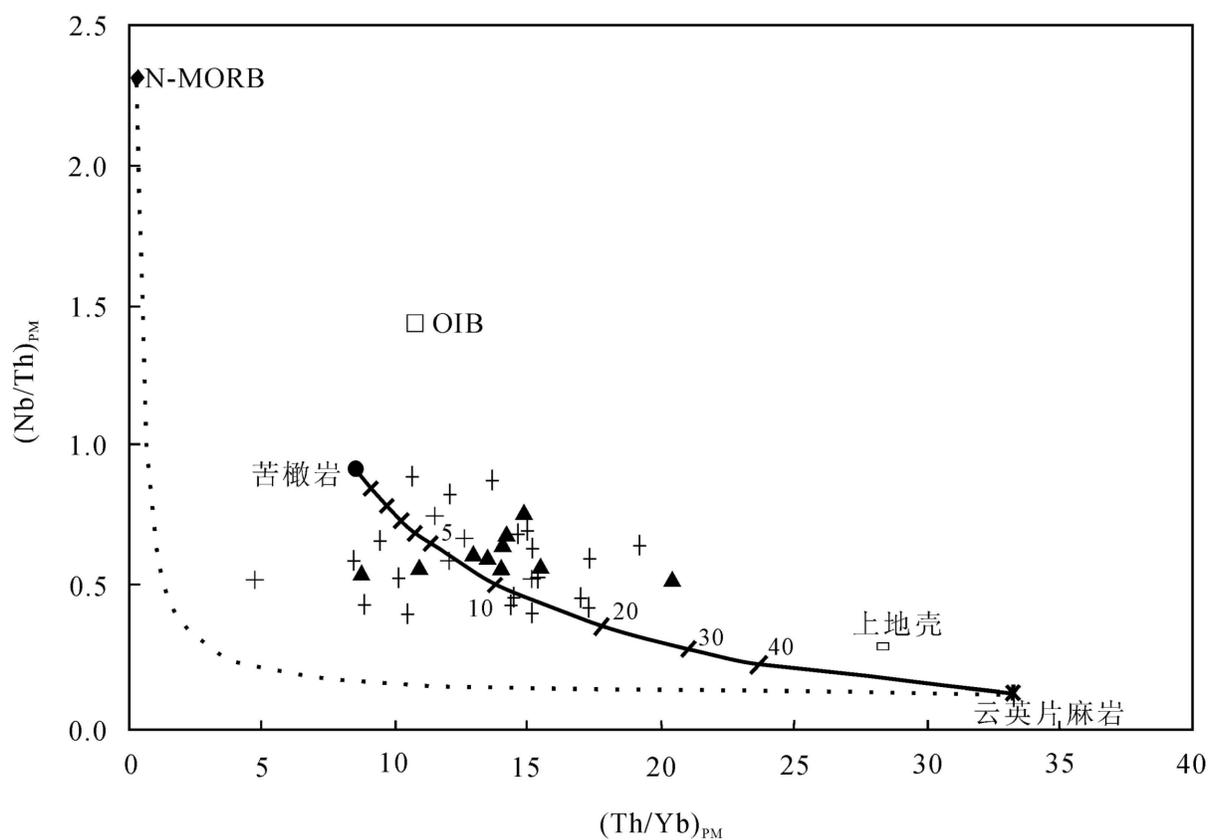


图 8 朱布岩体的 $(Th/Yb)_{PM} - (Nb/Th)_{PM}$ 图解(底图据文献[18])

Fig.8 $(Th/Yb)_{PM}$ versus $(Nb/Th)_{PM}$ diagram showing the degree of crustal contamination of the Zhubu rocks (from reference [18])
N-MORB 和 OIB 数值据文献[29]; 峨眉山大火成岩省苦橄岩数据引自文献[28]; 上地壳数据引自文献[40]; 云英片麻岩数据引自文献[16]; 朱布数据: ▲本研究, +引自文献[16]。

N-MORB and OIB values from reference [29]; Emeishan picrites values from reference [28]; upper crust values from reference [40]; greisen-gneisses values from reference [16]; Zhubu samples: + from reference [16], ▲ from this study.

5.3 成岩成矿作用

陶琰等^[22]认为朱布岩体为未经深部硫化物熔离分异的岩浆侵位,在岩体冷凝过程中结晶分异和硫化物熔离成矿,矿体产状受温度梯度和浓度扩散所控制,形成岩体边部漏斗状的 Cu-Ni-PGE 硫化物结果,朱丹等^[15]认为边缘矿层是 Soret 分异(指在热梯度作用下,处于化学平衡状态的液相系统中某些组分自发产生浓度梯度的过程,也称为热扩散)作用的产物。

通过前文 5.1 节对朱布岩体原始岩浆性质的讨论,得出其母岩浆为苦橄质熔体,运用陶琰等^[20]计算熔离硫化物及熔离后岩浆中成矿元素含量的方法,发现在岩浆与熔离硫化物的比例 $R = 1000 \sim 5000$ 时与朱布样品的实际测定值比较吻合(图 9),而且较低的硫化物含量也符合样品的真实情况。许多研究者认为在岩浆通道和熔岩通道环境的开放系统中,硫化物很容易和流经的多脉动岩浆相互反应,通过多级富集过程可得到高 R 值,许多矿床便是例证,如 Noril'sk Ni-Cu-PGE 矿床^[41]、Voisey 湾 Ni-Cu-Co 矿床^[42]、金宝山铂钯矿^[11]等。综上所述,我们认为朱布岩体可能为一开放的岩浆房,原始岩浆在上升至

朱布岩浆房的过程中经历过不同程度的地壳混染,到达岩浆房以后,由于压力、温度等条件的变化,在浓度扩散作用下在岩浆房边部开始熔离出硫化物,当新的硫不饱和岩浆再经过朱布岩浆房时,其中的 PGE 及 Cu、Ni 等元素被硫化物吸收,由于 PGE 和 Cu、Ni 在硫化物和硅酸盐岩浆之间分配系数的巨大差别,导致了硫化物中 PGE 比 Cu、Ni 富集得多,在新岩浆经过朱布岩浆房时,也同时存在着对流、堆晶和岩浆演化作用,边部的某些硫化物也有可能随新岩浆一起参与上述过程,最终当朱布岩浆房的出口被封死,对流、堆晶、岩浆演化都稳定时,这些硫化物便以“上悬矿”的形式出现在其中,堆晶岩即形成了橄榄岩,演化岩浆形成了辉长岩,中间过渡为橄辉岩和辉石岩。在后期构造运动作用下,朱布开放岩浆房被抬升,后经各种侵蚀出露于地表。

6 结 论

朱布镁铁-超镁铁岩体是峨眉山大火成岩省构造岩浆活动的产物,具有拉斑玄武岩系列特征,原始岩浆为苦橄质成分,岩浆在上升过程中经历了 3%~20% 的地壳混染,到达朱布开放岩浆房时由于

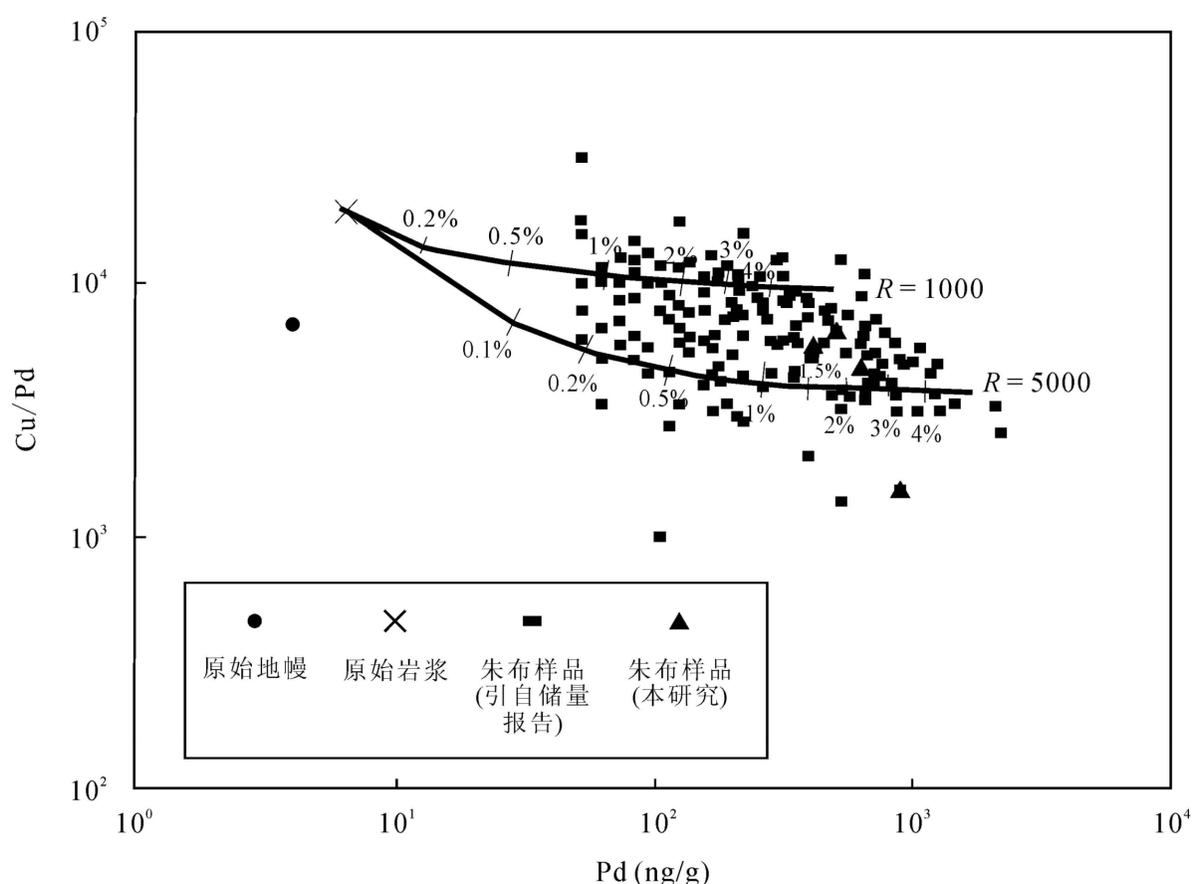


图 9 硫化物熔离模式计算 Cu/Pd-Pd 图

Fig.9 Cu/Pd versus Pd of sulfide from the modeling of segregation
原始地幔数据引自文献[40]。

The data of primitive mantle are from reference [40].

压力、温度等条件的变化,在浓度扩散作用下在岩浆房边部开始熔离出硫化物,随着多期次岩浆的涌过,再经过多级富集过程,硫化物中具有高 PGE 含量,岩浆房中同时存在堆晶和岩浆演化作用,分别形成下部橄榄岩和上部的辉长岩,中间则过渡为橄辉岩和辉石岩。

参考文献(References):

- [1] Pirajno F. Hotspots and mantle plumes: Global intraplate tectonics, magmatism and ore deposits [J]. *Mineral Petrol*, 2004, 82(3/4): 183–216.
- [2] 钟宏, 朱维光, 漆亮, 周美夫, 宋谢炎, 张贻. 攀西地区峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征[J]. *科学通报*, 2006, 51(11): 1297–1304.
Zhong Hong, Zhu Weiguang, Qi Liang, Zhou Meifu, Song Xieyan, Zhang Yi. Platinum-group element (PGE) geochemistry of the Emeishan basalts in the Pan-Xi area, SW China [J]. *Chinese Sci Bull*, 2006, 51(7): 845–854.
- [3] Chung Sun-lin, Jahn Bor-ming. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23(10): 889–892.
- [4] Xu Yigang, Chung Sun-lin, Jahn Bor-ming, Wu Genyao. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. *Lithos*, 2001, 58(3/4): 145–168.
- [5] Xu Yi-gang, He Bin, Chung Sun-lin, Menzies M A, Frey F A. Geologic, geochemical and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province [J]. *Geology*, 2004, 32(10): 917–920.
- [6] 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1–466.
Zhang Yun-xiang, Luo Yao-nan, Yang Chong-xi. Panzhihua-Xichang Rift [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1–466 (in Chinese).
- [7] Zhong Hong, Zhou Xin-hua, Zhou Mei-fu, Sun Min, Liu Bing-guang. Platinum-group element geochemistry of the Hongge Fe-V-Ti deposit in the Pan-Xi area, southwestern China [J]. *Mineral Deposit*, 2002, 37(2): 226–239.
- [8] Zhong Hong, Yao Yong, Prevec S A, Wilson A H, Viljoen M J, Viljoen R P, Liu Bing-Guang, Luo Yao-Nan. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China [J]. *Chem Geol*, 2004, 203(3/4): 237–252.
- [9] 杨廷祥. 云南省弥渡县金宝山铂钯矿典型矿床研究报告[R]. 云南省地矿局第三地质大队, 1989: 1–235.
Yang Ting-xiang. The research report on the Jinbaoshan Pt-Pd deposit in Midu Country, Yunnan Province [R]. The Third Geological Group of Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1989: 1–235 (in Chinese with English abstract).
- [10] Tao Yan, Li Chusi, Hu Ruizhong, Ripley E M, Du Andao, Zhong Hong. Petrogenesis of the Pt-Pd mineralized Jinbaoshan ultramafic intrusion in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2007, 153(3): 321–337.
- [11] Wang Christina Yan, Zhou Mei-fu, Qi Liang. Origin of extremely PGE-rich mafic magma system: An example from the Jinbaoshan ultramafic sill, Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2010, 119(1/2): 147–161.
- [12] 马言胜, 陶琰, 钟宏, 王兴阵. 云南金宝山含铂钯超镁铁质侵入体中铬铁矿的成因研究[J]. *矿物学报*, 2007, 27(3): 342–350.
Ma Yan-sheng, Tao Yan, Zhong Hong, Wang Xing-zhen. Genetic research on chromite from the Pt-Pd-bearing ultramafic intrusions in Jinbaoshan, Yunnan [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2007, 27(3): 342–350 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王登红, 楚萤石, 罗辅勋, 卢治安. 杨柳坪铜-镍-铂族元素矿床的矿化类型及意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4): 323–325.
Wang Deng-hong, Chu Ying-shi, Luo Fu-xun, Lu Zhi-an. The significance and mineralization type of the Yangliuping Cu-Ni-PGE deposit [J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2000, 19(4): 323–325 (in Chinese).
- [14] Song Xie-yan, Zhou Mei-fu, Cao Zhi-min, Sun Min, Wang Yun-liang. Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China [J]. *Mineral Deposit*, 2003, 38(7): 831–843.
- [15] 朱丹, 罗泰义, 宋谢炎, 徐义刚, 陶琰, 黄智龙. 基性-超基性岩浆成岩和成矿过程中 Soret 效应的研究进展[J]. *矿物学报*, 2007, 27(3/4): 265–272.
Zhu Dan, Luo Tai-yi, Song Xie-yan, Xu Yi-gang, Tao Yan, Huang Zhi-long. Advances in research on Soret effects in petrogenesis and metallogenesis of mafic-ultramafic rocks [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2007, 27(3/4): 265–272 (in Chinese with English abstract).
- [16] 朱丹, 徐义刚, 罗泰义, 宋谢炎, 陶琰, 黄智龙, 朱成明, 蔡恩照. 峨眉山玄武岩的输送通道: 云南元谋朱布岩体[J]. *矿物学报*, 2007, 27(3/4): 273–280.
Zhu Dan, Xu Yi-gang, Luo Tai-yi, Song Xie-yan, Tao Yan, Huang Zhi-long, Zhu Cheng-ming, Cai En-zhao. Conduit of the Emeishan basalts: The Zhubu mafic-ultramafic intrusion in the Yuanmou area of Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2007, 27(3/4): 273–280 (in Chinese with English abstract).
- [17] Wang Christina Yan, Zhou Mei-fu. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China [J]. *Mineral Deposit*, 2006, 41(8): 771–783.
- [18] Wang Christina Yan, Zhou Mei-fu, Keays R R. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 152(3): 309–321.
- [19] Sun Xiaoming, Wang Shengwei, Sun Weidong, Shi Guiyong, Sun Yali, Xiong Dexin, Qu Wenjun, Du Andao. PGE geochemistry and Re-Os dating of massive sulfide ores from the Baimazhai Cu-Ni deposit, Yunnan Province, China [J]. *Lithos*, 2008, 105(1/2): 12–24.
- [20] 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 罗泰义. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成岩成矿分析[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2785–2800.
Tao Yan, Hu Rui-zhong, Qi Liang, Luo Tai-yi. Geochemical characteristics and metallogenesis of the Limahe ma-

- fic-ultramafic intrusion, Sichuan [J]. *Acta Petrol Sinica*, 23(11): 2785–2800 (in Chinese with English abstract).
- [21] 马言胜, 陶琰, 朱飞霖, 王兴阵. 金宝山铂-钯矿和力马河镍矿的硫同位素组成特征及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2009, 28(2): 123–127.
Ma Yan-sheng, Tao Yan, Zhu Fei-lin, Wang Xing-zhen. The sulfur isotopic characteristics and geological significance of Jinbaoshan Pt-Pd deposit and Limahe nickel deposit [J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2009, 28(2): 123–127 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陶琰, 胡瑞忠, 王兴阵, 朱丹, 宋谢炎, 冯家毅. 峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 成矿作用——几个典型矿床岩石地球化学特征分析[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, 25(3): 236–244.
Tao Yan, Hu Rui-zhong, Wang Xing-zhen, Zhu Dan, Song Xie-yan, Feng Jia-yi. The Cu-Ni-PGE mineralization in the Emeishan Large Igneous Province — Geochemical study on some typical deposits [J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2006, 25(3): 236–244 (in Chinese with English abstract).
- [23] Zhou Mei-fu, Arndt N T, Malpas J, Wang Christina Yan, Kennedy A K. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2008, 103(3/4): 352–368.
- [24] He Bin, Xu Yi-gang, Huang Xiao-long, Luo Zhen-yu, Shi Yu-ruo, Yang Qi-jun, Yu Song-yue. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 255(3/4): 306–323.
- [25] 王登红, 骆耀南, 屈文俊, 李云泉, 傅德明, 李佑国, 李纯杰, 陈振宇, 付小方. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 253–254.
Wang Deng-hong, Luo Yao-nan, Qu Wen-jun, Li Yun-quan, Fu De-ming, Li You-guo, Li Chun-jie, Chen Zhen-yu, Fu Xiao-fang. *Geology, Geochemistry and Prospecting of PGE Deposits in SW China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 253–254 (in Chinese).
- [26] Qi Liang, Grégoire D C. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *J Geostand Geoanal*, 2000, 24(1): 51–63.
- [27] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Can J Earth Sci*, 1971, 8(5): 523–548.
- [28] 张招崇, Mahoney J J, 王福生, 赵莉, 艾羽, 杨铁铮. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部熔融的证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1538–1552.
Zhang Zhao-chong, Mahoney J J, Wang Fu-sheng, Zhao Li, Ai Yu, Yang Tie-zheng. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China: Evidence for a plume-head origin [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(6): 1538–1552 (in Chinese with English abstract).
- [29] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process [J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 42: 313–345.
- [30] 赖绍聪. 秦岭造山带勉略缝合带超镁铁质岩的地球化学特征[J]. *西北地质*, 1997, 18(3): 36–45.
Lai Shao-cong. Geochemical features of the ultramafic rocks in Mianlue suture zone, Qingling orogenic belt [J]. *Northwest Geol*, 1997, 18(3): 36–45 (in Chinese with English abstract).
- [31] Capobianco C J, Hervig R L, Drake M J. Experiments on crystal/liquid partitioning of Ru, Rh and Pd for magnetite and hematite solid solutions crystallized from silicate melts [J]. *Chem Geol*, 1994, 113(1/2): 23–43.
- [32] Puchtel I S, Humayun M. Platinum group element fractionation in a komatiitic basalt lava lake [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65(17): 2979–2993.
- [33] Naldrett A J. *Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration* [M]. New York: Springer, 2004: 388–389.
- [34] Rollinson H. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation and Interpretation* [M]. Singapore: Longman Press, 1993: 351–352.
- [35] Chai Gang, Naldrett A J. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma [J]. *Petrology*, 1992, 33(2): 277–303.
- [36] 张招崇, 王福生. 一种判别原始岩浆的方法——以苦橄岩和碱性玄武岩为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(2): 130–134.
Zhang Zhao-chong, Wang Fu-sheng. A method for identifying primary magma — Examples from picrite and alkali basalts [J]. *J Jilin Univ (Earth Sci ed)*, 2003, 33(2): 130–134 (in Chinese with English abstract).
- [37] 陶琰, 高振敏, 罗泰义, 祁敬东, 禾英军, 杨廷祥. 云南金宝山超镁铁岩原始岩浆成分反演[J]. *岩石学报*, 2002, 18(1): 70–82.
Tao Yan, Gao Zhen-min, Luo Tai-yi, Qi Jing-dong, He Ying-jun, Yang Ting-xiang. Inversion of primary magma composition for Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2002, 18(1): 70–82 (in Chinese with English abstract).
- [38] La Bas M J. IUGS reclassification of the High-Mg and picritic volcanic rocks [J]. *Petrology*, 2000, 41(10): 1467–1470.
- [39] Xu Ji-feng, Suzuki K, Xu Yi-gang, Mei Hou-jun, Li Jie. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts: Insights into the source of a large igneous province [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71(8): 2104–2119.
- [40] Taylor S R, Mclennan S M. *The Continental Crust: Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 209–272.
- [41] Naldrett A J, Lightfoot P C. Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk region, Siberia: Their formation in conduits for flood basalt volcanism [J]. *Geol Assoc Can Short Course Note*, 1999, 13: 195–249.
- [42] Li C, Naldrett A J. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: Reaction of olivine with sulfide and silicate liquids [J]. *Lithos*, 1999, 47(1/2): 1–31.