

文章编号:1000-4734(2007)03-0273-08

峨眉山玄武岩的输送通道:云南元谋朱布岩体

朱丹^{1,2}, 徐义刚², 罗泰义¹, 宋谢炎¹, 陶琰¹, 黄智龙¹, 朱成明³, 蔡恩照³

(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 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;

3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要:朱布镁铁-超镁铁侵入岩赋存有中型硫化物铂族元素矿床。根据岩体大小和矿床储量的简单质量平衡计算,矿床的形成需要至少3000倍现存岩体体积的岩浆参与成矿,因此朱布岩体应该是峨眉山玄武岩的输送通道。岩体的年龄、地质特征、地球化学都支持这个结论。岩体的原始岩浆应该属于峨眉山高钛玄武岩。

关键词:镁铁-超镁铁岩;橄榄岩;输送通道;朱布

中图分类号:P574.2; P581; P588 **文献标识码:**A

作者简介:朱丹,男,1970年生,博士,副研究员,主要从事矿物、岩石和矿床学研究。

地幔柱成矿系统中,岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床是最重要成矿作用之一,世界上许多重要的岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床的成矿岩体,如布什维尔德、诺里尔斯克、大岩墙和 Duluth Complex 等都被认为是地幔柱岩浆活动的产物。峨眉山大火成岩省岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿化岩体广泛分布,构成了峨眉山地幔柱成矿系统中一个非常重要的成矿系列^[1]。云南元谋地区朱布岩体是一个中型硫化物铜镍型铂钯矿床^[2],独特的成矿模式的提出^[3],引起了广泛的重视。不过朱布岩体成岩学、地球化学的研究还很薄弱,需要深入的研究。

1 地质背景

朱布基性-超基性岩体呈不对称的漏斗状不整合侵入前震旦系苴林群变质岩(云英片麻岩)中。岩体辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为(256.0 ± 1.0) Ma^[4],与峨眉山玄武岩年龄一致^[5]。平面呈椭圆形,南北长 750 m,东西宽 400 m,已控制垂深 580 m,尚未尖灭;岩体北端横剖面呈“U”形,南端呈“O”形,中段横剖面上宽下窄,最深部位偏于西侧,宽不到 20 m。

岩体北、西、南三面接触带产状都很陡:将近

直立至向外倒转。其中西面大部分地段是断层接触,断层在接触带附近通过,仍大体可代表原接触带产状。东接触带倾向西,浅部倾角 50°~60°,向深部逐渐变陡至直立^[6](图 1)。

岩体外接触带有一厚 1 至数米的角岩带,岩石主要由斜长石、石英及少量黑云母组成,细粒结构。内接触带有一厚 2 m 左右的混染辉长岩带,岩石主要由辉石、斜长石及少量石英组成,次为黑云母及钛铁矿(混染辉长岩为地质队命名)。岩体中的主要矿体——边部矿体则在内接触带沿岩体呈皮壳状分布,仅局部地区稍偏入岩体内部,或偏入外接触带。

岩体垂直分带明显,除边部混染带和矿体外,自上而下可分为:辉长岩带,辉石岩带,橄榄辉石岩带和单辉橄榄岩带(图 1)。

2 岩石化学及地球化学特征

2.1 岩相学及矿物学

单辉橄榄岩带:构成岩体的主体,约占岩体体积的 2/3,分布于岩体西侧及深部。主要为中-粗粒单辉橄榄岩,主要由贵橄榄石(F_{083-84})和普通辉石组成,其次为古铜辉石、角闪石、黑云母及拉长石,矿物成分见表 1。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。

收稿日期:2007-06-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(编号:2007CB411401);国家自然科学基金(批准号:40572054; 40274027; 40573020)

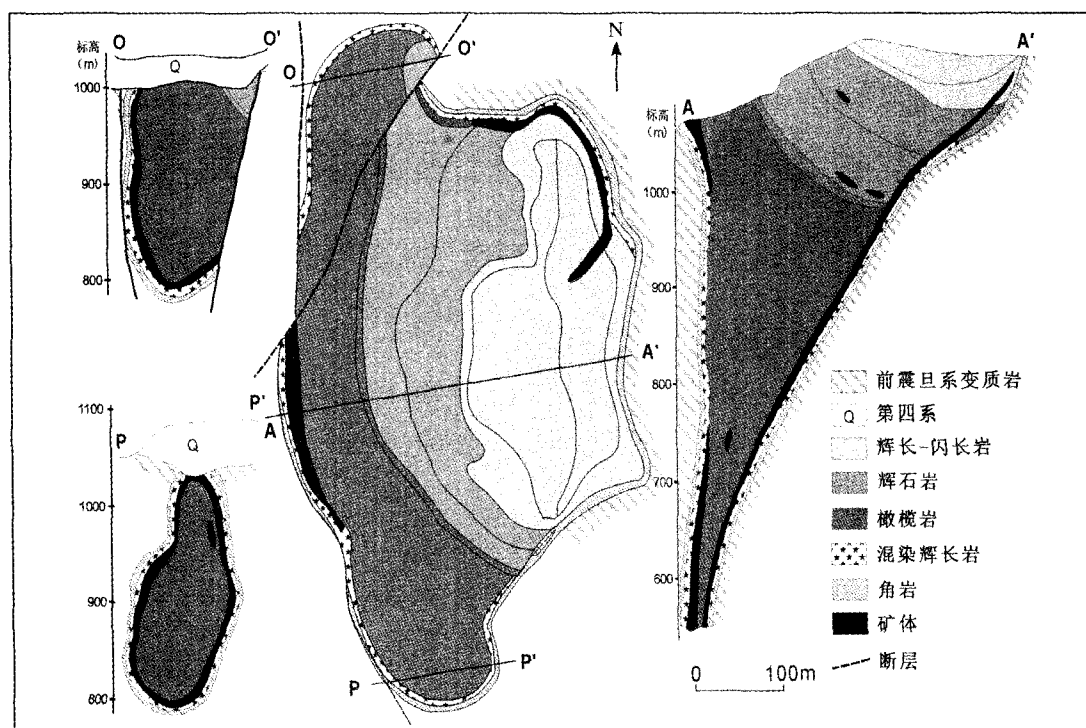


图1 朱布基性-超基性岩体地质图(根据文献^[6], 矿体厚度经过放大)

Fig. 1. Geological map of the mafic-ultramafic intrusion.

橄榄辉石岩带:为单辉橄榄岩带与辉石岩带的过渡岩带,厚度5m左右。

辉石岩带:厚110m。以细粒结构为特点。岩石主要由普通辉石组成,含少量橄榄石和古铜辉石。原角闪石、斜长石和黑云母含量少。副矿物为钛铁矿、钛磁铁矿等。普通辉石强烈阳起石化。

辉长岩带:分为暗色和中色辉长岩带。暗色辉长岩带厚20m,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,斜长石常具有带状构造,为钠长石和更长石;中色辉长岩带厚40m,分布于岩体中段顶部,岩性与暗色辉长岩相同,但斜长石增加,并含少量石英,斜长石为中长石,常具带状构造,岩石近于闪长结构^[6]。

2.2 镁铁-超镁铁岩岩石化学特征

朱布镁铁-超镁铁岩的岩石化学成分见表2。朱布橄榄岩的全岩烧失量很高,这表明橄榄岩成岩后经历了很强的水热改造,这与金川橄榄岩和含辉橄榄岩相似(烧失量>10%)^[8]。朱布超镁铁岩均富MgO(28%~33%),贫K₂O和Na₂O,在富镁且单斜辉石含量少的样品中这些氧化物含量非常低。由于强烈蚀变的原因,主量元素与MgO(或

者Mg[#])相关关系不是很好。但大体上TiO₂、Al₂O₃、Na₂O与MgO表现为负相关关系,表明朱布超镁铁岩带为堆晶形成。Cr₂O₃与MgO的正相关表明橄榄石与铬尖晶石是共结相,铬尖晶石表现为自形晶也说明了此点。SiO₂和FeO与MgO只有一弱的负相关关系,岩浆结晶铬尖晶石、磁铁矿等含铁矿物在橄榄石粒间的不均一性分布影响了Fe-Mg的相关性,橄榄石的蛇纹石化影响了Si-Mg相关性。K₂O和CaO与MgO没有表现出相关性,表明这两种元素受后期热液改造强烈。

2.3 镁铁-超镁铁岩微量元素和铂族元素地球化学特征

微量元素和铂族元素结果见表2。稀土和蜘蛛网图见图2。朱布岩体的围岩云英片麻岩显示强亏损Sr、Eu和强富集U、Th特征。朱布岩体的岩石(橄榄岩、辉石岩和辉长岩)、矿体(上悬矿体和边缘矿体)与围岩有相同的微量元素特征,表明岩体在整体上都受到围岩的强烈混染。而混染辉长岩和岩体附近的细晶基性岩脉这种特征却不明显,因此岩体边缘的边缘岩相带是围岩混染的这个结论,还值得推敲,需要其它机制解释^[3],这不是本文的主要讨论的内容,我们将另文讨论。岩

表 1 朱布超镁铁岩矿物成分 ($w_B/\%$)

Table 1. The mineral composition of the ultramafic rocks at Zhubu

矿物	样品号	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	总和	Fo
橄榄石	ZHBZ5-1		0.21	14.97				0.10	45.73		37.86		98.85	0.84
橄榄石	ZHBZ5-2		0.22	15.66				0.11	45.80		37.79		99.58	0.84
橄榄石	ZHBZ5-3		0.23	15.42				0.11	45.69		37.74		99.19	0.84
橄榄石	ZHBZ5-4		0.20	15.72				0.11	45.40		37.60		99.03	0.84
橄榄石	ZY4-1		0.31	16.15				0.63	44.46		38.18		99.73	0.83
橄榄石	ZY4-2		0.33	16.16				0.19	44.79		38.24		99.71	0.83
橄榄石	ZY4-3		0.18	16.03				0.27	44.95		38.33		99.76	0.83
橄榄石	ZY4-4		0.27	16.10				0.24	44.76		38.24		99.61	0.83
橄榄石	ZY4-5		0.36	15.52				0.19	45.38		38.13		99.58	0.84
橄榄石	K36-1-1		0.32	15.75				0.19	44.80		38.50		99.56	0.84
橄榄石	K36-1-2		0.34	15.43				0.23	44.97		38.63		99.60	0.84
橄榄石	K36-1-3		0.27	16.70				0.20	44.31		38.05		99.53	0.83
橄榄石	K36-1-4		0.29	15.88				0.22	45.05		38.36		99.80	0.83
橄榄石	K36-1-5		0.29	15.80				0.13	44.78		38.58		99.58	0.83
橄榄石	K36-1-6		0.31	15.90				0.23	44.73		38.37		99.54	0.83
橄榄石	K36-1-7		0.23	15.53				0.12	45.04		38.78		99.70	0.84
橄榄石	K36-1-8		0.31	15.79				0.18	44.59		38.73		99.60	0.83
普通辉石	ZHBZ5-1	0.83	0.10	5.09	0.23	0.00	1.69	20.92	17.97	0.78	53.13		100.73	
普通辉石	ZHBZ5-2	0.64	0.14	5.05	0.19	0.00	1.22	20.52	18.73	0.67	53.31		100.46	
普通辉石	ZHBZ5-3	0.59	0.13	5.18	0.25	0.01	2.70	21.54	17.18	1.32	51.36		100.26	
普通辉石	ZHBZ5-4	0.58	0.11	5.25	0.25	0.01	2.15	21.33	17.67	1.07	51.44		99.85	
古铜辉石	ZY4-4	0.10	0.21	10.65	0.60	0.10	2.23	1.06	30.68	0.46	53.62		99.71	
普通辉石	K36-1-2	0.64	0.18	4.73	1.03		2.34	19.49	18.72	0.62	52.24		99.99	
钛铁矿	ZHBZ5-2	0.08	0.99	24.87			0.02	0.01	3.34	50.65	0.04	17.29	97.27	
钛铁矿	ZHBZ5-3	0.09	0.91	24.37			0.01	0.02	3.70	51.01	0.01	17.28	97.40	
钛铁矿	WT2-C-4	0.70	2.77				0.70		3.51	44.29	0.65	47.32	99.94	
铬铁矿	ZY4-3	19.54					3.59		1.08	1.12	0.64	74.03	100.00	
铬铁矿	WT2-C-1	22.93					0.57		0.91	0.96	0.35	74.10	99.82	
铬铁矿	ZY4-1	24.48					7.41		2.20	3.75		61.78	99.62	
铬铁矿	WT2-C-3	26.20			0.53		0.22		0.66	0.78	0.26	71.35	100.00	
铬铁矿	ZY4-2	29.71	0.47		0.65		7.61		2.61	1.50	0.44	56.20	99.19	
铬铁矿	ZY4-4	29.71	0.47		0.65		7.61		2.61	1.50	0.44	56.20	99.19	
铬铁矿	K36-1-1	32.16		51.08			10.51		4.01	1.28	0.54		99.58	
铬铁矿	K36-1-2	32.16		51.08			10.51		4.01	1.28	0.54		99.58	
铬铁矿	ZHBZ5-1	37.90	0.00	19.27			7.87	0.06	8.42	4.32	0.05	19.70	97.58	
铬铁矿	WT2-C-2	38.38					7.87		2.68	1.64	0.45	48.24	99.26	

注: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电子探针分析室周国富 2006 年分析;仪器和分析条件见 <http://www.gyig.ac.cn/Main.aspx>

表2 朱布岩体超镁铁岩岩石化学成分(主量元素: $w_B/\%$, 微量元素: $w_B/10^{-6}$)

Table 2. Major element composition of the Zhubu ultramafic rocks

岩石	云英片麻岩	云英片麻岩	角岩	混染辉长岩	混染辉长岩	混染辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩
样号	CR2	CR1	CV4	ZR4-4	ZR4-5	ZR4-7	V2	ZR3-7	V4-1	ZR3-5	ZR5-8	ZR5-1
Mg [#]	0.58	0.65	0.55	0.79	0.85	0.89	0.61	0.64	0.63	0.73	0.82	0.79
SiO ₂	68.01	66.31	70.19	50.69	50.08	46.12	45.91	49.45	46.77	50.27	47.15	47.08
TiO ₂	0.81	0.90	0.71	2.44	2.26	1.05	3.77	3.85	2.93	2.88	4.20	4.56
Al ₂ O ₃	16.32	15.37	14.24	7.18	6.10	2.66	16.98	11.36	14.08	13.19	8.85	6.50
Fe ₂ O ₃	4.29	4.84	4.25	13.01	10.74	11.41	15.38	14.45	15.50	12.23	9.92	13.23
MnO	0.05	0.06	0.04	0.18	0.18	0.13	0.19	0.14	0.21	0.18	0.26	0.21
MgO	1.34	2.07	1.17	11.40	13.70	21.62	5.57	5.75	6.05	7.41	9.95	11.47
CaO	1.15	1.85	2.39	10.94	13.32	11.96	7.47	10.81	7.04	9.20	10.28	13.36
Na ₂ O	2.61	3.43	3.96	1.44	0.96	0.12	1.86	2.06	1.08	1.50	3.01	1.18
K ₂ O	3.32	2.78	1.79	1.00	0.98	0.05	1.55	0.44	3.40	1.04	1.84	0.39
P ₂ O ₅	0.11	0.13	0.22	0.22	0.15	0.06	0.06	0.32	0.34	0.29	0.34	0.19
LOI	1.68	2.01	0.78	1.14	1.10	4.35	1.21	0.89	2.12	1.51	3.88	1.49
总和	99.69	99.75	99.74	99.64	99.57	99.53		99.52	99.52	99.70	99.68	99.66
S												
Sc	19.36	18.22	10.81	43.77	48.06	39.16	30.40	36.80	44.66	34.40	34.23	48.04
V	146.48	142.46	65.14	306.42	262.58	165.13	525.25	519.69	417.78	318.20	323.49	376.40
Cr	89.11	93.40	10.26	1312.12	1082.15	2798.65	27.05	5.00	68.07	209.63	792.27	482.41
Co	215.52	120.49	198.50	97.45	116.80	91.86	47.34	226.16	102.52	80.25	89.60	91.63
Ni	29.72	26.09	8.71	180.29	240.47	876.82	16.41	16.16	72.87	303.75	211.33	142.80
Cu	11.03	16.09	49.91	207.85	231.63	625.54	43.29	63.64	34.28	294.70	1127.52	157.65
Zn	100.72	132.10	345.78	220.38	195.47	163.18	131.53	193.55	310.53	197.83	892.93	288.18
Rb	143.84	140.63	106.39	38.16	32.49	0.76	61.82	11.88	261.73	42.48	87.08	11.43
Sr	115.39	400.38	189.92	358.26	258.17	60.20	698.49	709.57	91.87	415.71	452.35	359.70
Y	34.56	25.09	30.80	25.50	20.29	8.99	25.66	31.27	40.65	29.66	30.59	22.70
Zr	232.93	203.43	206.15	199.06	155.50	58.21	236.29	285.09	119.65	263.00	341.67	190.41
Nb	16.75	17.62	24.46	21.54	18.23	6.85	25.85	28.17	21.34	29.03	34.72	25.56
Ba	475.37	526.82	299.32	128.11	314.98	16.31	375.94	162.23	346.23	1539.26	395.42	113.49
La	45.11	44.61	41.71	34.79	22.54	4.31	33.12	47.28	18.11	42.46	45.17	26.57
Ce	95.95	92.75	93.50	81.76	54.50	13.36	77.60	109.40	43.35	92.98	103.50	64.12
Pr	10.83	10.33	11.09	10.61	7.16	2.11	10.05	13.69	6.00	11.36	13.19	8.58
Nd	38.53	38.92	43.73	44.72	31.01	11.10	44.76	56.69	26.88	46.84	56.75	35.94
Sm	7.93	7.67	10.44	9.34	7.26	3.14	9.45	11.80	7.59	9.76	13.11	8.12
Eu	1.12	1.40	1.36	2.52	1.65	0.41	2.72	2.92	2.09	2.52	2.80	1.83
Gd	6.40	6.18	8.46	7.84	5.82	2.43	8.77	9.34	7.13	8.34	10.18	6.48
Tb	1.10	0.90	1.20	1.12	0.79	0.37	1.10	1.31	1.25	1.19	1.39	0.94
Dy	6.24	5.08	6.71	5.42	4.53	2.17	5.84	6.85	7.54	6.17	7.02	4.98
Ho	1.31	1.00	1.14	1.02	0.83	0.38	1.08	1.21	1.50	1.19	1.20	0.97
Er	3.93	2.76	3.06	2.62	2.12	0.98	2.69	3.20	4.37	2.94	3.05	2.41
Tm	0.52	0.39	0.38	0.35	0.27	0.13	0.33	0.39	0.61	0.38	0.34	0.27
Yb	3.82	2.64	2.52	2.23	1.59	0.75	2.09	2.67	3.95	2.51	2.37	1.84
Lu	0.62	0.40	0.44	0.31	0.25	0.12	0.27	0.39	0.66	0.41	0.32	0.28
Hf	10.45	8.05	10.06	6.35	5.45	2.40	6.47	10.69	4.95	7.98	10.74	6.51
Ta	1.40	1.37	2.14	1.37	1.13	0.44	1.81	1.88	1.16	1.76	2.24	1.70
Th	19.95	17.11	15.54	5.58	3.71	1.23	5.59	7.98	1.40	6.57	6.02	4.82
U	3.25	2.71	7.06	1.25	0.84	1.10	1.31	1.55	0.35	1.22	1.46	1.00
Ir							1.76				0.07	
Ru							1.09				0.04	
Rh							1.28				0.44	
Pt							108.03				2.42	
Pd							93.92				5.47	

续表 1

岩石	辉石岩	辉石岩	辉石岩	辉石岩	辉石岩	辉石岩	橄辉岩	橄辉岩	橄辉岩	橄辉岩	橄辉岩
样号	ZR5-2	ZR5-6	ZR3-1-x	ZR3-1	ZRx-1	ZR3-2	ZY1	ZY4	ZY2	ZR1	ZR7-1
Mg [#]	0.85	0.88	0.81	0.81	0.92	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91
SiO ₂	49.71	51.16	42.69	43.48	50.11	46.27	37.10	40.29	40.58	39.39	37.21
TiO ₂	1.97	1.03	5.02	3.65	0.94	0.78	1.28	1.80	0.93	1.28	0.70
Al ₂ O ₃	4.77	4.39	3.96	4.47	2.21	2.57	2.99	2.92	3.59	2.68	1.81
Fe ₂ O ₃	10.82	9.18	17.76	17.85	7.96	11.15	13.86	14.83	13.39	14.26	14.83
MnO	0.18	0.16	0.24	0.20	0.15	0.13	0.17	0.17	0.14	0.16	0.16
MgO	14.12	14.93	17.44	17.73	19.63	21.67	28.55	29.59	29.60	31.98	32.53
CaO	14.83	14.35	9.20	9.00	16.13	10.37	3.93	4.45	2.98	1.90	1.30
Na ₂ O	0.58	1.11	0.18	0.22	0.37	0.07	0.12	0.36	0.16	0.15	0.07
K ₂ O	0.58	0.23	0.06	0.08	0.16	0.03	0.38	0.44	0.36	0.37	0.09
P ₂ O ₅	0.14	0.05	0.09	0.10	0.04	0.04	0.08	0.07	0.09	0.07	0.05
LOI	1.91	3.28	3.48	2.73	1.82	6.95	11.07	4.64	7.90	7.45	10.93
总和	99.61	99.87	100.12	99.51	99.52	100.03	99.53	99.56	99.72	99.69	99.68
S											
Sc	59.01	61.11	42.82	40.49	48.39	35.24	15.65	22.58	16.63	14.71	12.75
V	261.60	176.53	325.07	413.68	156.64	118.13	134.42	166.38	121.23	109.93	87.68
Cr	388.76	501.55	691.83	1869.02	3345.35	2431.97	3674.44	3831.66	4030.54	3231.52	2939.04
Co	127.34	107.69	116.22	129.44	121.17	93.62	178.95	146.63	132.35	149.05	150.89
Ni	153.94	201.38	556.01	517.97	530.48	1363.29	1385.23	1174.28	1176.05	1369.85	1212.22
Cu	169.21	118.06	574.75	113.27	442.93	552.07	147.79	181.57	57.88	292.70	508.71
Zn	274.88	275.49	281.88	217.77	249.03	164.85	276.70	273.67	262.30	264.65	273.28
Rb	15.20	6.95	0.60	0.99	6.24	0.39	18.86	14.62	10.92	13.40	3.86
Sr	379.17	119.87	27.29	37.47	62.82	33.36	162.51	128.10	36.03	26.62	36.65
Y	19.76	20.30	15.38	15.45	9.14	7.95	7.86	8.11	8.77	6.89	4.24
Zr	122.43	116.40	127.39	117.19	35.47	43.44	70.21	80.77	68.04	77.50	34.00
Nb	12.85	10.23	18.64	15.87	2.87	3.68	8.42	10.55	7.92	9.21	4.43
Ba	191.41	40.57	27.08	28.35	46.78	26.80	87.72	126.23	77.27	96.74	25.01
La	19.93	16.44	14.22	14.50	5.22	5.64	9.21	10.63	13.25	8.54	4.80
Ce	47.70	42.52	32.42	36.06	15.10	13.69	22.95	25.33	30.27	21.43	12.37
Pr	6.54	6.12	4.61	4.64	2.18	1.95	3.19	3.18	3.78	2.70	1.63
Nd	28.23	27.21	19.20	20.91	10.90	8.61	13.32	13.92	16.17	11.35	6.79
Sm	7.19	6.55	4.60	5.00	3.28	2.49	2.98	3.02	3.22	2.61	1.71
Eu	1.66	1.41	0.84	0.90	0.70	0.47	0.71	0.65	0.67	0.58	0.32
Gd	5.88	5.68	4.02	4.42	2.64	2.03	2.46	2.40	2.55	1.96	1.08
Tb	0.85	0.79	0.59	0.65	0.37	0.33	0.35	0.36	0.38	0.29	0.16
Dy	4.81	4.62	3.24	3.17	2.42	1.58	1.47	2.04	1.99	1.52	0.87
Ho	0.85	0.84	0.63	0.68	0.36	0.33	0.33	0.36	0.36	0.26	0.20
Er	1.95	2.18	1.68	1.53	0.91	0.83	0.80	0.87	1.05	0.69	0.47
Tm	0.30	0.26	0.19	0.20	0.11	0.10	0.12	0.10	0.14	0.09	0.06
Yb	1.64	1.67	1.35	1.28	0.82	0.66	0.69	0.66	0.71	0.61	0.43
Lu	0.23	0.22	0.19	0.21	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.06
Hf	5.01	4.40	4.12	4.08	1.91	1.52	3.06	2.64	2.27	2.43	1.26
Ta	0.83	0.62	1.32	1.02	0.17	0.26	0.55	0.68	0.52	0.57	0.27
Th	2.90	3.05	2.50	2.54	0.67	1.02	1.50	1.69	2.08	1.66	0.89
U	0.62	0.55	0.90	0.76	0.17	0.94	0.36	0.34	0.42	0.45	0.19
Ir							0.67	0.98	0.75		
Ru							0.66	0.59	0.56		
Rh							0.64	0.67	0.80		
Pt							24.40	36.58	23.05		
Pd							16.42	64.24	14.73		

续表 2

岩石 样号	橄榄岩 ZR6-2	上悬矿体 K36-2-1	上悬矿体 K41-2	边缘矿体 WT2-D	边缘矿体 WT2-C	边缘矿体 WT2-B	边缘矿体 WT2-A	细晶岩脉 ZV2-1	细晶岩脉 ZV1-2	细晶岩脉 ZV1-1
Mg [#]	0.91	0.92	0.89	0.92	0.91	0.90	0.89	0.72	0.79	0.79
SiO ₂	39.18	44.20	45.47	41.32	40.18	42.35	38.52	46.48	47.80	47.66
TiO ₂	0.79	0.66	1.46	0.90	0.44	0.48	0.49	5.75	3.12	2.99
Al ₂ O ₃	2.43	2.33	5.80	3.73	1.77	1.44	2.39	7.45	10.46	10.34
Fe ₂ O ₃	14.92	11.14	11.96	12.05	14.06	14.63	11.61	15.72	12.64	13.21
MnO	0.17	0.14	0.13	0.15	0.15	0.13	0.16	0.22	0.19	0.18
MgO	33.59	27.70	22.84	32.28	31.73	30.91	22.13	9.30	10.88	11.36
CaO	1.90	9.76	8.11	2.70	1.75	2.71	17.71	10.12	8.28	8.04
Na ₂ O	0.10	0.06	0.08	0.05	0.05	0.05	0.10	1.51	2.56	2.59
K ₂ O	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.83	1.55	1.39
P ₂ O ₅	0.08	0.05	0.11	0.09	0.05	0.04	0.06	0.19	0.26	0.26
LOI	6.20							1.99	1.84	1.52
总和	99.56							99.56	99.58	99.54
S		0.03	0.04	0.40	0.79	0.71	0.11			
Sc	12.32	20.81	17.12	8.44	6.99	12.36	15.90	54.48	33.77	35.25
V	89.30	93.31	135.65	100.96	62.31	65.12	90.65	494.39	347.24	351.17
Cr	4863.44	2615.99	1069.31	4671.57	4266.27	2618.57	3469.26	131.18	705.75	792.01
Co	162.69	94.37	88.42	151.84	221.40	112.99	146.88	129.19	89.77	93.14
Ni	1390.80	1422.87	1938.89	3090.45	5964.08	3054.12	3845.27	87.22	170.37	164.96
Cu	42.04							94.70	156.79	199.14
Zn	405.64							223.49	304.31	173.36
Rb	8.94	0.93	0.94	5.93	2.35	0.59	0.84	33.83	66.99	73.29
Sr	51.17	20.71	25.55	12.77	18.50	51.69	66.46	274.30	633.74	643.25
Y	5.77	4.96	8.44	6.52	3.80	5.02	6.18	28.42	24.22	25.12
Zr	47.25	29.51	168.34	77.80	38.49	39.86	49.46	238.59	229.06	234.29
Nb	7.11	2.83	14.40	9.09	4.09	3.53	4.58	34.33	28.69	30.90
Ba	49.12	66.43	78.83	29.81	10.07	5.55	7.04	272.63	811.91	721.82
La	7.70	2.79	4.94	9.55	2.73	5.17	6.60	32.30	37.79	37.14
Ce	19.17	8.17	14.52	22.69	8.12	13.62	17.26	75.91	81.47	82.04
Pr	2.48	1.23	2.24	2.85	1.16	1.85	2.31	9.98	10.25	10.12
Nd	10.37	5.97	10.89	12.31	5.44	8.29	10.39	42.56	41.97	43.24
Sm	1.96	1.49	2.62	2.38	1.23	1.82	2.30	9.85	8.65	8.99
Eu	0.37	0.37	0.59	0.39	0.20	0.48	0.61	2.19	2.07	2.65
Gd	1.53	1.65	2.89	2.19	1.23	1.82	2.27	7.95	6.72	7.14
Tb	0.24	0.21	0.36	0.28	0.16	0.22	0.28	1.10	1.03	0.98
Dy	1.34	1.10	1.94	1.47	0.84	1.14	1.46	5.86	5.15	5.30
Ho	0.24	0.20	0.37	0.27	0.16	0.21	0.26	1.10	0.91	0.98
Er	0.63	0.49	0.90	0.71	0.40	0.53	0.63	2.91	2.73	2.60
Tm	0.06	0.07	0.12	0.09	0.05	0.07	0.08	0.35	0.32	0.32
Yb	0.47	0.39	0.80	0.56	0.35	0.40	0.51	2.37	2.12	2.03
Lu	0.10	0.06	0.11	0.09	0.05	0.06	0.07	0.37	0.32	0.31
Hf	1.62	0.87	4.52	2.20	1.13	1.21	1.55	8.30	6.77	6.91
Ta	0.45	0.21	1.27	0.70	0.32	0.31	0.40	2.26	1.59	1.81
Th	1.41	0.57	2.66	2.04	0.94	1.05	1.27	4.97	5.21	5.27
U	0.27	0.33	1.48	0.46	0.27	1.09	1.39	1.20	1.16	1.19
Ir		37.80	23.90	40.17	65.11	56.43	28.95	0.06		0.08
Ru		16.30	12.00	25.13	64.61	59.10	27.95	0.04		0.07
Rh		17.80	11.90	24.33	89.38	50.72	23.25	0.21		0.41
Pt		970.00	658.00	1641.53	5747.96	6264.08	2011.74	0.92		1.14
Pd		505.00	376.00	808.97	5462.22	5837.87	1249.71	6.74		6.60

注:主量元素在西北大学大陆动力学实验室 X-荧光分析法;微量元素在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验 ICP-MS 实验室分析;铂族元素在香港大学由漂亮分析,分析方法见文献^[7].

体附近的细晶基性岩脉(或者岩墙)分异不明显,结构上表现为微晶-细晶结构。部分被岩体切割的基性岩墙代表早于岩体侵位并快速冷却固化;而切割岩体的代表岩体晚期发育的,其中一些岩墙代表岩体结晶分异晚期从岩体内部部分异出来的,也有直接从深部来的。这些穿插特征表明这些岩墙与岩体同一时代。一些岩墙本身高 MgO 或 Mg[#] 特征(Mg[#] =

0.79),可以认为它们代表朱布岩体的母岩浆。其地球化学特征与峨眉山的高钛玄武岩相同^[9]。

朱布岩体的贵贱金属比值以及 Pt/Pd 值与原始地幔接近,Cu-Ni 与 PGE 相对原始地幔没有显著分异(图 3)。这与力马河和金山山有明显区别,与杨柳坪相似^[1]。与峨眉山玄武岩的铂族元素配分模式也相同^[12]。

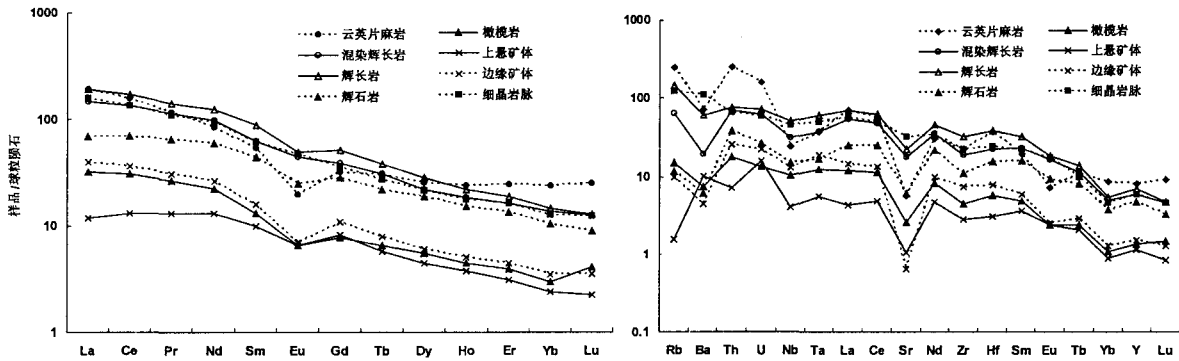


图 2 朱布镁铁-超镁铁岩稀土元素分布模式及微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔数据引自文献^[10])

Fig.2. Chondrite-normalized REE patterns and trace spider diagram of the Zhubu mafic-ultramafic intrusion.

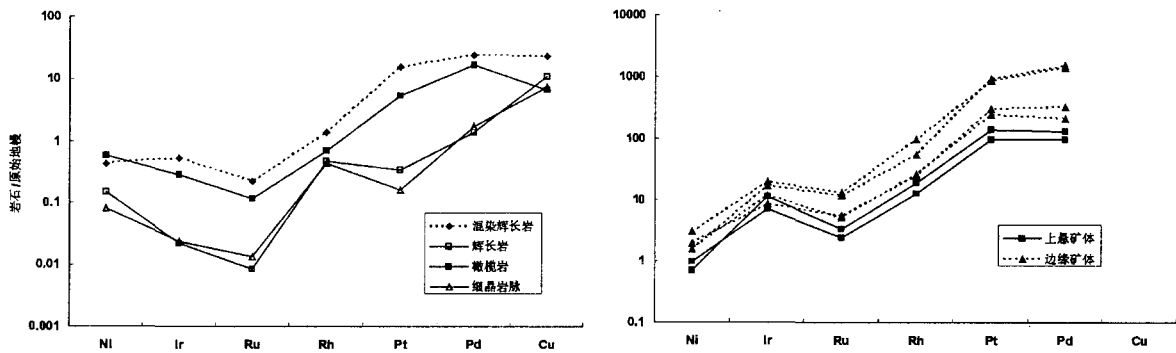


图 3 朱布岩体 Cu-Ni-PGE 岩石、矿石原始地幔标准化的 Cu、Ni、PGE 分配型式

Fig.3. Primitive mantle normalized Cu, Ni, PGE patterns of the rocks and ores in the Zhubu intrusion.

3 成岩过程讨论

根据岩体大小和矿床储量(中型铂钯矿床)^[2]的简单质量平衡计算,并且假设岩体母岩浆的 Pt + Pd 的初始含量为 20×10^{-9} ,矿床的形成需要至少 3000 倍现存岩体体积的岩浆参与成矿(如果矿床是由现存岩体体积的岩浆形成,则需要母岩浆的初始 Pt + Pd 的初始含量为 60×10^{-6} 。这显然不符合实际),因此朱布岩体很可能是峨眉山玄武岩的输送通道。我们提出了下面的模式(图 4)。

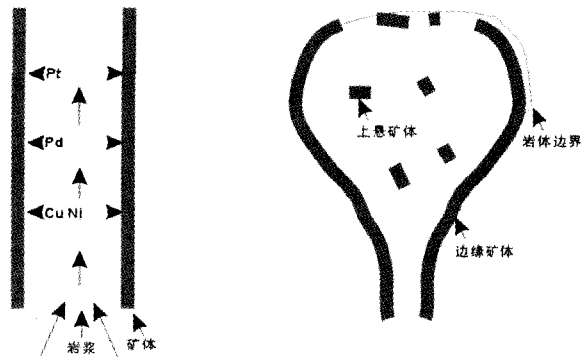


图 4 朱布岩体成岩成矿模式示意图

Fig.4. Sketch map showing the model of formation of the Zhubu intrusion.

朱布岩体现在的位置应该是峨眉山玄武岩的输送通道,玄武岩通过通道时,由于 Soret 效应的作用,通道壁的岩浆到达硫饱和^[3,13],吸收通道内经过的岩浆中的铂族元素和 Cu、Ni,形成矿体。由于某种原因,通道封闭,随后进入的岩浆使得原来的通道壁膨胀扩大,大部分的通道壁变成边缘

矿体。部分的边缘矿体在岩体的内部,比如岩体东部的边缘矿体(图1)。部分顶部的通道壁矿体破碎,并且由于密度大的原因沉降到未完全固化的岩体内部,形成上悬矿体,因此上悬矿体与边缘矿体的地球化学特征相同(图2和3)。

参 考 文 献:

- [1] 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的分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25: 236-244.
- [2] 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[R]. 云南: 云南省地矿局 970.
- [3] Dan Z, Luo T-Y, Xu Y-G, Tao Y, Huang Z-L. Soret fractionation—a novel process for origin of the PGE mineralization in Zhubu mafic-ultramafic intrusion in SW China [A]. IGCP Project 479 Field Conferences. *Recent Advances in Magmatic Ore Systems in Mafic-Ultramafic Rocks* [C]. Hong-Kong, China: IGCP Project 479 Field Conferences, 2004: 64-66.
- [4] Zhou M-F, Malpas J, Song X-Y. SHRIMP zircon geochronology of the Emeishan Large Igneous Province (SW China): implications for double mass extinction in Late Permian [A]. In. *Eleventh Annual V M Goldschmidt Conference* [C]. Virginia, USA: Hot Springs, 2001: 3519.
- [5] He B, Xu Y-G, Huang X-L, Luo Z-Y, Shi Y-R, Yang Q-J, Yu S-Y. 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 and Planetary Science Letters*, In Press, Corrected Proof.
- [6] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [7] Qi L, Zhou M F, Wang C Y. Determination of low concentrations of platinum group elements in geological samples by ID-ICP-MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2004, 19: 1335-1339.
- [8] Chai G, Naldrett A J. The Jinchuan ultramafic intrusion—cumulate of a high-Mg basaltic magma [J]. *Journal of Petrology*, 1992, 33: 277-303.
- [9] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. *Lithos*, 2001, 58: 145-168.
- [10] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 223-253.
- [11] Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquid [A]. Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C. *Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and Their Application in Mineral Exploration* [C]. Geological Association of Canada: Short Course, 1999: 69-106.
- [12] Zhong H, Zhu W-G, Qi L, Zhou M-F, Song X-Y, Zhang Y. Platinum-group element (PGE) geochemistry of the Emeishan basalts in the Pan-Xi area, SW China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51: 845-854.
- [13] 朱丹, 罗泰义, 高振敏, 徐义刚, 陶琰, 黄智龙. Soret 效应在基性—超基性岩浆成岩和成矿过程中作用的研究进展[J]. 矿物学报, 2007, 27(3/4): 265-272.

CONDUIT OF THE EMEISHAN BASALTS: THE ZHUBU MAFIC-ULTRAMAFIC INTRUSION IN THE YUANMOU AREA OF YUNNAN PROVINCE, CHINA

ZHU Dan^{1,2}, XU Yi-gang², LUO Tai-yi¹, SONG Xie-yan¹,
TAO Yan¹, HUANG Zhi-long¹, ZHU Chen-ming³, CAI En-zhao³

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

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002, China)

Abstract: The Zhubu mafic-ultramafic intrusion is a medium-sized deposit of Pt, Pd, Cu and Ni. The simple mass balance calculation based on the size and reserves of the deposit showed that the volume of magma involved in the mineralization should be, at least, 3000 times that of the intrusion. So the intrusion can be considered as a fossil conduit of the Emeishan basalts. The viewpoint is consistent with the geology, age and geochemistry data of the Zhubu intrusion. The parent magma of the Zhubu intrusion should belong to the Emeishan high-Ti basalt.

Key words: mafic-ultramafic rock; peridotite; fossil conduit; Zhubu, Yunnan