

云南思茅大平掌矿区火山岩的地球化学特征及构造意义*

钟宏^{1,2} 胡瑞忠¹ 周新华² 叶造军¹

ZHONG Hong^{1,2}, HU RuiZhong¹, ZHOU XinHua² and YE ZaoJun¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 550002 贵阳

2. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈实验室, 100029 北京

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Laboratory of Lithosphere Tectonic Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2003-11-20 收稿, 2004-04-18 改回.

Zhong H, Hu RZ, Zhou XH and Ye ZJ. 2004. Geochemistry of the volcanic rocks in the Dapingzhang ore district, Simao, Yunnan province and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):567-574

Abstract The spilite-quartz keratophyre formations in the Dapingzhang ore district are typical bimodal rocks lack of intermediate rocks with 52% ~ 61% SiO₂, which are most probably formed under island-arc environment indicated by their low TiO₂ concentrations and other petrochemical characteristics and REE geochemistry. Furthermore, the N-MORB normalized spider diagrams of incompatible elements of the rocks are characterized by enrichments in Ba, Nd, Sm, and depletions in Nb, Sr, Ti. The enrichment in Ba and depletion in Nb are regarded as major indicative characteristics of island-arc volcanism. The very low Nb/Y and Zr/TiO₂ ratios of spilites, low Nb/Y and Zr/TiO₂ ratios and range of Zr/Y, (La/Yb)_N ratios of quartz keratophyres in the Dapingzhang ore district suggest that they are formed under island-arc environment. The Sr, Nd isotopic characteristics of the volcanic rocks are similar to those of the typical island-arc-type volcanic rocks in the world. It is suggested that the parent magma was derived from a depleted mantle, which was influenced by crustal contamination and/or seawater hydrothermal alteration. The high concentrations of radiogenic lead in the rocks are also related to the island-arc environment. As a result, the formation of Dapingzhang copper-polymetallic deposit might be controlled by bimodal volcanism under island-arc environment.

Key words Spilite-quartz keratophyre formation, Island-arc environment, Dapingzhang

摘要 大平掌矿区细碧岩-石英角斑岩建造为典型的双峰式火山岩组合, 缺失 SiO₂ 为 52% ~ 61% 之间的中性火山岩。火山岩的 TiO₂ 含量低及其它岩石化学特征、稀土元素地球化学特征均表明这套火山岩很可能形成于岛弧环境。不相容元素 N-MORB 标准化型式以 Ba、Nd、Sm 相对富集和 Nb、Sr、Ti 的相对亏损为特征, 其中 Ba 富集和 Nb 亏损更是岛弧火山作用的主要特征之一。大平掌矿区细碧岩具非常低的 Nb/Y (<0.15) 和 Zr/TiO₂ (<0.01) 比值, 石英角斑岩的低 Zr/TiO₂ 和 Nb/Y 特征以及 Zr/Y 比值(3.34 ~ 4.23)、(La/Yb)_N 比值(0.47 ~ 2.50) 变化范围都可以反映出火山岩形成于岛弧环境。大平掌火山岩的 Sr、Nd 同位素特征与世界上典型岛弧火山岩的 Sr、Nd 特征相似, 其岩浆来源于亏损地幔, 且经受地壳混染和(或)海水热液蚀变的影响。岩石中富含的放射成因铅也与岛弧环境密切相关。因此, 大平掌铜多金属矿床的形成很可能受岛弧环境下的双峰式火山作用控制。

关键词 细碧岩-石英角斑岩建造; 岛弧环境; 大平掌

中图分类号 P588.12

* 中国科学院“百人计划”和中国科学院与云南省院省合作项目资助

第一作者简介: 钟宏, 男, 1971 年生, 博士, 研究员, 地球化学专业, E-mail: pgezhang@hotmail.com

“怒江-金沙江-澜沧江”(“三江”)地区是我国主要的火山岩型块状硫化物矿床成矿区域之一。云南省思茅市大平掌铜多金属矿床即为1996年发现的火山岩型块状硫化物矿床,该矿床赋存于“三江”地区的澜沧江火山岩带(中南段)的一套细碧岩-石英角斑岩建造中,具有大型矿床远景(云南省第五地质大队内部资料,1997)。细碧-角斑质火山岩是海相火山岩的重要组成部分,其产出的大地构造环境多种多样,可为洋中脊、岛弧和活动大陆边缘和弧后盆地。恢复火山岩形成的古构造环境对火山岩型块状硫化物矿床研究具有重要意义(Hali *et al.*, 1991; 王登红, 1996; 贾群子, 1996),因为这不仅有利于了解火山岩的形成演化特征,也可以为矿床的成矿机制研究及找矿工作提供重要依据。大平掌细碧-角斑岩的研究基础十分薄弱,除少量基础地质工作

外(云南省第五地质大队内部资料,1997),岩石学、地球化学等方面的工作均未进行。本文将针对研究薄弱的大平掌细碧-角斑岩的岩石化学、稀土元素、微量元素、同位素地球化学特征,以及成岩构造环境进行探讨。

1 地质概况

大平掌矿区位于“三江”造山带中澜沧江火山岩带中南段的南部,即兰坪-思茅中生代拗陷西缘。澜沧江火山岩带呈两端宽,中间窄,夹持于东部昌都-思茅拗陷带和西部澜沧江结合带之间(莫宣学等,1993)。

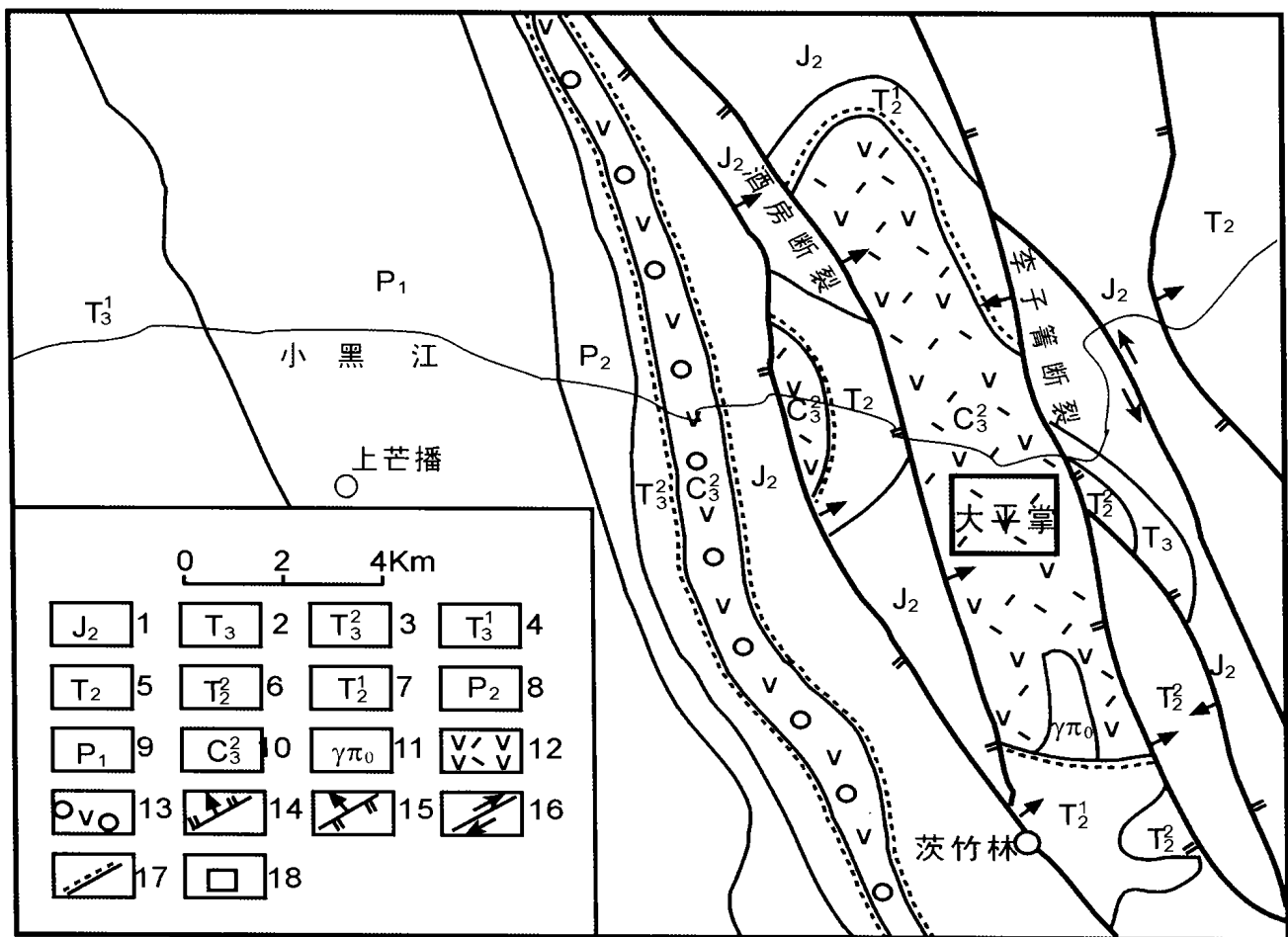


图1 大平掌矿区区域地质略图(据 Zhong *et al.*, 2000)

1. 砂岩、页岩夹泥灰岩; 2. 碎屑岩夹灰岩; 3. 砂岩、泥岩夹煤层; 4. 砂岩、页岩、灰岩; 5. 碳酸盐岩夹砂岩、页岩; 6. 灰岩、泥灰岩、泥岩;
7. 灰岩、白云质灰岩; 8. 灰岩、砂泥岩; 9. 砂岩、泥岩、页岩; 10. 龙洞河组火山岩上段(?); 11. 花岗闪长斑岩; 12. 细碧-角斑岩建造;
13. 中性火山碎屑岩; 14. 实测正断层; 15. 实测及推测逆断层; 16. 走滑断层; 17. 不整合界线; 18. 大平掌矿区

Fig.1 Regional geological sketch map of the Dapinzhang ore district (after Zhong *et al.*, 2000)

大平掌矿区位于复背斜的核部,东西两侧被NW向压性断裂夹持,其西侧为区域性的酒房断裂,东侧为李子箐断裂。矿区主要出露一套细碧岩-石英角斑岩建造,主要岩石类型

有石英角斑岩、细碧岩、角斑岩等,常见硅质岩、凝灰岩夹层(图1)。矿区附近还同时产出一套中性火山碎屑岩。研究工作的薄弱使这套火山岩的形成时代问题还存在很大争议。

陈炳蔚等(1987)编制的1:200万怒江-澜沧江-金沙江及邻近地区大地构造图将这一套火山岩系划归P-T₃,而云南省第五地质大队(1997)编制的1:50万澜沧江火山岩带中南段地质略图则将这一火山岩系的形成时代归属于石炭系上统龙洞河组上段(C_{3ln2})(内部资料)。而大平掌细碧-角斑岩的岩石学特征及产出构造环境与“三江”地区零星分布的寒武纪火山岩相似。对这套岩石进行的详细同位素年代学研究得到Sm-Nd、Rb-Sr全岩等时线年龄分别为513±40 Ma和511±8 Ma,故认为这套火山岩形成于寒武纪(Zhong *et al.*, 2000)。

2 岩石学及岩石化学特征

大平掌矿区的含矿火山岩主要为细碧-角斑岩建造。细碧岩呈中厚层-薄层产出,厚度为110~150m,灰绿、黄绿及暗灰绿色,呈斑状结构,枕状和块状构造。岩石主要由钠长石、绿泥石、斜黧帘石、黑云母及少量金属矿物组成。钠长石呈半自形板条状晶体,其格架间由绿泥石和黑云母等矿物充填。钠长石具中空骸晶结构,细条状钠长石尾部分叉成燕尾状,表明其形成于淬冷条件下(祈岷等,1986)。含矿石英角斑岩厚约100~210m,顶板为3~5m厚的薄层状凝灰岩,不含矿的石英角斑岩大于30m。石英角斑岩呈灰色、灰白色,斑状结构,致密块状构造。斑晶主要由钠长石、石英及少量

绿泥石、绢云母、碳酸盐和金属矿物等组成,基质主要由钠长石、石英组成。可见高温石英斑晶,且出现特征的熔蚀现象。角斑岩在该区火山岩中所占的比例较小,厚约5~10m,浅褐色、浅绿色,多具斑状结构,致密块状构造。斑晶主要为钠长石,可见单个颗粒的钠长石发生弯曲并产生波状消光。基质中矿物主要为钠长石,及少量钾长石、绿泥石、绿帘石、金属矿物等。火山岩中常见沉积成因的硅质岩、凝灰岩夹层。

本研究中涉及的火山岩样品大多受到一定程度的矿化蚀变作用影响。细碧岩样品DP₆-5、DP₄-4中钠长石受应力作用而较破碎且发生较强的绢云母化、碳酸盐化,样品DP₆-6、DP₆-5'则因几乎未受矿化作用影响而比较新鲜。角斑岩中钠长石斑晶表面仅发生轻微的绢云母化,而部分基质发生较强绢云母化。石英角斑岩样品DP₆-7比较新鲜,而样品DP₅-3、DP₂-4、DP₂-3的钠长石斑晶发生较强的绢云母化、绿泥石化,基质则发生较强的绢云母化、碳酸盐化。

大平掌矿区火山岩的岩石化学成分见表1, SiO₂集中于44%~52%和61%~77%两个区域,而缺乏SiO₂为52%~61%之间的中性火山岩。这与野外观察结果一致,均显示出双峰式火山岩组合的特征。双峰式火山岩一般被认为是拉伸环境或洋内和陆缘岛弧的特征岩套。TiO₂在蚀变过程中活动性不强,所以其组分特征可在一定程度上指示火山岩原岩的形成构造环境。矿区火山岩的低TiO₂含量表明其可能形成于洋内岛弧或初始弧后盆地环境。

表1 大平掌矿区火山岩岩石化学成分

Table 1 Bulk compositions of the volcanic rocks from the Dapingzhang ore district

样号	细碧岩				角斑岩			石英角斑岩		
	DP ₆ -6	DP ₆ -5'	DP ₆ -5	DP ₄ -4	DP ₅ -7'	DP ₆ -3	DP ₆ -7	DP ₅ -3	DP ₂ -4	DP ₂ -3
SiO ₂	49.33	44.28	51.92	51.65	67.25	61.95	72.37	72.07	73.90	76.39
TiO ₂	0.70	0.72	0.42	0.67	0.13	0.25	0.17	0.16	0.28	0.14
Al ₂ O ₃	19.76	20.00	16.87	17.35	10.36	15.42	12.77	13.50	13.01	10.85
Fe ₂ O ₃	4.45	2.86	2.68	6.20	4.00	1.06	3.01	2.56	1.14	1.05
FeO	6.45	12.84	3.32	5.01	5.52	4.74	0.69	0.84	2.86	2.35
MnO	0.12	0.21	0.15	0.13	0.23	0.09	0.08	0.10	0.13	0.13
MgO	7.00	7.20	5.00	5.50	5.20	7.70	1.40	1.20	2.30	1.60
CaO	1.70	2.80	9.10	2.00	0.50	1.00	1.11	0.70	1.30	0.70
Na ₂ O	4.52	3.15	1.94	0.71	0.08	1.79	3.30	3.31	3.48	3.71
K ₂ O	0.09	0.16	0.84	2.42	0.33	0.87	1.03	2.29	0.37	0.51
H ₂ O ⁺	4.50	4.02	2.16	5.70	4.90	3.80	3.10	3.09	1.00	1.52
H ₂ O ⁻	0.17	0.11	0.11	0.21	0.11	0.10	0.09	0.20	0.05	0.09
P ₂ O ₅	0.03	0.12	0.12	0.15	0.13	0.18	0.10	0.12	0.11	0.10
CO ₂	0.63	1.01	4.43	1.40	0.47	0.65	-	-	-	-
总计	99.45	99.48	99.06	99.10	99.21	99.60	99.22	99.14	99.93	99.14
FeO [*] /MgO	1.49	2.14	1.15	1.92	1.75	0.74	2.43	2.62	1.69	2.06
Ni(μg/g)	18.8	64.70	9.05	13.9	3.15	3.60	2.44	1.14	1.94	4.52

中国科学院地球化学研究所李荪蓉用常规湿化学分析方法结合原子吸收法测定,分析精度优于5%,含量单位(除Ni外)为%。

表2 大平掌矿区火山岩的稀土元素、微量元素特征

Table 2 REE and trace element characteristics of the volcanic rocks from the Dapingzhang ore district

岩性	细碧岩				角斑岩		石英角斑岩			洋中脊玄武岩	
	DP ₆ -6	DP ₆ -5	DP ₆ -5'	DP ₄ -4	DP ₆ -3	DP ₅ -7'	DP ₆ -7	DP ₅ -3	DP ₂ -4	DP ₂ -3	N-type MORB
La	6.46	27.3	6.07	6.93	12.9	5.79	12.4	6.18	4.10	2.06	2.50
Ce	14.2	60.2	12.0	13.6	26.3	8.47	18.6	18.6	8.70	4.84	7.50
Pr	1.82	7.57	1.57	1.85	3.41	1.48	2.95	1.84	1.19	0.67	1.32
Nd	8.59	29.8	7.74	9.60	15.8	6.77	13.5	8.71	5.90	3.72	7.30
Sm	2.18	8.01	2.17	2.39	4.13	1.57	3.79	2.54	1.61	1.25	2.63
Eu	0.79	2.88	1.09	0.69	0.89	0.38	0.95	0.64	0.43	0.35	1.02
Gd	2.18	6.33	2.24	2.09	4.00	1.55	3.34	2.54	1.53	1.46	3.68
Tb	0.44	1.13	0.42	0.42	0.75	0.30	0.68	0.59	0.34	0.37	0.67
Dy	2.65	5.55	2.53	2.29	4.33	1.93	4.20	3.57	2.27	3.26	4.55
Ho	0.76	1.29	0.66	0.66	1.23	0.55	1.16	1.07	0.68	0.85	1.01
Er	1.58	2.63	1.52	1.54	2.98	1.28	2.81	2.64	1.87	2.46	2.97
Tm	0.22	0.41	0.23	0.27	0.51	0.22	0.50	0.50	0.32	0.45	0.46
Yb	1.56	2.53	1.75	1.71	3.35	1.50	3.35	3.21	2.29	2.96	3.05
Lu	0.16	0.34	0.24	0.19	0.41	0.23	0.46	0.45	0.27	0.40	0.46
ΣREE	43.59	155.97	40.23	44.23	80.99	32.02	68.69	53.08	31.5	24.42	
LREE/HREE	3.56	6.72	3.20	3.82	3.61	3.24	3.16	2.64	2.29	1.06	
(La/Yb) _N	2.79	7.27	2.34	2.73	2.60	2.60	2.50	1.30	1.21	0.47	
(La/Sm) _N	1.86	2.14	1.76	1.82	1.96	2.32	2.06	1.53	1.60	1.04	
δEu	1.11	1.24	1.51	0.94	0.67	0.75	0.82	0.77	0.84	0.79	
δCe	1.00	1.01	0.94	0.91	0.95	0.70	0.74	1.33	0.95	0.99	
Rb	1.43	16.5	2.65	50.4	14.8	4.71	15.0	31.6	4.76	7.31	0.56
Ba	90.0	188	122	645	205	189	252	476	108	611	6.30
Th	1.08	1.20	1.04	0.92	2.58	1.20	2.59	2.70	1.54	1.72	0.12
K	600	5500	1100	16000	5700	2200	6800	15100	2400	3400	600
Nb	1.80	1.49	1.93	0.93	2.52	1.34	2.06	2.28	1.97	1.98	2.33
Sr	151	122	106	30.1	46.5	4.58	85.9	52.2	104	64.2	90
P	131	524	524	655	786	568	437	524	480	437	510
Hf	1.05	1.23	1.04	0.79	2.10	1.39	2.15	2.71	1.76	1.82	2.05
Zr	30.2	40.8	36.7	31.9	72.8	42.8	80.6	90.9	54.4	60.1	74
Ti	6100	2500	6700	4700	900	1000	900	1000	1400	500	7600
Y	13.8	24.6	13.8	11.4	26.6	11.1	23.7	21.5	14.0	18.0	28
Cr	46.3	17.3	45.1	40.4	12.7	7.53	12.7	13.0	13.3	20.2	
Zr/TiO ₂	0.004	0.010	0.005	0.005	0.029	0.033	0.047	0.057	0.019	0.043	
Zr/Y	2.19	1.66	2.66	2.80	2.74	3.86	3.40	4.23	3.89	3.34	
Nb/Y	0.13	0.06	0.14	0.08	0.09	0.12	0.09	0.11	0.14	0.11	

本分析由中国科学院地球化学研究所漆亮运用密闭溶样在 ICP-MS 上完成,分析精度优于 5%,含量单位为 μg/g

3 稀土元素地球化学特征

本次测定的容矿火山岩稀土元素含量及参数特征见表 2。细碧岩的稀土元素总量低到中等(除 DP₆-5 外),轻稀土富集而重稀土平坦,铈正异常较明显或基本无异常,铈基本无异常,配分曲线右倾(图 2a)。角斑岩、石英角斑岩的稀

土总量低到中等,轻稀土富集而重稀土平坦,铈负异常较明显,铈无异常或负异常(除 DP₅-3 外),配分曲线右倾(图 2b、c)。DP₆-5 的稀土总量高可能是岩石中稀土元素含量高的副矿物引起的,而 DP₅-3 的铈正异常可能是由于岩石遭受较强风化作用的影响,Ce⁴⁺ 发生水解所致(王中刚等,1989)。

目前许多关于火山岩型块状硫化物矿床容矿围岩稀土元素特征的研究成果表明,在围岩发生蚀变后,轻稀土和中

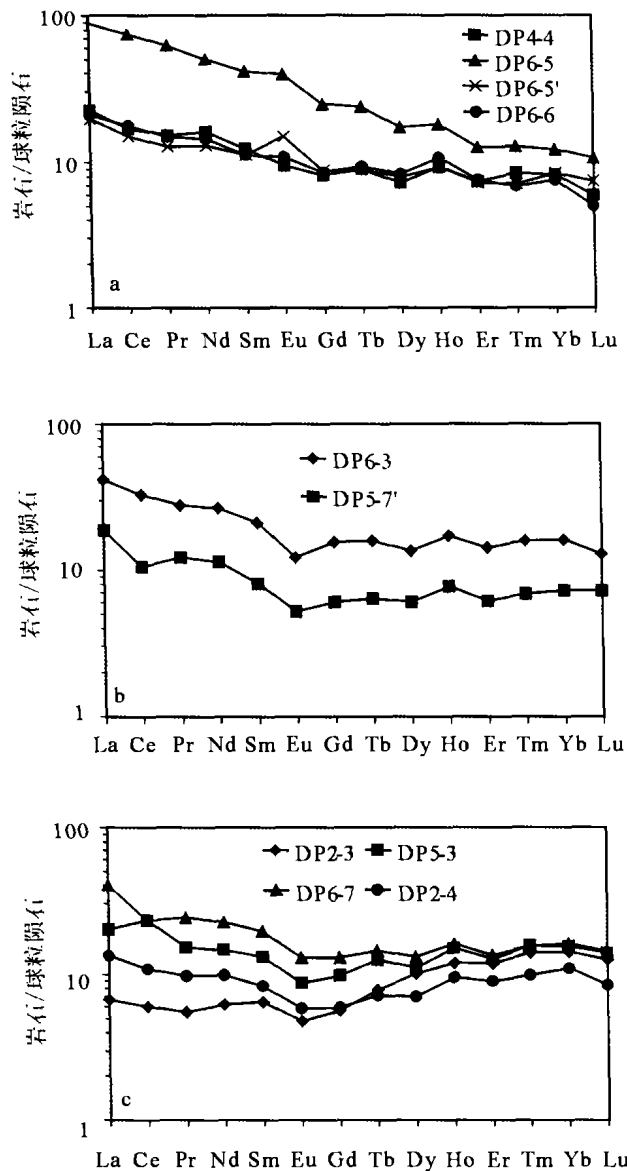


图2 大平掌矿区火山岩稀土配分模式

(a) 细碧岩; (b) 角斑岩; (c) 石英角斑岩

Fig. 2 REE distribution pattern of the volcanic rocks from the Dapingzhang ore district

稀土表现出其活动性,发生一定程度的亏损,特别是 Eu 的活动性最为明显 (Campbell *et al.*, 1982, 1984; Whitford *et al.*, 1988)。细碧岩的 Eu 正异常是由于岩石中包含大量具有明显 Eu 正异常的斜长石所致。尽管细碧岩发生较强的碳酸盐化后,斜长石中的 Ca、Si 带出会同时导致其中的 Eu 丢失,但还不至于影响 Eu 正异常得到反映。大平掌细碧岩的 Eu 正异常与岛弧拉斑玄武岩具非常明显的 Eu 正异常这一特征非常吻合 (王中刚等, 1989)。在火山岩系列中,斜长石的不不断从熔体中析出是 Eu 负异常逐渐增加的重要原因。大平掌角斑岩的 Eu 负异常可能主要源于此。而蚀变较强的石英角斑岩的 Eu 负异常则可能归因于斜长石斑晶的不断析出和碳酸盐化及其它蚀变过程中 Eu 的丢失。

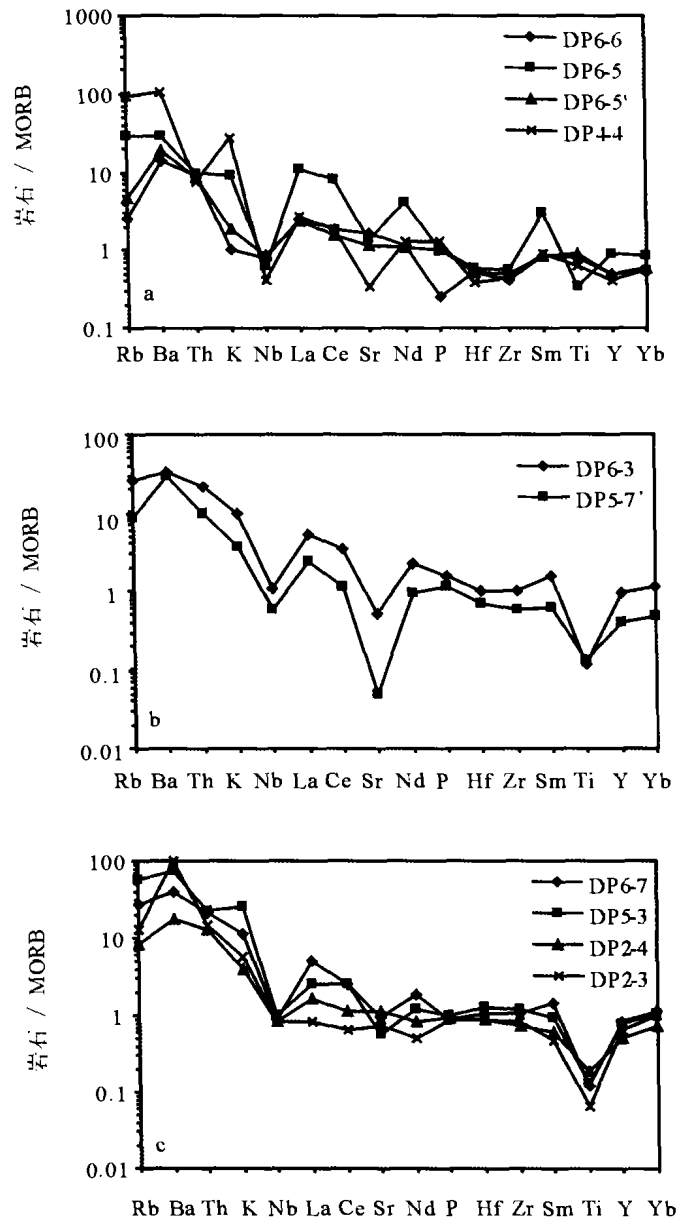


图3 大平掌矿区火山岩不相容元素 N-MORB 标准化型式 (N-MORB 值据 Sun and McDonough, 1989)

(a) 细碧岩; (b) 角斑岩; (c) 石英角斑岩

Fig. 3 N-MORB normalized distribution pattern of incompatible elements of the volcanic rocks from the Dapingzhang ore district (N-MORB values after Sun and McDonough, 1989)

4 微量元素地球化学特征

大平掌矿区火山岩的微量元素特征见表 2。各种岩石的不相容元素 N-MORB 标准化的分配型式 (图 3a、b、c) 表明, Ba、Nd、Sm 相对富集而 Nb、Sr、Ti 相对亏损。细碧岩、角斑岩、石英角斑岩不相容元素的上述特征与岛弧或活动大陆边缘环境下的玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩非常相似 (Pearce, 1982; 李昌年, 1992; Stolz, 1995; Lentz, 1998),

其中Ba 富集和 Nb 亏损是岛弧火山作用的主要特征之一 (Whitford *et al.*, 1989; Stolz, 1995)。

Zr、Nb、Ta、Y、Th、Hf 等不活动性微量元素丰度可用作区分岩浆类型和成岩构造环境的标志 (Winchester *et al.*, 1977; 李昌年, 1992; Stolz, 1995; Lentz, 1998)。Nb/Y 比值是确定玄武岩碱度的一个良好指标, Winchester *et al.* (1977) 认为 Nb/Y 几乎只受碱度的影响而与分异作用无关, 只是在钙碱系列中随着分异作用的增强 Nb/Y 比值略有增加, 而 Zr/TiO₂ 比值既指示碱度又指示结晶分异作用程度。细碧岩具非常低的 Nb/Y (<0.15) 和 Zr/TiO₂ (<0.01) 比值, 显示典型的岛弧环境特征。石英角斑岩的低 Zr/TiO₂ 和 Nb/Y 特征也反映相同的构造背景 (Lentz, 1998)。

在 Zr/Y - Zr、Cr - Y 图解 (图 4; 图 5) (Pearce, 1979; Pearce, 1982) 上, 细碧岩数据点分别投影在岛弧玄武岩和火山弧玄武岩区域, 说明细碧岩可能形成于岛弧环境。Cr - Y 图解的另一个功能是反映成岩过程的部分熔融和结晶分异作用程度, 因为 Cr、Y 不受地幔不均一性的影响, 而取决于部分熔融量以及分离结晶的程度 (王仁民等, 1987), 由此我们推断该区细碧岩形成于部分熔融及分离结晶程度较高的条件下。长英质火山岩 (石英角斑岩) 的 Zr/Y 比值 (3.34 ~ 4.23)、(La/Yb)_N 比值 (0.47 ~ 2.50) 也可以反映出火山岩形成于岛弧环境 (Lentz, 1998)。

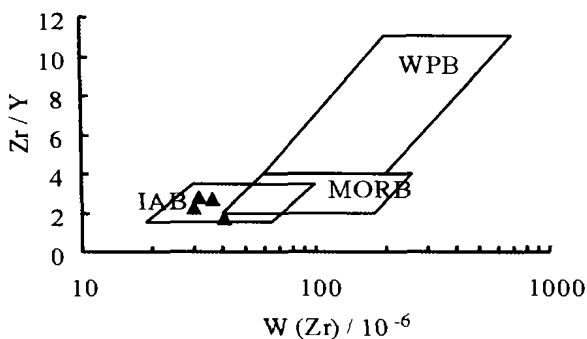


图 4 大平掌矿区细碧岩 Zr/Y - Zr 图解

(据 Pearce *et al.*, 1979)

WPB-板内玄武岩 MORB-洋中脊玄武岩 IAB-岛弧玄武岩

Fig. 4 Zr/Y - Zr diagram of the spilites from the Dapingzhang ore district

微量元素判别结果表明, 大平掌矿区火山岩形成于岛弧环境, 经历的地幔部分熔融和分离结晶程度较高。大平掌细碧岩-石英角斑岩建造与“三江”地区其它零星分布的早古生代中基性、中酸性、酸性火山岩的岩石组合、产出构造背景具相似性, 前人的构造演化研究表明这些火山岩形成于岛弧环境 (罗建宁等, 1992; 莫宣学等, 1993)。这也为本研究的结论提供了强有力的佐证。

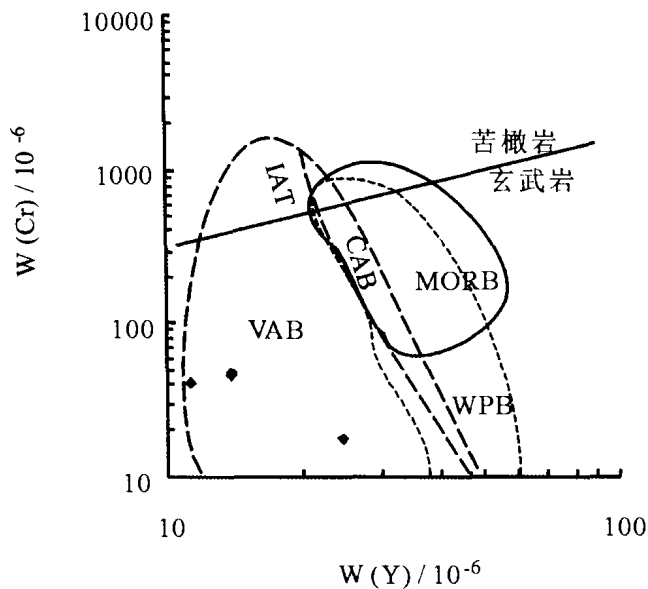


图 5 大平掌矿区细碧岩 Cr - Y 图解

(据 Pearce, 1982)

CAB-钙碱性玄武岩 IAT-岛弧拉斑玄武岩 MORB-洋中脊玄武岩

VAB-火山弧玄武岩 WPB-板内玄武岩

Fig. 5 Cr - Y diagram of the spilites from the Dapingzhang ore district

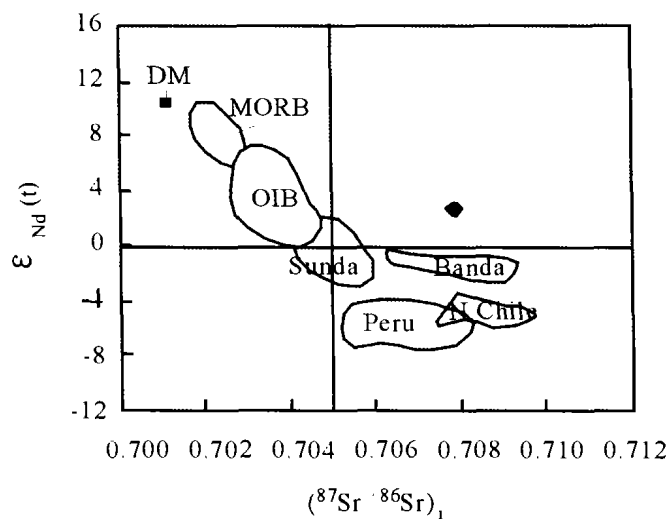


图 6 大平掌矿区火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 图解

(据 Faure, 1986 修改)

MORB: 大洋中脊玄武岩; OIB: 洋岛玄武岩; Sunda & Banda: 巽他和班达 (印度尼西亚岛弧玄武岩); Peru & N. Chile: 秘鲁和智利北部大陆边缘火山岩; DM: 亏损地幔; ◆ 大平掌矿区火山岩

Fig. 6 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ diagram of the volcanic rocks from the Dapingzhang ore district

(modified after Faure, 1986)

表3 大平掌矿区火山岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征

Table 3 Sr、Nd、Pb isotopic characteristics of the volcanic rocks from the Dapingzhang ore district

样号	样品名称	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
DP ₅ -7	细碧岩	0.707794	+55.2	0.512114	+2.6	17.781	15.587	38.394
DP ₅ -7'	角斑岩	0.707829	+55.7	0.512114	+2.6	18.465	15.582	38.412
DP ₆ -3	角斑岩	0.707868	+56.3	0.512118	+2.7	17.653	15.564	38.016
DP ₆ -5'	细碧岩	0.707879	+56.4	0.512117	+2.7	-	-	-
DP ₆ -6	细碧岩	0.707814	+55.5	0.512120	+2.7	18.431	15.613	38.586

注: Sr、Nd 数据引自 Zhong *et al.* (2000), Pb 数据引自钟宏等 (2000)。

5 同位素地球化学特征

大平掌矿区火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素特征见表 3。这套火山岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7078$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 2.7$, 说明其成岩物质应主要来源于弱亏损地幔。但在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(图 6)上, 大平掌火山岩的投影点明显偏离岩石形成时的亏损地幔值, 表明这套岩石明显受到地壳混染作用或海水热液蚀变的影响(Zhong *et al.*, 2000)。由于海水中钕含量低($\leq 3 \mu\text{g/g}$)且钕在海水中滞留时间短暂(< 300 年), 海水热液混染不可能使岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 发生很大的变化(Jacobsen *et al.*, 1979), 所以 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值表明地壳混染在成岩过程中的重要性。高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值则可能由地壳混染和(或)海底热卤水混染引起。地壳混染已由钕同位素特征得到证实。同时海水具有高铯含量(8×10^{-6})和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (当时为 0.709 左右)(沈渭洲等, 1992), 在岩石形成时或形成后不久发生的海水热液混染过程中, 两者之间的铯同位素交换也可使岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值升高。大平掌细碧岩-石英角斑岩建造的 Sr、Nd 同位素特征与 Banda 弧、南美大陆边缘(智利北部、秘鲁)火山岩相似(图 6), 表明其形成于岛弧环境, 且岩浆与地壳岩石或海水之间进行过明显的物质交换。

大平掌矿区火山岩明显富含放射性成因铅, 其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 17.653$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.564$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 38.016$ (表 3)。岛弧火山岩铅一般都位于大洋中脊玄武岩和大洋沉积物铅(或上地壳铅)之间, 其铅同位素组成也反映它们所在区域内大洋沉积物特征(Zindler *et al.*, 1986)。靠近大陆的岛弧火山岩铅必然就会反映出陆源沉积物铅混入的迹象, 因此大平掌细碧岩-石英角斑岩建造富含放射性成因铅的特征与其形成于岛弧环境非常吻合。

6 结论

(1) 大平掌矿区细碧岩-石英角斑岩建造为双峰式火山岩组合, 缺乏中性火山岩。火山岩的 TiO_2 含量低, 表明其可

能形成于洋内岛弧或初始弧后盆地环境。

(2) 矿区火山岩的稀土总量低到中等, 轻稀土富集而重稀土平坦, 配分曲线右倾。细碧岩的锕正异常特征与岛弧拉斑玄武岩的特征吻合。

(3) 矿区火山岩的不相容元素 N-MORB 标准化分配型式以 Ba、Nd、Sm 的相对富集和 Nb、Sr、Ti 的相对亏损为特征。Ba 富集和 Nb 亏损是岛弧火山作用的主要特征之一。

(4) 大平掌矿区细碧岩具非常低的 Nb/Y (< 0.15) 和 Zr/TiO₂ (< 0.01) 比值, 石英角斑岩的低 Zr/TiO₂ 和 Nb/Y 特征以及 Zr/Y 比值(3.34 ~ 4.23)、(La/Yb)_N 比值(0.47 ~ 2.50) 变化范围都可以反映出火山岩形成于岛弧环境。这一结论也得到 Zr/Y - Zr、Cr - Y 图解判别结果的有力支持。

(5) 大平掌矿区火山岩的 Sr、Nd 同位素特征与世界上典型的岛弧火山岩的 Sr、Nd 特征相似, 其岩浆来源于亏损地幔, 且受到地壳混染作用和(或)海底热液蚀变的影响。火山岩富含放射成因铅的特征也与其所处的岛弧环境密切相关。

致谢 本项目的顺利完成还得益于涂光焯院士的悉心指导, 野外工作得到云南省第五地质大队领导及三分队全体同志的大力支持, 作者谨向他们表示衷心的感谢!

References

- Campbell I H, Coad P, Franklin J M *et al.* 1982. Rare earth elements in volcanic rocks associated with Cu-Zn massive sulfide mineralization: a preliminary report. *Can. J. Earth Sci.*, 19: 619 - 623
- Campbell I H, Leshes C M, Coad P *et al.* 1984. Rare earth element mobility in alteration pipes below massive sulfide deposits. *Chem. Geol.*, 45: 181 - 202
- Chen Bingwei, Wang Kaiyuan, Liu Wanxi *et al.* 1987. Geotectonics of the Nujiang River- Lancangjiang River- Jinshajiang River region. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology. 2nd edition, Wiley, New York, 217 - 234
- Hali J M, and Yang J S. 1991. A preferred environmental of preservation

- for volcanic massive sulfide deposits in the Troodos ophiolite (Cyprus). *Econ. Geol.*, 89: 851–857
- Jacobsen S B, and Wasserburg G J. 1979. Nd, and Sr isotopic study of the Bay of Island ophiolite complex and the evolution of the source of mid-ocean ridge basalts. *J. Geophys. Res.*, 84: 7429–7445
- Jia Qunzi. 1996. Geological characteristics and metallogenic environment of the Ashele volcanogenic massive sulfide deposit, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 15: 267–277 (in Chinese with English abstract)
- Lentz D R. 1998. Petrogenetic evolution of felsic volcanic sequences associated with Phanerozoic volcanic-hosted massive sulphide systems; the role of extensional geodynamics. *Ore Geol. Rev.*, 12: 289–327
- Li Changnian. 1992. Trace element petrology of igneous rocks. Wuhan: Press of China University of Geosciences (in Chinese)
- Luo Jianning, Zhang Zhengui, Chen Ming *et al.* 1992. Sedimentary geology and mineralization in the Tethys of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue *et al.* 1993. Volcanism and mineralization in the Tethys of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Pearce J A, and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33–47
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thrope R S (ed.). *Andesites*. J Wiley and Sons, Chichester: 525–547
- Qi Qu, Zhou Xinmin, and Wang Dezi. 1986. The origin of the spilite-keratophyre series and the characteristics of the related mantle-derived granitic rocks in Xiqiu, Zhejiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 5(4): 299–308 (in Chinese with English abstract)
- Shen Weizhou, Zou Haibo, Chu Xuejun *et al.* 1992. Nd, Sr and O isotopic study on Fuchuan ophiolite suite in Anhui province. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 333–341 (in Chinese with English abstract)
- Stolz A J. 1995. Geochemistry of the Mount Windsor Volcanics: implications for the tectonic setting of Cambro-Ordovician volcanic-hosted massive sulfide mineralization in northeastern Australia. *Econ. Geol.*, 90: 1080–1097
- Sun S-S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J (eds.). *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society of London Special Publication 42: 313–345
- Wang Denghong. 1996. Devonian bimodal volcanic rocks and metalotectonic environment of the Ashele copper district in Xinjiang. *Geological Review*, 42(1): 45–53 (in Chinese with English abstract)
- abstract)
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen *et al.* 1987. Original rocks identification of metamorphosed rocks using diagrams. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua *et al.* 1989. Rare earth element geochemistry. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Whitford D J, Korsch M J, Porritt P M *et al.* 1988. Rare earth element mobility around the volcanogenic polymetallic massive sulfide deposit at Que River, Tasmania. *Chem. Geol.*, 68: 105–119
- Winchester J A, and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, 20: 325–343
- Zhong Hong, Hu Ruizhong, Ye Zaojun *et al.* 2000. Isotope geochronology of Dapingzhang spilite-keratophyre formation in Yunnan province and its geological significance. *Science in China (series D)*, 43(2): 200–207
- Zhong Hong, Hu Ruizhong, and Ye Zaojun. 2000. Sulfur, lead, hydrogen and oxygen isotopic geochemistry of the Dapingzhang copper-polymetallic deposit, Yunnan province. *Geochimica*, 29(2): 136–142 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A, and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493–571

附中文参考文献

- 陈炳蔚, 王铠元, 刘万熹等. 1987. 怒江-澜沧江-金沙江地区大地构造. 北京: 地质出版社
- 贾群子. 1996. 新疆阿舍勒块状硫化物矿床成矿特征及形成环境. *矿床地质*, 15(3): 267–277
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社
- 罗建宁, 张正贵, 陈明等. 1992. 三江特提斯沉积地质与成矿. 北京: 地质出版社
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越等. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社
- 祁岷, 周新民, 王德滋. 1986. 浙江西裘细碧角斑岩的成因与相关幔源花岗岩类的特征. *岩石矿物学杂志*, 5(4): 299–308
- 沈渭洲, 邹海波, 楚雪君等. 1992. 安徽伏川蛇绿岩套的 Nd-Sr-O 同位素研究. *地质科学*, (4): 333–341
- 王登红. 1996. 新疆阿舍勒铜矿区双峰式火山岩与成矿背景的初步研究. *地质论评*, 42(1): 45–53
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珠等. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社
- 王中刚, 于学元, 赵振华等. 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社
- 钟宏, 胡瑞忠, 叶造军. 2000. 云南大平掌铜多金属矿床硫、铅、氢、氧同位素地球化学. *地球化学*, 29(2): 136–142