

# 江西岩背斑岩锡矿区火山侵入杂岩 稀土元素特征和成岩模拟\*

刘昌实 沈渭洲 熊小林 王德滋  
(南京大学地球科学系, 南京 210008)

**主题词** 斑岩锡矿 稀土元素协变投影 成岩模拟

**提要** 以岩背斑岩锡矿区火山侵入杂岩为例, 根据稀土元素Ce, Nd, Eu, Yb等5种元素6种不同式样协变关系(元素—元素, 比值—比值)的判别, 重建了本区火山侵入杂岩成岩机制。结果认为, 本区第一旋回酸性岩浆是由华南加里东褶皱区基底(云开群) $F=0.3$ 的聚集熔融形成的。未喷出地表的那一部分岩浆经历了 $F=0.2$ 的分离结晶作用形成本区残余的花岗质熔体。

江西会昌岩背大型斑岩锡矿位于武夷山南段稀有金属—锡钨成矿带内。它于1985年由江西地质研究所与物化探大队发现并联合进行勘探, 是继银岩斑岩锡矿之后华南锡矿找矿工作的又一重大突破。由于它是Sn-F型, 不同于驰名中外的玻利维亚的Sn-B型, 从而成为世界重要的典型矿例之一。

## 1 地质概况

岩背锡矿位于石城—寻乌断裂带上。后者是邵武—河源断裂在江西境内的延伸部分。目前国内地质学家均把这一断裂作为华夏古陆与华南加里东褶皱带的拼贴带<sup>[1,2]</sup>。中生代时期受库拉板俯冲的影响, 该断裂又一次活化, 形成众多大小不等的火山盆地(如岩背火山盆地)等。通过本次调研和室内研究, 将岩背地区火山—侵入旋回、阶段划分如下:

### 1.1 第一旋回: 分为四个阶段

(1) 第一阶段: 主要由灰流相流纹质熔结凝灰岩和火山散落相的凝灰岩和少量角砾凝灰岩组成, 其产状以火山为中心向外倾(图1)。

(2) 第二阶段: (次)流纹斑岩, 为喷溢—侵出相。因地球化学特征相似于火山岩, 在下文讨论中将其和火山岩合并。

(3) 第三阶段: 为浅成相含黄玉花岗斑岩和中深成相含黄玉花岗岩。东侧为岩背岩体, 西侧为凤凰嶂岩体。饼状锡矿体赋存于岩背岩体与(次)流纹斑岩的内外接触带上(图1)。

(4) 第四阶段: 火成黄英斑岩, 呈脉状出露于凤凰嶂一带。

### 1.2 第二旋回

国家自然科学基金资助项目(49070092)。  
本文于1993年5月收到, 1993年7月改回。

主要为(次)英安流纹岩。在增坑一带英安流纹岩具有爆破侵入角砾构造,同时在薄片  
中常见捕获有第一旋回细粒花岗岩的捕  
虏体。活动时间应晚于花岗岩。

### 1.3 第三旋回

主要为闪长斑岩。为成矿后期岩浆  
活动,规模很小。

根据以上划分,本区岩浆活动从早  
到晚岩性由酸性变为中酸性,呈反序分  
布,表明深部岩浆房具有成分分带的特  
征。各旋回、阶段的代表性岩石的化学  
成分和稀土含量分别列于表1和2。

作为一个整体,本区火山侵入杂岩  
主成分特点是:①第一旋回岩石特别富  
SiO<sub>2</sub> (>73%), 贫 TiO<sub>2</sub>、MgO; 第二  
旋回的(次)英安流纹岩相对贫 SiO<sub>2</sub>  
(<67%), 富 TiO<sub>2</sub>、MgO(表1)。②富F  
贫 Cl, 具有高的 F/Cl 比(8-552)。③  
相对富 K<sub>2</sub>O, 贫 Na<sub>2</sub>O, Na/K(atm)  
值为 0.008-1.498。④弱至强的过铝  
质, A/NKC 值为 0.927-2.756。⑤中  
等碱质, NK/A(atm)为 0.330-0.897。  
本次对岩背流纹质火山岩 5 件 Rb-Sr 等  
时线测定, 得  $t(V) = 123.3 \pm 1.3\text{Ma}$ ,  
 $I_{Sr}(V) = 0.7103 \pm 0.0004$ 。含黄玉花岗  
斑岩和花岗岩 4 件 Rb-Sr 等时线获得  
 $t(P) = 114.1 \pm 0.7\text{Ma}$ ,  $I_{Sr}(P) = 0.7118$   
 $\pm 0.0007$ 。 $\epsilon_{Nd}(T)$  值测定和计算结果  
是: 熔结凝灰岩 = -8.9~-9.3; (次)  
流纹斑岩 = -8.9; 含黄玉花岗斑岩 =  
-4.0~-4.8; (次) 英安流纹岩 =

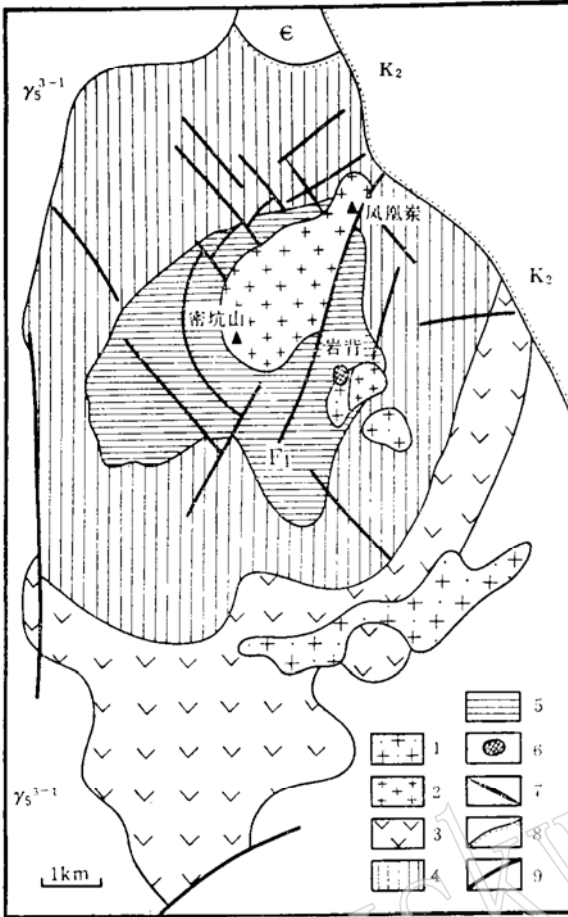


图 1 岩背斑岩锡矿区地质略图 (据江西省地矿局  
1/5万区测图修编)

Fig. 1 Schematic geological map of the Yanbei  
porphyry tin ore district

1—含黄玉花岗斑岩; 2—含黄玉花岗岩; 3—(次)英安流纹  
岩; 4—熔结凝灰岩、凝灰岩夹流纹斑岩; 5—(次)流纹斑  
岩; 6—锡矿体; 7—黄英岩脉; 8—不整合接触; 9—断层;  
ε—寒武系; K<sub>2</sub>—上白垩统;  $\gamma_s^{3-1}$ —燕山早期花岗岩

-9.4。具有较高的  $I_{Sr}$  和较低的  $\epsilon_{Nd}(T)$  值。

## 2 稀土元素分布特征

第一旋回火山侵入杂岩,特别是含黄玉花岗(斑)岩,其稀土含量与配分模式图(图2,  
A-C)与华南锡、钨、稀有金属花岗岩<sup>[3,4]</sup>极其相似。主要表现为:

(1) 普遍具有弱的铈负异常,  $\delta Ce$  值熔结凝灰岩为 0.71 (N=4), (次)流纹斑岩为 0.86  
(N=2), 含黄玉花岗(斑)岩为 0.70 (N=4), 含黄玉花岗岩为 0.60 (N=7)。据 Taylor<sup>[5]</sup>

表1 岩背火山侵入杂岩化学成分

Table 1 Chemical composition of the Yanbei volcanic-intrusive complex

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	H <sub>2</sub> O	2F=O	总量
1	76.51	0.05	12.61	0.76	1.29	0.05	0.07	0.85	2.57	4.07	0.00	0.254	1.14	0.11	100.11
2	77.06	0.05	12.47	0.53	0.67	0.04	0.00	0.21	1.86	5.13	0.00	0.066	1.31	0.03	99.36
3	79.89	0.05	12.32	0.80	0.73	0.04	0.02	0.22	0.02	3.73	0.00	0.173	2.13	0.07	100.05
4	78.46	0.03	10.33	0.35	1.46	0.06	0.04	1.21	1.16	5.41	0.00	0.053	1.41	0.02	99.95
5	74.99	0.05	13.12	0.48	0.98	0.04	0.00	0.23	2.24	5.13	0.00	0.048	0.76	0.02	98.05
6	76.84	0.05	12.84	0.49	0.79	0.05	0.00	0.22	1.94	5.05	0.00	0.076	1.11	0.03	98.43
7	76.13	0.01	12.17	0.39	1.12	0.11	0.00	1.17	2.93	5.25	0.00	0.565	0.70	0.24	100.30
8	75.31	0.01	12.24	0.49	1.52	0.07	0.00	1.23	2.96	5.64	0.00	0.700	0.79	0.29	100.67
9	76.63	0.04	12.21	0.60	1.02	0.04	0.00	1.01	2.88	5.25	0.00	0.368	0.87	0.15	100.76
10	75.70	0.01	12.81	0.02	0.86	0.04	0.00	1.10	1.82	5.80	0.00	0.700	1.34	0.29	100.91
11	75.78	0.04	12.38	0.37	1.32	0.05	0.00	1.16	3.24	5.26	0.00	0.880	0.67	0.37	100.78
12	75.98	0.02	12.27	0.39	1.45	0.07	0.00	1.15	3.33	4.83	0.00	0.800	0.52	0.34	100.47
13	74.68	0.04	12.49	0.58	1.58	0.12	0.00	1.21	2.92	4.88	0.00	1.160	0.91	0.49	100.08
14	76.04	0.02	12.17	0.58	1.09	0.09	0.00	1.19	2.87	6.85	0.00	0.960	0.75	0.40	100.21
15	73.48	0.05	13.43	0.49	1.65	0.05	0.34	0.98	2.91	6.03	0.00	1.260	0.58	0.53	100.72
16	76.31	0.02	12.17	0.33	1.18	0.06	0.00	0.95	2.81	4.77	0.00	1.160	0.74	0.49	100.01
17	77.55	0.07	11.86	0.45	1.04	0.03	0.02	0.63	3.06	4.79	0.00	0.564	0.66	0.24	100.48
18	77.57	0.02	12.00	0.40	0.59	0.03	0.00	0.33	2.77	5.09	0.00	0.400	0.79	0.17	99.82
19	64.67	0.62	16.14	1.75	3.31	0.14	0.72	3.24	3.42	3.99	0.08	0.159	1.16	0.07	99.31
20	66.27	0.55	15.53	1.56	2.80	0.09	0.45	1.47	3.06	5.51	0.06	0.270	1.95	0.11	99.46

1—4: 流纹质熔结凝灰岩; 5—6: (次)流纹斑岩; 7—10: 含黄玉花岗斑岩; 11—18: 含黄玉花岗岩; 19—20: (次)英安流纹岩

研究以及近年有关华南基底岩石稀土分析的报导,  $\delta\text{Ce} < 1$  是变质沉积岩源区的重要特征之一, 如PAAS (澳大利亚后太古代页岩)<sup>[5]</sup> 为 0.88, ES (欧州页岩平均值) 为 0.80, 华南前寒武纪变质岩为 0.71—0.86<sup>①</sup>。表明岩背酸性岩浆是衍生于沉积变质岩源区的。

(2) 普遍具有强的Eu负异常,  $\delta\text{Eu}$  值 0.19—0.05。配分模式图呈V字形 (图 2, A—C)。

(3) 中等一高的稀土总量 ( $\Sigma\text{REE}$  值)。火山岩为  $(181.75—184.36) \times 10^{-6}$ , 但花岗 (斑) 岩高达  $(382.58—390.50) \times 10^{-6}$ 。

(4) 富重稀土,  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  值对于火山岩为 4.36—4.82, 对于花岗 (斑) 岩为 2.42—2.76, 随着岩石中 F 和全碱含量增大 (表 1, 2) 该比值降低。表明重稀土丰度与全岩 F 和全碱含量呈正比。

(5) 具有与华南稀有金属花岗岩<sup>[4]</sup> 相似的稀土四分组效应。第 1, 2 分组为右倾斜,  $\text{La}_N/\text{Nd}_N$  和  $\text{Nd}_N/\text{Gd}_N$  变化范围分别为 1.99—2.40 和 2.30—2.85。第 3, 4 分组为左倾斜,  $\text{Gd}_N/\text{Ho}_N$  和  $\text{Ho}_N/\text{Lu}_N$  分别为 0.72—1.02 和 0.67—0.84 (图 2, A—C)。

① 引自凌洪飞 (1990, 博士论文), 九岭群  $\delta\text{Ce}$  为 0.83, 双桥山群为 0.81, 汜工群为 0.77, 修水群为 0.86, 冷家溪群为 0.81, 震旦纪变质岩为 0.71, 西堡群为 0.80。

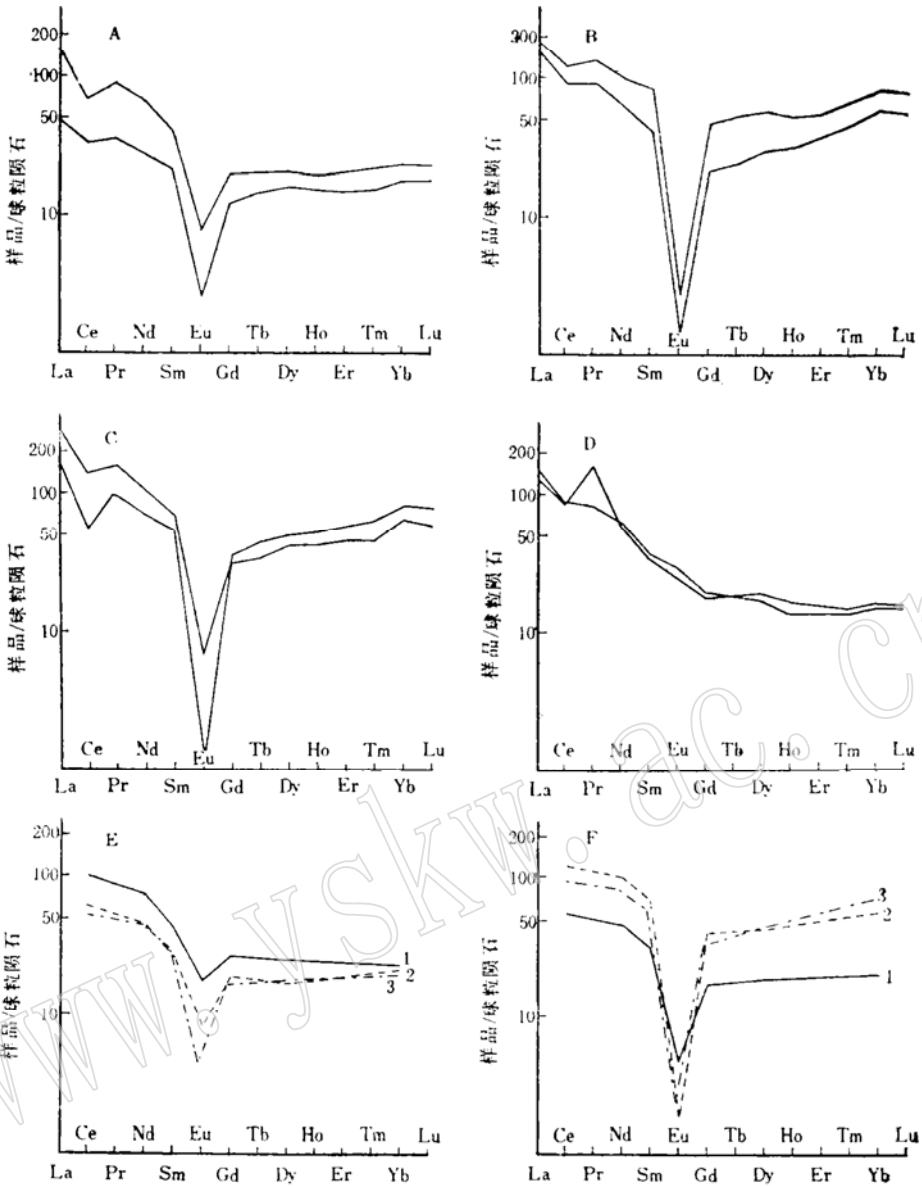


图 2 岩背火山侵入杂岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns for the Yanbei volcanic-intrusive complex

A—熔结凝灰岩和(次)流纹斑岩 (N=6); B—含黄玉花岗斑岩 (N=4); C—含黄玉花岗岩 (N=7);  
 D—(次)英安流纹岩 (N=2); E: 1—云开群片麻岩(源区); 2—源区 $R=0.3$ 聚集熔融时计算值; 3—岩背熔结凝灰岩平均值 (N=4); F: 1—岩背熔结凝灰岩平均值 (N=4); 2—分离结晶时计算值( $R=0.2$ ); 3—含黄玉花岗岩平均值 (N=7)

第二旋回的(次)英安流纹岩稀土配分模式与第一旋回明显不同, Eu为正常值,  $\delta Eu = 0.99$  (N=2) (图2, D)。它是源区残余物在斜长石作为主要熔融相情况下又一次熔融形成的。

表2 岩背火山侵入杂岩稀土元素含量( $\times 10^{-6}$ )Table 2 REE contents of the Yanbei volcanic-intrusive complex( $\times 10^{-6}$ )

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
1	53.2	63.3	10.6	39.5	7.9	0.56	6.0	0.88	5.40	1.1	3.1	0.50	3.4	0.55	31.8
2	25.6	51.7	6.4	25.1	5.9	0.31	5.3	0.95	6.30	1.4	4.1	1.30	4.4	0.70	38.2
3	15.6	30.7	4.2	16.3	4.2	0.19	3.8	0.73	5.00	1.1	3.4	0.54	3.6	0.58	32.5
4	30.7	63.2	7.5	29.9	7.0	0.30	6.1	1.00	6.30	1.3	3.7	0.59	4.0	0.63	37.2
5	25.8	55.7	6.3	24.6	5.6	0.30	4.9	0.88	6.00	1.3	4.1	0.65	4.4	0.70	36.6
6	32.3	64.4	7.7	30.1	6.5	0.32	5.0	0.83	5.40	1.1	3.2	0.76	3.5	0.56	29.2
7	61.0	93.2	14.3	50.7	12.9	0.13	11.6	2.10	15.30	3.6	11.6	2.01	14.5	2.20	108.0
8	55.0	88.0	13.3	47.0	11.9	0.13	10.8	2.20	15.40	3.6	11.2	1.90	14.2	2.10	108.0
9	51.1	85.3	10.9	36.7	8.1	0.11	6.6	1.20	9.20	2.3	7.8	1.50	11.1	1.70	67.6
10	58.5	113.0	16.0	58.8	16.4	0.20	14.4	2.60	17.60	3.8	11.7	2.20	15.5	2.40	108.0
11	64.5	57.2	14.8	51.3	12.5	0.12	11.0	2.20	15.40	3.8	12.0	2.10	15.5	2.40	111.0
12	55.9	52.4	13.1	46.3	11.7	0.10	10.5	2.00	14.30	3.5	11.1	1.90	13.9	2.20	107.0
13	67.0	84.2	14.8	50.2	11.6	0.11	10.0	1.90	13.40	3.3	10.6	1.86	13.5	2.10	98.6
14	58.8	91.6	14.0	49.4	12.2	0.10	10.9	1.90	14.30	3.4	11.0	1.90	13.9	2.30	103.0
15	66.7	126.0	14.6	50.4	11.8	0.50	10.2	1.80	13.00	3.1	9.6	1.50	12.3	1.80	94.9
16	43.6	92.1	11.6	41.5	10.7	0.09	9.6	1.70	13.02	3.3	10.6	1.80	13.8	2.00	101.0
17	93.0	131.0	19.0	61.7	13.7	0.25	10.3	1.90	13.60	3.2	10.1	1.80	13.7	2.10	90.6
19	41.9	79.2	19.2	35.2	6.8	1.80	5.6	0.92	5.90	1.2	5.2	0.49	3.1	0.49	29.6
20	49.5	82.0	9.8	37.4	7.3	2.10	6.0	0.91	5.30	1.0	2.9	0.45	2.9	0.47	32.8

注:序号及所代表岩性同表1。

### 3 利用稀土元素协变关系重建成岩作用机制

在不同成岩机制(分离结晶,岩浆混合,平衡结晶等)制约下,微量元素根据能斯特分配理论,其丰度变化规律已有成熟的成岩模式表示<sup>[6-9]</sup>。由这些模式推导出元素—元素,比值—比值的协变关系有一定的特定性<sup>[10]</sup>。经推导笔者将其归纳于表3。在给出n个样品, m个变量(元素)分析值后,用最小二乘拟合方法,以线性方程( $y=ax+b$ ),幂方程( $y=dx^b$ )和双曲方程( $ax+bxy+cy+d=0$ )分别进行拟合,并计算其相关系数。取其正态分布好,相关系数高( $R^{*1}>0.70$ )的协变关系进行比较,以资判别成岩作用的主要机理。本文取稀土元素La, Sm, Nd, Eu, Yb五个元素含量按表3中6种协变样式分别计算线性函数、双曲函数和幂函数的相关系数(表4),就其结果讨论如下:

#### (1) 第1样式( $u/v-x/y$ )<sup>\*1</sup>

应有34组协变关系产生。 $R<0.7$ (无判别意义)占14组, $>0.70$ 的20组中,多数是 $R_p(1)>R_b(1)$ 或 $R_l(1)$ <sup>\*3</sup>(表4)。图3A为Sm/Eu—Nd/Yb的散点图,拟合的幂方程为

\*1 本文R代表相关系数的绝对值|R|。

\*2 u, v, x, y分别代表4种不同元素。

\*3  $R_p, R_b, R_l$ 分别代表幂函数、双曲函数、线性函数相关系数,括号数字代表样式编号。

表 3 不同岩浆演化机制下元素协变关系  
Table 3 Trace element covariance plots under different magmatic evolution mechanism

机 制	样 式					
	(1) u/v-x/y	(2) x-y	(3) x/y-x	(4) x/v-x/y	(5) u/y-x/y	(6) x/y-1/y
I 分离结晶分离熔融热扩散	幂	幂	幂	幂	幂	幂
II 混合不混溶对流	双曲	直线	双曲	双曲	直线	直线
III 平衡结晶批式熔融	双曲	双曲	直线	直线	双曲	双曲
IV 聚集熔融	近直线	近直线	近双曲	近双曲	近双曲	近双曲

$(Nd/Yb) = 20.4554(Sm/Eu)^{-0.3884}$ 。表明表 3 中机制 I 成立, 而机制 II, III, IV 被排除。

(2) 第 2 样式 (x-y)

应有 10 组协变关系产生。 $R > 0.7$  共有 6 组,  $R_h(2) > R_p(2) > R_l(2)$  有 3 组, 而  $R_l(2) > R_h(2)$  或  $R_p(2)$  也有 3 组。表明表 3 中机制 II、III、IV 可能都存在, 但机制 I 被排除。图 3B 是 Sm-Yb 散点图, 拟合的线性方程为  $Yb = 1.4218(Sm) - 4.285$ 。

(3) 第 3 样式 (x/y-x)

应有 30 组协变关系, 其中  $R > 0.7$  有 9 组, 多数组是  $R_l(3) > R_p(3)$  或  $R_h(3)$ , 表明机制 III 存在, I、II、IV 被排除。图 3C 是 Eu/La-Eu 散点图, 拟合的线性方程为  $Eu/La = 0.0213(Eu) + 0.0009$ 。

(4) 第 4 样式 (x/y-x/u)

应有 15 对协变关系,  $R > 0.7$  共 11 组, 而  $R_p(4) > R_h(4)$  或  $R_l(4)$  有 6 组, 其余为无判别意义的  $R_p(4) \approx R_h(4) \approx R_l(4)$  (表 4)。这样式判别表明机制 I 成立, 而机制 II、III、IV 被排除。图 3D 是 Nd/Eu-Nd/Yb 的散点图, 拟合的幂函数为  $Nd/Eu = 3856(Nd/Yb)^{-1.9724}$ 。

(5) 第 5 样式 (x/y-u/y)

应有 30 组,  $R > 0.7$  有 20 组, 其中  $R_p(5)$  显著大于  $R_h(5)$  或  $R_l(5)$  有 5 组 (表 4), 其余为无判别价值的  $R_p(5) \approx R_h(5) \approx R_l(5)$ 。这样式判别表明, 机制 I 成立, 而机制 II、III、IV 被排除。图 3E 为 Eu/Yb-Sm/Yb 散点图, 拟合幂方程为  $Eu/Yb = 0.01804(Sm/Yb)^{3.5164}$ 。

(6) 第 6 样式 (u/y-1/y)

应有 20 组,  $R > 0.7$  有 9 组, 其中  $R_h(6) > R_p(6)$ ,  $R_l(6)$  有 4 组,  $R_p(6) > R_h(6)$ ,  $R_l(6)$  有 2 组, 其余组为无判别意义的  $R_p(6) \approx R_h(6) \approx R_l(6)$  (表 4), 表明机制 I, III, IV 成立, II 被排除。图 3F 是 Sm/Eu-1/Eu 散点图, 拟合的双曲方程为  $1/Eu + 0.0044(1/Eu)(Sm/Eu) - 0.1428(Sm/Eu) = 0$ 。

根据上述 6 种样式协变关系的判别, 表 3 中机制 I 被肯定 4 次, 排除 2 次; 机制 II 肯定 1 次, 排除 5 次; 机制 III 肯定 3 次, 排除 3 次; 机制 IV 肯定 2 次, 排除 4 次。根据以上综合笔者认为:

(1) 反应两种岩浆混合作用的特征协变关系  $R_l(5)$  和  $R_l(6)$  占优势没有出现。表明它

表4 岩背火山侵入杂岩稀土元素协变关系  
Table 4 REE covariance plots for the Yanbei volcanic intrusive complex

第1样式 $u/v-x/y$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	La/Eu	La/Eu	La/Yb	La/Yb	Sm/Eu	Sm/Eu	Sm/Yb	Sm/Yb	Sm/Yb	Nd/Eu	Nd/Yb
	Sm/Yb	Nd/Yb	Sm/Eu	Nd/Eu	Eu/Sm	Nd/Yb	Yb/Nd	Nd/Eu	Eu/Nd	Yb/Sm	Eu/Sm
直线	-0.78	-0.74	-0.69	-0.68	0.83	-0.76	0.88	-0.78	0.81	0.86	0.84
双曲	-0.75	-0.76	-0.72	-0.72	0.81	-0.74	0.88	-0.73	0.86	0.81	0.88
幂	-0.89	-0.88	-0.87	-0.84	0.87	-0.91	0.91	-0.89	0.89	0.89	0.91

第2样式 $x-y$						
	La-Sm	La-Nd	Sm-Nd	Sm-Yb	Nd-Yb	La-Yb
直线	0.82	0.94	0.96	0.91	0.83	0.72
双曲	0.92	0.99	0.97	0.79	0.63	0.56
幂	0.89	0.97	0.96	0.88	0.76	0.69

第3样式 $x/y-x$									
	Eu/La	Eu/Sm	Eu/Nd	Eu/Yb	Yb/Nd	La/Sm	Yb/Eu	Yb/Sm	Yb/La
	Eu	Eu	Eu	Eu	Yb	La	Yb	Yb	Yb
直线	0.97	0.99	0.99	0.99	0.89	0.78	0.87	0.87	0.77
双曲	0.92	0.94	0.95	0.95	0.88	0.73	0.71	0.90	0.79
幂	0.92	0.95	0.95	0.95	0.89	0.77	0.91	0.90	0.78

第4样式 $x/v-x/y$									
	Sm/Yb	Nd/Yb	La/Yb	Yb/Eu	Yb/Eu	Yb/Eu	Eu/Yb	Eu/Yb	Eu/Yb
	Sm/Eu	Nd/Eu	La/Eu	Yb/La	Yb/Sm	Yb/Nd	Eu/La	Eu/Sm	Eu/Nd
直线	-0.78	-0.75	-0.64	0.81	0.88	0.89	0.97	0.99	0.99
双曲	-0.71	-0.75	-0.71	0.85	0.81	0.84	0.97	0.99	0.99
幂	-0.90	-0.90	-0.79	0.90	0.94	0.95	0.98	0.99	0.99

第5样式 $x/y-u/y$										
	La/Yb	Sm/Yb	Nd/Yb	Eu/Sm	Eu/Nd	La/Eu	La/Eu	Sm/Eu	Sm/Eu	Nd/Eu
	Eu/Yb	Eu/Yb	Eu/Yb	Yb/Sm	Yb/Nd	Sm/Eu	Nd/Eu	Nd/Eu	Yb/Eu	Yb/Eu
直线	0.85	0.81	0.84	-0.71	-0.75	0.97	0.99	1.00	0.99	0.99
双曲	0.81	0.88	0.89	-0.78	-0.75	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99
幂	0.90	0.94	0.95	-0.90	-0.90	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99

第6样式 $x/y-1/y$								
	La/Eu	Sm/Eu	Nd/Eu	Yb/Eu	La/Yb	Sm/Yb	Nd/Yb	Eu/Yb
	1/Eu	1/Eu	1/Eu	1/Eu	1/Yb	1/Yb	1/Yb	1/Yb
直线	0.92	0.94	0.95	0.95	0.79	0.90	0.88	0.71
双曲	0.97	0.99	0.99	0.99	0.77	0.87	0.89	0.87
幂	0.92	0.95	0.95	0.95	0.78	0.90	0.89	0.91

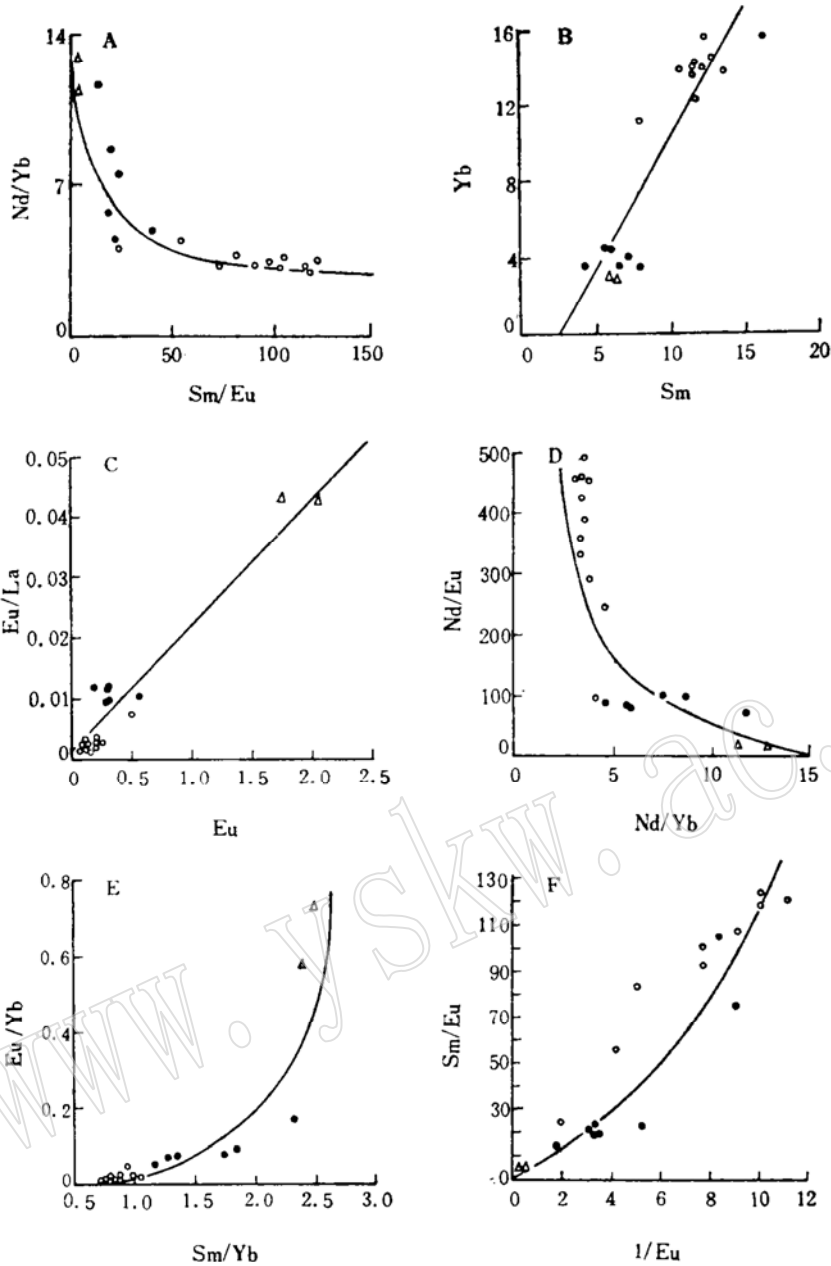


图 3 岩背火山侵入杂岩稀土元素 6 种不同样式的协变投影

Fig. 3 Covariance plots of REE in six different coordinates for Yanbei complex

○—含黄玉花岗岩斑岩和花岗岩；●—熔结凝灰岩和（次）流纹斑岩；△—（次）英安流纹岩

不是造成岩背杂岩体成分多样性的原因。在侵入岩单元内也没发现由岩浆混合而形成淬冷包体也证实了这一点。

(2) 分离结晶作用是造成本区第一旋回火山岩和花岗岩在稀土元素丰度差异的主要原



因之一。特别在与Eu相关的元素—元素, 比值—比值协变关系中  $R_p$  占优势的趋势是明显的。但也不排除局部阶段或局部范围内出现平衡结晶的可能性。

(3) 笔者(1993)<sup>①</sup> 在利用Sr, Rb, Zr, Hf, Nb微量元素重建本区岩浆形成作用(熔融)中曾发现  $R_1(1)$  和  $R_1(2)$  占优势出现, 表明机制IV的聚集熔融作用的主导性。但在本次稀土元素分析中, 机制IV的记录只出现在  $R_1(2)$  和  $R_n(6)$  占优势中,  $R_1(1)$  占优势没有出现。综合考虑微量元素和稀土元素的分布特征, 笔者认为聚集熔融仍然是岩背地区岩浆形成的主要机理。

#### 4 岩背杂岩体岩浆形成作用与结晶作用的模拟

(1) 熔融源区: 据台湾—黑水地学大断面综合研究的最新成果<sup>②</sup>, 通过本区的邵武—河源断裂切入深度约15km, 只达浅变质基底。断面倾向东, 倾角上陡下缓。下盘(华南加里东褶皱区)下冲, 上盘(华夏地块)向上推覆。根据断裂构造上这一格局, 推断本区火山侵入杂岩的初始岩浆是由下冲的华南加里东褶皱区前寒武纪变质基底(云开群)熔融而成的。拟作为本区火山侵入杂岩源区物质代表的云开群堇青石片麻岩的稀土含量列于表4 ( $C_0$ , 引自陈斌等<sup>③</sup>)。

表4 岩背火山侵入杂岩聚集熔融和分离结晶模拟结果

Table 4 Modelling results of collect melting and fractional crystallization processes for Yanbei volcanic-intrusive complex

		Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Yb
分配系数	斜长石	0.27	0.21	0.13	2.15	0.097	0.069	0.049 <sup>(1)</sup>
	钾长石	0.044	0.025	0.018	1.13	0.011	0.006	0.012 <sup>(1)</sup>
	黑云母	0.32	0.29	0.26	0.24	0.28	0.29	0.44 <sup>(1)</sup>
	角闪石	1.52	4.26	7.77	5.14	10.0	13.0	8.38 <sup>(1)</sup>
	独居石	3397	3152	2735	1290	1859	770	1020 <sup>(4)</sup>
	褐帘石	2494	1840	977	100	130	150	37 <sup>(4)</sup>
聚集熔融	$C_0$	94.9	44.0	8.52	1.30	8.30	7.78	4.43 <sup>*1</sup>
	$D_s$	1.78	1.77	1.72	2.37	1.49	1.55	1.11
	$C_1$ (计)	57.40	26.70	5.31	0.60	5.88	5.33	4.05
	$F=0.3$							
	$C_1$ (测)	52.23	27.70	6.25	0.34	5.30	5.75	3.85 <sup>*2</sup>
分离结晶	$C_1^1$	52.23	27.70	6.25	0.34	5.30	5.75	3.85
	$D_s$	0.52	0.52	0.51	1.58	0.47	0.48	0.35
	$C_1^2$ (计)	113.09	59.97	13.75	0.13	12.43	13.27	10.95
	$F=0.2$							
	$C_1^2$ (测)	90.64	50.11	12.03	0.18	10.36	13.86	13.80 <sup>*3</sup>

\*1—据陈斌等, 1993, 云开群片麻岩; \*2—表2 №.1—4平均; \*3—表2 №.11—17平均

① 刘昌实等, 利用微量元素协变关系重建岩浆房成分分带的形成机制, 待刊。

② 中国地质勘查技术院, 1990, 台湾—黑水地学大断面综合研究。

③ 陈斌等, 1993, 云开大山加里东期花岗岩的形成, 岩石学与地球化学证据, 南京大学学报地球科学版, 待刊。

(2) **聚集熔融**: 以本区熔结凝灰岩的稀土含量作为第一批熔出的初始岩浆值(表4C<sub>1</sub>), 若以斜长石(70%)、钾长石(5%)、黑云母(5%)、角闪石(10%)、独居石(0.02%)、褐帘石(0.03%)组合作为残留相(难熔相), 采用表4分配系数, 据聚集熔融模式

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1 - (1 - F)^{1/D}}{F}$$

计算, 当部分熔融度为30% ( $F = 0.30$ ) 时, 理论计算的初始岩浆的稀土含量与岩背熔结凝灰岩平均值极为一致(表4, 图2E)。

(3) **分离结晶**: 以岩背熔结凝灰岩作为初始岩浆值(表4C<sub>1</sub>), 当结晶分离相组合为斜长石(60%)、钾长石(5%)、黑云母(5%)、角闪石(3%)、独居石(0.005%)、褐帘石(0.005%)时, 采用表4分配系数, 按分离结晶模型

$$\frac{C_1^2}{C_1^0} = F^{(D, -1)}$$

计算, 当残余岩浆重量百分比为20% ( $F = 0.20$ ) 时, 理论计算值( $C_1^2$ )与本区花岗岩平均值最为接近(表4, 图2F)。

## 5 小结

(1) 岩背斑岩锡矿区第一旋回的酸性岩浆据稀土元素模拟是由华南加里东褶皱带基底浅变质岩经30%聚集熔融形成的。喷出地面部分的火山岩主要由流纹质熔结凝灰岩夹少量凝灰岩和流纹岩组成。

(2) 第一旋回酸性岩浆未喷出地面部分, 据稀土元素相关分析判断, 以分离结晶作用为主, 形成残余的富F花岗质岩浆(成矿岩体)。按分离结晶模型, 当分离相组合为斜长石(60%)、黑云母(5%)、角闪石(3%)、独居石(0.005%)、褐帘石(0.005%), 当 $F = 0.2$ 时, 计算残余岩浆的稀土元素含量与岩背含黄玉花岗岩实测值极为接近。

(3) 区内英安流纹岩据野外产状和镜下鉴定为次火山岩相, 晚于第一旋回, 为第二旋回岩浆活动的产物。

(4) 岩背火山侵入杂岩作为一个整体, 具有高的 $I_{Sr}$ 值(0.7103—0.7118)和较低的 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值(-4.0—-9.4), 成因类型应为板内S型火山侵入杂岩。

### 参 考 文 献

- 1 水涛. 中国东南大陆基底构造格局. 中国科学, B辑, 1987, (4): 414—422.
- 2 徐克勤, 尹琳, 孙明志, 王新光, 黄标. 华南钨、锡、钼(铌)、稀有金属花岗岩产出的地质背景和岩体演化特征. 南京大学学报(地球科学版), 1991, (1): 1—12.
- 3 朱金初, 徐士进. 华南含锡钨花岗岩的稀土元素地球化学特征与成岩作用. 矿床地质, 1989, 8(3): 21—31.
- 4 赵振华, 增田彰正, M. B. 夏巴尼. 稀有金属花岗岩稀土元素四分组效应. 地球化学, 1992, (3): 221—233.
- 5 Taylor S T. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific Publication, 1985, 1—95.
- 6 Languir C H, Vocke R D, Hanson G N. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts. Earth and Planet. Sci. Lett, 1978, 37: 380—392.
- 7 Minster J F, Allegre G j. Systematic use of trace element in igneous processes. Contrib. Mineral. Petrol. 1978, 68: 37—52.

- 8 Vollmer R. Rb-Sr and U-Th-Pb systematics of alkaline rocks from Italy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1976, 40: 283—295.
- 9 江培谟. 地质过程的理论模拟. 北京: 科学出版社, 1988. 1—274.
- 10 杨浩. 论微量元素协变关系的应用. *地质论评*, 1990, 36(1): 69—80.
- 11 Arth J G. Behaviours of trace elements during magmatic processes—a summary of theoretical models and their applications. *J. Res. USGS*, 1976, 4(1): 41—47.

## REE Characteristics and Petrogenic Models of the Volcanic-Intrusive Complex in the Yanbei Porphyry Tin Ore District

Liu Changshi, Shen Weizhou, Xiong Xiaolin, Wang Dezi

(Department of Earth Sciences, Nanjing University 210008)

**Key words:** porphyry tin deposit; REE covariance plot; petrogenic model

### Abstract

Taking the volcanic-intrusive complex in the Yanbei porphyry tin ore district as an example and based on the covariance plots of Ce, Nd, Sm, Eu, Yb in six different element-element, ratio-ratio coordinates, the authors have reestablished the petrogenic mechanism of the volcanic-intrusive complex in this district. The results suggest that the melt of the first acidic magmatic cycle was formed as a result of accumulative melting of basement rocks in South China ( $F=0.3$ ). A part of acidic magma of the first cycle which was not extruded onto the surface might be crystallized in fractional crystallization state at depth, leading to the formation of residual granitic melts ( $F=0.2$ ).