

湘南多金属矿集区燕山期成矿花岗岩的稀土地球化学特征和成岩成矿作用探讨

伍光英^{1,2} 侯增谦¹ 肖庆辉³ 王 涛¹ 闫全人¹ 陈辉明¹ 马铁球³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
3. 国土资源部信息中心, 北京 100812; 4. 湖南省地质调查院, 湖南 湘潭 411100)

提 要: 湘南燕山期成矿花岗岩可划分为 3 种类型。3 种类型成矿花岗岩具有不同的稀土地球化学特征、配分型式和成分变异特征, 反映出成矿花岗岩的成岩成矿作用有明显的差别。① MC 型花岗岩的 ΣREE 最低, 平均为 225×10^{-6} ; La/Yb 比值平均为 17, LREE/HREE 比值平均为 5.4 和 δEu 为 1.67, 都为最高, 稀土配分曲线呈右倾斜的近直线。C 型花岗岩的 ΣREE 最高, 平均为 353×10^{-6} ; La/Yb 比值平均为 4.3, δEu 平均为 0.14, LREE/HREE 比值平均为 1.5, 都为最小, 稀土配分曲线呈海鸥型。CM 型花岗岩总体上介于上述两类花岗岩之间, ΣREE 变化较大, 早期次单元配分曲线呈右倾斜的近直线, 晚期次单元配分曲线呈海鸥型。② 3 种类型成矿花岗岩从 MC 型—CM 型—C 型花岗岩以及从同一类型花岗岩的早期次单元至晚期次单元, 随岩石酸性程度增高, 稀土总量和稀土元素分量总体增高, 但轻稀土相对亏损, 重稀土相对富集, δEu 、La/Yb 比值、LREE/HREE 比值与 SiO_2 的含量存在较明显的负消长演化关系, 重稀土元素则随岩浆演化学具逆向演化分异性。③ CM 型花岗岩晚期次单元与 C 型花岗岩的稀土元素分馏明显, 配分曲线销谷深, 显示经历了较强的分离结晶作用; 并导致重稀土元素相对富集, 常与 Sn、W、Nb、Pb 富集成矿。④ 成矿花岗岩显示富含 F、Cl 等挥发组分的壳幔源熔体混合型花岗岩类的特点, 其形成与壳幔岩浆混合作用有关, 而 CM 型花岗岩晚期次的花岗岩类和 C 型花岗岩类的岩浆演化可能还存在分离结晶作用。

关 键 词: 稀土元素; 地球化学特征; 多金属矿; 花岗岩; 湘南

中图分类号: P588.12*1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)-0410-11

湘南锡多金属矿集区(简称研究区)位处南岭山脉中段北缘, 是南岭中段多金属成矿带的一个重要组成部分(图 1)。研究区丰富的金属矿产与燕山期花岗岩关系密切, 如柿竹园、骑田岭、香花岭、黄沙坪、宝山、大义山、水口山、川口、瑶岗仙、铜山岭等大型—超大型多金属矿矿区(床), 主要产于燕山期花岗岩类岩体或其围岩之中。因此, 笔者通过对燕山期 3 种类型成矿花岗岩的典型花岗岩体中的稀土元素地球化学特征及其成分变异特征的研究, 对探索成矿花岗岩形成的物质来源、岩浆演化机制及其大规模成矿作用机制具有重要的意义。

1 区域地质背景

在大地构造上, 研究区主要位于扬子陆(板)块与华夏陆(板)块之间的钦—杭结合带上, 地层出露较齐全, 自震旦系—第四系均有分布, 大致可划分为前震旦纪、震旦纪—志留纪、泥盆纪—中三叠世、晚三叠世—白垩纪和新生代 5 个构造层, 构成以晋宁和加里东构造层为基底, 海西—印支构造层为盖层的二元结构^[1-2]。

据现有资料^[1-2]分析, 研究区主要经历了 6 次构造运动, 其中加里东运动、印支运动、尤其是燕山运

型锡多金属矿产的潜力而备受关注^[3-7,10-18]①。笔者为了总结不同成因的花岗岩类序列及其成矿专属性,将研究区各花岗岩类序列,归并为4个花岗岩类岩石组合谱系类型,其中,燕山期成矿花岗岩类可划分出3个花岗岩类岩石组合谱系类型①:

幔壳混合型花岗岩(MC型花岗岩)包括铜山岭、大坊、水口山、宝山等花岗岩类序列,以花岗闪长岩为主,次为石英闪长岩、英云闪长岩、二长花岗岩及石英闪长斑岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩等,属于镁质准铝质的高钾钙碱性系列花岗岩类。岩石中有大量的暗色微粒铁镁质包体,伴生基性脉岩。岩体多呈小岩体或岩脉群产出。产Cu、Pb、Zn、Sb和Ag等多金属矿。

壳源铝质花岗岩(C型花岗岩)包括瑶岗仙、香花岭、宝峰仙、上堡等花岗岩类序列,以黑云母二长花岗岩为主,次有二云母二长花岗岩、二(白)云母正长花岗岩、白云母正长花岗岩、碱长和花岗斑岩等;属铁质过铝质的高钾钙碱性系列花岗岩类。岩体常呈岩株、岩枝和岩滴产出,伴生少量基性脉岩。产Sn、W、Nb、Ta和稀土矿。

壳幔混合型花岗岩(CM型花岗岩)包括骑田岭、千里山、诸广山、大义山和锡田等花岗岩类序列,以(角闪石)黑云母二长花岗岩为主,次有角闪石黑云母花岗闪长岩、黑(二)云母二长花岗岩、二(白)云母正长花岗岩等。岩体中常有大量的暗色微粒铁镁质包体,伴生基性岩墙或岩脉。矿化介于上述2类型之间,早期次铁质至镁质准过铝质至弱过铝质的高钾钙碱性系列花岗岩类有弱的Cu、Pb、Zn等多金属矿化,晚期次铁质弱过铝质-过铝质高钾钙碱性系列花岗岩类则产Sn、W、Nb、Ta和稀土矿。

2 稀土地球化学特征

对研究区13个主要成矿花岗岩体的60个花岗岩样品进行了稀土元素测试分析,收集84个前人可利用的分析数据(表1中列出12个),共对144个数据(表1中列出72个)进行统计分析(表2),笔者采用Taylor等^[9]的球粒陨石稀土元素含量值对样品分析数据进行标准化。

研究区成矿花岗岩的稀土元素含量(表1~2)总的特征是稀土总量变化为 $102.59 \times 10^{-6} \sim 1500.06 \times 10^{-6}$,

平均为 328.51×10^{-6} 和轻重稀土元素比值(LREE/HREE比值)变化为1.78~16.35,平均为8.75,变化都较大; δEu 值变化为0~0.84,平均为0.37,铕负异常强弱明显。

2.1 MC型花岗岩

该类型花岗岩的 ΣREE 为研究区最低,一般变化为 $150 \times 10^{-6} \sim 310 \times 10^{-6}$,平均为 225×10^{-6} 。La/Yb比值为5~40,平均为179;LREE/HREE比值一般为2.50~10.53,平均5.4; δEu 值一般为0.60~0.98,部分大于1;都是3个成矿花岗岩类型中最高的。该类花岗岩稀土配分曲线呈右倾斜直线,铕谷不明显(图2~3),与岩体伴生辉绿(玢)岩稀土配分曲线相似(图4)。岩体伴生基性岩类,甚至产出深源铁镁质包体,显示出幔源岩浆大量参与的幔壳岩浆混合成因特点。

2.2 C型花岗岩

花岗岩的 ΣREE 一般变化为 $250 \times 10^{-6} \sim 580 \times 10^{-6}$,平均为 353×10^{-6} ,是研究区3种类型成矿花岗岩中稀土元素总量和分量最高的。La/Yb比值为2~10,平均4.3; δEu 值一般为0.05~0.21,平均为0.14;LREE/HREE比值一般变化为0.60~3.3,平均为1.5;是研究区3种类型成矿花岗岩中稀土元素最小的。从二长花岗岩-正长花岗岩-碱长花岗岩, ΣREE 增高,La/Yb比值、LREE/HREE比值、 δEu 值减小。

瑶岗仙、香花岭、宝峰仙和上堡等花岗岩体的 ΣREE 、 δEu 、La/Yb比值,总体上变化不大,表现在稀土配分曲线极其相似:稀土配分曲线总体较平坦(图5~8),呈海鸥型,轻稀土部分右缓倾,重稀土部分接近水平,略左缓倾,且都具有较明显的Eu负异常,这种特征暗示它们可能具有相同的物质来源。而且随岩石酸性程度增高,轻稀土亏损,重稀土富集,说明C型花岗岩比MC型和CM型花岗岩的重稀土元素相对富集,反映在成岩过程中重稀土曾发生过较强烈的分馏,显示经历了高度岩浆混合后的分离结晶作用。尤其是上堡等岩体花岗岩的 ΣREE 值极高,一般为 $560 \times 10^{-6} \sim 1500 \times 10^{-6}$,平均为 769×10^{-6} ;而 δEu 值极小,平均为0.08,铕谷极深;是Nb、Ta和稀土矿化的花岗岩类。

2.3 CM型花岗岩

骑田岭、大义山、千里山和锡田等CM型花岗

①伍光英. 湘东南多金属矿集区燕山期花岗岩类及其大规模成矿作用. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2005.

表 1 花岗岩的稀土元素含量 (10⁻⁶) 及参数

Table 1 Concentration of REE of granites (μg/g)

样号	岩体	单元	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ	La/Yb	1 REE/1 HREE	δEu	资料来源	
BS-1	宝山	半边月	花岗岩长英	54.31	102.00	11.13	40.34	6.48	1.75	5.03	0.68	3.27	0.60	1.53	0.23	1.34	0.21	14.21	243.11	40.53	7.97	0.99		
BS-2			隐辉角闪岩	58.59	106.90	11.81	43.34	7.26	1.78	5.64	0.77	3.90	0.74	1.94	0.29	1.74	0.26	18.66	263.61	33.67	6.77	0.89		
宝-1	宝山	大坊	花岗岩长英	25.44	45.05	5.85	21.55	4.37	0.85	3.53	0.61	3.90	0.95	1.47	0.33	2.49	0.36	17.79	134.21	10.22	3.31	0.70		
大-1			花岗岩长英	42.38	80.11	9.56	36.95	7.28	1.39	6.42	0.99	5.25	1.03	2.80	0.48	3.14	0.47	25.86	224.1	13.50	3.8.3	0.67		
2355	水口山	老盟山	花岗岩长英	36.33	76.54	7.89	31.15	6.33	1.48	4.93	0.72	3.55	0.96	1.80	0.48	2.44	0.33	21.56	196.01	14.89	4.4	0.85	①	
2356			花岗岩长英	41.37	85.57	8.30	43.17	4.29	1.43	3.15	0.45	2.42	0.54	1.05	0.3	1.74	0.32	13.28	207.38	23.78	7.92	1.24	①	
H54	铜山岭	方冲	石英闪长岩	45.13	83.72	9.99	36.08	7.01	1.90	5.94	0.85	4.80	0.92	2.44	0.39	2.45	0.36	22.73	224.72	18.42	4.5	0.96		
铜-1			花岗岩长英	23.00	49.86	5.67	24.53	7.18	0.93	6.72	1.42	1.42	1.61	3.68	0.46	0.61	39.72	175.93	5.16	1.72	0.44	①		
D1	小江	正长花岗岩	花岗岩	15.58	15.94	2.31	8.23	2.27	0.08	1.91	0.46	2.91	0.54	1.64	0.30	2.22	0.39	15.20	69.98	7.02	1.74	0.13		
D2			花岗岩	51.7	51.70	6.35	21.37	5.88	0.18	6.38	1.36	9.94	2.05	6.56	1.10	6.56	1.08	60.63	205.70	7.88	1.15	0.10		
D3	大义山	墨烟窑	二长-正长花岗岩	59.72	59.72	8.15	26.71	7.03	0.18	6.90	1.37	9.97	1.94	5.87	0.92	5.55	0.95	58.68	224.37	10.76	1.43	0.09		
D4			花岗岩	90.04	90.04	10.36	35.07	6.99	0.49	5.80	0.97	5.95	1.13	3.14	0.48	2.96	0.47	32.86	243.6	30.42	3.53	0.25		
D6	大义山	介头	正长花岗岩	36.19	79.78	10.39	39.25	11.64	0.28	13.15	2.45	15.80	3.26	9.26	1.51	1.51	9.76	1.50	88.41	322.64	3.71	1.22	0.08	
D7			(正)二长花岗岩	13.98	29.66	4.41	14.29	4.39	0.07	4.43	0.98	6.84	1.26	4.07	0.75	0.75	5.35	0.83	41.68	132.99	2.61	1.01	0.05	
D8	大义山	道士仙	二长花岗岩	12.64	23.37	3.36	11.08	3.07	0.08	3.22	0.72	5.04	0.97	3.04	0.57	3.62	0.55	31.04	102.38	3.49	1.10	0.09		
D9			花岗岩	29.36	66.05	7.94	27.01	6.99	0.20	6.79	1.41	9.53	1.93	6.03	1.03	6.59	0.97	60.71	232.55	4.46	1.45	0.10		
D10	大义山	岩前	二长花岗岩	65.73	127.80	14.84	51.35	9.58	1.32	7.32	1.09	5.63	1.01	2.64	0.38	2.26	0.31	24.73	316.00	29.08	5.96	0.51		
C9			正长花岗岩	101.70	203.80	22.2	72.99	14.91	0.32	12.87	2.17	12.37	2.51	7.30	1.15	1.15	7.62	1.13	69.2	532.24	13.35	3.58	0.08	
C10	千里山	太平里	二(正)长花岗岩	31.77	66.35	8.67	32.93	7.70	0.53	7.99	1.52	9.53	2.11	6.61	1.13	8.01	1.23	65.31	251.38	3.97	1.43	0.23		
C8			二长花岗岩	37.01	80.36	10.47	40.34	11.66	0.26	13.9	2.73	17.83	3.80	11.48	1.80	1.80	11.8	1.82	110.5	355.75	3.14	1.03	0.07	
大-7	大义山	神合堂	二长花岗岩	19.80	43.90	5.82	20.20	6.13	0.24	6.89	1.48	9.84	2.20	7.17	1.27	9.28	1.43	65.70	201.35	2.13	0.91	0.12		
大-8			二长花岗岩	23.75	46.00	7.10	30.00	8.10	0.29	8.85	1.435	13.1	2.275	8.00	1.425	7.15	1.104	37.50	196.06	3.32	1.30	0.11	③	
XT503	荒塘岭	荒塘岭	正(碱)长花岗岩	83.00	107.00	21.00	77.00	13.00	1.10	15.00	2.70	18.00	3.90	10.80	1.80	1.80	11.00	1.40	108.00	474.40	7.55	1.75	0.27	
618			花岗岩	65.00	118.00	13.00	37.00	7.40	0.33	5.10	0.76	4.50	0.80	2.00	0.27	1.60	0.23	15.00	270.99	40.63	7.96	0.17		
C22	南溪	大山里	正长花岗岩	97.20	165.40	16.13	47.71	7.29	0.65	5.49	0.80	4.53	0.93	2.69	0.44	2.91	0.46	24.60	377.23	33.40	7.80	0.33		
C41			二长-正长花岗岩	87.24	161.80	17.43	55.11	9.48	0.29	7.17	1.24	7.37	1.57	4.88	0.87	6.15	0.95	47.48	409.02	14.19	4.27	0.11		
C43	大山里	廖家洞	二长-正长花岗岩	71.54	126.80	13.32	43.98	7.76	0.60	6.80	1.16	7.20	1.47	4.42	0.77	5.30	0.81	42.76	334.70	13.50	3.73	0.27		
C55			二长花岗岩	104.97	175.50	17.56	59.83	9.78	1.09	8.57	1.42	7.95	1.69	4.91	0.88	6.00	0.86	45.34	446.36	17.50	4.75	0.39		
C24	铜田岭	廖家洞	二长花岗岩	91.74	158.60	16.51	53.06	8.72	1.08	6.75	1.06	5.68	1.14	3.01	0.47	2.82	0.41	29.60	380.64	32.53	6.47	0.45		
C40			二长花岗岩	91.08	159.00	16.97	51.76	8.92	0.46	7.14	1.22	7.31	1.50	4.43	0.80	5.40	0.80	39.11	395.91	16.87	4.85	0.19		
C42	仰天湖	仰天湖	二长花岗岩	104.60	119.20	18.80	63.32	10.42	1.10	8.98	1.49	8.52	1.68	4.68	0.79	5.30	0.83	46.35	396.06	19.74	4.04	0.37		
C21			二长花岗岩	89.40	161.00	17.80	58.08	11.24	1.73	9.35	1.46	8.22	1.66	4.48	0.69	4.42	0.65	42.28	412.46	20.23	4.63	0.55		
C23	仰天湖	仰天湖	二长花岗岩	74.37	133.10	14.66	49.39	8.67	1.41	7.36	1.16	6.50	1.29	3.46	0.55	3.34	0.48	33.91	339.66	22.27	4.85	0.58		
C48-1			二长花岗岩	79.04	143.20	16.86	59.45	10.99	1.59	9.01	1.44	8.02	1.54	4.18	0.65	3.84	0.55	39.24	379.58	20.58	4.54	0.52		
C60	仰天湖	仰天湖	二长花岗岩	78.95	135.60	15.43	53.20	9.38	1.33	7.56	1.24	6.85	1.36	3.79	0.59	3.79	0.54	36.29	355.89	20.83	4.74	0.51		
C47			二长花岗岩	57.37	119.80	15.22	61.26	12.80	1.39	11.16	1.80	10.89	2.03	5.50	0.81	4.83	0.73	51.00	356.59	11.88	3.02	0.38		

续表 1

样号	岩体	单元	岩 性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ	La/Yb	LREE/HREE	δ Eu	资料来源
C48-2	轿田岭	黄家湾	二长-花岗岩	63.64	121.90	14.72	53.61	10.19	1.88	8.60	1.36	7.77	1.50	4.07	0.65	4.06	0.59	38.14	332.67	15.67	3.98	0.65	
C54				67.83	126.90	14.63	55.10	9.90	2.01	8.70	1.33	7.62	1.48	4.02	0.63	3.94	0.57	37.02	341.69	17.22	4.23	0.71	
D201-7				151.69	360.93	44.82	172.76	37.18	1.11	31.82	5.02	31.02	5.73	16.52	2.26	15.01	0.91	2.19	878.06	10.11	7.01	0.10	②
Q1-36		包体	包体	95.52	215.30	16.43	73.65	12.97	2.55	12.04	1.68	9.88	2.13	6.37	0.94	6.19	0.91	456.57	15.43	10.37	0.61	0.10	④
D202-1				73.38	146.81	15.57	57.22	10.52	1.37	8.92	1.37	7.59	1.46	4.23	0.64	4.20	0.61	333.89	17.47	10.51	0.42	0.42	②
D202-2				63.93	127.54	13.66	50.90	10.08	1.28	7.99	1.18	6.72	1.26	3.58	0.52	3.49	0.49	292.60	18.32	10.61	0.42	0.42	②
H2	大湖		正长花岗岩	22.13	42.37	5.84	22.96	5.74	0.34	5.54	0.98	6.13	1.30	3.87	0.66	4.43	0.69	36.21	159.18	5.00	1.66	0.2	
H6	山洋坑		正长花岗岩	20.63	45.86	6.16	25.64	8.57	0.13	9.34	2.04	13.55	2.82	8.83	1.58	11.48	1.81	77.83	236.26	1.80	0.83	0.05	
H5	锡田		二长花岗岩	30.82	70.92	9.89	37.05	11.92	0.12	13.54	2.96	20.97	4.53	14.46	2.61	18.92	3.17	128.00	369.88	1.63	0.77	0.03	
H8	贺家田		二长花岗岩	73.78	141.10	16.20	56.13	9.89	0.62	7.33	1.24	6.76	1.30	3.32	0.48	2.60	0.32	31.62	352.70	28.38	5.33	0.23	
H1	光泉		花岗岩	74.49	135.10	16.26	55.49	8.80	1.25	6.21	0.93	4.99	1.00	2.86	0.45	2.95	0.47	26.68	337.94	25.25	6.26	0.53	
C33			花岗岩	93.28	178.70	20.38	70.67	15.10	0.27	14.16	2.43	15.19	3.02	8.69	1.39	8.98	1.30	79.24	512.80	10.39	2.82	0.06	⑤
C36	大东山	水打龙	二(正)花岗岩	47.78	94.87	11.61	43.73	10.21	0.48	10.48	1.84	11.9	2.33	6.68	1.01	6.13	0.89	61.94	311.89	7.79	2.02	0.16	
C34				56.01	97.80	12.37	44.77	9.92	0.72	9.58	1.70	11.01	2.24	6.45	1.03	6.73	0.99	58.58	319.90	8.32	2.25	0.25	
C32		河背	二长花岗岩	98.33	189.10	21.3	71.59	13.37	0.42	11.35	1.90	11.66	2.36	6.73	1.07	6.66	0.98	63.49	500.30	14.76	3.71	0.11	
C20-2		方井头	流纹-石英斑岩	19.82	38.94	4.77	18.16	4.53	0.11	4.55	0.85	5.44	1.13	3.56	0.59	3.86	0.59	29.58	136.45	5.13	1.72	0.08	
C20-1	黄沙坪			13.86	30.68	4.09	16.00	5.26	0.14	5.60	1.07	6.91	1.42	4.24	0.68	4.37	0.62	38.26	133.21	3.17	1.11	0.09	
237-1		牛角冲	花岗岩	19.10	40.60	7.20	29.90	10.90	0.10	13.10	3.00	17.70	3.90	12.40	1.76	15.60	2.36	135.00	312.62	1.22	0.53	0.03	
C70-4		丝茅冲		20.68	40.28	4.90	18.64	4.97	0.44	5.32	1.08	6.89	1.40	4.18	0.70	4.54	0.69	43.54	158.24	4.56	1.32	0.29	
C70-3	瑶岗仙	向阳村	二(正)花岗岩	7.45	18.54	2.88	13.55	7.98	0.09	12.19	2.65	17.26	3.78	11.88	2.05	13.39	2.13	126.9	242.72	0.56	0.26	0.03	
C70-2				5.92	16.22	2.84	11.57	7.29	0.10	11.46	2.47	18.54	3.68	12.44	2.11	16.13	2.50	137.52	250.80	0.37	0.21	0.04	
C70-1		蛤蟆石	二长花岗岩	12.43	29.50	4.52	16.36	7.57	0.22	10.77	2.31	16.01	3.08	9.65	1.44	9.51	1.31	123.25	247.94	1.31	0.40	0.08	
C26-1		尖峰岭	正长花岗岩	36.91	87.65	10.45	37.12	13.36	0.07	15.46	3.40	23.09	5.16	16.78	2.95	18.84	3.08	129.70	404.01	1.96	0.85	0.02	
C25		香花岭	二长花岗岩	59.54	119.10	14.27	51.83	13.83	0.08	13.16	2.92	19.09	3.83	11.77	1.93	13.34	2.07	82.25	409.00	4.46	1.72	0.02	
C29		瑶山里		33.93	78.38	9.59	27.41	7.81	0.04	6.93	1.61	11.25	2.35	7.43	1.45	9.97	1.60	45.61	245.36	3.40	1.78	0.02	
G18		南极岭	二长花岗岩	41.39	95.58	11.62	39.33	10.07	0.09	10.62	2.69	17.66	4.72	11.83	2.17	14.32	1.91	91.90	355.90	2.89	0.17	0.03	
C2		猴	正长花岗岩	34.33	80.08	10.44	36.60	11.10	0.17	12.06	2.23	14.51	2.90	8.32	1.30	8.38	1.18	78.76	302.37	4.10	1.33	0.05	
C3			正长花岗岩	60.12	126.90	15.02	50.63	11.81	0.69	11.79	2.00	11.56	2.29	6.07	0.89	5.30	2.76	59.53	365.37	11.34	2.65	0.20	
C7	宝峰仙	大	二(正)花岗岩	54.18	115.70	14.10	45.99	11.15	0.52	10.86	1.92	11.28	2.16	5.68	0.83	4.90	0.73	56.66	336.67	11.06	2.54	0.16	
C1		黄	二长花岗岩	61.94	130.10	16.10	55.92	13.98	0.38	14.29	2.51	15.04	2.98	7.94	1.16	6.97	1.01	78.25	408.57	8.89	2.14	0.09	
C5				49.37	98.88	11.93	38.54	8.70	1.17	8.23	1.39	8.11	1.62	4.55	0.73	4.87	1.22	43.92	282.73	10.14	2.81	0.46	
IV-1-1		牛	二(正)花岗岩	126.08	265.29	28.06	97.24	23.81	0.63	21.79	4.965	38.35	26.82	26.82	5.407	41.02	6.69	204.83	898.59	3.07	1.51	0.09	⑤
h62	上堡	野	二(正)花岗岩	59.50	122.5	13.95	44.41	11.00	0.26	10.69	2.12	14.3	2.99	9.54	1.79	12.60	2.00	90.95	398.60	4.72	1.71	0.08	
IV-3-1		王	二(正)花岗岩	128.92	233.78	26.31	98.58	23.39	0.54	21.33	4.476	26.87	15.41	15.41	3.013	22.14	3.39	164.68	777.95	5.82	1.92	0.08	⑤

注:①湖南省区域地质志;②中国地质调查局宜昌地质调查中心(付建明等),中南地区基础地质综合研究报告(2002-);③湖南湘南地质队1:5万永春、宜章豺帽区调查报告;④朱金初等,(2003);⑤湖南地质调查院1:25万道县幅、郴州市幅和衡阳市幅区调报告(2004和2005);其他为本文,由湖北武汉岩矿综合测试中心完成。

表 2 燕山期不同类型成矿花岗岩的稀土元素含量 (10^{-6}) 及参数特征
Table 2 Concentration of REE of different types of metallogenitic granites in the Yanshanian

组合谱系	MC 型花岗岩		CM 型花岗岩				C 型铝质花岗岩			
	花岗闪长岩-石英闪长岩类		正(碱)长花岗岩		二长花岗岩(少量花岗闪长岩)		二-正长花岗岩		上堡正(碱)长花岗岩	
矿化系列	Cu 多金属矿化		Sn 多金属矿化		Cu 多金属矿化		Sn 多金属矿化		Nb、Ta、稀土矿化为主	
统计值(样数)	算术平均(20)	均方差	算术平均(16)	均方差	算术平均(68)	均方差	算术平均(36)	均方差	算术平均(4)	均方差
La	41.32	14.50	57.07	22.09	72.76	17.85	43.61	24.52	114.62	27.56
Ce	86.26	32.84	113.91	31.52	128.58	28.07	96.56	51.17	230.73	54.11
Pr	9.84	3.47	12.64	3.58	14.22	2.71	10.87	5.70	24.82	5.43
Nd	42.60	17.56	42.17	10.72	51.28	10.65	38.59	19.41	88.20	21.90
Sm	8.10	4.01	10.09	3.01	9.55	1.68	10.95	4.43	21.47	5.24
Eu	1.97	1.07	0.39	0.22	1.05	0.41	0.36	0.23	0.51	0.12
Gd	6.10	2.29	9.67	4.29	7.81	1.70	14.15	7.52	19.68	4.49
Tb	0.85	0.25	1.96	1.08	1.32	0.29	2.36	0.94	4.22	1.05
Dy	4.73	1.55	11.63	6.08	8.05	1.89	15.08	6.48	29.06	8.48
Ho	0.82	0.19	2.47	1.37	1.54	0.41	4.75	3.27	17.51	8.31
Er	2.46	0.93	7.31	3.87	4.48	1.21	9.86	4.74	19.14	6.67
Tm	0.48	0.19	1.06	0.53	0.66	0.16	1.92	0.79	3.76	1.35
Yb	2.72	0.78	8.42	4.53	4.40	1.41	12.61	6.13	28.02	10.65
Lu	0.35	0.06	1.20	0.60	1.26	1.24	1.94	0.91	4.40	1.70
Y	23.48	6.81	73.33	40.66	45.83	20.69	93.64	45.30	174.41	46.59
Σ	225.75	78.55	343.99	70.18	337.09	59.88	352.83	139.98	768.84	185.12
La/Yb	17.18	7.93	13.30	9.45	20.50	7.29	4.35	2.45	4.40	0.88
LREE/HREE	5.14	1.61	4.20	2.93	6.11	2.75	1.49	0.77	1.69	0.13
δEu	0.92	0.16	0.15	0.09	0.39	0.13	0.14	0.12	0.08	0.00

注:成矿花岗岩类岩体有:MC 型花岗岩组合谱系为铜山岭、水口山、宝山等岩体,CM 型花岗岩组合谱系为骑田岭、大义山、千里山待岩体,铝质 A 型花岗岩组合谱系为香花岭、瑶岗仙、宝峰仙等岩体。

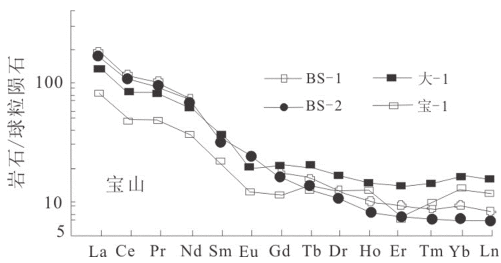


图 2 宝山花岗岩稀土元素配分曲线

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of the Baoshan granite

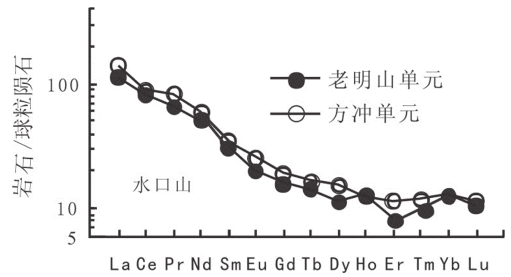


图 3 水口山花岗岩稀土配分曲线

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of the Shuikoushan granite

岩类具有 C 型和 MC 型花岗岩之间的共同特点, Σ REE 变化较大。CM 型花岗岩序列早期次单元的花岗闪长岩和二长花岗岩总体为轻稀土富集型,而晚期次单元的正长花岗岩和碱长花岗岩总体则为重稀土富集型(图 9~11)。

骑田岭花岗岩的 Σ REE 值为 $215.61 \times 10^{-6} \sim 625.54 \times 10^{-6}$, 变化较大;La/Yb 比值为 5.40~24.60, δ Eu 值为 0.11~0.57, 具有强到中等铕负异常, 为轻稀土富集型。在稀土配分曲线图上(图 9), 花岗岩体

的主体即早期次单元的轻稀土部分右倾较陡, 重稀土部分接近水平, 反映了在成岩过程中 LREE 曾发生过较强烈的分馏, 其富集主要可能与花岗岩中十分常见的褐帘石和磷灰石有关, 显示了壳幔岩浆混合不彻底, 表现在这些单元中存在大量的暗色包体。花岗岩体晚期次单元稀土配分曲线与 C 型花岗岩较为相似;并且, 花岗岩体从早期次单元-晚期次单元, 岩石的 δ Eu 变小, 铕谷加深, 但稀土配分曲线相似, 表明它们之间存在演化关系。

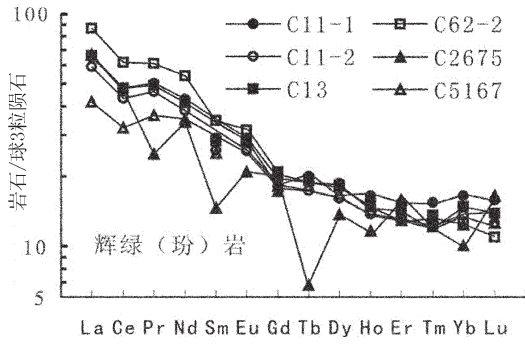


图4 辉绿(玢)岩岩石稀土配分曲线
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of diabase(or porphyrite)

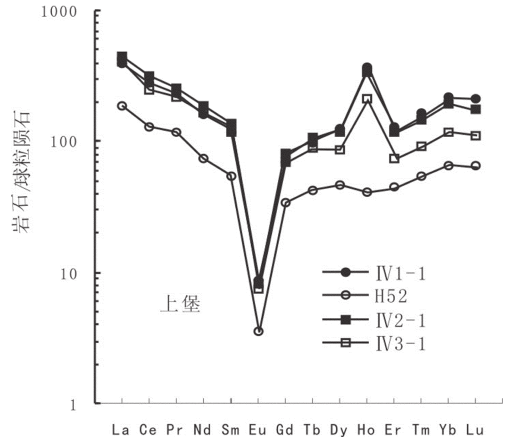


图5 上堡花岗岩稀土元素配分曲线
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of the Shangbao granite

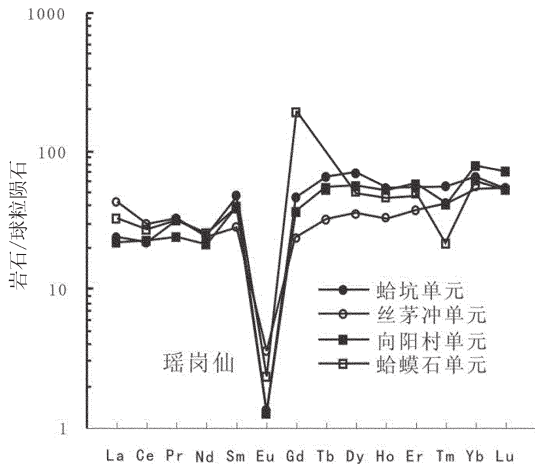


图6 瑶岗仙花岗岩稀土元素配分曲线
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of the Yaogangxian granite

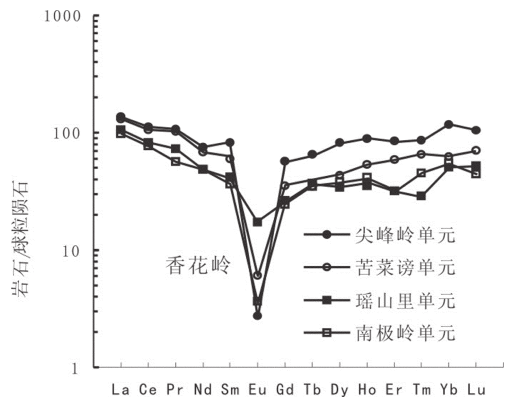


图7 香花岭花岗岩稀土元素配分曲线
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of the Xianghualing granite body

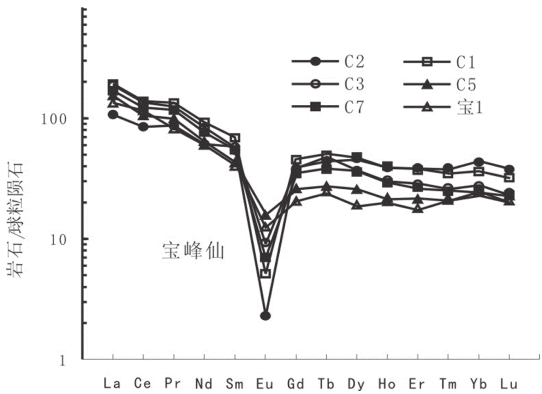


图8 宝峰仙花岗岩稀土元素配分曲线
Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of the Baofengxian granite

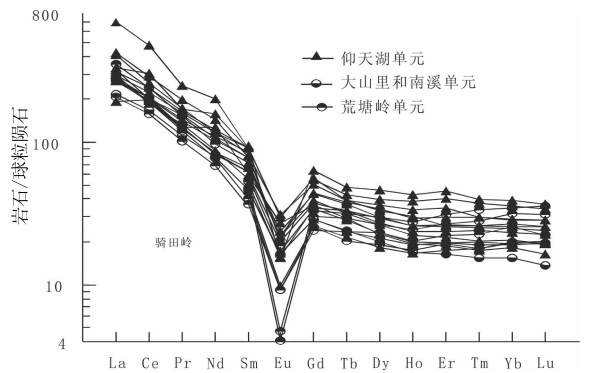


图9 骑田岭花岗岩稀土元素配分曲线
Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of the Qitieling granite

千里山、大义山和锡田等岩体/序列的早期次单元花岗岩(二长花岗岩-花岗闪长岩)的 ΣREE 值一般变化为 $260\times 10^{-6}\sim 480\times 10^{-6}$,平均为 337×10^{-6} 。La/Yb 比值为 11~35, 平均值为 20; δEu 值一般为 0.25~0.60, 平均 0.39; 相对 MC 型花岗岩小, 却比 C 型花岗岩大, 钨谷相对较浅(图 10~11)。稀土配分曲线与骑田岭岩体早期次单元花岗岩类有一定的相似之处, 但轻稀土部分右倾斜较缓。晚期次单元花岗岩(正长花岗岩-碱长花岗岩)的 ΣREE 值一般变化为 $270\times 10^{-6}\sim 590\times 10^{-6}$, 平均为 344×10^{-6} ; La/Yb 比值为 4~21, 平均为 13; δEu 值一般为 0.08~0.27, 平均 0.15; 稀土配分曲线与 C 型花岗岩较为相似, 轻稀土亏损, 重稀土富集, 稀土元素之间明显分馏, 钨谷很深, 稀土配分曲线呈海鸥型(图 10~11)。

3 稀土元素成分变异与成岩成矿作用探讨

研究区不同类型成矿花岗岩从 MC 型至 CM 型至 C 型花岗岩, 以及同一花岗岩类型的早期次单元至晚期次单元花岗岩, 随 SiO_2 含量的增加, 稀土元素成分有如下特征:

① δEu 值与 SiO_2 含量存在明显的负消长演化关系(图 2~5)。

② 稀土总量(ΣREE)和轻重稀土元素分量总体随着 SiO_2 含量的增加而增加。但重稀土元素在岩石中的含量具有随 SiO_2 含量的增加而迅速增加的趋势, 是随岩浆演化而逆向分异。

③ 轻稀土相对亏损, 重稀土相富集。C 型花岗岩与 CM 型花岗岩晚期次单元过铝质花岗岩较 MC 型花岗岩与 CM 型花岗岩早期次单元的准铝质花岗岩的轻重稀土比值相对变小, 重稀土元素常与 Sn、W、Nb、Pb 富集成矿。

通常稀土元素在岩石中它们普遍以类质同像的形式赋存在造岩矿物和副矿物中; 岩石的重稀土元素含量具有随岩浆演化和 SiO_2 含量的增加而降低的趋势^[8-9]。但上述特点表明, 研究区成矿花岗岩这种变化趋势并不明显, 且是逆向的, 其原因可能是:

其一, 由于 C 型花岗岩和 CM 型花岗岩晚期次单元过铝质花岗岩中 F、Cl 等挥发分含量极高^[2-9], 而稀土元素易与 F^- 、 Cl^- 、 OH^- 等阴离子结合形成络阴离子, 并与 K、Na 等碱金属离子构成较稳定的络合物^[2,9], 当岩浆富含挥发分时, 它们将保留在残余熔浆中而不进入早期的矿物相中, 可以形成独居石、磷钇矿、褐帘石等独立矿物, 这些独立矿物甚至可成为这些稀土元素的主要荷载矿物。因此, 在湘南矿集区一些岩体中的正长花岗岩-碱性花岗岩类中, 发现大量的此类副矿物^[2,9,15], 甚至高度富集成矿。

其二, 研究区 C 型花岗岩和 CM 型花岗岩的晚期次单元岩石的 SiO_2 含量较高时, 稀土元素与 Co、Cr、V、Sc、Ba、Ga、Zr、Zn、Cu 等元素一般成正相关, 且随着稀土元素原子序数的增大, 相关系数逐渐变小, 而与 Rb、Sn、W、Be、Nb、Pb、U 等的相关系数则随稀土元素原子序数的增大而递增^[3]。鉴于稀土元素的离子电位以及它们与 F、Cl 等挥发组分构成的

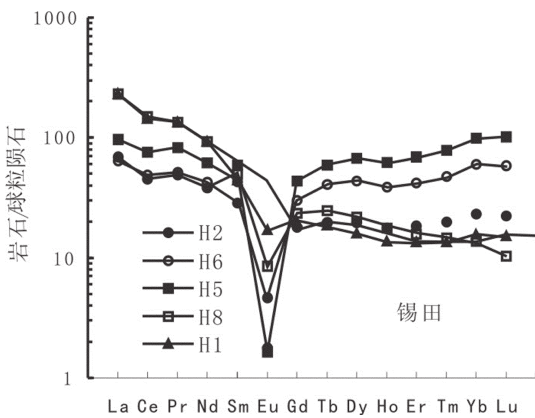


图 10 锡田花岗岩稀土元素配分曲线

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns of the Xitian granite

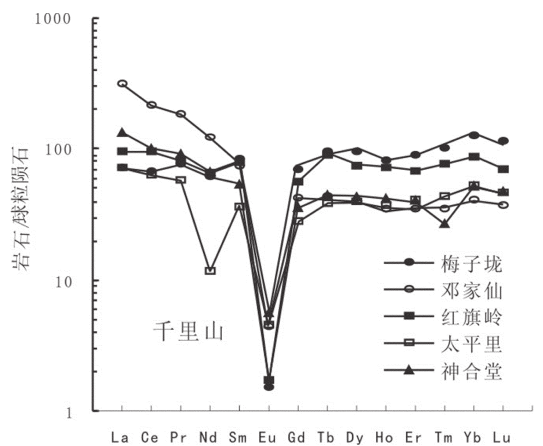


图 11 千里山花岗岩稀土元素配分曲线

Fig. 12 Chondrite-normalized REE patterns of the Qianlishan granite

络合物的稳定性随其原子序数的递增而增大,因此,重稀土元素与 U、Rb、Sn、Be 等元素的相关系数比轻稀土元素相对要大。这就导致该类花岗岩的轻稀土亏损,重稀土富集,稀土元素之间出现了高分馏,重稀土元素于是与 Sn、W、Nb、Pb 富集成矿;这一事实对探讨花岗岩中稀土地球化学特性及稀土成矿作用有重要启示。

此外,这些特点可以解释岩浆的起源与演化机制,一方面,可以说明过铝质花岗岩岩浆的结晶分离程度高;另一方面,一定程度上反映其演化过程中有更多的幔源组分的参与,因为随着地球的发展演化,重稀土趋向于地幔中富集^[7]。花岗岩中稀土元素在上述二方面指示它们之间存在一定的分异演化关系,但又非单一岩浆演化的结果。这说明 C 型花岗岩与 CM 型花岗岩的晚期次单元过铝质花岗岩类的形成有壳幔岩浆混合作用,且混合相对较彻底;野外的岩石露头上出现大量的黑云母团块或暗色条带,暗色包体小而少的原因,可能是幔源岩浆参与的混合作用程度相对较高的结果。而在 MC 型花岗岩与 CM 型花岗岩早期次单元的准铝质花岗岩类中,常见的暗色微粒包体,可能是幔源岩浆团未能完全混合而结晶固结形成的;反映了幔源岩浆参与的混合作用程度相对较低^[7],故在这些岩石中轻稀土元素反而更富集。笔者曾对 CM 型花岗岩的大义山、千里山等花岗岩类岩浆的演化进行过探讨,均为岩浆混合作用为主的岩浆演化机制^[5,7,18]。需要指明的是,MC 型花岗岩类和 CM 型花岗岩类早期次的花岗岩类岩浆的演化主要是岩浆混合作用,而 CM 型花岗岩晚期次的花岗岩类和 C 型花岗岩类的岩浆的演化还存在强烈的分离结晶作用。

4 结 论

(1)MC 型花岗岩的 $\sum \text{REE}$ 值最低,平均为 225×10^{-6} ;La/Yb 比值平均为 17、LREE/HREE 比值平均 5.4 和 δEu 值为 1.67,都为最高。稀土配分曲线呈右倾斜斜直线,与辉绿(玢)岩稀土配分曲线相似,显示幔壳岩浆混合型花岗岩类特点。

(2)C 型铝质花岗岩的 $\sum \text{REE}$ 值最高,平均为 353×10^{-6} 。La/Yb 比值、 δEu 值、LREE/HREE 比值都为最小。随岩石酸性程度增高,轻稀土亏损,重稀土相对轻稀土富集,铕谷很深,配分曲线呈海鸥型,显示高分异铝质花岗岩特征。

(3)CM 型准铝质-过铝质花岗岩总体上具有上述两类花岗岩之特点, $\sum \text{REE}$ 变化较大;早期次单元的花岗闪长岩和二长花岗岩总体为轻稀土富集型,而晚期次单元的正长花岗岩和碱长花岗岩总体为重稀土富集型。早期次单元花岗岩的 LREE/HREE 比值、La/Yb 比值、 δEu 值比 MC 型花岗岩小,却比 C 型铝质花岗岩大,但与 MC 型花岗岩有一定的相似之处。CM 型晚期次单元花岗岩与 C 型花岗岩类较为相似,轻稀土亏损,重稀土富集,稀土元素之间明显分馏,铕谷很深,显示经历了极强的分离结晶作用。

(4)从 MC 型-CM 型-C 型花岗岩,以及同一类型花岗岩的早期次单元至晚期次单元, δEu 值与 SiO_2 含量存在较明显的负消长演化关系,铕亏损渐趋明显;稀土总量($\sum \text{REE}$)和轻重稀土元素分量随着 SiO_2 的增加而增加;但重稀土元素在岩石中的含量具有随 SiO_2 含量增加而迅速增加的趋势,是随岩浆演化而逆向分异。

(5)成矿花岗岩 F、C1 等挥发分含量高,导致 C 型花岗岩和 CM 型花岗岩晚期次单元的轻稀土小相对亏损,重稀土富集,稀土之间高度分馏,重稀土元素常与 Sn、W、Nb、Pb 富集成矿,对探讨花岗岩稀土元素的成矿作用有重要启示。同时,揭示了成矿花岗岩在成岩作用过程中有深部的富含 F、C1 等挥发组分熔体的参与,或者富含 F、C1 等挥发组分的幔源岩浆的直接参与。

参考文献(References):

- [1] 湖南地质矿产勘查开发局. 湖南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1988.
Hunan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development. Regional Geology of Hunan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988(in Chinese with English abstract).
- [2] 地质矿产部南岭项目花岗岩专题组. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿关系[M]. 北京:地质出版社, 1989.
Granitoid Research Group of Nanling Project. Geology of Granitoids of Nanling Range and Their Petrogenesis and Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989(in Chinese with English abstract).
- [3] 刘铁生. 大义山矿田岩体类型锡矿地质特征及矿床成因[J]. 中国地质, 2002, 29(4): 411-415
Liu Tiesheng. Geological characteristics and genesis of rock body-type tin deposits in the Dayishan ore field [J]. Geology in China, 2002, 29(4): 411-415(in Chinese with English abstract).
- [4] 魏绍六, 曾钦旺, 许以明, 等. 湖南骑田岭地区锡矿床特征及找矿

- 前景[J]. 中国地质, 2002, 29(1):67-75
- Wei Shaoliu, Zeng Qinwang, Xu Yiming, et al. Characteristics and ore of deposits in the Qitianling area, Hunan [J]. *Geology in China*, 2002, 29(1):67-75(in Chinese with English abstract).
- [5] 伍光英, 潘仲芳, 李金冬, 等. 湘南大义山花岗岩地质地球化学特征及其与成矿的关系[J]. 中国地质, 2005, 32(3):434-443.
- WU Guangying, Pen Zhongfang, Li Jindong, et al. Geological and geochemical characteristics of the Dayishan granitoids in south Hunan and their metallogenic relations [J]. *Geology in China*, 2005, 32(3):434-443(in Chinese with English abstract).
- [6] 邓希光, 李献华, 刘义茂, 等. 骑田岭花岗岩体的地球化学特征及其对成矿的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 56(02):121-128.
- Deng Xiguang, Li Xianhua, Liu Yimao, et al. Geochemical characteristics of Qitianling granites and their implications for mineralization [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 56 (2): 121-128(in Chinese with English abstract).
- [7] 伍光英, 马铁球, 柏道远, 等. 湖南宝山花岗岩岗长质隐爆角砾岩地质与 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 现代地质, 2005, 19(2):198-204.
- WU Guangying, Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, et al. Zircon SHRIMP dating and geological of the underground explosion breccia in Baoshan area, Hunan and its significance[J]. *Geoscience*, 2005, 19(2): 198-204(in Chinese with English abstract).
- [8] Talyor S R, McLennan S M. *The continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwells Scientific, 1985, 312.
- [9] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992:179-185
- Li Changnian. *Trace Element Petrology of Magmatic Rocks* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992:179-185 (in Chinese with English abstract).
- [10] 马铁球, 伍光英, 贾宝华, 等. 南岭中段郴州一带中、晚侏罗世花岗岩浆混合作用: 来自镁铁质微粒包体的证据 [J]. 地质通报, 2005, 24(7):415-419.
- Ma Tieqiu, Wu Guangying, Jia Baohua, et al. Middle-Late Jurassic granite magma-mixing in the middle segment of the Nanling Mountains, South China: Evidence from mafic microgranular enclaves[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(7):415-419(in Chinese with English abstract).
- [11] 邱瑞照, 周肃, 肖海亮, 等. 香花岭花岗岩稀土元素演化[J]. 现代地质, 2002, 16(1):53-58.
- Qiu Ruizhao, Zhou Su, Xiao Hailiang, et al. Evolution of rare earth elements of granitoid in Xianghualing area, Hunan [J]. *Geoscience*, 2002, 16(1):53-58(in Chinese with English abstract).
- [12] 王登红, 陈毓川, 李华芹, 等. 湖南芙蓉锡矿的地质地球化学特征及找矿意义[J]. 地质通报, 2003, 22(1):50-56
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Li Huaqin, et al. Geological and geochemical features of the Furong tin deposit in Hunan and their significance for mineral prospecting [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(1):50-56(in Chinese with English abstract).
- [13] 李兆丽, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 湖南芙蓉锡矿田流体包裹体的 He 同位素组成及成矿流体来源示踪 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2006, (01):178-184.
- Li Zhaoli, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, et al. Helium Isotope Composition of Fluid Inclusions and the Origin of Ore-Forming Fluids of Furong Tin Orefield in Hunan Province, China [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2006, (01): 178-184(in Chinese with English abstract).
- [14] 朱金初, 黄革非, 张佩华, 等. 湘南骑田岭岩体菜岭超单元花岗岩岩侵位年龄和物质来源研究[J]. 地质论评, 2003, 49(3):245-252.
- Zhu Jinchu, Huang Gefei, Zhang Peihua, et al. The emplacement age and material sources for the granites of Cailing superunit, Qitianling Pluton, South Hunan Province [J]. *Geological Review*, 2003, 49(3):245-252(in Chinese with English abstract).
- [15] 南京大学地质系. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿的关系 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- Geology Department of Nanjing University. *Granitoids of Different Ages in South China and Their Metallogenic relations* [M]. Beijing: Science Press, 1981(in Chinese with English abstract).
- [16] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- Xiao QinHui, Deng Jjin Fu, Ma Daquan, et al. *The Way of investigation on Granitoids* [M]. Beijing: Geological Publishing House. 2002(in Chinese with English abstract).
- [17] 王德滋, 沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 2003, 10(3):209-220.
- Wang Dezi, Shen weizhou. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10 (3):209-220(in Chinese with English abstract).
- [18] 贾宝华, 伍光英, 何江南, 等. 湖南花岗岩体侵入位机制初步研究[J]. 湖南地质, 1998, 10(增刊):126-159.
- Jia Baohua, Wu Guangying, He Jiangnan, et al. Pilot study of intrude mechanism of granitoids in Hunan [J]. *Hunan Geology*, 1998, 10(Supp.):126-159(in Chinese with English abstract).

REE geochemistry and petrogenesis and mineralization of the Yanshanian mineralized granites in the southern Hunan polymetallic deposit concentration region

WU Guang-ying^{1,2}, HOU Zeng-qian¹, XIAO Qing-hui³, WANG Tao¹,
YAN Quan-ren¹, CHEN Hui-ming¹, MA Tie-qiu³

- (1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*
2. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;*
3. *Information Center of the Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China;*
4. *Hunan Institute of Geological Survey, Xiangtan 411100, Hunan, China;*)

Abstract: Yanshanian mineralized granites in southern Hunan may be divided into three types, which have different REE geochemical features, distribution patterns and characteristics of compositional variations, showing distinct differences in petrogenesis and mineralization. (1) The total REE of MC-type granites is lowest, 225×10^{-6} on average; the average La/Yb ratio is 17, the average LREE/HREE ratio is 5.4, and δ Eu is 1.67, all of which are highest. Chondrite-normalized REE patterns are nearly straight lines inclined to the right. The total REE of C-type granites is highest, 353×10^{-6} on average; the average La/Yb ratio is 4.3, the average LREE/HREE ratio is 1.5, and δ Eu is 1.67, all of which are lowest. The REE distribution patterns are seagull wing-shaped. CM-type granites are intermediate between MC- and C-type granites. The distribution patterns of the early-stage CM-type granites incline to the right, while those of the late-stage ones are seagull wing-shaped. (2) With increasing acidity, the Σ REE and REE concentrations increase from MC-type through CM-type to C-type mineralized granites and from the east to late stage of the same type of granite. However, LREE show somewhat depleted slightly and HREE enriched; the δ Eu, La/Yb and LREE/HREE show significantly antithetic relationships with SiO_2 ; and HREE display a reversed trend of evolution and differentiation with magma evolution. (3) The REE of the late-stage CM-type and C-type granites are remarkably differentiated. The deep Eu troughs of the REE patterns indicate a significant fractional crystallization of CM- and C-type granitic magma, which caused HREE to be enriched and Sn, W, Nb and Pb to be concentrated to form ore deposits. (4) Mineralized granites show features of crust- and mantle-derived melt mixing granites rich in volatiles such as F and Cl, and their formation was related to crust-mantle magma mixing; whereas the magmatic evolution of the late-stage CM-type granites and C-type granites might also involve fractional crystallization.

Key words: REE; geochemistry; polymetallic deposit; granite; southern Hunan

About the first author: WU Guang-ying, male, born in 1965, doctor and senior researcher, engages in studies of mineralogy, petrology and mineral deposit geology; E-mail: ycwguangying@cgs.gov.cn.