

南岭西段金鸡岭复式花岗岩基地质 及岩浆动力学特征

章邦桐¹, 戴永善¹, 王 驹², 柏仇勇³, 刘洪磊⁴

(1. 南京大学 地球科学系及内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 江苏 南京 210093;

2. 核工业北京地质研究院; 3. 江苏宿迁市环保局; 4. 山东省国土资源厅)

摘 要: 对南岭西段金鸡岭复式花岗岩基进行的 Rb-Sr 同位素定年研究, 确定 阶段黑云母二长花岗岩的等时线年龄为 169.5Ma, 、 阶段黑云母花岗岩和二云母花岗岩为 150.7Ma, 其 I_{Sr} 值分别为 0.7163 和 0.7206, 表明该复式岩基属燕山早期。金鸡岭复式花岗岩基岩石属钙碱性系列, 从 阶段到 、 阶段表现出有规律的演化特征: 岩石由准铝质(), 演化为过铝质() 和强过铝质(); 钾长石有序度由 0.33(), 增高到 0.69() 和 0.80(); 斜长石由 An₃₇() 降低到 An₂₆() 和 An₇(); 黑云母由铁质黑云母() 向铁叶云母() 和铁白云母() 方向演化; 氧化物 (SiO₂, Al₂O₃, TFeO, MgO, TiO₂, CaO) - DI 图解上呈良好的线性演化关系; 成岩温度逐阶段降低, 由 745 () 降低到 673 () 至 505 ()。采用地质地球化学方法估算出金鸡岭岩基的侵位深度约为 6.3km, 成岩压力为 180MPa, 具中深成相特征, 属 S 型花岗岩并形成于华南板块内部的碰撞构造环境。

关 键 词: 湘南; 金鸡岭复式花岗岩基; 岩浆动力学; 结晶-侵位时差

中图分类号: P591

文献标识码: A

金鸡岭复式花岗岩基位于湘南蓝山县境内, 南岭东西向构造岩浆带西段, 九嶷山花岗杂岩带的中部。莫柱孙等研究南岭花岗岩地质并指出, 九嶷山复式花岗岩体自西向东依次由早古生代雪花顶岩体、晚古生代—三叠纪砂子岭岩体、早侏罗世金鸡岭岩体和侏罗世西山岩体及螃蟹木岩体组成^[1]。湖南省地质矿产局则将雪花顶岩体归属为加里东期(422Ma), 砂子岭岩体为印支期(184Ma), 金鸡岭岩体为燕山早期(171Ma), 西山岩体和螃蟹木岩体(151Ma)为燕山晚期, 其主要依据为 K-Ar 年龄数据^[2]。九嶷山地区的多种金属矿产与金鸡岭岩体和螃蟹木岩体有密切的成因联系, 其中产出在金鸡岭岩体内外接触上的一系列铀矿床组成的 380 铀矿田是我国华南铀矿省^[3]的主要成矿单元。因此, 研究金鸡岭岩体的地质及地球化学特征对阐明南岭(西段)花岗岩形成的地质构造条件及成矿作用具有重要地质意义。由于金鸡岭岩体内部山高林密, 无公路相通, 而有关矿床均位于岩体内外接触带, 因而前人对金鸡岭岩体缺乏系统研究。本文作者通过在野外实地调研和系统的室内鉴定测试, 对金鸡岭复式花岗岩基的时代归属、侵入阶段划分、岩石学、地球化学及岩浆演化的动力学特征进行了研究。

1 岩体地质概况和同位素年代学

1.1 岩体地质概况

金鸡岭复式岩基位处华南板块内的湘桂拗陷带南侧,南岭东西向构造岩浆带西段北缘的花江复背斜轴部。岩基呈不规则椭圆形展布,地表出露面积约 440km²,由 3 个不同侵入阶段的花岗岩体组成:第 1 侵入阶段() 砂子岭(含角闪石)黑云母二长花岗岩体、第 2 侵入阶段() 金鸡岭黑云母花岗岩体和第 3 侵入阶段() 螃蟹木二云母花岗岩体。第 1 阶段的金鸡岭岩体地表出露面积为 330km²,构成金鸡岭复式岩基的主体,其西端与加里东期雪花顶花岗闪长岩体呈构造接触,东面与早阶段() 侵入的砂子岭岩体呈侵入接触(图 1)。砂子岭岩体地表出露面积约为 65km² 呈近南北向不规则状环绕于金鸡岭岩体东缘,以东为西山(天鹅寨)次花岗斑岩体,两者呈构造接触。晚阶段() 螃蟹木岩体产于金鸡岭岩体西部,地表出露面积约为 49km²,两者呈突变侵入接触关系(图 1)。

金鸡岭复式岩基周围分布的地层主要是震旦系、寒武系和泥盆系。震旦系为巨厚层浅变质石英砂岩、粉砂岩、夹板岩和硅质岩,厚度约为 1 746m。寒武系下部以板岩、炭质板岩为主,夹硅质岩,局部出现石煤层,上部为粉砂岩夹板岩,总厚度达 3 241m。泥盆系为灰岩、粉砂岩和砂岩,总厚度约为 1 649m。

金鸡岭复式岩基侵入于震旦系和寒武系地层,接触带上热变质现象十分强烈,热变质带宽达 800m~1 000m,热变质岩石种类有黑云母角闪岩、红柱石角闪岩、堇青石角闪岩、紧靠岩体接触带有白云母角闪岩形成。

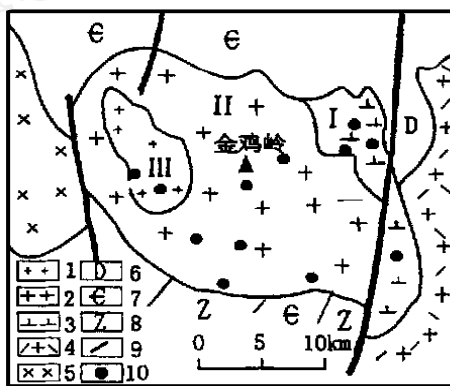
1.2 同位素年代学

在对金鸡岭复式岩基 3 个阶段岩石样品进行岩相学和地球化学详细研究的基础上,分别选择有代表性的、未蚀变并 Rb/Sr 差值较大的样品(具体取样位置见图 1)进行 Rb-Sr 同位素测定,分析数据列于表 1,计算结果示于图 2。

表 1、图 2A 表明砂子岭 4 个黑云母二长花岗岩样品组成的 Rb-Sr 等时线年龄值为 169.5 ± 4.4 Ma, $I_{sr} = 0.7163$, 线性相关系数 $R = 0.9951$ 。4 个样品点在等时线上分布均匀,线性关系良好,因而所得年龄值可信度高。这表明砂子岭岩体应归属燕山早期,而不是印支期^[2]或三叠纪^[1]。

根据表 1 中 6 个金鸡岭黑云母花岗岩样品计算得出的 Rb-Sr 等时线年龄为 150.2 ± 6.2 Ma, I_{sr} 为 0.72064, $R = 0.99986$ 。低的误差值和高的线性相关系数表明该年龄值可信度高,可代表金鸡岭复式岩基主体的形成时间。

表 1 中 2 个螃蟹木二云母花岗岩样品虽然不能组成具有地质意义的 Rb-Sr 等时线,但它们与金鸡岭岩体 6 个样品组成同一条等时线(图 2B),其等时线年龄值为 150.7 ± 2.8 Ma, I_{sr} 为



1. 阶段二云母花岗岩(螃蟹木岩体); 2. 阶段黑云母花岗岩(金鸡岭岩体); 3. 阶段二长花岗岩(砂子岭岩体); 4. 次花岗斑岩(西山岩体); 5. 加里东期花岗闪长岩(雪花顶岩体); 6. 泥盆系; 7. 寒武系; 8. 震旦系; 9. 断裂; 10. 同位素采样点。
1. two-mica granite (-stage, Pangxiemu pluton); 2. biotite granite (-stage, Jinjiling pluton); 3. adamellite (-stage, Shaziling pluton); 4. subvolcanic granite porphyry (Xishan pluton); 5. Caledonian granodiorite (Xuehuading pluton); 6. Devonian System; 7. Cambrian System; 8. Sinian System; 9. fault; 10. location of samples for isotopic dating

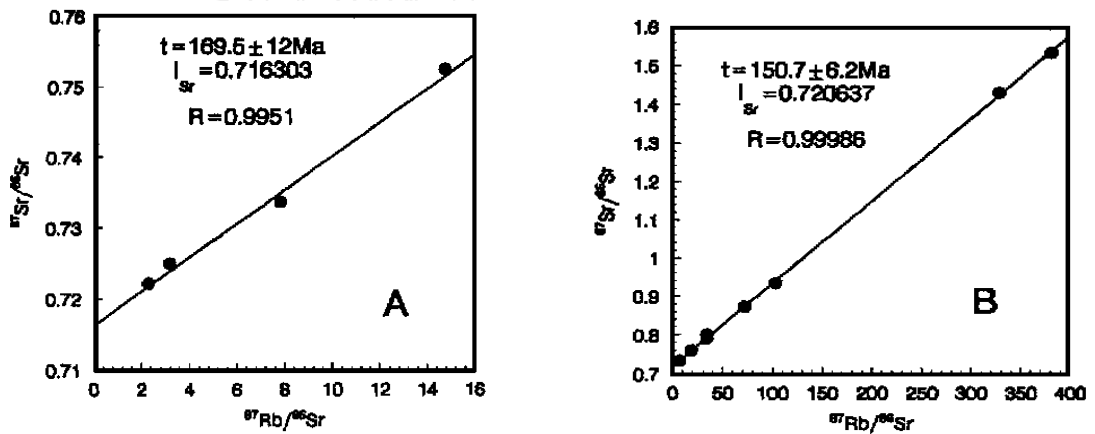
图 1 金鸡岭复式花岗岩基略图

Fig. 1 Geological sketch map of Jinjiling composite granitic batholith

表 1 金鸡岭复式花岗岩基的 Rb-Sr 同位素测定结果

Table 1 Rb-Sr isotopic data for Jinjiling composite granitic batholith							
侵入阶段	岩性	样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$
(砂子岭)	黑云母二长花岗岩	J52	292.0	56.8	14.6700	0.75254	± 0.00002
		J53	175.1	156.9	3.17468	0.72504	± 0.00001
		J51	311.2	113.73	7.78858	0.73376	± 0.00002
		J56	141.3	174.27	2.308541	0.72218	± 0.00002
(金鸡岭)	黑云母花岗岩	J01	582.8	16.725	103.142	0.93459	± 0.00003
		J04	327.0	49.565	19.2631	0.76077	± 0.00001
		J09	251.0	111.633	6.52783	0.73452	± 0.00001
		J21	414.2	35.596	34.0073	0.80269	± 0.00002
		J29	395.7	33.696	34.2864	0.79248	± 0.00003
		J44	542.5	22.061	72.3635	0.87371	± 0.00002
(螃蟹木)	二云母花岗岩	J43	1011.6	8.27	382.517	1.53645	± 0.00001
		JP1	986.9	9.283	329.692	1.43303	± 0.00002

注:样品分析委托核工业北京地质研究院完成。



A. 砂子岭岩体(Shaziling pluton); B. 金鸡岭岩体(Jinjiling pluton)

图 2 金鸡岭复式花岗岩基的 Rb-Sr 等时线图

Fig. 2 Rb-Sr isochrones for Jinjiling composite granitic batholith

0.72047, $R = 0.99986$ 。这两组样品计算得出的年龄值(150.7Ma, 150.2Ma)及 I_{Sr} 值基本一致。这表明晚阶段()二云母花岗岩与主阶段()黑云母花岗岩的结晶时间十分接近,可能是在前者尚未完全冷却固结条件下侵位的。

总之, Rb-Sr 同位素年代学研究表明:砂子岭岩体、金鸡岭岩体和螃蟹木岩体均属燕山早期;砂子岭岩体和螃蟹木岩体分别作为金鸡岭复式岩基第 一 侵入阶段和第 二 侵入阶段的产物并提供了同位素定年依据。

2 岩石学和矿物学特征

2.1 岩石学特征

鸡岭复式岩基第 一 侵入阶段岩体(砂子岭岩体)的岩性为中粗粒深灰色(角闪石)黑云母二长花岗岩,主要造岩矿物组成为石英(22%~24%),斜长石(37%~40%),钾长石(19%~22%),黑云母(10%~12%),角闪石(1%~2%)。

第 二 侵入阶段岩体(金鸡岭岩体)的岩性为黑云母花岗岩,主要造岩矿物组成:石英(29%~33%),钾长石(42%~46%),斜长石(18%~22%)黑云母(4%~6%)。本阶段岩石的特点是相带发育良好;中心相岩石为巨粗粒黑云母花岗岩;边缘相(或顶盖相)为似斑状中粒黑

云母花岗岩,仅分布在岩体边缘 100~300m 范围及标高 1 000m 以上的岩体顶部,并以发育显微文象结构、包含珠边结构为特征;过渡相岩石具不等粒花岗岩结构,分布范围最广,与中心相岩石呈过渡关系。

第 1 阶段侵入阶段岩体(螃蟹木岩体)的岩性为中细粒二云母花岗岩,主要造岩矿物组成为石英(31%~35%),钾长石(33%~37%)斜长石(24%~28%),及少量白云母和黑云母(1%~2%),与黑云母花岗岩()呈突变接触关系,但不存在淬冷边。

2.2 矿物学特征

金鸡岭复式岩基 1 个侵入阶段岩石的主要造岩矿物特征如下:

(1) 钾长石 第 1 阶段黑云母二长花岗岩和第 2 阶段黑云母花岗岩中的钾长石均为微斜条纹长石,条纹含量达 20%,边界不规则,常见分叉、复合等形态,条纹常与卡氏双晶接合面呈 70°~80°高角度斜交,显示出固溶体分离成因特征。第 1 阶段二云母花岗岩的钾长石为板条状微斜长石,无条纹但泥化强烈。采用 X 射线粉末衍射法测得 3 个阶段钾长石样品 Al/Si 的结构参数列于表 2。从该表可知,金鸡岭复式岩基 1、2 阶段岩石中的钾长石为 Al/Si 无序的显微条纹长石,第 3 阶段二云母花岗岩中为最大微斜长石($t_{131} = 0.81$),其 Al/Si 有序度()显示出有规律地从 0.13~0.33()演化增高到 0.69()和 0.80()。

表 2 金鸡岭复式花岗岩基的钾长石 Al/Si 结构态数据

样号	侵入阶段	岩性	2 (Cu K)				t_1	$t_{1(0)}$	$t_{1(m)}$	$t_{2(0)}$	
			131	131	060	204					
J52		黑云母二长花岗岩			41.67	50.69	0.13	0.77	0.39	0.39	0.12
J57		黑云母二长花岗岩	未分离	未分离	41.70	50.65	0.33	0.82	0.41	0.41	0.09
J41		黑云母花岗岩			41.83	50.66	0.69	0.90	0.45	0.45	0.05
J43		二云母花岗岩	29.48	30.140	41.75	50.58	0.80	0.94	0.89	0.05	0.03

(2) 斜长石 金鸡岭岩基 1 阶段黑云母二长花岗岩内的斜长石为中长石,环带结构发育,其长石牌号(A_n)为 37(平均值,弗氏台测定); 2 阶段黑云母花岗岩中斜长石为奥长石,并为板条状、自形一半自形($A_n = 26$,平均值)。 3 阶段二云母花岗岩中的斜长石为板条状、自形一半自形晶的钠长石($A_n = 7$)。这表明,金鸡岭岩基的斜长石成分有规律地从 1 阶段的中长石,逐步演化为奥长石()和钠长石()。

(3) 黑云母 黑云母是金鸡岭岩基中最主要的镁铁矿物,其组分特征现已成为判别花岗岩体形成的物理化学环境及成岩物质来源的一种指示矿物。金鸡岭岩基 3 个不同侵入阶段岩石中 4 个黑云母样品的化学分析结果及对单位晶胞计算得出的阳离子数和有关参数列于表 3。

表 3 金鸡岭花岗岩基中黑云母化学成分及阳离子数(以 24 个氧为基础)

序号	样号	阶段	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	LiO	F	Cl	总量
1	J53		黑云母二长花岗岩	34.30	4.04	13.71	3.46	24.6	0.35	5.40	0.34	0.16	8.94	3.43	0.36	0.09	99.05
2	J57		黑云母二长花岗岩	34.32	3.71	13.49	5.78	23.5	0.39	5.35	0.43	0.20	8.46	3.98	0.49	0.08	100.01
3	J41		黑云母花岗岩	33.63	2.22	15.83	6.20	25.2	0.44	1.87	0.64	0.15	7.82	3.89	1.26	0.13	99.27
4	J43		二云母花岗岩	39.82	0.91	22.35	2.51	16.1	0.70	1.13	0.11	0.35	9.60	2.62	0.63	0.04	98.75
序号	Si	Al	Ti	Al	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	OH ⁻	F ⁻	Cl ⁻	MF	R ²⁺	R ³⁺
1	5.484	2.516	0.486	0.067	0.416	3.289	0.047	1.287	0.058	0.05	1.824	3.638	0.182	0.024	0.255	3.33	1.04
2	5.391	2.479	0.438	0	0.683	3.086	0.052	1.253	0.072	0.061	1.695	4.147	0.243	0.021	0.249	3.14	1.12
3	5.345	2.655	0.265	0.31	0.741	3.349	0.059	0.443	0.109	0.046	1.586	4.101	0.633	0.035	0.10	3.40	1.32
4	6.143	1.857	0.106	2.206	0.291	2.077	0.091	0.260	0.018	0.105	1.890	2.682	0.307	0.018	0.09	2.17	2.603

从表 3 可知,金鸡岭岩基中黑云母以贫镁、富铁、富铝为特征,其 Mg 离子数仅为 0.26 ~ 1.287, MF 值为 0.09 ~ 0.255,与华南改造型(壳源型)花岗岩中黑云母特征(Mg < 1.8, MF < 0.38)^[4]一致。岩基黑云母在 Mg-R³⁺-R²⁺图解上的投影点从第 I 阶段到第 IV 阶段由铁质黑云母向铁白云母和铁白云母方向演化(图 3)。

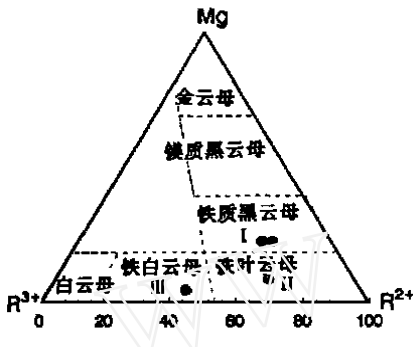


图 3 金鸡岭复式花岗岩基中黑云母的 Mg-R³⁺-R²⁺图解

Fig. 3 Mg-R³⁺-R²⁺ diagram of biotites from Jinjiling composite granitic batholith
R³⁺ = (Fe³⁺ + Al + Ti); R²⁺ = (Fe²⁺ + Mn)

(4)白云母 白云母仅出现在金鸡岭岩基 I 阶段的细粒二云母花岗岩中,呈自形晶分布在长石、石英之间,晶粒较大,晶体端面完整,偶含少量长石包裹体,表明其为岩浆成因的原生白云母^[5]。

(5)副矿物 对金鸡岭岩基 5 个人工重砂鉴定和重量统计得出以下特征:副矿物总量较低, I 阶段黑云二长花岗岩为 2525g/T, II 阶段黑云母花岗岩为 981g/T, III 阶段二云母花岗岩为 760g/T;副矿物组合, I 阶段为钛铁矿—褐帘石—磷灰石—锆石组合, II、III 阶段为萤石—独居石—锆石组合,并出现少量晶质铀矿、黑稀金矿及磷钇矿等。

3 岩石化学特征

金鸡岭复式岩基 3 个侵入阶段 14 件样品的岩石化学成分及有关参数列于表 4。

表 4 金鸡岭复式岩基的化学成分(%) ,CIPW 标准矿物及岩石化学参数

Table 4 Chemical compositions, CIPW norms and petrochemical parameters of Jinjiling composite batholith

岩性 侵入阶段	含角闪石黑云母二长花岗岩 (砂子岭岩体)				黑云母花岗岩 (金鸡岭岩体)						二云母花岗岩 (螃蟹木岩体)			
	J57	J57-1	J53	JTC	J01	J04	J15	J66*	J63*	J63*	J43	JE2	J47*	J54*
SiO ₂	67.98	69.07	66.95	71.48	76.86	75.02	76.15	76.34	75.56	77.11	75.95	76.7	76.9	76.14
TiO ₂	0.69	0.71	0.84	0.39	0.07	0.2	0.1	0.15	0.15	0.05	0.04	0.03	0.03	0.01
Al ₂ O ₃	13.81	13.36	13.34	12.38	12.25	12.49	12.32	12.84	12.84	12.15	12.72	12.38	13.2	12.48
Fe ₂ O ₃	0.53	1.12	1.43	1.02	0.78	0.14	0.41	0.32	0.47	0.35	0.08	0.46	1.05	0.78
FeO	4.43	4.02	5.55	2.35	1.03	1.62	1.53	1.9	1.93	2.4	1.32	0.21	1.02	1.89
MnO	0.08	0.06	0.09	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.1	0.01	0.01
MgO	0.88	1.03	1.05	0.53	0.02	0.1	0.08	0.23	0.35	0.25	0.19	0.01	0.2	0.2
CaO	2.39	0.33	2.83	1.67	0.34	0.42	0.33	0.54	0.71	0.59	0.38	0.88	0.19	0.01
Na ₂ O	2.86	3.38	3.36	3.88	3.51	3.25	2.38	3.0	2.88	2.5	3.37	2.8	3.0	3.14
K ₂ O	4.95	4.38	4.25	4.63	5.13	5.63	5.63	4.0	4.0	4.5	4.85	3.8	4.0	4.85
P ₂ O ₅	0.23	0.24	0.33	0.16	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.08	0.01	0.05	0.04	0.01
烧失	0.81	0.51	0.24	0.47	0.65	0.65	0.69	0.42	0.24	0.06	0.96	1.18	0.80	0.63
总计	99.64	100.21	100.53	99.0	100.71	99.60	100.69	100.19	99.31	100.12	99.91	99.95	100.42	100.12
Q	23.6	24.7	21.6	26.9	36.7	32.5	39.0	40.9	40.4	42.1	35.7	43.2	43.1	37.7
Or	29.2	25.9	25.1	27.4	30.3	33.3	33.3	23.4	23.6	26.6	28.7	22.5	23.6	28.7
Ab	24.2	28.6	28.4	32.8	29.7	27.5	20.1	25.4	24.4	21.2	28.5	23.7	25.4	26.6
An	10.2	8.34	8.76	2.69	1.43	1.82	1.38	2.16	3.00	2.40	1.82	4.04	0.68	0
C	0	0	0	0	0.40	0.38	1.81	2.78	2.67	2.28	1.26	2.18	3.68	2.07
DI	77.1	79.2	75.1	87.1	95.6	93.2	92.4	89.9	88.4	89.8	92.8	89.4	92.1	93.0
SI	6.45	7.39	6.71	4.27	0.19	0.93	0.80	2.43	3.63	2.50	1.94	0.12	2.16	1.84
A/NKC	0.96	0.92	0.87	0.86	1.03	1.02	1.16	1.25	1.24	1.26	1.11	1.20	1.37	1.20
KN/A	0.73	0.77	0.76	0.92	0.92	0.92	0.81	0.72	0.71	0.74	0.85	0.70	0.70	0.83
Ox	0.10	0.20	0.19	0.28	0.40	0.07	0.19	0.13	0.18	0.12	0.05	0.24	0.48	0.27
	2.44	2.31	2.42	2.54	2.20	2.46	1.94	1.47	1.45	1.44	2.05	1.29	1.45	1.93
A. R.	2.09	2.51	2.42	3.47	3.52	3.03	2.21	2.63	2.48	2.29	3.12	2.46	2.62	3.02
R ₁	2200	2218	2060	2199	2622	2472	2854	3018	3004	3118	2687	3179	3064	2749
R ₂	570	562	617	448	278	295	281	321	345	314	299	337	289	250

注:带 *样品数据来源为核工业 303 大队;A/NKC = Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O + CaO) (分子比);KN/A = (K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ (分子比);Ox = Fe³⁺ / (Fe³⁺ + Fe²⁺ + Mn) (原子比);R₁ = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti);R₂ = 6Ca + 2Mg + Al

从表 4 可以得知金鸡岭复式岩基的岩石化学特征如下：

(1) 金鸡岭复式岩基各阶段岩石的里特曼岩系指数 () 为 1.29 ~ 2.54 , 莱特碱度率 (A. R.) 为 2.09 ~ 3.52 , 表明岩石属钙碱性系列。

(2) 岩石的铝饱和指数 (A/ NKC) 从 阶段二长花岗岩的 0.90 (平均值) 增高到 1.16 (阶段黑云母花岗岩) 和 1.22 (阶段二云母花岗岩) , 标准矿物刚玉 (C) 值也从 0 增长到 1.72 % (阶段) 和 2.30 % (阶段) 。这表明金鸡岭岩基从早阶段到晚阶段由准铝质 () 向过铝质 () 和强过铝质花岗岩演化。

(3) 表征中酸性岩浆分异程度的分异指数 (DI) 从 阶段的 75.1 ~ 87.1 增高到 88.4 ~ 95.2 (, 阶段) 。在氧化物 - DI 图解上 , MgO、TiO₂、CaO、TFeO (全铁) 和 Al₂O₃ 与分异指数呈良好的线性关系 (图 4) 。这些特征为金鸡岭岩基 3 个阶段花岗岩是同一岩浆源分异演化产物提供了重要的岩石化学依据。

(4) 岩石的氧化系数 (Ox) 较低 (< 0.50) , 变化范围不大 , 从 0.19 (阶段 , 平均值) , 0.16 (阶段 , 平均值) 到 0.26 (阶段 , 平均值) 。这表明岩石形成于深成条件下。

4 地球化学特征

4.1 稀土元素

表 5 列出了金鸡岭复式岩基 3 个阶段花岗岩中稀土元素含量和有关参数 , 其主要特征是 : (1)

阶段花岗岩的稀土总量 (236 × 10⁻⁶ , 平均值) 接近世界花岗岩的平均含量 (250 × 10⁻⁶) , 阶段花岗岩的稀土总量偏高 (354 × 10⁻⁶ ,

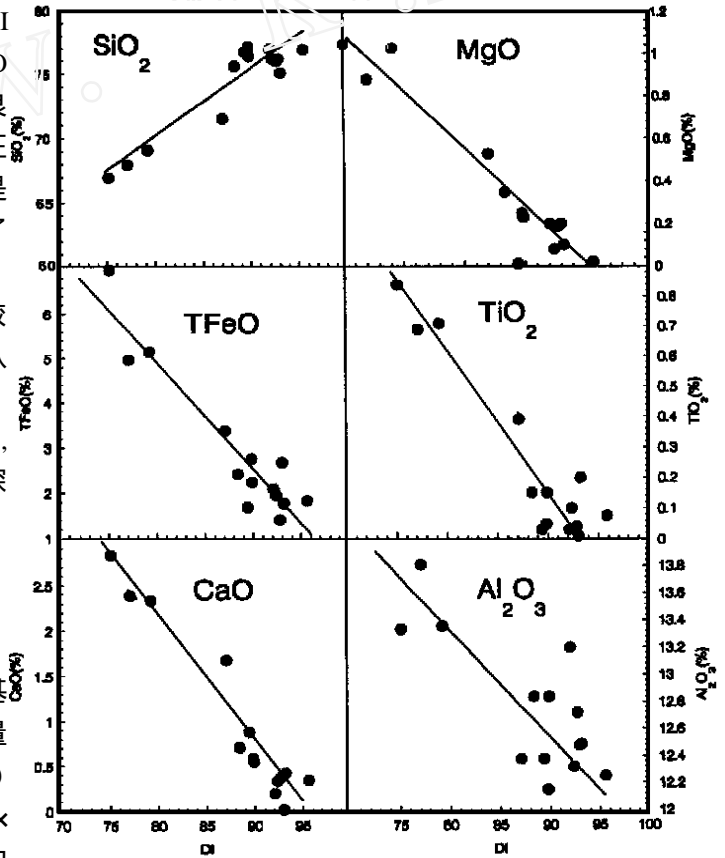


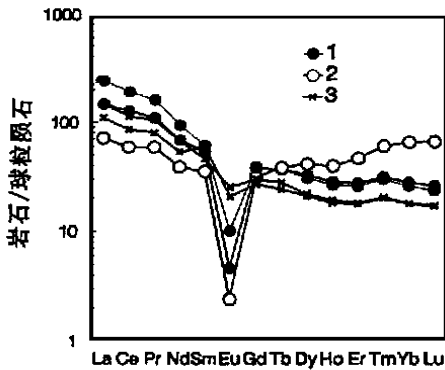
图 4 金鸡岭复式花岗岩基的氧化物 - DI 图解

Fig. 4 Oxides-DI diagrams for Jinjiling composite granitic batholith

表 5 金鸡岭复式花岗岩基稀土元素含量 (× 10⁻⁶) 及参数

Table 5 Rare earth element contents (× 10⁻⁶) and parameters of Jinjiling composite granitic batholith

样号	侵入阶段	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	LREE HREE	Eu	La/Sm
J53		53.8	107	14.2	47.4	10.6	2.21	9.25	1.63	8.41	1.64	4.57	0.73	4.46	0.66	267	7.5	0.67	5.08
J57		39.9	81.6	10.9	37.6	4.03	1.81	8.29	1.41	8.05	1.55	4.42	0.72	4.43	0.66	205	6.0	0.93	4.42
J04		87.2	180	21.8	66.1	14.1	0.88	11.9	2.12	11.7	2.28	6.53	1.07	6.44	0.91	413	8.6	0.20	6.18
J41		53.3	121	15.1	48.8	12.4	0.40	11.4	2.14	12.6	2.43	6.96	1.12	6.00	1.00	296	5.6	0.10	4.30
J43		26.1	55.9	8.03	27.5	8.17	0.21	9.59	2.22	15.8	3.39	11.7	2.15	16.3	2.53	190	1.98	0.07	3.19



- 1. 黑云母花岗岩 (biotite granite) ;
- 2. 二云母花岗岩 (two mica granite) ;
- 3. 黑云母二长花岗岩 (biotite adamellite)

图5 金鸡岭复式花岗岩基稀土配分曲线

Fig.5 REE distribution patterns of Jinjiling composite granitic batholith

平均值),而 阶段花岗岩则降低到 190×10^{-6} ; (2) 阶段花岗岩轻稀土明显富集,轻重稀土比值(LREE/HREE)为 5.6 ~ 8.62,分布型式属右倾轻稀土富集型(图5), 阶段二云母花岗岩则重稀土富集,LREE/HREE 值降低至 1.98,分布型式呈平展的海鸥式,显示出强过铝质花岗岩的特征;(3) Eu 从 阶段花岗岩的 0.80(Eu 平均值)降低至 0.15() ,和 0.07() ,并与分异指数呈线性负相关;(4) 各阶段花岗岩的 La/ Sm 值变化范围较小,在 La/ Sm - Sm 图解上的投影点近水平分布,显示出岩浆结晶分异的特点。

4.2 微量元素

表6 列出金鸡岭岩基3个阶段花岗岩的微量元素含量,与原始地幔岩相比较其主要特征是:(1)大离子亲石元素(Rb, K, Ba, Th)强富集, Rb/ Sr 值从 1.31() 增高到 17.6() 和 83.3() ;(2)高场强元素(Zr, Y, Ga)及过渡元素(Ti)呈弱富集趋势,但 Pb 呈强富集,

这可能与放射性元素衰变成因铅的积累有关;(3)铁族元素(Ni, Co, Cr)强烈亏损;(4)3个阶段花岗岩的微量元素平均值的原始地幔标准化曲线基本相似,呈“双隆起”型式(图6),显示出同源岩浆演化的特点。

表6 金鸡岭复式花岗岩基微量元素含量($\times 10^{-6}$)

Table 6 Trace element contents (10^{-6}) of Jinjiling composite granitic batholith

样号	阶段	岩性	Rb	Ba	Sr	K	Th	Nb	Zr	Y	Sc	Ga	Pb	Ti	P	Co	Cr	Ni
J53	黑云母二长花岗岩		191	876	146	35275	23.8	21.1	17.9	43.6	13.5	14.9	31.0	4955	1222	9.33	18.7	11.6
J57			218	738	125	41085	23.1	21.2	23.0	44.3	11.4	15.6	42.1	4062	1008	8.13	13.5	9.91
平均值			205	807	136	38180	23.5	21.2	20.5	44.0	12.5	15.3	36.5	4508	1115	8.73	16.1	10.8
J01	黑云母花岗岩		572	57.6	26.3	42579	31.8	19.6	105	26.8	2.63	20.3	64.1	540	95.9	1.07	8.06	4.00
J04			334	105	45.1	46729	33.2	18.8	71.0	47.5	5.55	19.2	47.8	1308	174	1.88	4.35	3.64
J16			537	79.1	19.6	46719	675	24.6	112	27.4	6.52	20.3	57.9	909	138	1.42	3.81	3.49
J44			536	102	30.5	44654	44.4	27.7	93.5	97.5	5.62	20.9	74.6	598	108	1.13	6.39	3.88
J41			446	108	22.7	49385	34.1	16.6	81.1	40.8	4.08	19.3	45.0	731	106	0.83	4.46	3.13
平均值			485	90.3	28.8	46013	42.2	21.5	92.5	48	4.88	20.0	57.9	817	124	1.27	5.15	3.63
J43	二云母花岗岩		991	66	12.6	40255	35.5	41.4	101	88.0	4.85	23.5	69.3	407	65.3	0.93	2.28	4.28
JP1			958	75	11.5	33200	36.0	39.4	94.9	125	5.13	22.7	74.2	391	71.8	1.13	3.23	4.46
平均值			975	71	12.1	36728	35.8	40.4	98.0	107	4.99	23.1	71.8	399	68.6	1.03	2.76	4.37

5 岩浆动力学特征

前述金鸡岭复式岩基与震旦—寒武系地层呈侵入接触关系;周边围岩存在宽达 1 000m 的角岩带以及岩体内部相带发育良好等地质特征表明其为岩浆成因。以下是研究并探讨金鸡岭岩基形成的岩浆动力学特征。

5.1 成岩温度

对金鸡岭岩基 3 个阶段花岗岩的成岩结晶温度采用二长石地质温度计进行了测试计算。钾长石成分采用化学分析结果。斜长石成分则用弗氏台测定。计算采用 J. A. Whitney^[7]二长石地温计公式。其结果列于表 7。可见,金鸡岭岩基的成岩结晶温度从 阶段二长花岗岩(745 ,平均值)到 阶段黑云母花岗岩(673)及 阶段二云母花岗岩(505)呈逐阶段降低趋势,与前述钾长石有序度逐阶段增大的规律相一致。

5.2 氧逸度 f_{O_2} 和水逸度 f_{H_2O}

将金鸡岭岩基 3 个阶段花岗岩的黑云母成分(表 3)及成岩结晶温度(表 8)投影到 Wones & Eugster^[8]实验得出的黑云母稳定度图解上,可见在其结晶过程 f_{O_2} 不断降低,铁质系数($Fe/(Fe + Mg)$)逐渐增高的特点,其结果列于表 8。同时,根据岩体花岗岩中黑云母、钾长石、少量磁铁矿共存的特点,按 Wones 提出的水逸度公式:

$$\log f_{H_2O} = \frac{7409}{T} + 4.25 + \frac{1}{2} \log f_{O_2} + 3 \log X_{Fe^{2+}} - \log K_{AlSi_3O_8} - \log Fe_3O_4$$

式中 T—成岩结晶温度(°K); f_{O_2} —氧逸度; $X_{Fe^{2+}}$ —黑云母中铁黑云母的摩尔分数; Fe_3O_4 —磁铁矿的活度(= 1); $K_{AlSi_3O_8}$ —钾长石活度。

表 7 金鸡岭复式花岗岩基的长石成分和成岩温度

Table 7 Compositions and forming temperatures of feldspars from Jinjiling composite granitic batholith

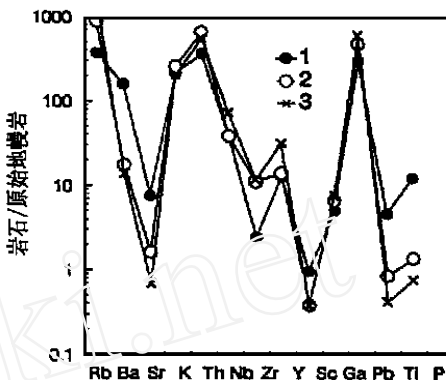
样号	阶段	岩性	钾长石成分(%)			$X_{ab,Af}$	$X_{ab,pf}$	T
			K_2O	Na_2O	CaO			
J53		黑云母二长花岗岩	13.15	1.97	0.33	0.21	0.63	707
J57			12.71	2.37	0.31	0.24	0.60	782
J41		黑云母花岗岩	11.98	2.74	0.14	0.26	0.80	673
J43		二云母花岗岩	13.88	1.43	0.08	0.14	0.93	505

表 8 金鸡岭复式岩基黑云母形成时的 f_{O_2} 和 f_{H_2O}

Table 8 f_{O_2} and f_{H_2O} of biotites from Jinjiling composite granitic batholith

样品号	阶段	岩性	T(°K)	$f_{O_2}(MPa)$	$X_{Fe^{2+}}$	$K_{AlSi_3O_8}$	$f_{H_2O}(MPa)$
J57		二长花岗岩	1055	10^{-19}	0.56	0.76	43.3
J41		黑云母花岗岩	946	$10^{-18.5}$	0.63	0.74	72.6
J43		二云母花岗岩	778	10^{-20}	0.36	0.86	101.8

计算出各阶段黑云母结晶时的水逸度 f_{H_2O} 列于表 8。可知,金鸡岭花岗岩基从 阶段向阶段演化过程中,岩浆的氧逸度逐级下降,水逸度则逐渐升高。



- 1. 黑云母花岗岩 (biotite granite);
- 2. 二云母花岗岩 (two-mica granite);
- 3. 黑云母二长花岗岩 (biotite adamellite)

图 6 金鸡岭复式花岗岩基微量元素的原始地幔岩标准化图

Fig. 6 Primordial mantle normalized trace element diagram for Jinjiling composite granitic batholith

5.3 侵位深度估算

金鸡岭复式岩基的侵位深度采用岩体上覆地层厚度和围岩变质矿物组合(变质相)两种方法进行估算:(1)金鸡岭复式岩基侵位于震旦—寒武系地层中,其南北缘均与震旦—寒武系直接接触,侵入时间为早侏罗世,岩体外围有古生代—中生代地层分布,因而用泥盆系至二叠系地层厚度估算为岩基侵位深度是合适的。根据湘南地区地层资料统计^[2],岩基所在地区D-P地层的总厚度约为6334m,可作为金鸡岭岩基侵位的深度。

(2)金鸡岭地区震旦—寒武系地层泥质岩石均已经受区域变质作用,并已成板岩,其变质矿物组合为石英—水云母—绿泥石(少量),属低温沸石变质相,其变质温度为100~200^[9]。按大地热流计算公式^[9]:

$$q = \frac{dT}{dz}$$

其中 q —大地热流, λ —岩石导热率, z —距地表深度, T —温度。

将中生代褶皱区的大地热流平均值(1.45HFU)^[10]及沉积岩的平均导热率(25.1Jcm⁻¹s⁻¹)代入上式,求得地热梯度值 $\left(\frac{dT}{dz}\right)$ 为24/km。由此得岩基侵位深度为6.25km(取变质作用温度为150)。这一估算结果与岩基上覆地层厚度为6.3km的结论相吻合。金鸡岭岩基的一系列地质特征,如岩石呈粗粒花岗结构,相带发育完整,存在宽达千米的热变质带等也印证其为中深成相侵位。

5.4 成岩压力

(1)根据前述金鸡岭岩基3阶段二云母花岗岩存在原生(岩浆成因)白云母,矿物组成和岩石化学成分接近花岗岩最低共熔组分等特征。笔者利用白云母—钾长石+刚玉反应平衡曲线^[11]与成分接近最低共熔组分的花岗岩初熔曲线的交点,估算出二云母花岗岩结晶时的压力为180MPa。

(2)根据金鸡岭岩基侵位深度(6.3km),按每公里岩石的静压力为30MPa^[12]计算得出岩基结晶时的成岩静压力为189MPa。

(3)与金鸡岭岩基接触的震旦—寒武系泥质板岩在受热变质作用后形成黑云母角岩、红柱石角岩、堇青石角岩、白云母角岩(紧靠岩体分布)、斑点角岩,其变质矿物组合为石英—黑云母—白云母—红柱石—堇青石,属角闪石角岩相和辉石角岩相。依据这些变质矿物形成的变质反应平衡曲线,采用岩石成因格子(Petrogenetic grid)^[11]方法确定其形成时的温压范围为650~800℃,200~300MPa。

5.5 岩浆结晶演化过程的模拟计算

金鸡岭复式花岗岩基3阶段岩石成分的投影点在氧化物(SiO₂, MgO, TFeO, TiO₂, CaO, Al₂O₃)—分异指数(DI)变异图解上呈线性关系(图4),黑云母成分(图3)和钾长石有序度(表2)有规律的演化以及微量元素分布型式(图6)均表明是同源岩浆结晶分异作用的产物。

为了进一步判明金鸡岭复式花岗岩基的岩浆作用类型,选择Sr, Ba, Nb, Yb, La, Gd等不相容元素(表5,表6)分别作出共分子比值(Ba/Sr, Ba/Nb)和共分母比值(La/Yb, Gd/Yb)的协变图解(图7)。由图可见,金鸡岭岩基成分点呈指数曲线变异关系,从而排除了批式熔融作用的可能性^[12],显示出Rayleigh分离结晶作用的特点。这为本文采用Rayleigh结晶模型进行模拟计算提供了地球化学依据。

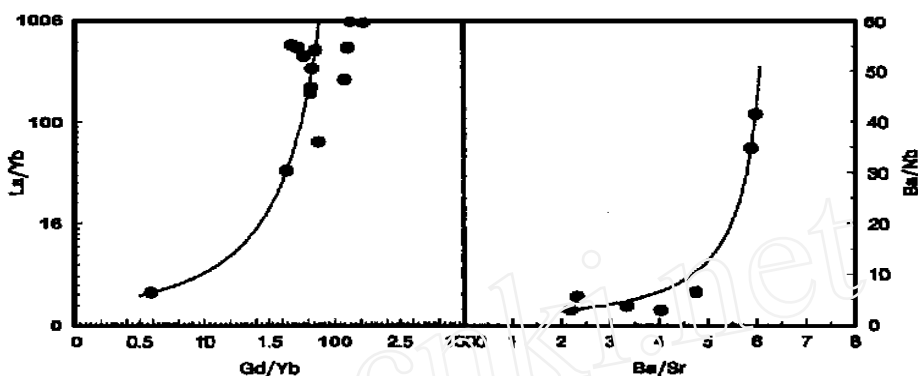


图7 金鸡岭复式花岗岩基的 Ba/Sr - Ba/Nb 和 Gd/Yb - La/Yb 协变图

Fig.7 Ba/Sr vs. Ba/Nb and Gd/Yb vs. La/Yb concordance diagrams of Jinjiling composite granitic batholith

在成岩作用的模拟计算中用 阶段二长花岗岩浆作为初始岩浆,其实际矿物平均含量为:石英 - 25%,斜长石 - 39%,钾长石 - 24%,黑云母 8%,角闪石 3%,不相容元素 $Rb = 205 \times 10^{-6}$, $Yb = 4.45 \times 10^{-6}$ 。上述 5 种造岩矿物对 Rb, Yb 的分配系数引自 Rollison (1993)^[13],按公式: $Di = \sum_{i=1}^n W_i K_i$, 计算得出 Rb, Yb 的总分配系数 $D_{Rb} = 0.2873$, $D_{Yb} = 0.2378$ 。将 阶段二云母花岗岩作为分离结晶的残余熔体,其不相容元素 $Rb = 975 \times 10^{-6}$, $Yb = 16.3 \times 10^{-6}$ (表 5, 6)。

按 Rayleigh 结晶模型: $C_L = C_0 F^{Di-1}$ (式中 C_L 为残留熔体中微量元素浓度; C_0 为初始熔体中微量元素浓度; Di 为元素 i 的总分配系数; F 为残留熔体的重量分数), 将 $D_{Rb} = 0.2873$, $C_0^{Rb} = 205 \times 10^{-6}$, $C_L^{Rb} = 975 \times 10^{-6}$ 代入上式, 得 $F = 0.112$ 。同样, 将 D_{Yb} , C_0^{Yb} , C_L^{Yb} 值代入上式得 $F = 0.182$ 。取平均值 $F = 0.143$ 。

以上模拟计算表明,以二长花岗岩浆为初始岩浆,经分离结晶作用将产生以二云母花岗岩() 为代表的残余岩浆约为 14.3%,与此同时形成的分离结晶固相约占 85.7%。这一结论与金鸡岭复式岩基的地质特征(、阶段岩石出露面积,野外实际接触关系及 Rb - Sr 同位素地质年龄等)基本吻合。

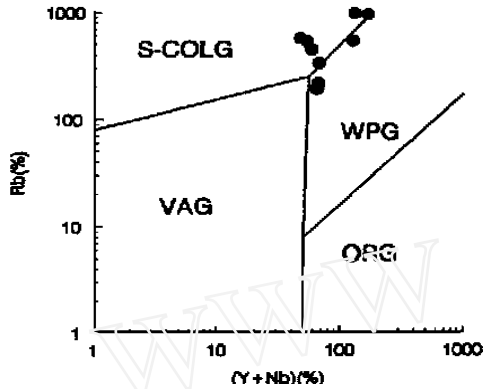
6 讨论与结论

前人^{[1][2]}将金鸡岭地区花岗岩按侵入接触关系及岩性等特征划分为砂子岭、金鸡岭和螃蟹木 3 个岩体,分别归属于印支期和燕山期。现通过 Rb - Sr 同位素定年研究确定砂子岭二长花岗岩和金鸡岭黑云母花岗岩 - 螃蟹木二云母花岗岩的 Rb - Sr 全岩等时线年龄值分别为 169.5Ma 和 150.7Ma。这表明它们同属燕山早期,为将其归属于燕山早期 3 个侵入阶段的(, ,) 复式花岗岩岩基提供了可靠的同位素地质依据。

前述有关金鸡岭复式岩基 3 个阶段花岗岩在钾长石有序度、斜长石的 An 成分、黑云母组分、岩石化学成分及稀土和微量元素地球化学特征等方面的演化规律充分表明它们是由同一花岗质岩浆源结晶分异形成的。按 Rayleigh 结晶模型进行模拟计算的结果 ($F = 0.112 \sim 0.182$) 与二云母花岗岩() 和黑云母花岗岩() 的实际出露面积(平面)之比值大体一致。从

岩浆动力学理论角度印证了上述结论的合理和可信。

金鸡岭复式花岗岩基侵位于震旦—寒武系地层,形成宽达 1 公里左右的接触变质(角岩)带。通过对岩基侵位时上覆岩层厚度的估算及根据接触变质矿物组合采用成岩格子法计算得出其侵位深度约为 6.3km,成岩压力约为 180MPa,具有中深成相主动侵位特征。



图中构造分区: S-COLG-同碰撞花岗岩(tectonic fields in diagram: S-COLG - syn-collision granite); WPG-板内花岗岩(WPG - within plate granite); VAG-火山弧花岗岩(VAG - volcanic arc granite); ORG-洋中脊花岗岩(ORG - ocean ridge granite)

图 8 金鸡岭复式花岗岩基的 (Y+Nb) - Rb 判别图(仿 Pearce 等,1984)

Fig. 8 (Y+Nb) - Rb discrimination diagram for Jinjiling composite granitic batholith (after Pearce et al, 1984)

深部地球物理资料表明,金鸡岭复式岩基位处地壳厚度大于 36km,岩石圈厚度超过 200km 的桂湘幔凹区^[14]。在 Pearce 等^[15]提出的 (Y+Nb) - Rb 花岗岩构造环境判别图上,金鸡岭复式花岗岩基的投影点集中分布在同碰撞-板内花岗岩区(图 8)。结合 I_{Sr} 高(0.7163()~0.7206(,)) ,黑云母的 MF 值低(<0.38),岩石属钙碱性系列等特征,确定金鸡岭岩基形成于板块碰撞挤压和地壳增厚的构造环境,其成因属地壳改造型(S型)花岗岩。

致谢 笔者在野外工作期间得到核工业 303 大队庞述之总工程师和韦光弟高级工程师的热情帮助和指导,本文初稿承蒙王德滋教授审阅并提出宝贵意见,一并在深表谢意!

第一作者简介: 章邦桐,男,1934 年生,教授、博士生导师,长期从事铀矿地质及成矿理论研究。通讯地址:南京大学地球科学系;邮编:210093。

参考文献(References):

- [1] 莫柱孙,叶伯丹,潘维祖,等. 南岭花岗岩地质学. 北京:地质出版社,1980, 181-187. [Mo Zhusun, Ye Baidan, Pan Weizhu, Wang Shaonian. Geology of granites in Nanling Region. Beijing: Geological Publishing House, 1980, 181-187.]
- [2] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志. 地质出版社,1988. 399-458. [Bureau of Geology and Mineral Resources, Hunan Province. Regional geology of Hunan province. Beijing: Geological Publishing House, 1988, 399-458.]
- [3] 刘兴忠,周维勋. 中国铀矿省及其分布格局. 铀矿地质, 1990, (6): 326-337. [Liu Xingzhong, Zhou Weixun. Uranium provinces in China and their distribution patterns. Uranium Geology, 1990, 6(6):326-337.]
- [4] 徐克勤,孙毓,王德滋,胡受奚,刘英俊,季寿元. 华南花岗岩成因与成矿. 见:徐克勤,涂光炽,主编. 花岗岩地质与成矿关系. 南京:江苏科学技术出版社. 1986, 1-21. [Xu Keqin, Sun Nai, Wang Dezi, Hu Shouxi, Liu Yingjun and Ji Shouyuan. Petrogenesis of the granitoids and their metallogenetic relations in South China. In: Xu Keqin and Tu Guangchi, eds. Geology of granites and their metallogenetic relation. Nanjing: Jiangsu Sci. Technol. Publ. House, 1984, 1-32.]
- [5] Barbarin B. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids. Geology, 1996, 24(4): 295-298.
- [6] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution. London: Blackwell Scientific Publications, 1985, 265-266.
- [7] Whitney J A, Stormer J C. The distribution of $NaAlSi_3O_8$ between coexisting microcline and plagioclase and its effect on geothermometric calculations. Amer. Mineralogist, 1977, 62: 687-691.
- [8] Wones D R, Eugster H P. Stability of biotite: Experiment, theory, and application. Amer. Mineralogist., 1965, 50: 1228-1272.

- [9] Turner F.J. Metamorphic petrology. second edition. New York: Cambridge University Press, 1981, 78-93.
- [10] 中国科学院地质研究所地热室, 编. 矿山地热概论. 北京: 煤炭工业出版社. 1981, 23-38. [Geothermal Group, Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, ed. An introduction to mine geothermics. Beijing: Coal Industry Press, 1981, 23-38.]
- [11] Chatterjee N D. Thermal stability and standard thermodynamic properties of synthetic 2M₁-muscovite, KAl₂[AlSi₃O₁₀(OH)₂]. Contrib. Mineral. Petrol., 1974, 48: 89-114.
- [12] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 李增田, 编. 花岗岩类岩浆动力学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994, 38-48. [Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua, Li Zengtian, eds. Magma-dynamics of granitoids-theory, method and a case study of the Eastern Hubei granitoids. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1994, 38-48.]
- [13] Rollison H. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. New York: Springer-Verlag, 1993, 106-130.
- [14] 徐夕生, 周新民, 王德滋. 壳幔作用与花岗岩成因——以中国东南沿海为例. 高校地质学报, 1999, 5(3): 241-250. [Xu Xisheng, Zhou Xinmin, Wang Dezi. Crust-mantle interaction and the genesis of granite: A case study of coastal area of Southeastern China. Geological Journal of China Universities, 1999, 5(3): 241-250.]
- [15] Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams from tectonic interpretation of granitic rocks. Jour. Petrol., 1984, 25: 956-983.

Geology and Magma-Dynamical Features of Jingjiling Composite Granitic Batholith in the Western Nanling Region

ZHANG Bang-tong, DAI Yong-Shan, WANG Ju, LIU Hong-lei, BAI Chou-Yong

(Department of Earth Sciences and State Key Laboratory for Mineral Deposits Research,
Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Jinjiling composite batholith in the west Nanling Region consists of three granite bodies with different ages of intrusion: I stage, amphibole-bearing biotite adamellite; stage, biotite granite; stage, two-mica granite. The ages and initial strontium ratios for the stage and stage granites by Rb-Sr whole-rock isochron method are 169.5Ma and 0.7163, and 150.7Ma and 0.7206, respectively. It indicates that they are intrusions of early Yanshanian period. Granites of the Jinjiling batholith belong to calc-alkaline rock series and show a general evolution trend from stage adamellite, to stage granite and stage bimicaceous granite as follows: aluminium saturation index increases from metaluminous () to peraluminous () and highly peraluminous; ordering degree of K-feldspar increases from 0.33 () to 0.69 () and 0.80 (); An of plagioclase decreases from 37 () to 26 () and 7 (); chemical composition of biotite varies from Fe-biotite (), to lepidomelane () and Fe-mica (); oxides (SiO₂, Al₂O₃, TFe, MgO, TiO, CaO) versus DI diagrams show a linear evolution features; rock-forming temperatures gradually drop down from 745 () to 673 () and 505 (). By means of geochemical and geobarometric methods, it is estimated that the depth of emplacement for Jinjiling batholith was about 6.5km, and the rock-forming pressure was about 180MPa. Jinjiling composite granitic batholith belongs to S-type granitoids, forming in collision orogeny environment.

Key words: west Nanling Region; Jinjiling composite granitic batholith; magma-dynamics