

广东永宁那程金矿区花岗岩: 地球化学特征、成因与构造环境

吴继承, 李己华, 李太兵, 李永光

中国人民武装警察部队 黄金技术学校, 湖北 襄樊 441002

摘要: 本文对出露于那程金矿区花岗岩体进行了详细的岩石学、地球化学及年代学研究, 重点讨论了岩体的成因。那程金矿区花岗岩体主要由石英(30%~35%)、钾长石(30%~35%)和斜长石(25%~28%)组成, 副矿物有锆石和磷灰石等。地球化学分析显示, 岩石总体具高硅、富碱、高钾、高铝和低镁、低钙的特征, $K_2O/Na_2O > 1$, 里特曼指数 σ 为1~2.43, 属高钾钙碱性系列。岩石铝饱和指数(A/CNK)大于1.1, 具强过铝质“S”型花岗岩的特征。稀土配分模式为右倾“V”字形, 轻重稀土分馏明显, $(La/Yb)_N = 1.51 \sim 9.66$, 具有较强的负铕异常($\delta Eu = 0.31 \sim 0.74$); 地球化学特征反映其岩浆有源于泥质岩的“低温”和源于砂岩的“高温”两种类型, 至少有两种岩浆来源, 形成于同碰撞构造环境。

关键词: S型花岗岩; 同碰撞; 强过铝; 地球化学特征; 广东

中图分类号: P588.12⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2010)04-0364-09

Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Setting of the Peraluminous Granites in the Nacheng Gold Deposit, Yongning, Guangdong

WU Ji-cheng, LI Ji-hua, LI Tai-bing, LI Yong-guang

Gold Technology College, Chinese People's Armed Police, Xiangfan, Hubei 441002, China

Abstract: The Nacheng granite locates in the Yongning area, Guangdong Province. This paper studied petrographical and chronological characteristics of this granite as well as its petrogenesis and geological significance. The Nacheng granite mainly consists of quartz (40%~50%), orthoclase (25%~30%), plagioclase (15%~20%) with minor accessory minerals of quartz apatite and magnetite. Geochemical analyses show that the manziying granite has high content of SiO_2 (75.56%), K_2O (4.72%), Al_2O_3 (13.34%) and total alkali ($Na_2O + K_2O = 7.49\%$), but relatively low MgO (0.04%~1.29%) and CaO (0.39%~2.21%). The ratios of K_2O/Na_2O are generally higher than 1. The Rittmann indexes are between 1~2.43, belonging to the high-K calc-alkaline series. The values of A/CNK vary from 1.12 to 1.32 with an average of 1.10, showing the characteristics of peraluminous S type granites. Trace element analyses show that the Nacheng granite has relatively high REE content of $82.6 \times 10^{-6} \sim 225.68 \times 10^{-6}$, and displays right-inclined V-shape REE patterns with relatively high fractionations of LREE and HREE [$(La/Yb)_N = 1.51 \sim 9.66$] and pronounced negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.31 \sim 0.74$) in the chondrite-normalized REE diagrams, suggesting a typical crust-derived granite. The magmas may be divided into two types: “low-temperature” type from mudstones and “high-temperature” type from sandstones. The Nacheng granites were formed from the post-orogenic tectonic setting.

Key words: S-type granite; syn collisional; peraluminous; geochemistry; Guangdong Province

那程金矿区(东经 $111^{\circ}33'21''$, 北纬 $22^{\circ}15'5''$)位于广东省阳春市永宁镇, 与阳春市 292° 方向直距 23 km。区内震旦系和寒武系地层出露广泛, 构造形迹

复杂, 岩浆岩发育, 金属矿床(点)星罗棋布。区内花岗岩类侵入岩的研究历来为国内外地质学家所关注。那程金矿区及邻区各种成因类型、不同形成时

代和体积大小不等的花岗岩类侵入岩分布广泛,约占岩层(体)出露面积的40%,主要岩石类型有片麻状斑状黑云二长花岗岩、花岗闪长岩、斜长花岗岩、细粒角闪黑云斜长花岗岩和花岗斑岩,不同单元岩体 Rb-Sr 等时线年龄值变化范围为 282~338 Ma^[1],据此,认为本地区花岗岩类岩体的侵位时间为海西期。永宁地区岩体的生成及定位机制长期未决也是重要地质难题之一。可是 2006 年 7 月至 2009 年在云开成矿带进行调查时发现了区内 1、2 号矿脉,并基本查明了它们的规模、形态、产状和含金性。我们认为必须查明岩浆活动与金属成矿作用的成因联系。为此,研究了那程金矿区花岗岩体的地质特征、岩石学特征和岩石化学特征,讨论了构造属性及其成矿关系。

1 研究区地质概况

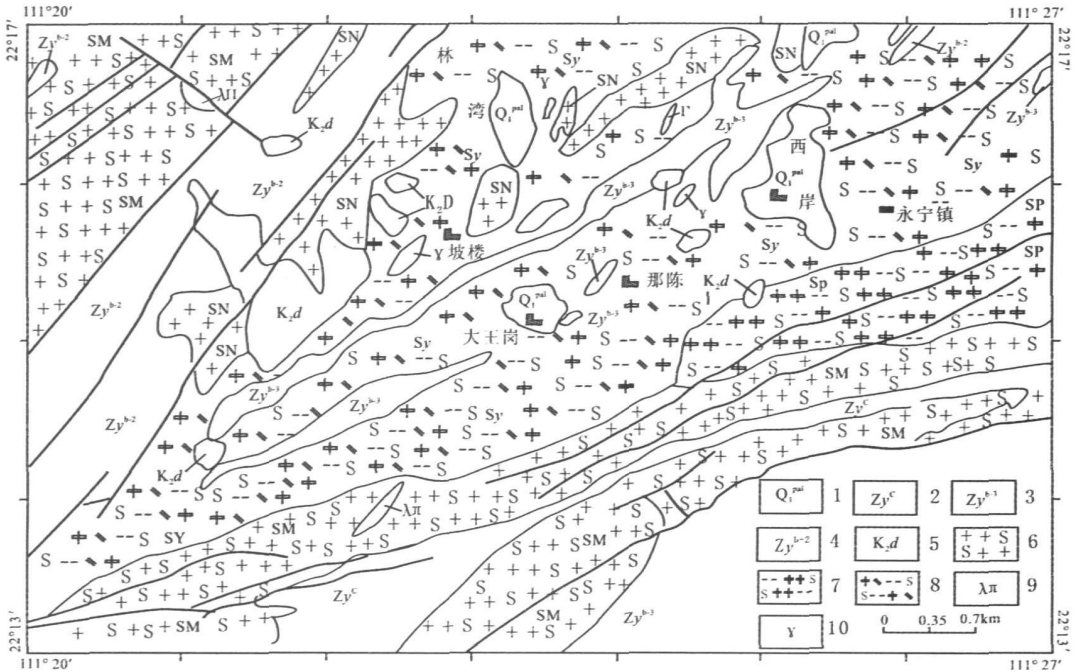
研究区大地构造上位于华南褶皱系南西段和北东向吴川-四会大断裂中部主断裂西南侧,粤西隆起云开隆起与粤中拗陷交接地段。区域出露的地层有震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系和侏罗系;总体上呈北东向分布,与区域北东向断裂相吻合。

区域构造活动褶皱和断裂较强烈。构造形迹以北东向为主,也发育其他构造形迹。北东向的山脉和断裂走向均大体以北东 40° 延展,此外还有呈显著的 S 型的构造形迹。

研究区出露地层为震旦系云开群中亚群第三段(图 1),分布于北部和那程村南西茅田一元墩-田心寨、狮子头-新坡一带,北东向条带状展布,为一套浅海相类复理石建造,岩性主要为灰色云母石英微片岩、云母片岩、变质长石石英砂岩夹片状云母长石石英岩和厚层状砂线石堇青石角岩。寒武系八村群上亚群分布于矿区南部及东部一带,即黄岭顶-合水口断裂以南,为浅海相、滨海相沉积,岩性主要为长石石英砂岩、变质石英粉砂岩夹炭质页岩及石英片岩。局部地段有含晶屑岩屑凝灰岩。区内第四纪沉积物不发育。

2 花岗岩体岩石学特征

出露的岩体有牛轭单元(Sn)、婆记顶单元(Sp)及梅花嶂单元(Sm)(图 1)。永宁单元(Sy)在区内仅见永宁侵入体,为大王山复式岩体的一部分,出露于那程、永宁、芒坑顶一带,呈长条状北东向展布,面



1. 第四系; 2. 震旦系云开群上亚群; 3. 震旦系云开群第三段; 4. 震旦系云开群第二段; 5. 燕山期大尖岭岩体;
6. 片麻状花岗岩; 7. 片麻状斑状黑云母花岗岩; 8. 片麻状斑状黑云母二长花岗岩; 9. 石英斑岩脉;
10. 花岗岩脉; SM. 梅花嶂单元; SP. 婆记顶单元; SY. 永宁单元; 据吴继承(2009)修改

1. Quaternary overburden; 2. upper member of Sinian Yunkai Group; 3. upper 3th member of Sinian Yunkai Group; 4. upper 2th member of Sinian Yunkai Group; 5. Yanshanian granites; 6. gneissic granite; 7. gneissic biotite granite; 8. gneissoid two mica monzonitic granites; 9. Quartz Monzonite Porphyry; SM. Meihuazhang units; SP. Pojiding units; SY. Yongning units; Modified from Wu Jicheng (2009)

图 1 矿区岩体分布地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of the Nacheng Orefield

积为 60 km²。各单元之间为侵入接触关系,围岩均为震旦系云开群。其先后顺序为:牛轭单元→梅花嶂单元→婆记顶单元→永宁单元。

岩性主要为粗片麻状斑状黑云二长花岗岩,局部受同化混染作用影响为花岗闪长岩、斜长花岗岩。岩石结构构造复杂,有残余花岗结构、似斑状结构、交代反条纹结构和交代净边结构等,片麻状构造。婆记顶单元分布于犁头坑、婆记顶一带,北东向展布。岩性主要为粗片麻状斑状黑云花岗岩。梅花嶂单元包括马鞍山、石人仔、梅花嶂、虚子前、大竹地等侵入体,多呈不规则长条状北东向展布,它们侵入婆记顶单元和永宁单元中,岩性主要为细片麻状花岗岩。永宁单元中主要是碎裂-糜棱岩化似斑状黑云母钾长石花岗岩,碎斑为正长石、钾微斜长石和变晶聚集石英。碎基组分为杂乱分布的片状黑云母、半自形状细粒斜长石、杂乱分布的他形细粒正长石和他形细-微粒石英。岩石呈碎斑结构,基质具细粒变晶和鳞片变晶结构。

3 样品的采集及测试

样品新鲜无蚀变,具有代表性;在国土资源部中

南矿产资源监督检测中心测试,稀土元素分析用美国 Thermo Fisher 公司的 XII Series 型 ICP-MS 测定。数据质量用国家一级标准物质进行质量监控 GB/T 14506-1993,分析结果用 DZ130-1991 进行数据检查,测试精度为 5%~10%。

4 元素地球化学特征

4.1 主量元素地球化学特征

主量元素分析(表 1)表明,各单元岩体均为富 K 贫 Na: Na₂O 为 2.16%~3.28%, K₂O 为 2.94%~5.54%, Na₂O/K₂O=0.386~0.81, SiO₂ 为 71.27%~76.71%, 平均 73.56%。Al₂O₃ 含量为 12.51%~14.41%, 平均 13.34%;在 SiO₂-K₂O 图上落入高钾钙碱性系列(图 2); A/CNK 值均大于 1.1(1.12~1.32),属于过铝质型岩石(图 3);在 A-C-F 图解(图 4)上所有数据点都落在 S 型花岗岩区域;里特曼指数(σ)为 1~2.43,属钙碱性系列,岩石总体表现为高钾钙碱性特征。分异指数(DI)为 76.25~95.47,反映不同单元的岩石经历了不同程度的分异演化过程。CIPW 标准矿物中出现刚玉分子(C),含量为 1.62%~3.72%(平均 2.34%),表明属硅铝过饱和型。

表 1 花岗岩体主量元素及其特征数值表^[1]

Table 1 Chemical composition and characteristic parameters of the Nacheng granite															
岩体单元	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	灼失量	Mg [#]
Sn	NN-1	76.71	0.05	12.51	0.57	0.41	0	0.04	0.39	3.25	4.81	0.04	0.64	0.94	3.92
Sm	N-3	74.95	0.09	13.47	0.68	0.56	0.02	0.16	0.33	3.28	5.54	0.17	0.23	0.77	11.43
Sp	N-1	71.32	0.27	14.41	1.54	1.76	0.07	0.83	0.72	2.16	5.6	0.12		1.6	20.10
Sy	N-2	71.27	0.53	12.96	0.48	3.74	0.1	1.29	2.21	2.38	2.94	0.16	0.58	1.26	23.41
岩体单元	样品号	σ	A.R	DI	SI	FL	MF	M/F	长英指数 f	钾质指数 k'	钠质指数 Na'	铝质指数 Al'	铁质指数 Fe'	A/CNK	A/NK
Sn	NN-1	1.93	3.03	95.47	0.44	95.38	96.08	0.07	95.38	59.68	40.32	148.05	96.07	1.12	1.19
Sm	N-3	2.43	2.81	95.1	1.57	96.39	88.57	0.25	96.39	62.81	37.19	147.21	88.57	1.12	1.18
Sp	N-1	2.13	3.11	86.43	6.98	91.51	79.9	0.47	91.51	72.16	27.84	169.92	79.9	1.32	1.5
Sy	N-2	1	1.91	76.25	11.91	70.65	76.59	0.54	70.65	55.26	44.74	172.11	76.59	1.18	1.84

注:原始数据引用庄文明等,1:5万石碌圩幅区域地质调查报告^[1];各元素单位为重量百分比;各项特征参数由本文计算

4.2 微量元素地球化学特征

花岗岩大离子亲石元素 Sr 的含量为 35~212.2 $\mu\text{g/g}$ 、Ba 为 172~597.2 $\mu\text{g/g}$, Sr/Ba 值较低(0.17~0.86)。Nb 含量较低(10.5~30.3 $\mu\text{g/g}$)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图解上(图 5),富集 K、Rb 等大离子亲石元素(LILE),而 Nb、Sr、等高场强元素(HFSE)相对亏损^[1]。

4.3 稀土元素地球化学特征

稀土元素分析结果(表 2、表 3)表明, ΣREE 为

82.6~225.68 $\mu\text{g/g}$,球粒陨石标准化的稀土元素模式图表现为右倾型(图 6),LREE 较富集, (La/Yb)_N 为 1.36~9.66, (Ce/Yb)_N 为 1.73~8.4。轻稀土元素之间表现出明显的分馏, (La/Sm)_N 为 0.86~3.94,平均值为 3.11;而重稀土元素之间的分馏不明显,呈平坦趋势, (Gd/Lu)_N 为 0.91~1.87 平均值为 1.34。Eu 显示明显负异常, $\delta\text{Eu}=0.31\sim 0.74$,表明有斜长石的分离结晶作用发生。同时, La_N<100, Yb_N<10, Eu/Eu^{*}<0.5,相比之下这些

特征类似于S型淡色花岗岩^[5]。

从本区稀土元素含量特征与世界花岗岩、小秦岭花岗岩^[6]、胶东玲珑黑云母花岗岩^[7]、江西德

兴铜厂花岗闪长斑岩^[8]和华南同熔型花岗岩等成矿岩体对比可知,本区的花岗岩类岩石属于华南同熔型花岗岩的范畴。

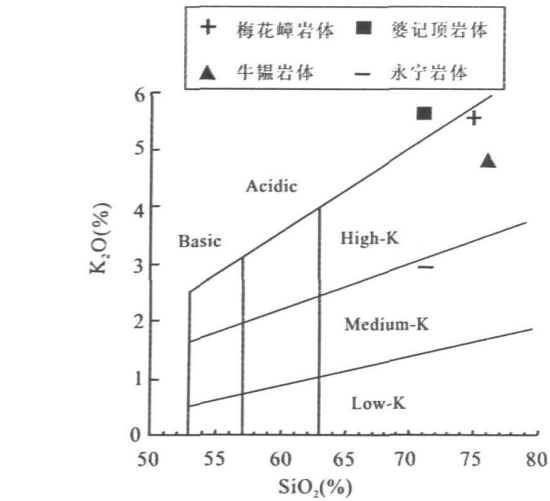


图2 那程金矿区花岗岩类 SiO₂-K₂O 图解^[2]

Fig. 2 SiO₂-K₂O diagram for the NaCheng granitoids^[2]

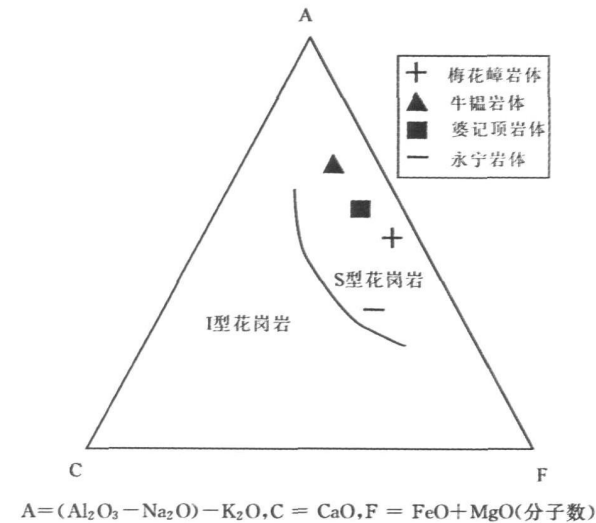


图4 那程金矿区花岗岩类 A-F-C 图解

Fig. 4 A-F-C diagram for the Nacheng granitoids

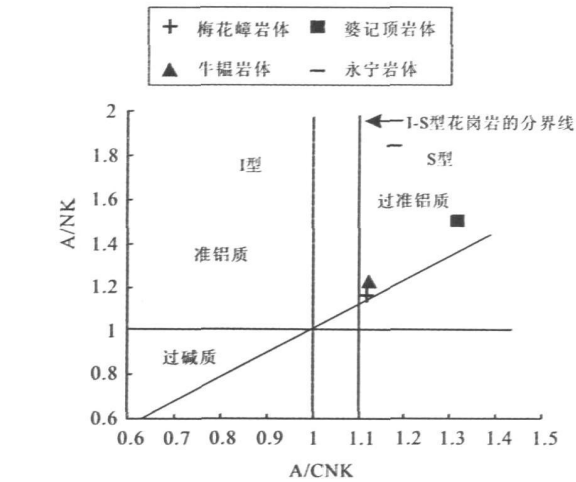


图3 那程金矿区花岗 A/NK-A/CNK 图解^[3]

Fig. 3 A/NK-A/CNK diagram for the Nacheng granites^[3]

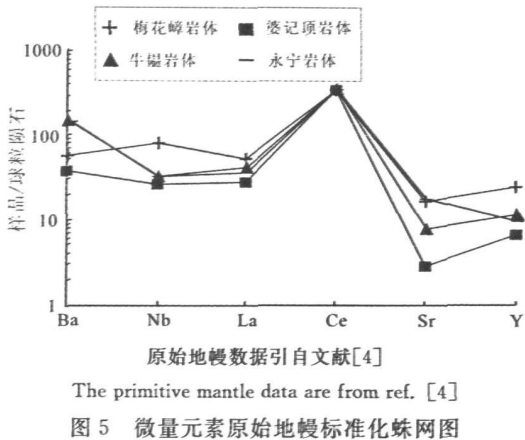


图5 微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 5 PM-normalized trace element patterns

表2 那程花岗岩的稀土元素丰度及特征参数表

Table 2 REE abundance and characteristic parameters of the Nacheng granites																		
岩体单元	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y		
Sn	NN-1	15.65	58.42	5.74	7.65	7.19	0.58	4.88	0.68	3.09	0.64	1.9	0.35	6.83	0.26	51.49		
Sm	N-3	7.41	25.39	5.26	3.95	5.36	0.74	3.47	0.67	7.07	0.7	1.81	0.34	2.3	0.28	17.85		
Sp	N-1	38.08	52.1	7.75	13.77	6.05	1.22	4.52	0.71	4.21	0.9	2.26	0.58	3.3	0.38	40.55		
Sy	N-2	36.25	82.22	9.43	42.6	8.04	1.54	6.17	1.2	4.43	0.93	2.53	0.43	2.53	0.36	27.02		
岩体单元	样品号	ΣREE	LREE	HREE	LR/HR	δEu	δCe	La/Sm	La/Yb	Ce/Yb	Eu/Sm	Sm/Nd	(La/Yb) _N	(Ce/Yb) _N	(Sm/Eu) _N	Σ Er Lu	Σ Snr Ho	Σ La Nd
Sn	NN-1	165.35	95.23	18.63	5.11	0.31	1.28	2.18	2.29	8.55	0.08	0.94	1.36	1.73	4.52	8	15	77
Sm	N-3	82.6	48.11	16.64	2.89	0.53	0.81	1.38	3.22	11.04	0.14	1.36	1.91	2.23	2.64	7	28	65
Sp	N-1	176.38	118.97	16.86	7.06	0.68	0.69	6.29	11.54	15.79	0.2	0.44	7.78	4.08	1.87	5	13	82
Sy	N-2	225.68	180.08	18.58	9.69	0.64	1.05	4.51	14.33	32.5	0.19	0.19	9.66	8.4	1.97	3	11	86

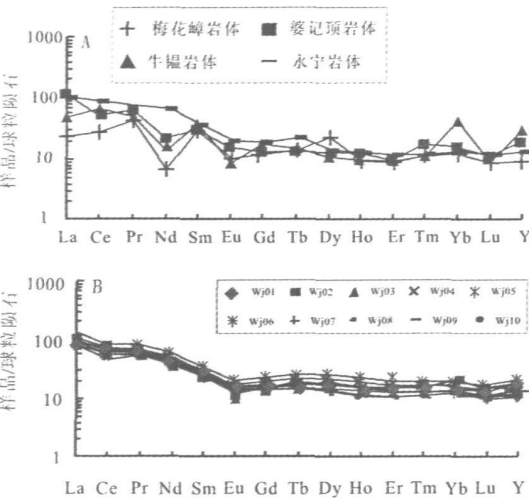
注: 原始数据引用 1: 5万石碌圩幅区域地质调查报告, 庄文明等^[1], 但各项特征参数本文重新计算; 各元素含量为×10⁻⁶

表 3 那程永宁单元花岗岩的稀土元素丰度及特征参数

Table 3 REE abundance and characteristic parameters of the Nacheng Yongning granites

岩体单元	送样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
S _y	WJ04	37.7	72.6	8.99	32.7	6.97	1.26	6.38	1.18	7.23	1.43	3.9	0.62	3.57	0.45	38
	WJ05	35.6	69	8.55	30.5	6.6	1.18	6.21	1.12	6.94	1.36	3.64	0.59	3.36	0.44	35.9
	WJ06	29.5	56.7	7.04	25.1	5.36	1.4	4.96	0.89	5.5	1.09	2.9	0.48	2.68	0.34	29.2
	WJ07	32.2	62.5	7.72	27.6	6.03	1.11	5.75	1.11	7.02	1.44	3.96	0.64	3.75	0.48	38.5
	WJ08	37.7	71.4	8.76	31.8	6.1	1.3	5.53	0.92	5.31	1.05	2.83	0.49	3.09	0.41	27.6
	WJ09	41.1	78.4	9.66	34.9	6.94	1.44	6	0.98	5.65	1.07	2.89	0.5	3.19	0.43	27.9
	WJ10	41.9	80.8	9.94	36.1	6.94	1.36	5.95	0.93	5.08	0.94	2.49	0.42	2.69	0.36	24.1
岩体单元	送样号	ΣREE	LREE	HREE	LR/ HR	(La/ Yb) _N	(Ce/ Yb) _N	(Sm/ Eu) _N	δEu	δCe	La/Sm	La/Yb	Ce/Yb	Eu/Sm	Sm/ Nd	
S _y	WJ04	223.6	160.22	25.39	6.31	6.27	4.11	2.02	0.62	0.8	5.41	10.56	20.34	0.18	0.21	
	WJ05	211	151.43	23.66	6.4	6.29	4.15	2.04	0.61	0.8	5.39	10.6	20.54	0.18	0.22	
	WJ06	173.2	125.2	18.84	6.65	6.56	4.27	1.4	0.9	0.8	5.52	11.04	21.16	0.26	0.21	
	WJ07	199.8	137.16	24.15	5.68	5.1	3.37	1.98	0.62	0.81	5.34	8.59	16.67	0.18	0.22	
	WJ08	204.3	157.06	19.63	8	7.25	4.67	1.71	0.74	0.8	6.18	12.2	23.11	0.21	0.19	
	WJ09	221.1	172.44	20.71	8.33	7.65	4.97	1.76	0.73	0.8	5.92	12.88	24.58	0.21	0.2	
	WJ10	220	177.04	18.86	9.39	9.25	6.07	1.86	0.69	0.8	6.04	15.58	30.04	0.2	0.19	

注:各元素含量为×10⁻⁶;测试者:宜昌地质矿产研究所国土资源部中南矿产资源监督检测中心,2009



A. 四个单元岩体的标准化; B 2009 年分析永宁单元岩体数据标准化; 标准化数值据文献[5]

图 6 那程金矿区花岗岩类稀土元素球粒陨石标准化分布模式图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of the Nacheng granites

本区花岗岩类岩全岩稀土配分模式图为较平缓的右倾曲线,δEu 较小亏损,与华南同熔型花岗岩及小秦岭崤崆花岗岩的配分曲线相似。本区各单元 δEu 值均小于壳幔型花岗岩的 δEu 平均值(0.84)^[9]。稀土元素配分曲线(图 6)显示各单元花岗岩具有不同的配分模式,这方面也反映各单元源区演化过程。

5 那程金矿区花岗岩的成因

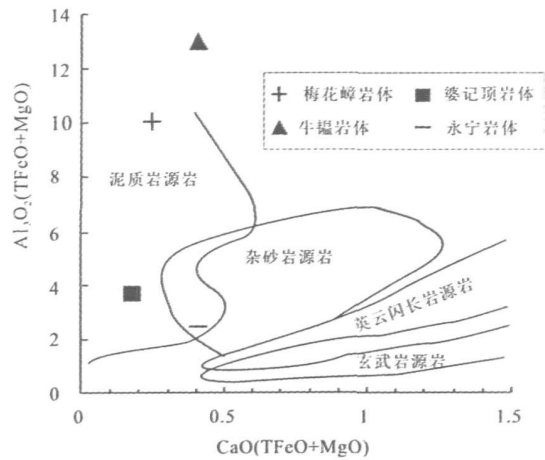
强过铝质花岗岩是指其过铝指数大于等于

1.10 的花岗岩类,一般含有原生白云母、堇青石、砂线石等富铝矿物,属 S 型花岗岩类^[10~12]。前人研究表明,过铝质花岗岩主要是地壳物质发生部分熔融^[10~12]。实验岩石学的研究结合全球典型造山带花岗岩类的成分统计表明,对 SiO₂ 含量为 67%~77% 的强过铝质花岗岩而言, CaO/Na₂O 值反映源区成分特征,而 Al₂O₃/TiO₂ 值反映其形成时的部分熔融温度^[10]。由砂岩(或正变质岩)部分熔融形成的花岗质熔体的 CaO/Na₂O 值高于由泥岩部分熔融形成的熔体。统计表明, CaO/Na₂O 值高于 0.3 者源区属于砂岩成分,而低于 0.3 者为泥岩成分^[10]。同时,不论是砂岩还是泥岩,在发生部分熔融时,温度愈高,熔体的 Al₂O₃/TiO₂ 值愈低;一般而言, Al₂O₃/TiO₂ 值大于 100 对应的熔融温度在 875℃ 以下(“低温”类型),而小于 100 者为 875℃ 以上(“高温”类型)。

基于此认识,那程金矿区强过铝质花岗岩牛轭单元、梅花嶂单元、婆记顶单元在(图 7) CaO(TFeO+MgO)-Al₂O₃(TFeO+MgO) 图解中落于泥质岩源区,而永宁单元落在杂砂岩源区。并且各单元岩体在 δEu-(La/Yb)_N 图解中落入壳源区内(图 8)。研究区不同期 SiO₂ 含量为 71.27%~76.71% 的强过铝质酸性岩体的岩石化学成分数据显示,它们的成分中高钾,稀土元素呈中等程度的轻稀土元素富集和明显的负铕异常(表 2、3,图 6)。经分析,婆记顶单元和永宁单元强过铝质花岗岩的 Al₂O₃/TiO₂ 值大多数小于 100,据此我们推断大部分强过铝质岩浆的源区的熔融温度高于 875℃;牛轭单元和梅

花嶂单元花岗岩 Al_2O_3/TiO_2 值大于 100 的花岗岩, 源区熔融温度低于 $875\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10]。牛温单元、梅花嶂单元强过铝质花岗岩的 CaO/Na_2O 值小于 0.3, 婆记顶单元、永宁单元的花岗岩大于 0.3, 指示岩浆源区成分海西期以泥岩质成分为主, 后期以砂岩或正变质岩为主^[10]; 指示多数花岗岩的源区成分以砂岩(或正变质岩)为主, 少数为泥岩质成分。一般认为, 泥岩质成分的源区成熟度较高, 而砂岩成分源区的成熟度较低^[10]。

因此我们认为, 那程金矿区在吴川四会地区海西期强过铝质花岗岩多数是华南造山带偏基性的下地壳熔融的产物, 少数是再循环表壳物质部分熔融的产物。当然, 不排除泥岩熔融产物和玄武岩岩浆发生混合而形成强过铝质花岗岩的可能性^[10]。吴川四会地区海西期强过铝质花岗岩具明显的负铕异常和较为平坦的重稀土元素配分模式, 多数显示中等程度的轻稀土元素富集(图6); 而轻稀土元素



本图是据不同源岩在水饱和条件下部分熔融实验的 $CaO/TFeO+MgO-Al_2O_3/TFeO+MgO$ 图解

图7 那程金矿区花岗岩类 $CaO/TFeO+MgO-Al_2O_3/TFeO+MgO$ 图解^[13]

Fig.7 Diagram of $CaO/TFeO+MgO-Al_2O_3/TFeO+MgO$ of granitoid in the Nacheng region^[13]

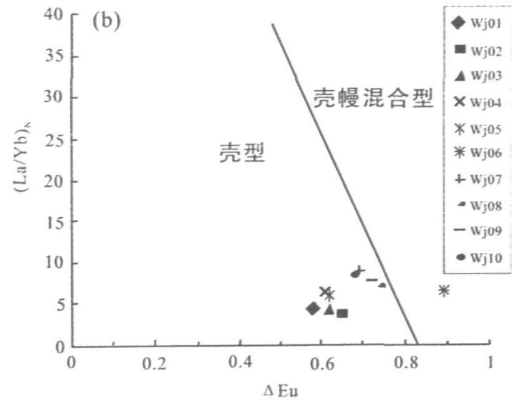
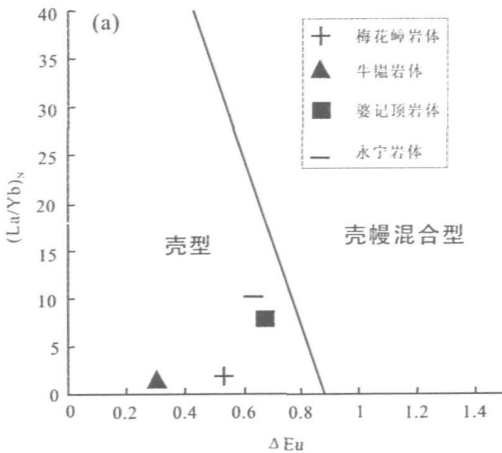


图8 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ 图解

Fig.8 Trace elements diagrams of $\delta Eu-(La/Yb)_N$ for granites

富集程度低的花岗岩 Al_2O_3/TiO_2 值大于 100、 CaO/Na_2O 值小于 0.3 (表 3, 4)。表明大多数强过铝质花岗岩的熔融源区的残留矿物相中含有斜长石、石榴子石和角闪石, 压力大致为 0.9~1.7 GPa, 对应的深度为 30~60 km; 而少数轻稀土元素富集程度低的花岗岩源区残留矿物相不含石榴子石, 深度相对较浅。S 型花岗岩大多是贫 Sr 的 ($Sr < 300 \times 10^{-6}$), Yb 大多为 $(1 \sim 7) \times 10^{-6}$, 在 Sr-Yb 图解中多数分布在低 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 区(图 9)。澳大利亚 Lachlan 褶皱带典型的 S 型花岗岩具浙闽型特征, 估计形成深度约 20~25 km (相当于 0.5~0.7 GPa^[14])。S 型花岗岩的源岩大多是泥质岩, 熔融的温度相对较低 ($< 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) 且大多与白云母的分解有关。S 型花岗岩的形成可能与地球化学特征有

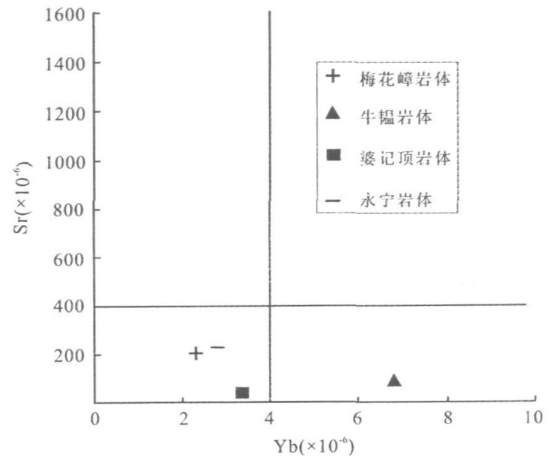


图9 花岗岩的 Sr-Yb 图解

Fig.9 Trace elements diagrams of Sr vs Yb for granites

关:若 Yb 含量高,可能形成的深度较浅;反之,若 Yb 含量低,则形成的深度较大。

可见那程金矿区海西期强过铝质花岗岩大部分形成于下地壳的含石榴子石麻粒岩相源区,其熔融温度在 875℃以上;而少数形成于不含石榴子石的源区,且熔融温度低于 875℃。

部分熔融作用所形成的岩浆岩的 La/Sm 值随 La 含量的增高而增大,而结晶分离作用所形成的岩浆岩 La 含量增高时,La/Sm 值基本保持不变(阿勒格雷等,1978)。因此通过 La/Sm-La 的直角坐标图可获得部分熔融和分离结晶两个模型。由判别岩浆形成机制的 La/Sm-La 图解(图 10)可见,那程金矿区不同时期不同单元花岗岩类岩石的投点不是水平分布,与分离结晶线不相符合,应是不同母岩浆经不断部分熔融而形成的。

本文归纳了花岗岩的岩石化学和地球化学成分数据,提取了源区成分特征和熔融温度的信息,进而了解到华南地区海西期深部动力学过程。

晚古生代构造期(386~251 Ma,中泥盆世早二叠世)即为海西期。这个时期中国大陆的多数地块仍在运移,离散阶段南方发育峨眉山地幔羽。石炭纪时华夏板块主要发育浅海碳酸式盐沉积。有人认为桂南和粤本地区存在着一个独立的云开地块,地域上还包括南海北部和南沙群岛^[15]。此意见有一定道理,只不过独立存在的时间比较短暂,可能仅存在于晚古生代。在早古生代晚期扬子板块四周张裂的过程中,云开地块与之分离,并有独立的沉积和构造演化特征。早二叠世末期发生碰撞和挤压,使云开地块晚古生代地层发生花岗质的沉积和区域变质作用($Rb-Sr$ 法年龄为 265 Ma^[17])并形成强烈的向北仰冲的逆掩断层。

因此本矿区岩浆活动年代数据及岩体地球化学特征的分析,对海西运动在粤西地区也有重要意义。

由此我们推断,海西早期(即碰撞早期),强烈的挤压使地壳密集破裂,分异出变质流体与大气降水,二者的混合流体沿破裂带流动并从围岩中淬取金,形成剪切带型金矿,同时在一些同碰撞 S 型花岗岩

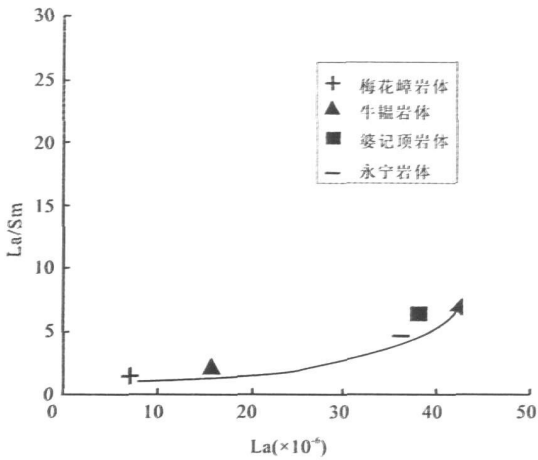
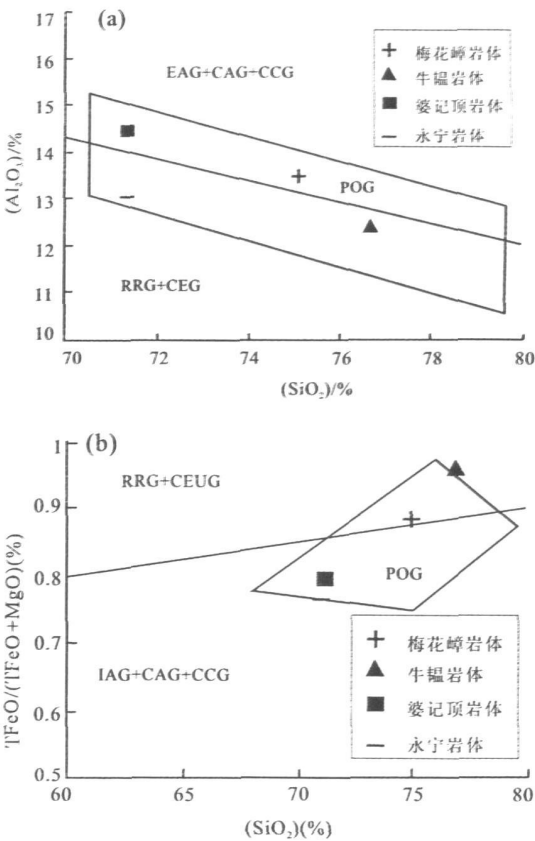


图 10 那程金矿区花岗岩类 La/Sm-La 图解

Fig 10 Diagram of La/Sm-La of granitoid in Nancheng region

6 地球动力学意义探讨

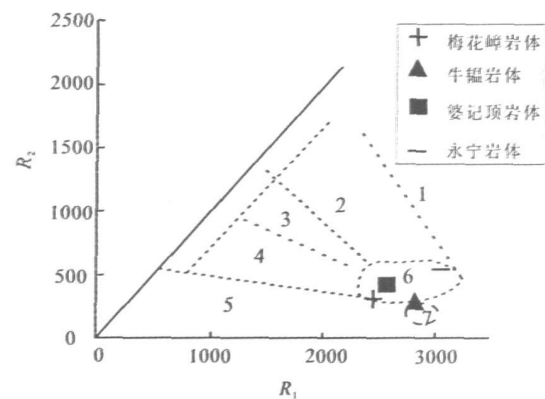
永宁单元花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄为 282 ± 18 Ma, 婆记单元花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄为 305 ± 45 Ma, 梅花岭单元花岗岩 Rb-Sr 等时线年龄为 338 ± 18 Ma^[1], 结合本区花岗岩的组合特点, 表明为 S 型过铝质花岗岩; SiO₂ 含量较高, 为 71.27% ~ 76.71%, 在 SiO₂(%) - Al₂O₃、SiO₂-TFeO/(TFeO+MgO) 及 R₁-R₂ 图解上, 投点落入同碰撞花岗岩范围内(图 11、12), 并且强过铝质花岗岩的岩石化学特征可以提供地壳部分熔融时的温压条件的信息。可见本区确实存在海西期岩浆活动, 花岗岩具有同碰撞造山的特点。



IAG 岛弧花岗岩; CAG 大陆弧花岗岩;
CCG 大陆碰撞花岗岩类; POG 造山
后花岗岩类; RRG 与裂谷有关的花岗岩类

图 11 花岗岩类构造环境类别图解^[4]

Fig 11 Major element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granites^[4]



1. 地幔分离; 2. 板块碰撞前; 3. 碰撞后抬升;
4. 造山晚期; 5. 非造山; 6. 同碰撞期; 7. 造山后
1. mantle separation; 2. pre-collision plate; 3. uplift after collision; 4. late orogeny; 5. non orogeny;
6. syn collision period; 7. post-orogeny

图 12 那程花岗岩构造环境判别 R_1 - R_2 图解^[16]
Fig. 12 Discrimination diagrams of the tectonic environment of the Nacheng granite^[16]

体内外接触带形成热液型锡、钨矿。碰撞晚期由于岩石圈下部拆沉引起大量碱性岩浆活动, 构成了以铜为主的多金属矿床及矿源层(如石碌铜矿), 同时幔源热流体(携带气体)进入地壳成矿热液系统, 形成了大量石英-钾长石脉型和蚀变岩型金矿。碰撞之后, 随着岩石圈拆沉引起的地壳由挤压体制转为伸展体制; 进一步大规模的地幔热隆起导致中下地壳广泛重熔, 大量的中酸性小岩体侵入, 形成了大规模的斑岩型铝、钨、铜、铅、锌等多金属矿床, 同时受岩浆活动和伸展构造控制, 在岩体附近和断裂带形成大量石英脉型金矿, 在断陷盆地中有沉积型铜矿和含煤岩系。

7 花岗岩与成矿的联系

岩体内金矿床(点)的空间分布规律可能暗示区内金矿化与岩体南缘北东向深大断裂之间的成因联系。围绕岩体边部分布是岩浆热液矿床的重要特征之一, 反过来又说明花岗岩是金的成矿母岩^[5]。

统计表明, 那程金矿区岩体 29 个样品的微量金平均值为 2.015×10^{-9} , 均高于华南褶皱系酸性火山岩中金的丰度(0.35×10^{-9})^[17], 也高于中国华南造山带花岗岩中金的丰度(0.5×10^{-9})^[18], 可见花岗岩较高金含量的本身是金成矿的物质基础。

与金、铜矿有关的花岗岩类的岩石地球化学^[19]对比, 可知本区永宁单元花岗岩类有较好的金、铜矿成矿潜力(表 4)。与金、铜矿化有关花岗岩类的含铁率 F_m 即 $[(Fe_2O_3 + FeO) / (Fe_2O_3 + MgO)]$ 为 $0.59 \sim 0.89$ ^[19], 一般为 $0.60 \sim 0.30$, 本区花岗岩

类样品的 F_m 值为 $0.60 \sim 0.77$ (表 4), 正好在此范围内。

表 4 与金、铜矿有关的花岗岩类与那程金矿区不同单元花岗岩类岩石地球化学对比

Table 4 Petrochemistry of Nacheng granitoids and with gold and copper mineralization					
与金矿有关的花岗岩特征参数 ^[9]	那程金矿区不同单元岩体特征参数(本文, 2009)				
	牛轭	梅花嶂	婆记顶	永宁	
FeO %	3.68	0.41	0.56	1.76	3.74
MgO %	1.34	0.04	0.16	0.83	1.29
CaO %	2.61	0.39	0.33	0.72	2.21
Na ₂ O / K ₂ O	> 0.8	0.676	0.592	0.386	0.81
DI	< 88	95.47	95.1	86.43	76.25
Fm	0.5~ 0.8	0.961	0.886	0.799	0.766
δEu	> 0.3	0.31	0.53	0.68	0.64
La / Yb	> 10	2.29	3.22	11.54	14.33

花岗岩类稀土元素特征也可反映其演化程度^[20, 21]。一般轻、重稀土比值小, δEu 愈小, 花岗岩分异程度愈高, 而与金、铜矿化有关的花岗岩类物质分异程度中等, 未产生强烈的铈亏损和重稀土的相对富集。该区花岗岩类为轻稀土富集型, δEu 值为 $0.58 \sim 0.9$, 平均为 0.63 , 亏损微弱或不明显, 这些特点说明永宁花岗岩类岩石的岩浆分异程度不强, 与金、铜矿化相关的花岗岩类相似。

那程金矿的北部河台金矿的区域成矿构造演化史表明, 成矿主要是在燕山晚期。李华芹(1993)河台金矿高村、云西、后迁三个矿床的石英矿物流体包裹体 Rb-Sr 同位素年龄为 $121.9 \sim 129.6$ Ma, 应属燕山晚期(白垩纪), 我们认为本区单元中越晚期的岩体对成矿可能贡献越大。

8 结 论

- (1) 本区花岗岩类岩体的侵位时间为海西期。
- (2) 区内不同单元岩体具有富 K 贫 Na, SiO₂ 含量较高(平均值 73.56%), 属于高钾钙碱性系列; 为源岩以泥质为主的壳源重熔性强过铝质 S 型花岗岩; 形成于同碰撞构造环境, 为同碰撞花岗岩。
- (3) 海西期形成的岩体中永宁单元与成矿关系相对最为密切, 应在该单元及其更晚期相关岩体中开展找矿工作。

致 谢: 野外工作期间得到了武警黄金九支队、宜昌所测试中心及中国地质大学(武汉)测试中心的领导和同仁们的关心和支持, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

[1] 庄文明, 许业照. 1: 5万石碌圩幅区域地质调查报告[R]. 广东省地调局, 1994.
Zhuang Wenming, Xu Yezhao. 1: 50000 regional geological surveys Investigation of the Shiluyu. [R] Guangdong Institute of Geological Survey, 1994. (in Chinese)

[2] Rickwood P C . Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22: 247– 263.

[3] Maniar P D, Piccolo P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635– 634.

[4] Sun S, Medonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process[A]. Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. London: Geol. Soc. Spec. Pub., 1989, 42: 313– 345.

[5] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 赵国春, 戴圣潜. 中国东部燕山期岩石圈软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 309– 311.
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing; Luo Zhaohua, Zhao Guochun, Dai Shengqian. The yanshanian lithosphere asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in East China[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4): 309– 311. (in Chinese with English abstract)

[6] 胡受奚, 徐金芳. 区域成矿规律对华南大地构造属性的联系[J]. 中国地质, 2008, (6): 1045– 1053.
Hu Shouxi, Xu Jinfang. The metallogeny of South China closely relationships to its geotectology[J]. Geology in China, 2008, (6): 1045– 1053. (in Chinese with English abstract)

[7] 王鹤年, 张景荣, 陆建军. 粤西金矿床地球化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1991.
Wang Henian, Zhang Jingrong, Lu Jianjun. Geochemistry of gold repositis in Guangdong Province[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1991. (in Chinese with English abstract)

[8] 朱训, 黄崇珂, 芮宗瑶, 等. 德兴斑岩铜矿[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
Zhu Xun, Huang Chongke, Rui Zongyao, *et al.* Dexing porphyry copper deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983. (in Chinese with English abstract)

[9] 徐克勤. 与金矿有关花岗岩类的岩石地球化学特征[J]. 桂林工学院学报, 1992, 12(1): 1– 9.
Xu Keqing. Petrochemical and geochemical characteristics and the genetic relation of gold mineralization to the granite[J]. Journal of Guilin University of Technology, 1992, 12(1): 1– 9. (in Chinese with English abstract)

[10] Sylveste P J. Post-collisional strongly aluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45: 29– 44.

[11] Zen E. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: some mineralogic and petrologic constraints [J]. Journal of Petrology, 1986, 27: 1095– 1117.

[12] Forst B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. Ageochemical classification for granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 2001, 42: 2033– 2048.

[13] 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 埃达克岩与花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2008: 11.
Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, Li Chengdong. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 11. (in Chinese with English abstract)

[14] Healy B, Collins W J, Richards S W. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: the Murrumbidgee Batholith example [J]. Lithos, 2004, 78: 197– 216.

[15] 吴浩若, 邝国敦, 王忠诚. 志留纪以来的云开地块[J]. 地理学报, 2001, (3): 32– 40.
Wu Haoruo, Kuang Guodun, Wang Zhongcheng. The Yunkai block since Silurian[J]. J. Palaeogeography, 2001, (3): 32– 40. (in Chinese with English abstract)

[16] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. Chem. Geol., 1985, 48: 43– 55.

[17] 彭松柏, 张业明, 战明国, 陈富文, 邱端照. 粤西云开元古宙眼球状花岗岩 Sm Nd, Pb Pb 和 Rb Sr 同位素定年及其动力学意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 99– 105.
Peng Songbai, Zhang Yeming, Zhan Mingguo, Chen Fuwen, Qiu Ruizhao. Dating of Sm Nd, Rb Sr isotopic systems and its dynamic significance for the Proterozoic augen granite in Yunkai area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(1): 99– 105. (in Chinese with English abstract)

[18] 史长义, 鄢明才, 刘崇民, 迟清华, 胡树起, 顾铁新, 卜维, 鄢卫东. 中国花岗岩类化学元素丰度及特征[J]. 地球化学, 2005, (5): 470– 482.
Shi Changyi, Yan Mingcai, Liu Chongmin, Chi Qinghua, Hu Shuqi, Gu Tiexin, Bu Wei, Yan Weidong. Abundances of chemical elements in granitoids of China and their characteristics[J]. Geochimica, 2005, (5): 470– 482. (in Chinese with English abstract)

[19] 徐克勤, 涂光炽. 花岗岩地质和成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1984.
Xu Keqin, Tu Guangzhi. Geology and geochemistry of the granite stock and its relationship to polymetallic tungsten mineralization[A]. Nanjing: Jiangsu Science Press, 1984. (in Chinese with English abstract)

[20] 王中刚. 花岗岩类稀土元素分布模式[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1984.
Wang Zhonggang. REE distribution patterns of granitoids [M]. Nanjing: Jiangsu Science Press, 1984. (in Chinese with English abstract)

[21] 王中刚. 新疆北部花岗岩类成因类型及其与成矿的关系[J]. 新疆地质, 1994, 12(1): 11– 20.
Wang Zhonggang. Genetic types of granitoids in northern Xinjiang and their relationship to deposits[J]. Xinjiang Geology, 1994, 12(1): 11– 20. (in Chinese with English abstract)