

云开造山带强过铝深熔花岗岩地球 化学、年代学及构造背景

彭松柏^{1,2},金振民¹,刘云华²,付建明²,何龙清²,蔡明海²,王彦斌³

1. 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

2. 宜昌地质矿产研究所,湖北宜昌 443003

3. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心,北京 100037

摘要: 云开造山带条带一眼球状(环斑)深熔花岗岩(含紫苏花岗岩)地球化学和年代学的研究表明,绝大多数花岗岩的 $A/CNK > 1.1$, $CaO/Na_2O = 0.62 \sim 1.61$ (平均 0.94, 大于 0.3), $Al_2O_3/TiO = 16.6 \sim 60.6$ (平均 23.68), 高场强元素 Ta、Nb、Zr 亏损,具大陆边缘俯冲—碰撞造山带后碰撞构造环境强过铝(SP)高钾钙碱性—钙碱性花岗岩的特征,紫苏花岗岩和片麻状含榴黑云二长花岗岩 Al_2O_3/TiO (平均 17.82)明显低于条带一眼球状(环斑)黑云二长花岗岩 Al_2O_3/TiO (平均 29.55),显示其形成温度更高,并具 A型花岗岩的演化特征。而且从高钾钙碱性条带一眼球状(环斑)黑云二长花岗岩到钙碱性紫苏花岗岩、片麻状含榴黑云二长花岗岩,形成时代由 (465 ± 10) Ma、 (467 ± 10) Ma 变为 (435 ± 11) Ma、 (413 ± 8) Ma,表明扬子板块与华夏板块在加里东期发生了洋—陆俯冲—碰撞造山和后碰撞的伸展—拆沉—底侵岩浆岩作用,并且后期又经历了海西—印支期挤压抬升和伸展揭顶作用的改造,这也为华南存在加里东期扬子板块向华夏板块的洋—陆俯冲—碰撞造山提供了重要证据。

关键词: 云开造山带;加里东期;强过铝深熔花岗岩;后碰撞构造环境;伸展—拆沉—底侵作用。

中图分类号: P588.12; P597

文章编号: 1000-2383(2006)01-0110-11

收稿日期: 2005-07-15

Petrochemistry, Chronology and Tectonic Setting of Strong Peraluminous Anatetic Granitoids in Yunkai Orogenic Belt, Western Guangdong Province, China

PENG Song-bai^{1,2}, JIN Zhen-min¹, LIU Yun-hua², FU Jian-ming², HE Long-qing²,
CAI Ming-hai², WANG Yan-bin³

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003, China

3. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

Abstract: There are different theories about the genesis and age of banded-augen (rapakivi) anatetic granitoids (charnockite), which outcrop extensively in Yunkai region, western Guangdong Province. Their petrochemistry, chronology, deformational and metamorphic structures were studied. The petrochemical features of most granitoids are: $A/CNK > 1.1$, $CaO/Na_2O = 0.62 \sim 1.61$ (average 0.94, > 0.3), $Al_2O_3/TiO = 16.6 \sim 60.6$ (average 23.68), loss high field strong elements Ta, Nb, Zr, strong peraluminous high-K calc-alkaline and calc-alkaline granitoids in a post-collisional tectonic environment of subduction-collision orogenic belt in an active-continental margin. The temperatures of charnockite and gneissic garnet-bearing biotite monzonitic granite are obviously higher than that of banded-augen (rapakivi) biotite monzonitic granite, and charnockite and gneissic garnet-bearing biotite monzonitic granite with the evolutionary characteristics of A-type granites. From banded-granite, augen (rapakivi) biotite monzonitic granite to charnockite and gneissic garnet-bearing biotite monzonitic granite, the forming ages are (465 ± 10) Ma, (467 ± 10) Ma, (435 ± 11) Ma and (413 ± 8) Ma respectively, and become younger. These

results show that there were oceanic-continent subduction-collision and post-collisional extension-delamination-underplating between the Yangtze and Cathaysia plates during the Caledonian, and they experienced compressional uplift and extensional exhumation during the Indosinian. It provides important evidence of the oceanic-continent subduction-collision of the Yangtze plate downward to the Cathaysia plate during the Caledonian in South China.

Key words: Yunkai orogenic belt; Caledonian; strong peraluminous anatetic granitoids; post-collisional tectonic environment; extension-delamination-underplating.

云开造山带粤西信宜东镇、思贺、合水、白石,高州长坡、云炉、黄岭和桂东南陆川六麻、容县天堂山一带广泛出露一套变形—变质改造强烈的片麻状—条带状—眼球状(环斑)花岗质岩石,对其成因和时代已有许多报道(莫柱荪等,1980;林庆华等,1990)。目前一般认为条带状—眼球状(环斑)花岗质岩石为深熔岩浆成因花岗岩(周汉文等,1994),而关于这套花岗岩的形成时代,一种认为是加里东期(林庆华等,1990;叶伯丹,1989;周汉文等,1994),另一种认为形成于中—新元古代(彭松柏等,2000)。笔者对云开粤西的片麻状—条带状—眼球状(环斑)深熔花岗质岩石的岩石地球化学、锆石SHRIMP U-Pb定年以及变形变质特征的系统研究表明,尽管存在中元古末构造变质和岩浆作用事件的重要信息,但它们应为加里东期洋—陆俯冲—碰撞造山后伸展—拆沉—底侵岩浆活动形成的深熔花岗岩。

1 地质背景

云开造山带以博白—岑溪断裂带为界的以东地区,特别是博白—岑溪断裂带和吴川—四会断裂带所围限的云开隆起区分布着大量的片麻状—条带状—眼球状(环斑)花岗质岩石,对其成因和时代一直存在不同的认识。片麻状—条带状—眼球状(环斑)花岗质岩石,过去一般认为是断裂变质混合岩、混合岩和混合花岗岩(莫柱荪等,1980)。20世纪80年代以来,对其地质产状、岩相学和岩石地球化学特征的研究表明,这套岩石具有花岗岩的组成、结构、侵入接触关系(林庆华等,1990;周汉文等,1994),以及深熔成因的特征,因而普遍认为是深熔侵入花岗岩(图1)。

2 岩石地球化学

深熔花岗岩样品采自云开造山带隆起区粤西信宜东镇、合水、思贺和高州长坡、云炉、黄岭等地,岩

石主要类型为条带—眼球状(环斑)黑云二长花岗岩、紫苏花岗闪长岩和片麻状含榴黑云二长花岗岩。花岗岩样品均经历了程度不同的韧性—流变剪切变形,普遍发育条带状和“ δ ”和“ σ ”眼球状韧性变形构造,眼球体为半自形板状、球状和透镜状的钾长石和钾长石聚合斑晶,基质为细粒半自形—他形粒状石英、云母、斜长石,显示遭受后期伸展韧性—流变剪切动力变形变质作用的改造。主量元素和微量元素分析分别在宜昌地质矿产研究所和广州地球化学研究所完成,结果见表1。数据处理采用路远发(2004)地球化学工具软件包GeoKit程序。

2.1 主量元素

深熔花岗岩的主量元素化学成分差异不十分明显,在 Middlemost(1989)岩浆/火成岩全碱—硅(TAS)岩石化学分类图上,均落入花岗岩和花岗闪长岩范围。在 K_2O-SiO_2 图上,条带—眼球状(环斑)黑云二长花岗岩绝大多数落入高钾钙碱性系列花岗岩中,紫苏花岗闪长岩(闪长岩)和片麻状含榴黑云二长花岗岩大多落入钙碱性系列花岗岩中(图2)。花岗岩(含紫苏花岗岩) SiO_2 含量介于 66.72%~75.08%,绝大多数花岗岩 $A/CNK \geqslant 1.1$,其中条带—眼球状(环斑)黑云二长花岗岩绝大多数为强过铝(SP)高钾钙碱性花岗岩,紫苏花岗岩和片麻状含榴黑云二长花岗岩以强过铝(SP)钙碱性花岗岩为主。花岗岩的 CaO/Na_2O 较高,介于 0.62~1.61(平均 0.94, 大于 0.3), Al_2O_3/TiO_2 为 16.6~60.6(平均 23.68),大多数为中低含量,介于 16.8~34.8,反映其源区为贫粘土富斜长石(>25%)和形成温度高的板块边缘(岛弧和大陆弧)的海槽或海沟俯冲带环境,而且紫苏花岗岩和片麻状含榴黑云二长花岗岩的 Al_2O_3/TiO_2 (平均 17.82)明显低于条带—眼球状(环斑)黑云二长花岗岩 Al_2O_3/TiO_2 (平均 29.55),显示形成温度更高(Patiño Douce and Johnston, 1991; Patiño Douce and Beard, 1995; Skjerlie and Johnston, 1996)。因此,云开造山带隆起区的深熔花岗岩是大陆边缘俯

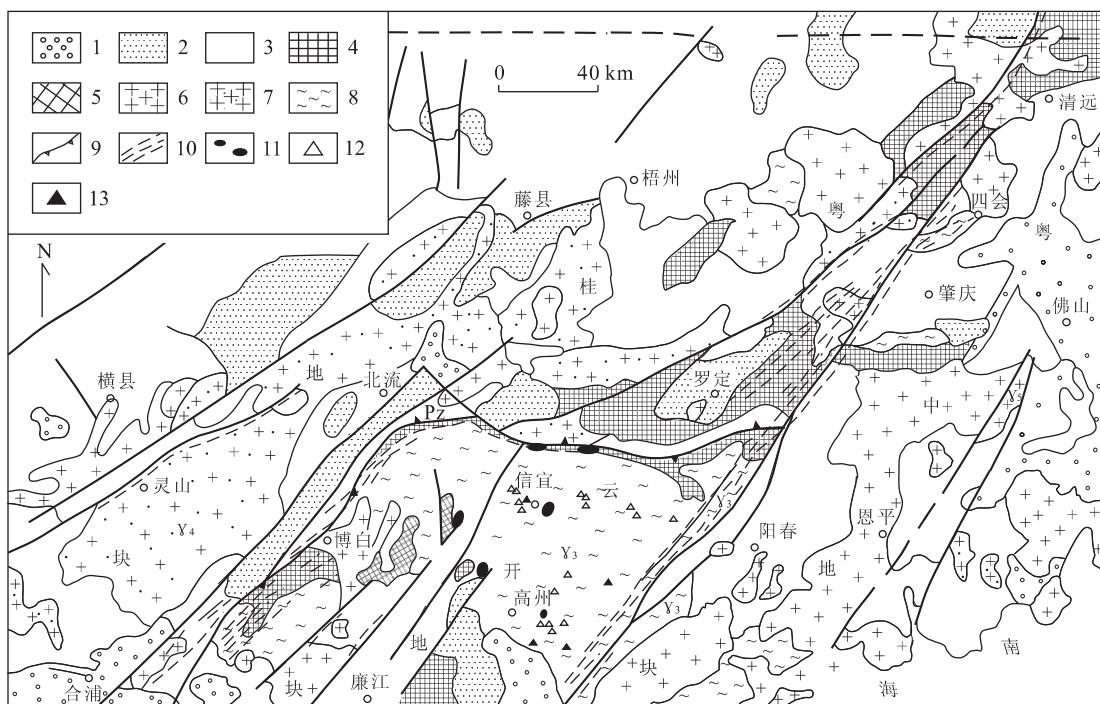


图 1 云开地区地质构造略图

Fig. 1 Geological sketch map of Yunkai area

1. 新生界(Kz); 2. 中生界(Mz); 3. 古生界(Pz); 4. 云开群(Pt₃); 5. 高州表壳岩系(Pt_{1~2}); 6. 燕山期花岗岩(γ₅); 7. 海西—印支期花岗岩(γ₄); 8. 加里东期花岗岩(γ₃); 9. 地块边界断裂; 10. 韧性剪切带; 11. 变基性超基性岩; 12. 采样位置; 13. 测年样位置

冲—碰撞造山背景下高温后碰撞造山环境形成的强过铝(SP)高钾钙碱性—钙碱性花岗岩(Liegeois, 1998; Sylevster, 1998).

2.2 微量元素

深熔花岗岩的稀土元素地球化学特征表现为: 稀土元素 REE 总量普遍较高(154.84~350.18 μg·g⁻¹), 配分曲线总体表现为轻稀土富集型, 负铕异常中等, 高场强元素 Ta、Nb、Zr 亏损。这些特征反映了俯冲—碰撞造山背景下后碰撞高钾钙碱性—钙碱性系列花岗岩的普遍特征(Herderson and Pankhurst, 1984; Liegeois, 1998)。从条带一眼球状(环斑)黑云二长花岗岩到紫苏花岗岩, 分异演化程度较低, 变化不大, 负铕异常中等。片麻状含榴黑云二长花岗岩的轻稀土元素与重稀土元素之间的分馏较弱, 具有较明显的负铕异常, 显示出向 A 型花岗岩演化的特征(Landenberger and Collins, 1996; Nédélec et al., 1995)。

花岗岩的微量元素普遍富集 Rb、Th、Ce 和 Sm, 不同程度地亏损 Ba、Ta、Nb 和 Zr, 尤其是 Ta、Nb 的亏损。除紫苏花岗岩 Ba 亏损不明显外, 花岗岩总体具有 Ba、Zr、Ta 和 Nb 的亏损, 显示大陆边缘

俯冲—碰撞造山带后碰撞花岗岩的配分特征(Pearce et al., 1984)。在 Pearce et al. (1984) 的 Rb-Y-Nb 和 Rb-Yb-Ta 判别图中(图 3), 条带一眼球状黑云二长花岗岩和紫苏花岗闪长岩(闪长岩)主要落在火山弧花岗岩(VAG)和板内花岗岩(WPG)区之间的后碰撞构造环境, 环斑花岗岩和片麻状含榴黑云二长花岗岩主要落在后碰撞和板内花岗岩(WPG)区。在 Harris et al. (1986) 的 Hf-Rb-Ta 判别图中(图 4), 条带一眼球状(环斑)黑云二长花岗岩和紫苏花岗闪长岩(闪长岩)主要落在火山弧花岗岩区, 而紫苏花岗岩主要落在火山弧花岗岩与板内花岗岩之间靠板内一侧。在 Whalen et al. (1987) A 型花岗岩的 $(K_2O + Na_2O)/CaO - Zr + Nb + Ce + Y$ 和 $FeO/(MgO - Zr + Nb + Ce + Y)$ 判别图中, 环斑黑云二长花岗岩、紫苏花岗闪长岩(闪长岩)和含榴片麻状花岗岩均落在 A 型花岗岩区。在 Eby (1992) A 型花岗岩构造环境判别 $Ce/Nb - Y/Nb$ 和 $Yb/Ta - Y/Nb$ 图上, 环斑黑云二长花岗岩和紫苏花岗闪长岩(闪长岩)均落入与俯冲—碰撞火山弧构造环境有关的 A2 型花岗岩区。此外, 稍晚的变基性侵入辉长岩也为形成于活动大

表1 云开地区花岗岩主量和微量元素地球化学分析数据

Table 1 Major (%) and trace ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) element analyses of the granitoids from the Yunkai area

位置 样号	高州					高州				信宜	
	D19-4	HLX-1	HSJ-1	HSW-1	D42-1	D38-4	D58-4	D59-1	D23-1	D23-4	
SiO ₂	68.65	67.90	68.76	66.72	69.66	70.41	71.64	73.13	69.29	69.10	
TiO ₂	0.76	0.85	0.80	0.78	0.62	0.64	0.36	0.22	0.52	0.49	
Al ₂ O ₃	14.36	14.30	13.29	15.41	14.03	13.85	13.41	13.34	14.32	14.69	
Fe ₂ O ₃	1.75	0.04	0.51	1.79	0.31	1.13	0.35	0.24	0.21	0.27	
FeO	3.85	5.43	5.16	3.68	4.56	3.86	3.40	2.80	3.86	3.70	
MnO	0.10	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	
MgO	1.86	1.81	1.87	1.93	1.20	1.17	0.76	0.48	1.18	1.08	
CaO	3.92	3.25	3.44	4.28	1.83	1.88	2.09	1.31	2.43	2.82	
Na ₂ O	2.43	2.48	2.52	2.74	2.68	3.02	2.74	2.91	2.51	2.82	
K ₂ O	1.63	2.43	3.14	1.97	4.04	3.56	3.95	4.64	3.90	3.68	
P ₂ O ₅	0.10	0.08	0.21	0.08	0.09	0.13	0.15	0.12	0.23	0.23	
CO ₂	0.18		0.13	0.26	0.18	0.13	0.19	0.29	0.19	0.14	
Cl	0.02		0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	
F	0.03		0.04	0.03	0.05	0.09	0.08	0.06	0.08	0.08	
LOI	0.25	0.44	0.28	0.16	0.26	0.34	0.46	0.19	0.86	0.14	
Total	99.64	99.01	99.97	99.77	99.34	99.96	99.21	99.61	98.80	99.21	
AKNC	1.11	1.13	0.96	1.07	1.16	1.13	1.07	1.09	1.12	1.07	
CaO/Na ₂ O	1.61	1.31	1.37	1.56	0.68	0.62	0.76	0.45	0.97	1.00	
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	16.82	16.82	16.61	19.76	22.63	21.64	37.25	60.64	27.64	29.98	
Ba	939.30	1 525.80	1 511.00	1 034.40	1 034.48	397.25	456.56	349.03	1 065.49	983.09	
Rb	53.05	76.15	93.50	60.47	113.12	118.19	152.75	165.59	134.83	112.45	
Sr	165.90	182.90	165.60	167.50	90.09	52.11	76.55	59.86	113.18	110.90	
Y	36.66	21.06	38.42	20.26	32.64	40.52	33.35	44.54	25.97	23.26	
Zr	256.30	286.30	336.20	347.30	150.28	114.94	152.20	119.17	159.70	84.53	
Nb	13.61	13.37	14.55	13.56	11.07	11.37	10.67	9.10	11.21	11.06	
Th	26.00	32.31	28.86	33.26	23.51	19.32	16.25	18.45	20.15	16.72	
Ga	19.15	18.64	19.43	20.00	16.23	16.37	16.43	16.23	18.54	18.54	
V	88.17	107.30	93.35	92.92	62.74	54.96	37.30	20.72	66.19	63.64	
Cr	45.23	46.69	41.86	40.27	30.09	26.80	12.03	6.61	27.61	25.97	
Hf	7.05	7.92	9.45	10.44	4.41	2.81	4.77	4.19	3.75	2.49	
Cs			4.19		7.92	4.70	6.01	4.05	3.85	4.74	
Sc	16.93	15.30	16.68	12.84	9.95	10.51	9.29	6.82	19.26	13.48	
Ta	0.98	0.99	1.14	0.96	1.05	0.79	1.02	1.27	0.79	1.00	
Co	12.57	12.32	10.48	11.98	5.87	6.15	3.38	2.04	6.47	5.52	
U	1.37	1.43	1.72	1.59	3.62	2.25	3.36	10.88	2.05	2.00	
La	69.35	75.35	65.85	77.33	44.45	38.83	34.49	25.89	47.64	39.26	
Ce	134.40	144.10	132.30	149.60	99.19	83.97	76.55	59.05	101.59	84.99	
Pr	16.25	17.72	16.29	18.53	11.81	9.55	9.04	7.24	11.30	9.68	
Nd	62.08	63.99	60.65	70.33	43.44	34.76	33.14	26.26	41.02	35.75	
Sm	10.34	11.06	11.22	12.23	8.61	7.14	7.20	6.50	7.98	7.32	
Eu	2.09	2.10	1.88	2.09	1.26	0.78	1.01	0.68	1.37	1.38	
Gd	8.33	8.83	9.87	9.00	7.81	6.70	6.76	6.45	7.29	6.43	
Tb	1.25	1.14	1.46	1.16	1.24	1.13	1.20	1.36	1.09	1.10	
Dy	7.14	5.05	7.46	4.97	6.64	6.54	6.94	8.48	5.44	5.68	
Ho	1.50	0.82	1.29	0.84	1.35	1.41	1.39	1.77	0.96	0.96	
Er	4.02	1.96	3.03	2.04	3.88	4.08	3.94	5.23	2.40	2.17	
Tm	0.56	0.26	0.40	0.26	0.57	0.59	0.57	0.82	0.28	0.23	
Yb	3.49	1.92	2.41	1.55	3.68	3.56	3.64	5.39	1.65	1.23	
Lu	0.54	0.34	0.43	0.26	0.58	0.53	0.56	0.81	0.24	0.18	
REE	321.32	334.64	314.53	350.18	234.51	199.57	186.43	155.93	230.25	196.36	
LREE/HREE	10.98	15.47	10.94	16.45	8.11	7.13	6.46	4.14	10.90	9.92	
δEu	0.73	0.69	0.58	0.64	0.51	0.37	0.48	0.35	0.59	0.66	
(La/Yb) _N	11.81	23.36	16.20	29.64	7.17	6.48	5.63	2.85	17.14	18.95	

续表1

位置 样号	信宜						信宜		高州	
	D23-5	D54-1	HGX-1	D41-2	HXY-1-1	HB-1	HHT-1	HY-1	JCS-1	XJ-1
SiO ₂	70.13	70.22	69.34	71.66	68.18	71.01	70.46	70.08	68.42	71.60
TiO ₂	0.53	0.56	0.50	0.54	0.67	0.46	0.48	0.46	0.67	0.75
Al ₂ O ₃	14.38	14.06	14.43	12.76	13.84	13.95	13.18	14.23	13.77	12.27
Fe ₂ O ₃	0.34	1.20	0.41	0.56	0.10	0.12	0.32	0.44	0.48	0.08
FeO	3.60	3.35	4.01	3.82	5.16	3.42	3.78	2.98	6.08	4.69
MnO	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.09	0.09
MgO	1.45	1.18	1.12	1.08	1.69	0.84	0.94	0.79	1.80	2.55
CaO	2.58	3.00	3.19	2.68	2.64	1.75	1.89	2.30	2.17	1.34
Na ₂ O	2.50	2.70	3.09	2.40	2.82	2.78	2.99	3.13	3.02	2.15
K ₂ O	3.62	2.70	3.06	2.80	2.72	4.32	4.29	4.18	2.54	2.29
P ₂ O ₅	0.21	0.21	0.20	0.24	0.19	0.10	0.12	0.10	0.14	0.05
CO ₂	0.13	0.22	0.19	0.19	0.16	0.39	0.21	0.34	0.21	0.39
Cl	0.03	0.03	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.08	0.01
F	0.09	0.12	0.09	0.10	0.10	0.08	0.09	0.10	0.06	0.10
LOI	0.24	0.52	0.22	0.72	0.98	0.62	0.36	0.54	0.64	1.34
Total	99.64	99.60	99.69	99.45	98.35	99.30	98.83	99.20	99.53	98.36
AKNC	1.13	1.10	1.02	1.08	1.12	1.12	1.01	1.03	1.18	1.45
CaO/Na ₂ O	1.03	1.11	1.03	1.12	0.94	0.63	0.63	0.73	0.72	0.62
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	27.13	25.11	28.86	23.65	20.66	30.33	27.46	30.93	20.55	16.36
Ba	673.66	609.34	587.80	415.98	620.90	754.90	751.10	674.70	512.70	232.80
Rb	81.98	115.79	143.60	73.23	138.00	121.60	199.80	172.50	100.60	149.80
Sr	75.52	101.13	123.90	67.08	130.50	84.86	86.94	83.47	99.27	43.56
Y	27.16	24.52	28.65	19.81	33.82	54.05	55.21	36.78	61.23	38.58
Zr	93.06	142.22	179.60	100.14	251.70	246.80	195.80	217.00	206.50	316.70
Nb	7.94	9.78	10.02	9.04	12.79	11.12	11.59	9.68	10.57	20.22
Th	13.39	24.76	16.22	13.42	25.34	25.46	24.72	22.61	14.21	28.33
Ga	13.45	17.59	18.68	13.13	19.35	18.84	19.10	18.51	17.97	18.78
V	42.55	59.83	50.36	42.45	71.81	40.33	52.14	41.65	52.08	70.00
Cr	18.51	21.53	15.25	13.98	25.80	16.28	21.89	12.64	20.99	58.50
Hf	2.56	4.25	5.39	3.11	7.39	7.70	6.13	6.67	5.95	9.36
Cs	2.49	7.20	6.80	2.56	6.90	12.56	11.73	5.47	5.72	5.82
Sc	7.63	15.45	9.49	14.56	13.19	9.96	9.93	7.15	16.92	9.86
Ta	0.51	0.77	0.84	0.76	0.94	1.37	1.53	0.84	1.01	1.17
Co	3.61	6.12	6.01	4.46	8.79	5.62	5.66	5.37	7.92	12.15
U	1.28	2.38	3.42	2.52	2.44	3.82	6.45	3.16	2.17	2.44
La	31.42	53.77	38.78	30.15	52.93	44.60	40.53	40.90	38.50	48.96
Ce	67.80	118.36	77.22	66.57	106.20	93.49	84.14	87.81	83.22	104.00
Pr	7.68	13.82	9.63	7.80	13.28	11.64	10.55	10.92	10.42	13.19
Nd	27.78	50.65	35.36	28.66	49.02	43.84	38.95	40.37	40.17	48.85
Sm	5.70	9.68	6.76	5.79	9.14	8.70	7.96	7.83	8.73	10.10
Eu	1.04	1.39	1.34	0.93	1.31	1.12	1.04	1.02	1.52	0.81
Gd	5.25	8.40	6.12	5.05	7.92	8.17	7.72	7.05	9.15	9.04
Tb	0.90	1.24	0.98	0.84	1.25	1.44	1.41	1.20	1.60	1.43
Dy	5.09	6.10	5.36	4.54	6.60	8.69	8.64	6.82	9.60	7.22
Ho	1.08	1.06	0.95	0.82	1.18	1.79	1.79	1.32	1.93	1.23
Er	3.17	2.59	2.16	2.00	2.73	5.02	5.11	3.51	5.22	3.02
Tm	0.46	0.29	0.25	0.24	0.32	0.79	0.81	0.52	0.82	0.43
Yb	2.87	1.52	2.29	1.27	1.62	4.72	5.08	3.10	5.14	2.57
Lu	0.44	0.21	0.22	0.18	0.27	0.80	0.84	0.50	0.86	0.42
REE	160.68	269.08	187.42	154.84	253.77	234.80	214.58	212.87	216.88	251.27
LREE/HREE	7.34	11.57	9.23	9.36	10.60	6.48	5.83	7.86	5.32	8.91
δEu	0.63	0.50	0.69	0.56	0.50	0.44	0.44	0.45	0.57	0.28
(La/Yb) _N	6.50	21.00	10.01	14.10	19.35	5.61	4.74	7.82	4.44	11.33

D19-4、HLX-1为紫苏花岗闪长岩; HSJ-1为紫苏闪长岩; HSW-1为紫苏花岗闪长岩; D42-1、D38-4、D58-4、D59-1、D23-1、D23-4、D23-5、D54-1、HGX-1、D41-2为球粒状黑云二长花岗岩; HXY-1-1、HB-1、HHT-1、HY-1为环斑状黑云二长花岗岩; JCS-1、XJ-1为含榴片麻状花岗岩。

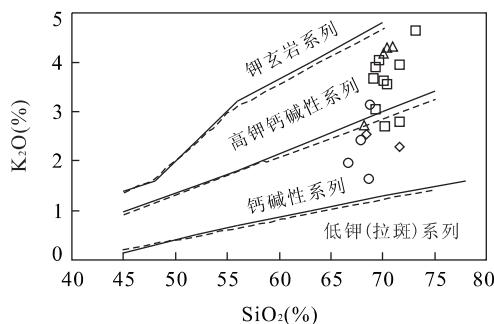


图2 花岗岩 K_2O - SiO_2 判别图解 (Le Maitre *et al.*, 1989; Rickwood, 1989)

Fig. 2 K_2O vs. SiO_2 discriminant diagrams for the granitoids
 ○. 紫苏花岗岩; □. 眼球状黑云二长花岗岩; △. 环斑黑云二长花岗岩;
 ◇. 片麻状含榴黑云二长花岗岩

陆边缘俯冲—碰撞造山带火山弧环境的基性岩体,这与花岗岩形成于大陆边缘俯冲—碰撞大地构造背景是一致的。

3 年代学

云开造山带条带—眼球状(环斑)深熔花岗岩(包括紫苏花岗岩)的 Rb-Sr 等时线,以及锆石 U-Pb 和谐曲线年龄(下交点)研究结果表明,时限跨度主要集中在 400~500 Ma 之间(叶伯丹,1989;林庆华等,1990;周汉文等,1994),而一些结晶锆石 U-Pb 和谐曲线(上交点)>800 Ma 年龄的取得和结晶锆石 Pb-Pb 蒸发法 800~1 300 Ma 年龄数据的报道(彭少梅等,1996),则使这套岩石的形成时代产生了新的分歧。由于云开造山带隆起区的深熔花岗岩经历了强烈的韧性一流变剪切变形变质改造,不同同位素体系发生了不同程度的影响和重新调整。因此,我们对这

套变形变质花岗岩石样品采用锆石 SHRIMP U-Pb 定年方法重新进行了精确年代学的研究。锆石 SHRIMP U-Pb 分析在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,背散射电子相研究在中国地质科学院矿床地质研究所电子探针研究室完成。数据处理采用 Ludwig(1999) SQUID1.0 及 ISOPLOT 程序。

SHRIMP 定年样品为云开造山带信宜、高州一带的典型条带—眼球状黑云二长花岗岩(HXY-1)、环斑黑云二长花岗岩(HY-1)、紫苏花岗闪长岩(HSW-1)和片麻状含榴黑云二长花岗岩(HL-1),锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年分析结果见表 2。锆石的阴极发光显示,大部分锆石都可以分为 3 层,即内核残留锆石、中间变质结晶或岩浆结晶过渡层和最外层的岩浆结晶部分。内核残留锆石的结构比较复杂,主要为结晶残留锆石。中间变质结晶或岩浆结晶成因锆石变化较大,只发育在部分锆石中。最外层均为岩浆结晶成因的锆石,几乎在所有锆石中都有发育,而且岩浆结晶锆石一般呈自形,韵律环带结构发育,显示典型的岩浆成因特征(图 5)。离子探针(SHRIMP)定年的分析结果显示,内核残留锆石年龄变化较大,从 1 600~2 800 Ma,中间层变质结晶或岩浆结晶锆石年龄主要分布于 900~1 100 Ma,最外层岩浆结晶锆石年龄集中分布于 413~467 Ma;条带—眼球状黑云二长花岗岩岩浆结晶锆石的形成年龄为 (465 ± 10) Ma($n=9$), MSWD=0.14;环斑黑云二长花岗岩岩浆结晶锆石的形成年龄为 (467 ± 10) Ma($n=10$), MSWD=0.33;紫苏花岗闪长岩岩浆结晶锆石的形成年龄为 (435 ± 11) Ma($n=8$), MSWD=0.21;片麻状含榴黑云二长花岗岩岩浆结晶锆石的形成年龄为 (413 ± 8) Ma($n=13$), MSWD=1.15(图 6)。侵入条带—眼球状黑云二长花岗岩的变苏长辉长岩

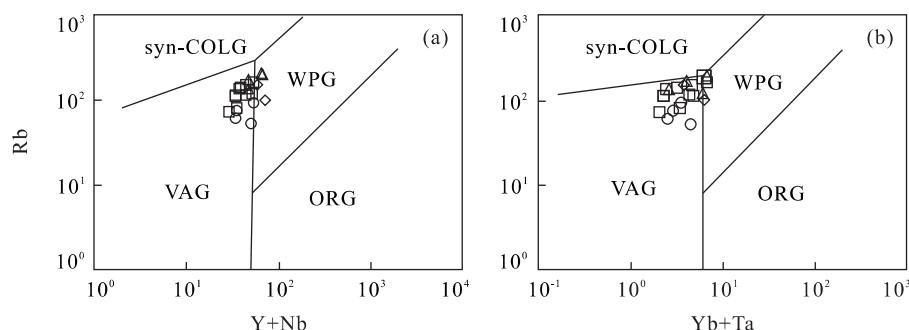


图3 花岗岩 Rb-(Y+Nb) 判别图解和 Rb-(Yb+Ta) 判别图解 (Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 3 Rb-(Y+Nb) and Rb-(Yb+Ta) tectonic discriminant diagrams for the granitoids
 VAG. 火山弧花岗岩; Syn-COLG. 同碰撞花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 洋脊花岗岩; 其余图例同图 2

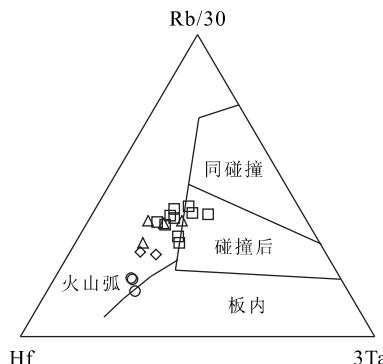


图 4 花岗岩 Hf—Rb—Ta 判别图解(Harris *et al.*, 1986; 图例同图 2)

Fig. 4 Hf-Rb-Ta tectonic discriminant diagrams for the granitoids

Sm-Nd 矿物—岩石等时线年龄则为 (392 ± 53) Ma(另文发表). 这表明条带—眼球状(环斑)花岗岩、紫苏花岗岩, 以及相关变基性侵入岩(变苏长辉长岩、变辉长岩)的形成时代为加里东期.

4 成因及构造背景讨论

云开造山带加里东期深熔花岗岩(条带—眼球状(环斑)黑云二长花岗岩、紫苏花岗闪长岩(闪长岩)和片麻状含榴黑云二长花岗岩)绝大多数的 $A/CNK > 1.1$, $CaO/Na_2O = 0.62 \sim 1.61$ (平均 0.94, 大于 0.3), $Al_2O_3/TiO_2 = 16.6 \sim 60.6$ (平均 23.68), 高场强元素 Ta、Nb、Zr 亏损, 具有大陆边缘俯冲—碰撞带和高温后碰撞构造环境强过铝(SP)高钾钙碱性—钙碱性花岗岩的地球化学特征, 而且紫苏花岗岩和片麻状含榴黑云二长花岗岩 Al_2O_3/TiO_2 (平均 17.82)明显低于条带状—眼球状(环斑)黑云二长花岗岩 Al_2O_3/TiO_2 (平均 29.55), 表明其形成温度更高, 并且具有向铝质 A 型花岗岩演化的特征, 显示花岗岩形成于加里东期洋—陆俯冲—碰撞造山背景下的后碰撞伸展构造环境(Whalen *et al.*, 1987; King *et al.*, 1997; Sylevster, 1998; Barbarin, 1999; 钟增球等, 1999; Rajesh, 2000; Ferrè and Leake, 2001; 肖庆辉等, 2002; Tesfaye and Christian, 2003). 根据 Condie(1982)估算造山带陆壳厚度的方法, 即地壳厚度(C, km)= $18.2 K_{60} + 0.45$, 可以得到云开地区从条带—眼球状(环斑)花岗岩($465 \sim 467$ Ma)、紫苏花岗岩(435 Ma)到片麻状含榴花岗岩(413 Ma)形成时的地壳厚度分别为 40.59 km、25.47 km 和

26.83 km, 反映出地壳厚度明显减薄(Dikinson, 1975). 加里东晚期变苏长辉长岩、辉长岩体(脉)的侵入则直接表明, 沿壳幔边界发生了大规模幔源岩浆的底侵作用, 并导致地壳的进一步伸展减薄(金振民和高山, 1996). 此外, 本区正 Eu 异常下地壳基性麻粒岩的存在也是云开地区经历了加里东期俯冲—碰撞造山地壳增厚和随之而来的后碰撞地壳伸展减薄的伸展—拆沉—底侵作用的重要标志(Kay and Kay, 1993; Kay, 1994; 金振民和高山, 1997).

云开造山带深熔花岗岩的空间分布从已有资料看, 后碰撞岩石圈伸展减薄构造环境下伸展—拆沉—底侵岩浆作用形成的条带—眼球状(环斑)花岗岩和变基性侵入辉长岩, 以及具 A 型花岗岩演化特征的紫苏花岗岩和片麻状含榴花岗岩主要分布在云开隆起区信宜、高州一带, 而碰撞构造环境下形成的条带状二长花岗岩则主要分布在云开隆起西缘(博白)一带, 其西侧为海西—印支期造山形成的大容山—十万大山花岗岩带. 这一空间分布特征显示从加里东期到海西—印支期造山扬子板块向华夏板块俯冲—碰撞造山或华夏板块向西仰冲迁移的大地构造演化过程, 这为华南存在加里东期扬子板块向华夏板块的洋—陆俯冲—碰撞造山, 以及华南新元古—早古生代洋盆的存在和闭合提供了重要证据(殷鸿福等, 1999).

此外, 邵建国等(1996)对云开造山带信宜东镇韧性一流变剪切变形条带—眼球状花岗岩动力变形变质激光 Ar-Ar 年代学的研究发现, “δ”和“σ”残斑系中重结晶细粒钾长石形成的年龄为 (273 ± 3) Ma. 最近, 王岳军(2004 面告)对云开隆起西缘韧性一流变剪切变形的 Ar-Ar 年代学研究也表明, 韧性一流变剪切动力变形变质作用的时代为印支期, 这都显示韧性一流变剪切动力变形变质作用的时代明显晚于加里东期花岗岩的形成时代. 但条带—眼球状深熔花岗岩中稍晚侵入的变苏长辉长岩和部分紫苏花岗岩未发生韧性一流变剪切变形, 以及麻粒岩相变质等压冷却后成合晶冠状体的形成明显晚于韧性一流变剪切变形的结构特征, 表明麻粒岩相一角闪岩相变质的时代晚于或略晚于韧性一流变剪切变形的时代. 考虑到 Ar-Ar 年代的封闭温度较低, 一般为 $350 \sim 400$ °C, 远低于麻粒岩相一角闪岩相韧性一流变剪切变形(彭松柏等, 1995; 彭少梅等, 1996)和麻粒岩相退变质等压冷却后成合晶冠状体形成的温度 $600 \sim 700$ °C(周汉文等, 1994), 因此, 韧性一流变剪切变形眼球状黑云二长花岗岩中动力变形变质的

表2 云开地区花岗岩锆石SHRIMP U-Pb同位素分析数据

Table 2 SHRIMP U-Pb data of zircons of the granitoids from the Yunkai area

样号	$^{206}\text{Pb}_{\text{c}}$ (%)	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ ±%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ ±%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ ±%
HXY-1-2.1	0.82	309	73	0.24	468 ± 16	526 ± 140	0.0579 ± 6.3	0.601 ± 7.2	0.0753 ± 3.5
HXY-1-3.1	0.43	265	97	0.38	466 ± 16	729 ± 59	0.0636 ± 2.8	0.658 ± 4.6	0.0750 ± 3.7
HXY-1-4.1	2.46	311	61	0.20	461 ± 16	345 ± 210	0.0534 ± 9.3	0.546 ± 9.9	0.0742 ± 3.5
HXY-1-5.1	2.00	251	110	0.45	457 ± 16	182 ± 280	0.0497 ± 12	0.504 ± 13	0.0735 ± 3.5
HXY-1-6.1	1.34	370	73	0.20	467 ± 16	322 ± 130	0.0528 ± 5.7	0.547 ± 6.7	0.0751 ± 3.5
HXY-1-7.1	1.98	397	72	0.19	462 ± 15	258 ± 160	0.0514 ± 6.9	0.527 ± 7.8	0.0744 ± 3.5
HXY-1-8.1	1.31	398	92	0.24	460 ± 15	461 ± 110	0.0562 ± 5.0	0.574 ± 6.1	0.0740 ± 3.4
HXY-1-9.1	1.26	406	33	0.08	474 ± 16	460 ± 110	0.0562 ± 4.9	0.591 ± 6.0	0.0763 ± 3.4
HXY-1-10.1	1.07	409	68	0.17	482 ± 16	390 ± 110	0.0545 ± 4.7	0.583 ± 5.8	0.0776 ± 3.4
HXY-1-11.1	0.61	632	90	0.15	506 ± 17	451 ± 60	0.0560 ± 2.7	0.630 ± 4.3	0.0816 ± 3.4
HXY-1-12.1	5.87	230	42	0.19	485 ± 18	308 ± 440	0.0530 ± 19	0.57 ± 20	0.0781 ± 3.8
HXY-1-12.2	1.83	208	76	0.38	474 ± 16	400 ± 220	0.0547 ± 9.9	0.575 ± 11	0.0763 ± 3.6
HXY-1-13.1	0.22	640	73	0.12	490 ± 16	535 ± 40	0.0582 ± 1.9	0.633 ± 3.9	0.0790 ± 3.4
HXY-1-9.2	1.15	214	124	0.60	992 ± 32	880 ± 86	0.0684 ± 4.1	1.569 ± 5.4	0.1664 ± 3.5
HXY-1-1.2	0.10	955	238	0.26	2343 ± 66	2524 ± 22	0.1666 ± 1.3	10.07 ± 3.6	0.438 ± 3.4
HXY-1-11.2	0.33	285	238	0.86	1831 ± 55	1699 ± 24	0.1042 ± 1.3	4.72 ± 3.7	0.329 ± 3.5
HY-1-1.1	1.94	347	106	0.31	457 ± 15	447 ± 170	0.0559 ± 7.7	0.566 ± 8.5	0.0735 ± 3.5
HY-1-2.1	1.70	371	88	0.25	452 ± 15	444 ± 160	0.0558 ± 7.2	0.558 ± 8.0	0.0726 ± 3.5
HY-1-3.1	1.23	511	139	0.28	460 ± 15	474 ± 110	0.0566 ± 4.9	0.577 ± 6.0	0.0740 ± 3.4
HY-1-4.1	2.01	417	87	0.22	475 ± 16	330 ± 270	0.0530 ± 12	0.560 ± 12	0.0765 ± 3.5
HY-1-5.1	0.21	782	270	0.36	593 ± 19	998 ± 30	0.0724 ± 1.5	0.962 ± 3.7	0.0964 ± 3.4
HY-1-6.1	2.17	199	131	0.68	474 ± 17	226 ± 280	0.0507 ± 12	0.533 ± 13	0.0763 ± 3.7
HY-1-6.2	1.08	604	190	0.32	475 ± 16	396 ± 68	0.0546 ± 3.0	0.576 ± 4.6	0.0765 ± 3.4
HY-1-7.1	0.92	541	210	0.40	497 ± 17	367 ± 93	0.0539 ± 4.1	0.595 ± 5.4	0.0801 ± 3.6
HY-1-8.1	0.88	473	186	0.41	463 ± 15	482 ± 89	0.0568 ± 4.0	0.582 ± 5.3	0.0744 ± 3.4
HY-1-10.1	0.78	518	205	0.41	492 ± 16	588 ± 75	0.0596 ± 3.4	0.651 ± 4.9	0.0793 ± 3.4
HY-1-11.1	1.55	471	125	0.27	473 ± 16	358 ± 140	0.0537 ± 6.1	0.563 ± 7.0	0.0761 ± 3.4
HY-1-12.1	0.89	457	31	0.07	477 ± 16	427 ± 95	0.0554 ± 4.3	0.586 ± 5.5	0.0768 ± 3.4
HY-1-13.1	0.33	831	248	0.31	467 ± 15	461 ± 49	0.0562 ± 2.2	0.583 ± 4.1	0.0752 ± 3.4
HY-1-14.2	0.60	734	63	0.09	491 ± 16	386 ± 63	0.0544 ± 2.8	0.593 ± 4.4	0.0792 ± 3.4
HY-1-9.1	0.33	950	167	0.18	1060 ± 43	1001 ± 23	0.07255 ± 1.1	1.787 ± 4.5	0.1787 ± 4.4
HY-1-11.2	0.87	218	250	1.18	1183 ± 37	1092 ± 57	0.0759 ± 2.8	2.108 ± 4.5	0.2014 ± 3.5
HY-1-14.1	0.55	540	330	0.63	924 ± 29	805 ± 44	0.0660 ± 2.1	1.401 ± 4.0	0.1541 ± 3.4
HSW-1-1.2	1.29	401	101	0.26	435 ± 15	485 ± 130	0.0568 ± 6.0	0.547 ± 7.0	0.0698 ± 3.5
HSW-1-2.1	1.57	420	64	0.16	427 ± 14	216 ± 190	0.0505 ± 8.2	0.476 ± 8.9	0.0684 ± 3.5
HSW-1-2.2	1.44	291	72	0.26	454 ± 15	496 ± 170	0.0571 ± 7.8	0.575 ± 8.5	0.0730 ± 3.5
HSW-1-3.1	0.53	371	124	0.35	432 ± 15	590 ± 88	0.0596 ± 4.0	0.570 ± 5.3	0.0694 ± 3.5
HSW-1-3.2	2.16	226	90	0.41	418 ± 15	488 ± 280	0.0569 ± 13	0.526 ± 13	0.0671 ± 3.6
HSW-1-5.1	0.91	561	120	0.22	431 ± 14	440 ± 94	0.0557 ± 4.2	0.531 ± 5.4	0.0692 ± 3.4
HSW-1-6.1	0.88	285	60	0.22	443 ± 15	606 ± 110	0.0601 ± 5.2	0.589 ± 6.3	0.0711 ± 3.5
HSW-1-7.1	2.38	198	50	0.26	446 ± 16	479 ± 240	0.0567 ± 11	0.560 ± 12	0.0716 ± 3.6
HSW-1-9.1	1.75	148	51	0.36	442 ± 18	560 ± 280	0.0588 ± 13	0.576 ± 14	0.0710 ± 4.2
HSW-1-4.1	0.33	338	70	0.22	1041 ± 34	890 ± 93	0.0687 ± 4.5	1.660 ± 5.7	0.1752 ± 3.5
HSW-1-6.2	0.32	282	163	0.60	1175 ± 37	1213 ± 67	0.0807 ± 3.4	2.22 ± 4.9	0.1999 ± 3.5
HSW-1-7.2	0.11	1018	22	0.02	1479 ± 54	2018 ± 260	0.1240 ± 15	4.42 ± 15	0.2580 ± 4.1
HSW-1-8.1	1.62	129	104	0.84	429 ± 16	1253 ± 190	0.0823 ± 9.5	0.782 ± 10	0.0689 ± 3.8
HSW-1-10.1	0.51	272	214	0.81	1682 ± 51	1580 ± 43	0.0977 ± 2.3	4.02 ± 4.2	0.298 ± 3.5
HL-1-1.1	0.30	304	145	0.49	485 ± 16	643 ± 66	0.0611 ± 3.1	0.658 ± 4.7	0.0781 ± 3.5
HL-1-1.2	0.52	267	42	0.16	428 ± 17	626 ± 79	0.0606 ± 3.6	0.574 ± 5.5	0.0687 ± 4.0
HL-1-2.1	1.16	269	49	0.19	427 ± 15	513 ± 170	0.0576 ± 7.5	0.544 ± 8.3	0.0685 ± 3.6
HL-1-4.1	2.37	291	54	0.19	418 ± 14	144 ± 270	0.0489 ± 12	0.452 ± 12	0.0670 ± 3.6
HL-1-5.1	1.59	308	72	0.24	406 ± 14	362 ± 170	0.0538 ± 7.6	0.483 ± 8.4	0.0651 ± 3.6
HL-1-6.1	1.24	461	56	0.13	431 ± 14	381 ± 130	0.0542 ± 5.8	0.517 ± 6.7	0.0691 ± 3.4
HL-1-7.1	2.14	247	102	0.43	405 ± 14	136 ± 310	0.0487 ± 13	0.436 ± 14	0.0648 ± 3.6
HL-1-8.1	2.66	226	90	0.41	421 ± 15	258 ± 280	0.0514 ± 12	0.478 ± 13	0.0674 ± 3.6

续表 2

样号	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ ±%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ ±%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ ±%
HL-1-9.1	1.14	395	151	0.39	426 ± 14	447 ± 120	0.0559 ± 5.4	0.526 ± 6.4	0.0683 ± 3.5
HL-1-10.1	2.04	231	115	0.51	400 ± 14	469 ± 260	0.0564 ± 12	0.498 ± 12	0.0640 ± 3.6
HL-1-11.1	1.58	273	81	0.31	400 ± 14	340 ± 270	0.0533 ± 12	0.470 ± 13	0.0640 ± 3.6
HL-1-13.1	0.78	330	102	0.32	420 ± 14	550 ± 66	0.0585 ± 3.0	0.543 ± 4.6	0.0672 ± 3.5
HL-1-13.2	0.83	550	107	0.20	451 ± 15	475 ± 91	0.0566 ± 4.1	0.565 ± 5.4	0.0724 ± 3.5
HL-1-3.1	0.07	463	235	0.52	2405 ± 73	2483 ± 10	0.1626 ± 0.60	10.140 ± 3.7	0.4520 ± 3.6
HL-1-14.1	0.60	434	313	0.75	1325 ± 41	2492 ± 17	0.1635 ± 1.0	5.14 ± 3.5	0.2282 ± 3.4

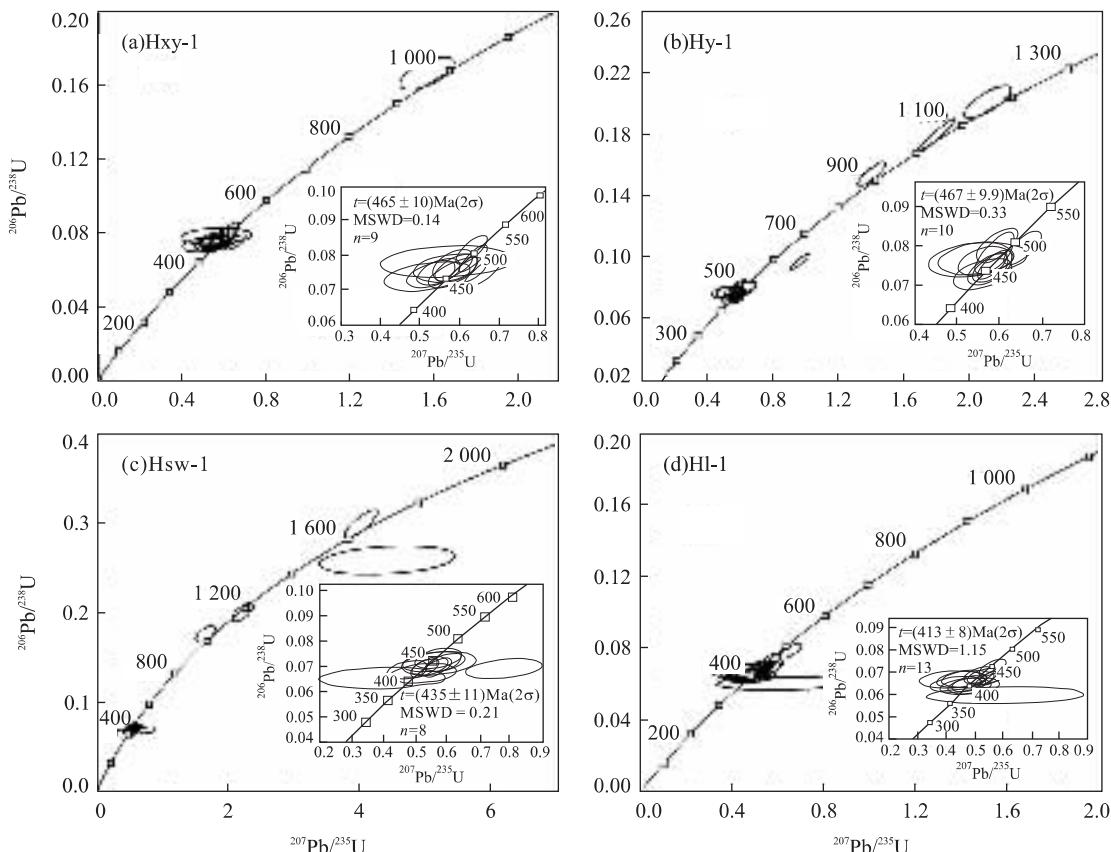


图 5 云开地区花岗岩锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon SHRIMP U-Pb concordia diagram of the granitoids from the Yunkai area

Ar-Ar 年龄, 实际上应反映后期挤压抬升和伸展揭顶作用事件 Ar-Ar 同位素体系封闭的时代, 这表明在海西—印支期还发生了强烈的挤压抬升和伸展揭顶作用。云开造山带条带—眼球状深熔花岗质岩石中普遍发育的近水平的透入性韧性—流变剪切变形—变质构造应主要是加里东晚期伸展变形变质作用的产物。

5 结论

(1) 云开造山带的条带—眼球状(环斑)花岗岩、

紫苏花岗岩和片麻状含榴花岗岩绝大多数为强过铝(SP)高钾钙碱性—钙碱性深熔花岗岩, 具有大陆边缘俯冲—碰撞造山背景后碰撞构造环境形成的强过铝(SP)高钾钙碱性—钙碱性花岗岩的地球化学特征, 其中紫苏花岗岩和片麻状含榴花岗岩具向铝质 A 型花岗岩演化的地球化学特征, 为洋—陆俯冲—碰撞背景下后碰撞构造环境伸展—拆沉—底侵岩浆活动的产物。(2) 云开造山带深熔花岗岩(含紫苏花岗)从高钾钙碱性条带—眼球状(环斑)黑云二长花岗岩到钙碱性紫苏花岗闪长岩和片麻状含榴黑云二长花岗岩, 形成时代由(465 ± 10) Ma、(467 ± 10) Ma 变为

(435±11)Ma 和(413±8)Ma, 表明在加里东期云开地区发生了扬子板块向华夏板块的洋—陆俯冲—碰撞造山地壳增厚作用和随后的地壳伸展减薄—拆沉—底侵作用,而且后期又经历了海西—印支期的挤压抬升和伸展揭顶,这为华南存在加里东期扬子板块向华夏板块的洋—陆俯冲—碰撞造山,以及华南新元古—早古生代洋盆的存在和闭合提供了重要证据。

References

- Barbarin, B. , 1999. A review of the relationships between granitoid types, origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46:605—626.
- Condie, K. C. , 1982. Plate tectonic and crustal evolution. Pergamon Press, New York, 310.
- Dikinson, W. R. , 1975. Potash-depth (K-h) relation in continental margin and intra-oceanic magmatic arcs. *Geology*, (3):53—56.
- Eby, G. N. , 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20 (7):641—644.
- Ferrè, E. C. , Leake, B. E. , 2001. Geodynamic significance of early orogenic high-K crustal and mantle melts: Example of the Corsica Batholith. *Lithos*, 59:47—67.
- Gao, S. , Jin, Z. M. , 1997. Delamination and its geodynamical significance for the crust-mantle evolution. *Geological Science and Technology Information*, 16(1):1—9 (in Chinese with English abstract).
- Harris, N. B. W. , Pearce, J. A. , Tindle, A. G. , 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M. P. , Ries, A. C. , eds., Collision tectonics. *Geol. Soc. Publ.* , 19:67—81.
- Henderson, P. , Pankhurst, R. J. , 1984. Analytica chemistry. In: Henderson, P. , ed., Rare earth element geochemistry. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 467—499.
- Jin, Z. M. , Gao, S. , 1996. Underplating and its geodynamical significances for the evolution of crust-mantle boundary. *Geological Science and Technology Information*, 15 (2):1—7 (in Chinese with English abstract).
- Kay, R. W. , Kay, S. M. , 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219:177—189.
- Kay, S. M. , 1994. Young mafic back arc volcanic rocks as indicators of continental lithospheric delamination beneath the Argentine Puna plateau, central Andes. *J. Geophys. Res.* , 99:24323—24339.
- King, P. L. , White, H. J. K. , Chappell, B. W. , et al. , 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology* , 38:371—391.
- Landenberger, B. , Collins, W. J. , 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelumdi complex, eastern Australia. *Journal of Petrology* , 37:145—170.
- Le Maitre, R. W. , Bateman, P. , Dudek, A. , et al. , 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford.
- Liegeois, J. P. , 1998. Contrasting origins of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids, the use of sliding normalization. *Lithos*, 45:1—28.
- Lin, Q. H. , Li, L. Y. , Liang, M. G. , 1990. The origin of granitoids in Heshui and Sihe, western Guangdong. *Regional Geology of China* , 9(20):173—180 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. F. , 2004. GeoKit—A geochemical toolkit for Microsoft excel. *Geochimica* , 33(5):459—464 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R. , 1999. Using Isoplot/EX, version 2: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1—47.
- Middlemost, E. A. K. , 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chem. Geo.* , 77:19—26.
- Mo, Z. S. , Ye, B. D. , Pan, W. Z. , et al. , 1980. The geology of granitoids in Nanling. Geological Publishing House, Beijing, 44—66 (in Chinese).
- Nédélec, A. , Stephens, W. E. , Fallicu, A. E. , 1995. The Pan-African stratoid granites of Madagascar: Alkaline magmatism in a post-collisional extensional setting. *Journal of Petrology* , 36:1367—1391.
- Patiño Douce, A. E. , Beard, J. S. 1995. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 k-bar. *J. Petrol.* , 36:707—738.
- Patiño Douce, A. E. , Johnston, A. D. , 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 107:202—218.
- Pearce, J. A. , Harris, N. B. W. , Tindle, A. G. , 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* , 25:956—983.
- Peng, S. B. , Peng, S. M. , Shao, J. G. , 1995. Petrofabric features as evidence of structural evolution of the Yunkai area. *Guangdong Geology* , 10(2):25—33 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. B. , Zhang, Y. M. , Zhan, M. G. , et al. , 2000. Dating

- of Sm-Nd, Rb-Sr isotopic system and its dynamic significance for the Proterozoic augen granite in Yunkai area. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 99—105 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. M., Wu, G. Y., Zhou, G. Q., et al., 1995. Tectonic evolution of Yunkai massif and its shearing anatetic origin of gneissic granitic rocks. China University of Geosciences Press, Wuhan, 43—147 (in Chinese with English abstract).
- Rajesh, H. M., 2000. Characterization and origin of a compositionally zoned aluminous A-type granite from South India. *Geol. Mag.*, 137(3): 291—318.
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247—263.
- Shao, J. G., Wu, G. Y., Peng, S. M., et al., 1996. Micro-area $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Dongzhen granitic body in Guangdong and its significance. *Guangdong Geology*, 11(3): 51—56 (in Chinese with English abstract).
- Skjelrie, K. P., Johnston, A. D., 1996. Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: Implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins. *J. Petrol.*, 37: 661—691.
- Sylvester, P. J., 1998. Post-collision strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29—44.
- Tesfaye, K., Christian, K., 2003. Petrogenesis of A-type granitoids from the Wallagga area, western Ethiopia: Constraints from mineralogy, bulk-rock chemistry, Nd and Sr isotopic compositions. *Precambrian Research*, 121: 1—24.
- Whalen, T. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407—419.
- Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. Q., et al., 2002. The ways of investigation of granitoids. Geological Publishing House, Beijing, 12—50 (in Chinese).
- Ye, B. D., 1989. Isotopic age data from Yunkai area of Guangdong and Guangxi provinces and their geologic implications. *Guangdong Geology*, 4(3): 39—56 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Wu, S. B., Du, Y. S., et al., 1999. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Z. Q., Zhang, H. F., Suo, S. T., et al., 1999. Partial melting in exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks, Dabieshan mountains, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(4): 393—399 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. W., You, Z. D., Zhong, Z. Q., et al., 1994. Characteristics of zircons in orbicular gneissic biotite-granite from Yunkai uplifted area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 427—432.

附中文参考文献

- 高山, 金振民, 1997. 拆沉作用 (delamination) 及其壳幔演化动力学意义. 地质科技情报, 16(1): 1—9.
- 金振民, 高山, 1996. 底侵作用 (underplating) 及其壳幔演化动力学意义. 地质科技情报, 15(2): 1—7.
- 林庆华, 李立源, 梁明国, 1990. 粤西合水、思贺地区花岗质岩石的成因. 中国区域地质, 9(20): 173—180.
- 路远发, 2004. GeoKit: 一个用 VAB 构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33(5): 459—464.
- 莫柱荪, 叶伯丹, 潘维组, 等, 1980. 南岭花岗岩地质学. 北京: 地质出版社, 44—66.
- 彭少梅, 伍广宇, 周国强, 等, 1996. 云开地区片麻状花岗岩形成的构造—深熔机理. 武汉: 中国地质大学出版社, 43—147.
- 彭松柏, 彭少梅, 邵建国, 1995. 云开地区构造演化的岩石组构特征. 广东地质, 10(2): 25—33.
- 彭松柏, 张业明, 战明国, 等, 2000. 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. 岩石学报, 16(1): 99—105.
- 邵建国, 伍广宇, 彭少梅, 等, 1996. 广东东镇岩体微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其意义. 广东地质, 11(3): 51—56.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等, 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 12—50.
- 叶伯丹, 1989. 两广云开地区同位素地质年龄数据及其地质意义. 广东地质, 4(3): 39—56.
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等, 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. 地球科学——中国地质大学学报, 24(1): 1—12.
- 钟增球, 张宏飞, 索书田, 等, 1999. 大别山高压折返过程中的部分熔融作用. 地球科学——中国地质大学学报, 24(4): 393—399.
- 周汉文, 游振东, 钟增球, 等, 1994. 云开隆起区钾长球斑片麻状黑云母花岗岩锆石特征研究. 地球科学——中国地质大学学报, 10(4): 427—432.