

# 佛冈花岗岩基及乌石闪长岩-角闪辉长岩体的形成 年龄和起源

徐夕生\* 鲁为敏 贺振宇

(南京大学地球科学系成矿作用国家重点实验室, 南京 210093)

**摘要** 佛冈花岗岩基约 6000 km<sup>2</sup>, 是南岭地区最大的晚中生代岩基. 乌石闪长岩-角闪辉长岩岩体位于佛冈花岗岩基的东北部, 它和佛冈花岗岩主体一并属于高钾钙碱性系列岩石. 但乌石岩体以低 Si (49%~55%), 高 Fe, Mg, Ca, 稀土总量低, Eu, Ba, P, Ti 亏损不明显, 而 Zr 和 Hf 亏损明显的特征不同于佛冈花岗岩主体. 锆石 LA-ICP-MS 定年及矿物-全岩 Rb-Sr 等时线年龄测定结果表明, 乌石岩体的结晶年龄为 160 Ma 左右, 与佛冈花岗岩主体是同时代形成的. 佛冈花岗岩主体具有较高的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值(0.70871~0.71570), ε<sub>Nd</sub>(*t*)变化于-5.11~-8.93 之间, 显示出壳源花岗岩的 Sr-Nd 同位素特点, 它们的两阶段 Nd 模式年龄介于 1.37~1.68 Ga. (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值、ε<sub>Nd</sub>(*t*)值和 Nd 模式年龄值的不均匀性, 可能反映巨大的佛冈花岗岩主体的源区组成是不均匀的, 同时在其形成过程中有地幔物质的不均匀混合. 乌石闪长岩-角闪辉长岩是一种少见的高(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值(0.71256~0.71318)、低 ε<sub>Nd</sub>(*t*)值(-7.32~-7.92)中基性岩浆岩, 它可能由地幔部分熔融产生的新生幔源玄武质岩浆与下地壳玄武质岩石脱水部分熔融产生的岩浆混合形成.

**关键词** 花岗岩 高 Sr 闪长岩 同位素定年 源区成分 中国南岭

广东佛冈复式岩基, 出露面积约 6000 km<sup>2</sup>, 是南岭地区规模最大的复式岩基. 其花岗岩主体岩性为中粗粒斑状黑云母花岗岩、中粒黑云母二长花岗岩, 局部为含角闪石的花岗闪长岩, 它们占佛冈复式岩基总面积的 90%以上. 少量中基性的闪长岩-角闪辉长岩与花岗岩主体在空间上伴生, 一并构成了一个钙碱性系列. 此外, 在佛冈复式岩基中, 有少量碱性正长岩和 A 型碱性长石花岗岩, 其中出露面积最大的 A 型碱性长石花岗岩是岩基南侧的南昆山岩体<sup>[1,2]</sup>.

与佛冈花岗岩主体和碱性岩石的研究相比, 中基性的闪长岩-角闪辉长岩的研究工作较为薄弱. 黄友义等<sup>[3]</sup>对其中的乌石岩体作了初步的研究, 利用全岩 Rb-Sr 等时线法获得该岩体的形成年龄为 198 Ma,

并认为它是早于佛冈钙碱性花岗岩主体 (160 Ma) 的岩浆活动. 但乌石岩体与佛冈花岗岩主体直接接触, 佛冈花岗岩主体中没有乌石岩体的碎块(捕虏体), 与乌石岩体接触也没有形成冷凝边. 因此, 这一年龄的地质解释有很大的困难. 此外, 乌石闪长岩-角闪辉长岩与佛冈花岗岩主体总体上属钙碱系列岩石, 它们是结晶分异的产物, 还是两种独立起源的岩浆, 有待进一步澄清.

佛冈花岗岩基巨大的出露面积和多种岩石类型, 显示了它在南岭花岗岩地质与岩石圈演化研究中的重要性. 而与花岗岩主体在空间上伴生的中基性岩石对认识佛冈花岗岩基的成因、阐明壳幔相互作用、岩浆分异或混合、区域构造运动等问题可能有重要的

意义. 显然, 佛冈复式岩基各种岩石类型, 特别是乌石闪长岩-角闪辉长岩的详细研究, 对全面解读南岭地区花岗岩的成因和演化有重要的意义. 因此, 本文结合以往佛冈花岗岩主体的研究资料, 着重研究乌石闪长岩-角闪辉长岩的形成年龄, 通过对佛冈花岗岩主体和乌石闪长岩-角闪辉长岩进一步的岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素分析, 讨论它们的物质来源和成因.

## 1 岩体地质和岩石地球化学

### 1.1 岩体地质

巨大的佛冈花岗岩基受东西向佛冈-丰顺断裂和北东向恩平-新丰断裂联合控制侵位, 主体岩石类型为中粗粒斑状黑云母花岗岩、中粒黑云母二长花岗岩和含角闪石的花岗闪长岩, 局部为中细粒黑云母二长花岗岩. 它们的矿物组成见表 1. 佛冈花岗岩主体普遍含自形的钾长石巨晶, 呈斑状结构, 只是钾长石

巨晶在不同部位产出的大小及分布不均匀. 岩石为块状构造. 此外, 在佛冈花岗岩主体中普遍含细粒、暗色、有时为斑状的石英闪长质-花岗闪长质岩石包体, 即“微花岗岩类包体”, 它们的分布也不均匀<sup>[4]</sup>. 在佛冈复式岩基中心石岭(恶鸡脑)出现的方钠石正长岩碱性岩体<sup>[5]</sup>, 其角闪石以  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$ 法测得的年龄为  $(127.5\pm 1.2)\text{Ma}$ <sup>[6]</sup>, 可能代表该侵入体的冷却年龄, 由锆石 SHRIMP U-Pb 法获得的年龄为  $(137\pm 2)\text{Ma}$ , 代表该侵入体的结晶年龄<sup>[7]</sup>. 该碱性岩体, 面积约  $9\text{km}^2$ , 矿物组成如表 1, 它恰好位于隐伏的佛冈-河源-丰顺深断裂带上. 在佛冈花岗岩主体南侧, 出露约  $200\text{km}^2$  的南昆山 A 型碱性长石花岗岩 (单颗粒锆石 U-Pb 年龄  $147\text{Ma}$ <sup>[2]</sup>).

乌石闪长岩-角闪辉长岩岩体位于佛冈复式岩基的东北部, 周围有数个岩性相同的小岩体, 出露面积约  $4\text{km}^2$  (图 1). 与乌石岩体接触的佛冈花岗岩主体

表 1 佛冈复式岩基矿物含量(单位: vol%)<sup>a)</sup>

岩体 岩性	佛冈花岗岩主体				石岭碱性岩体 <sup>b)</sup>		乌石岩体	
	中粗粒斑状黑 云母花岗岩	中粒黑云母二 长花岗岩	中细粒黑云母 二长花岗岩	花岗闪长岩	碱性长石 花岗岩	方钠石正长岩	闪长岩	角闪辉长岩
石英	23~29	28	29	25~35	34		5~15	5~10
斜长石 (An)	25~35 (20~25)	28 (20)	27 (15)	30~40 (25~35)	16 (5)		35~55 (40~60)	35~55 (45~60)
钾长石	35~45	41	41	15~25	45	75	<5	
黑云母	3~8	2.5	3	5~15	4	5	5~15	5~10
角闪石				<5		8	20~25	25~35
						霓石-普通辉石<1 霞石 1 方钠石 8		次透辉石 1~2 斜方辉石 2~4

a) vol%=体积分数

b) 据文献<sup>[5]</sup>

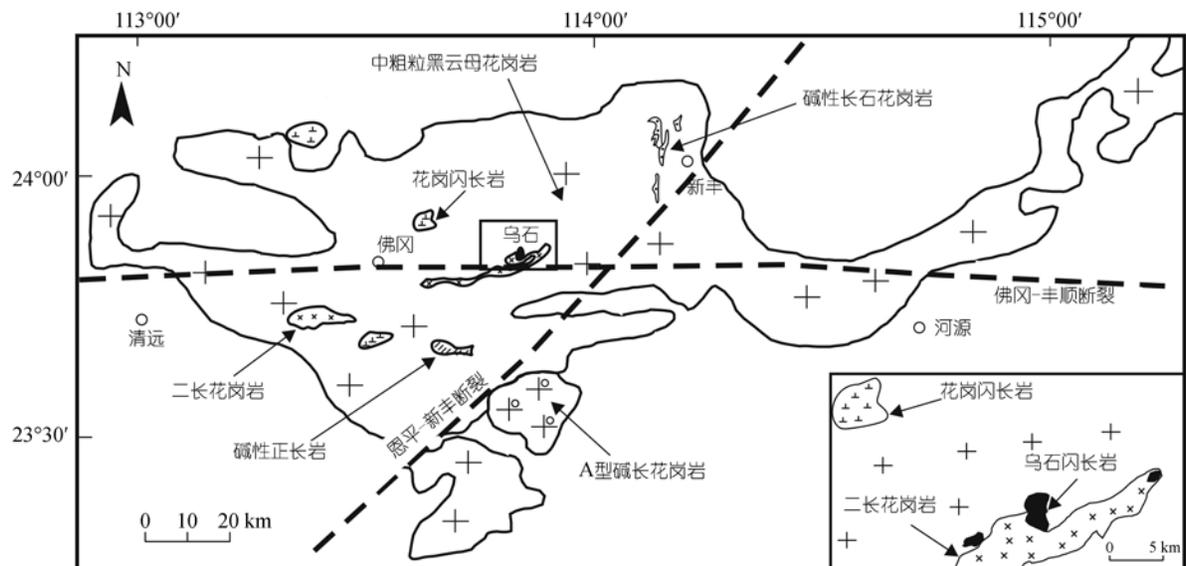


图 1 佛冈花岗岩基及石岭碱性岩体、乌石闪长岩-角闪辉长岩岩体地质简图

为黑云母花岗岩和含角闪石的花岗闪长岩。乌石岩体的岩性主要是闪长岩, 部分为与闪长岩呈渐变过渡关系的角闪辉长岩, 中细粒结构, 块状构造, 矿物组成如表 1。其中闪长岩含少量钾长石, 斜长石多为中长石, 平均  $An=47$ , 环带发育。角闪辉长岩与闪长岩相比, 粒度更细, 颜色更深, 含更多的铁镁质矿物, 含次透辉石和斜方辉石, 但不含钾长石, 斜长石中钙长石分子较高, 平均  $An=53$ , 环带发育。

### 1.2 岩石地球化学

佛冈花岗岩主体、乌石闪长岩-角闪辉长岩及佛冈复式岩基中碱性长石花岗岩、方钠石正长岩的主量分析结果如表 2。

乌石闪长岩  $SiO_2$  含量为 55%左右, 全碱( $Na_2O+K_2O$ )含量为 4.0%~4.7%; 乌石岩体中角闪辉长岩  $SiO_2$  含量更低 (49%), 但  $TiO_2$  高达 2.3%,  $FeO_7+MgO$  高达 17.4%。佛冈花岗岩主体的主量元素化学成分分析结果表明,  $SiO_2$  含量约为 67%~73%, 全碱含量为 6.5%~8.4%,  $ACNK$  值除 FG16 样品较高(为 1.14)外, 其余为 0.94~1.08。乌石岩体周围的含角闪石花岗闪长岩  $SiO_2$  含量为 67%左右, 全碱含量为 7.38%左右,  $ACNK$  值为 0.94~1.01 之间。佛冈花岗岩主体和乌石闪长岩-角闪辉长岩的里特曼指数都小于 3, 是典型的钙碱性岩石。由图 2 可见, 除了乌石岩体中  $SiO_2$  最低的角闪辉长岩属于钙碱系列外, 其它样品都落在高 K 钙碱系列区间。佛冈复式岩基中的碱性长石花岗岩  $SiO_2$  含量很高(约 77%), 全碱含量为 7.58%~8.22%左右,  $ACNK$  值为 1.05 左右。

佛冈花岗岩主体、乌石闪长岩-角闪辉长岩以及佛冈复式岩基中碱性长石花岗岩、方钠石正长岩的微

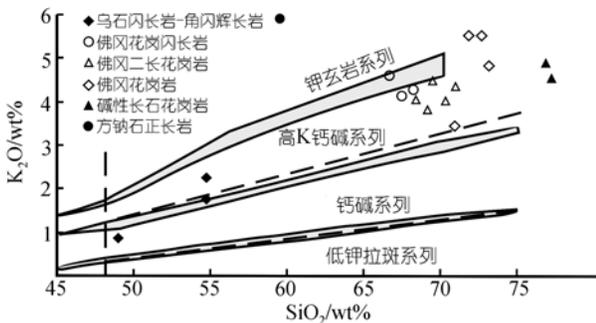


图 2 佛冈花岗岩基及乌石闪长岩-角闪辉长岩的  $K_2O-SiO_2$  图解  
岩系划分据文献[8]

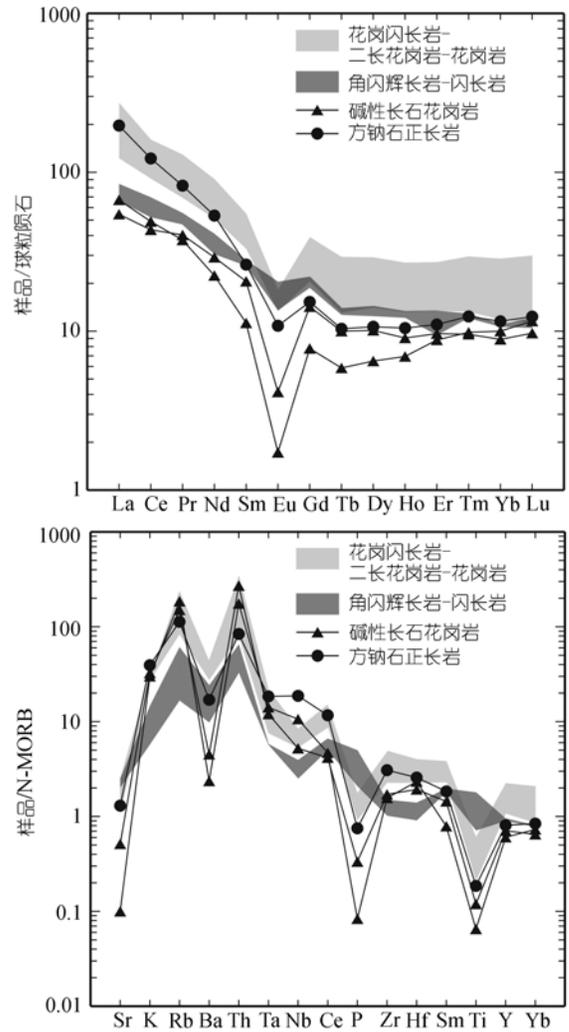


图 3 佛冈花岗岩基及乌石闪长岩-角闪辉长岩稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图解  
球粒陨石标准化值据文献[9]; N-MORB值据文献[10]

量元素分析结果如表 3。它们的稀土配分曲线及微量元素蛛网图如图 3。乌石闪长岩-角闪辉长岩具富集 Rb, Th, Ce, P, 亏损 Sr, Ba, Nb, Zr, Hf 的特征, 稀土元素总量( $\Sigma REE=131\sim 161 \mu g/g$ )和轻重稀土比( $(La/Yb)_N=5.9\sim 7.9$ )变化范围不大。稀土元素配分曲线为具弱或中等  $\delta Eu$  负异常(0.56~0.90)的右倾斜线。佛冈花岗岩主体和乌石闪长岩-角闪辉长岩相比, 具较高的稀土元素总量和轻重稀土比( $\Sigma REE=211\sim 379 \text{ ppm}$ ,  $(La/Yb)_N=5.4\sim 16.4$ )、较强的  $\delta Eu$  亏损(0.32~0.69), 在微量元素蛛网图上 Zr 和 Hf 呈正异常。碱性长石花岗岩稀土元素总量最低,  $\Sigma REE$  约  $107 \mu g/g$ ,  $(La/Yb)_N$  约为 7,  $\delta Eu$  负异常最明显(约 0.2), 在微量元素蛛网图

表2 佛冈花岗岩基及乌石闪长岩-角闪辉长岩的主量元素(单位: wt%)<sup>a)</sup>

岩体 岩性	乌石岩体			佛冈花岗岩主体													石岭碱性岩体	
	角闪辉长岩	闪长岩		花岗闪长岩			二长花岗岩					花岗岩			碱性长石花岗岩		方钠石正长岩	
样品号	FG32	FG31-2	Ws-H <sup>b)</sup>	FG33-2	FG22-1	FG34-2	FG9-1	FG15	FG2h	FG11-3h	FG17-2h	FG-zh24 <sup>c)</sup>	FG24-5	FG27	FG16	FG5-1	FG29-1	FG3-2
SiO <sub>2</sub>	48.96	54.71	54.77	68.27	66.72	67.46	68.39	69.18	69.53	70.34	70.90	73.17	70.97	71.85	72.72	76.88	77.24	59.55
TiO <sub>2</sub>	2.29	1.14	1.07	0.58	0.65	0.63	0.64	0.42	0.34	0.36	0.48	0.26	0.51	0.31	0.25	0.16	0.16	0.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.32	16.39	17.14	14.25	15.06	14.64	14.59	14.76	15.42	14.59	13.93	13.32	13.70	13.45	13.82	11.92	12.22	18.38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.86	9.32	1.60	1.29	1.25	4.60	0.93	1.11	0.49	0.85	0.53	0.71	1.14	0.85	0.58	0.48	0.09	2.15
FeO	8.69	—	6.50	3.10	3.59	—	3.81	2.20	2.35	2.05	2.90	1.76	2.37	2.27	1.60	1.03	0.83	3.20
MnO	0.18	0.18	0.19	0.07	0.08	0.11	0.07	0.07	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.03	0.03	0.07	0.17
MgO	4.86	4.32	4.34	0.90	1.44	0.98	0.94	0.85	0.57	0.75	0.77	0.45	0.87	0.34	0.32	0.13	0.08	0.47
CaO	10.26	7.63	7.72	2.74	3.12	2.92	2.83	2.38	1.95	2.30	2.11	1.44	2.58	1.44	0.76	0.79	0.43	1.69
Na <sub>2</sub> O	1.81	2.53	2.27	3.10	2.58	3.47	2.95	3.46	3.48	3.20	3.15	2.96	3.18	2.71	2.86	2.71	3.72	6.70
K <sub>2</sub> O	0.86	2.21	1.72	4.27	4.60	4.12	4.03	3.81	4.56	4.01	4.35	4.81	3.41	5.52	5.53	4.87	4.50	5.91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.60	0.25	0.32	0.16	0.21	0.16	0.18	0.10	0.11	0.09	0.16	0.07	0.17	0.09	0.15	0.04	0.01	0.09
LOI	0.75	1.56	1.88	0.95	0.61	0.66	0.53	1.41	1.09	1.18	0.39	0.65	0.78	0.79	1.26	0.81	0.44	1.23
SUM	99.44	100.24	99.52	99.68	99.91	99.75	99.89	99.75	99.94	99.78	99.74	99.66	99.74	99.68	99.88	99.85	99.79	99.87
ALK	2.67	4.74	3.99	7.37	7.18	7.59	6.98	7.27	8.04	7.21	7.50	7.77	6.59	8.23	8.39	7.58	8.22	12.61
NK/A	0.24	0.40	0.33	0.68	0.61	0.70	0.63	0.67	0.69	0.66	0.71	0.76	0.65	0.78	0.77	0.82	0.90	0.95
ACNK	0.72	0.80	0.87	0.97	1.01	0.94	1.01	1.04	1.08	1.06	1.01	1.05	1.01	1.03	1.14	1.07	1.04	0.90
$\sigma$	1.20	1.92	1.35	2.15	2.17	2.36	1.92	2.02	2.44	1.90	2.02	2.00	1.55	2.35	2.37	1.70	1.97	9.61
CMF	0.69	0.82	0.66	0.66	0.59	0.98	0.61	0.72	0.70	0.78	0.60	0.64	0.75	0.57	0.40	0.68	0.54	0.43
AMF	0.60	0.97	0.81	1.90	1.58	2.70	1.74	2.47	3.03	2.73	2.18	3.26	2.18	2.91	4.01	5.68	8.50	2.59

a) 主量元素成分由南京大学现代分析中心采用XRF方法测定, 二价铁采用湿化学法测定。“—”表示未进行分析测定; ALK=Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O; NK/A=(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>分子比; ACNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O+CaO)分子比;  $\sigma$ =里特曼指数(ALK<sup>2</sup>/(SiO<sub>2</sub>-43)); CMF=CaO/(MgO+FeO)分子比; AMF=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(MgO+FeO)分子比. wt%=质量分数

b) 引自文献[3]

c) 文献[11]中24个佛冈花岗岩成分的平均值

表3 佛冈花岗岩基及乌石闪长岩-角闪辉长岩的微量元素(单位:  $\mu\text{g/g}$ )<sup>a)</sup>

岩体 岩性 样品号	乌石岩体			佛冈花岗岩主体								石岭碱性岩体	
	角闪辉长岩	闪长岩		花岗岩闪长岩			二长花岗岩		花岗岩		碱性长石花岗岩		方钠石正长岩
	FG32	FG31-2	Ws-H	FG33-2	FG22-1H	FG34-2	FG2-1	FG17-2H	FG38-5	FGchen-18	FG5-1	FG29-1	FG3-2
Rb	33.50	122.00	95.00	263.00	236.00	274.00	167.00	310.00	481.00	370.15	301.00	371.00	226.00
Ba	197.00	485.00	370.00	608.00	630.00	686.00	734.00	552.00	578.00	880.16	90.30	47.20	340.00
Th	6.57	13.10	—	22.80	20.60	27.80	16.20	56.00	37.50	69.44	54.20	35.10	16.80
U	1.41	2.89	—	9.12	3.57	10.30	4.14	12.30	27.20	11.70	13.90	10.80	3.81
Nb	13.70	12.00	8.80	20.80	19.40	22.50	18.10	23.30	29.50	18.84	18.30	37.20	65.50
Ta	1.04	1.04	—	2.35	1.36	3.98	2.02	3.01	3.64	3.85	2.16	2.55	3.32
Pb	9.77	14.20	7.00	31.90	22.90	25.70	14.20	33.00	48.70	—	33.10	36.70	27.90
Sr	301.00	242.00	260.00	161.00	242.00	126.00	312.00	216.00	151.00	129.80	61.60	12.00	156.00
Zr	91.50	135.00	99.00	265.00	303.00	247.00	204.00	276.00	443.00	240.70	154.00	141.00	277.00
Hf	2.18	3.36	—	5.99	6.20	7.00	5.42	6.05	9.65	7.59	4.62	5.59	6.18
Ti	16148	6464	6420	3830	4509	3461	5459	2922	3520	1860	1074	584	1667
Y	28.70	26.90	—	53.30	44.70	68.00	31.60	37.80	62.90	32.41	21.20	18.10	24.20
K	7136	18338	14272	35432	38170	34187	37838	36096	—	—	40411	37340	49040
P	2620	1092	1397	699	917	699	480	699	—	—	175	44	393
La	24.20	31.10	24.40	45.10	44.80	56.60	47.70	56.80	88.00	100.56	20.00	24.60	72.30
Ce	50.30	66.50	50.30	91.50	91.20	107.00	87.40	109.00	150.00	153.49	41.60	46.90	117.00
Pr	6.42	7.27	7.59	10.20	10.60	11.50	7.55	11.90	17.70	17.54	5.52	5.13	11.30
Nd	27.10	29.20	21.80	40.50	42.10	43.10	36.60	42.40	62.10	64.49	20.70	15.90	38.00
Sm	5.96	6.48	6.18	8.56	8.59	10.20	7.65	8.14	12.70	11.03	4.75	2.60	6.06
Eu	1.78	1.35	1.18	1.31	1.50	1.29	1.58	1.24	1.38	1.16	0.36	0.15	0.94
Gd	6.13	5.74	6.74	8.66	8.37	9.35	6.32	7.20	12.00	11.00	4.36	2.38	4.67
Tb	0.81	0.74	0.77	1.22	1.14	1.31	0.76	0.95	1.70	1.36	0.58	0.34	0.60
Dy	5.48	4.75	4.95	8.82	7.44	9.41	5.37	6.41	11.10	7.26	3.85	2.47	4.06
Ho	1.14	1.03	1.11	1.91	1.55	2.14	1.12	1.37	2.29	1.34	0.77	0.59	0.89
Er	3.35	3.03	2.36	5.74	4.56	6.51	3.36	4.17	6.79	4.18	2.40	2.19	2.74
Tm	0.43	0.43	0.46	0.84	0.65	1.05	0.47	0.61	0.92	0.63	0.34	0.35	0.44
Yb	2.75	2.65	2.75	5.33	3.82	7.09	2.94	4.10	5.85	4.14	2.20	2.48	2.86
Lu	0.45	0.40	0.46	0.90	0.60	1.14	0.43	0.65	0.88	0.59	0.37	0.44	0.47
ΣREE	136.30	160.67	131.05	230.59	226.92	267.69	211.25	254.94	373.41	378.77	107.80	106.52	262.33
LREE/HREE	5.64	7.56	5.69	5.90	7.07	6.04	9.17	9.01	7.99	11.42	6.25	8.48	14.68
(La/Yb) <sub>N</sub>	5.95	7.93	6.00	5.72	7.93	5.39	10.96	9.36	10.17	16.41	6.14	6.70	17.08
δEu	0.90	0.68	0.56	0.46	0.54	0.40	0.69	0.49	0.34	0.32	0.24	0.18	0.54

a) 微量元素成分由南京大学壳幔演化与成矿作用国家重点实验室采用 Finnigan Element II ICP-MS 测定; “—”表示未进行分析测定

上 Sr, Ba, P, Ti 的亏损也最明显. 方钠石正长岩与佛冈花岗岩主体的稀土元素总量相近,  $\sum\text{REE}$  约 262  $\mu\text{g/g}$ , 轻重稀土比最大,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=17$ ,  $\delta\text{Eu}$  负异常中等 (约 0.54), 其微量元素蛛网图与碱性长石花岗岩的微量元素蛛网图总体上相似.

## 2 同位素定年

对佛冈花岗岩主体, 曾有不少 K-Ar 年龄测定数据, 得出的年龄范围较宽 (110~196 Ma)<sup>[12]</sup>. 陈小明等<sup>[13]</sup>采用全岩-矿物 Rb-Sr 等时线方法, 获得佛冈黑云母花岗岩的形成年龄为 (167.5±7.5) Ma (表 4). 包志伟等<sup>[14]</sup>采用全岩 Rb-Sr 等时线方法获得佛冈黑云母花岗岩的形成年龄为 (158±17) Ma (表 4). 因此, 佛冈花岗岩主体的形成年龄为 160 Ma 左右. 这与佛冈花岗岩主体侵入早侏罗统砂页岩的地质证据是吻合的.

对佛冈杂岩体中的乌石岩体, 黄友义等<sup>[3]</sup>利用全岩 Rb-Sr 等时线法, 获得乌石岩体形成年龄为 (198±1.3) Ma, 并认为它是早于佛冈花岗岩主体 (160 Ma) 的岩浆活动. 仔细检查他们的分析数据, 发现前 5 个样品的 Rb/Sr 比值为 0.284~0.509, 差别不大, 其中 H1 和 H3 的 Rb/Sr 比值均为 0.4, 而这两个样品的

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值竟差 3.3 倍, 令人难以置信. 据其它 3 个样品的分析结果, H1 样品的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值显然偏低. 因此, 黄友义等<sup>[3]</sup>获得的乌石岩体形成年龄 198 Ma 是值得质疑的.

为了确定乌石闪长岩-角闪辉长岩的形成年龄, 进行了矿物-全岩 Rb-Sr 等时线年龄测定 (表 4, 图 4), 并用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年 (表 5, 图 5) 进行了校验. 用 Isoplot 程序对乌石闪长岩-角闪辉长岩全岩、角闪石、斜长石 Rb-Sr 同位素数据进行计算得到的年龄为 (158.5±2.2) Ma,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.71238\pm0.00003$ , MSWD=0.087.

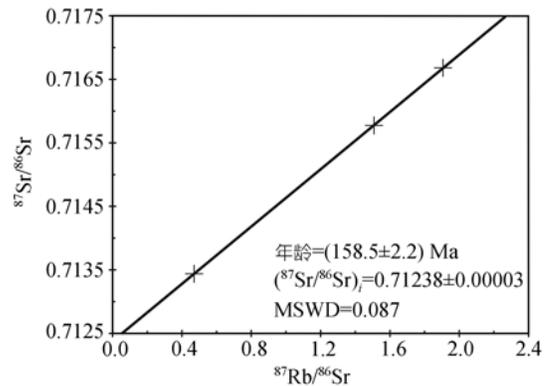


图 4 乌石闪长岩-角闪辉长岩矿物-全岩 Rb-Sr 等时线

表 4 佛冈花岗岩及乌石闪长岩-角闪辉长岩的 Rb-Sr 同位素定年<sup>a)</sup>

样品号	样品	Rb/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Sr/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	数据源
佛冈花岗岩:							
FG18-Bi	黑云母	789.2	13.32	178.3	1.13651	(167.5±7.5) Ma, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ =0.7116	[13]
FG18-Kf	钾长石	579.5	169.1	9.926	0.736024		
FG18-WR	黑云母花岗岩	393.6	136.5	8.347	0.730949		
FG8-1WR	黑云母花岗岩	343.3	46.93	21.24	0.762014		
Fu-12	粗粒黑云母花岗岩	22.2	108.8	6.08673	0.72954	(158±17) Ma, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ =0.71559	[14]
Fu-13	中粒斑状黑云母花岗岩	195.3	215.5	2.70140	0.71854		
佛-1	粗粒黑云母花岗岩	259.3	48.0	16.10649	0.75072		
Fu-8	中粒斑状黑云母花岗岩	351.8	36.0	29.12833	0.78200		
F-36	粗粒黑云母花岗岩	184.9	83.9	6.56923	0.73062		
乌石闪长岩-角闪辉长岩:							
H1	全岩	99.87	248.1	0.3558	0.712797	(198±1.6) Ma, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ =0.71180	[3]
H2	全岩	80.26	282.5	0.8307	0.714134		
H3	全岩	102.4	259.2	1.174	0.715103		
H4	全岩	114.2	263.3	1.278	0.715394		
H5	全岩	124.7	244.8	1.503	0.716027		
H6	全岩	4.951	287.6	0.0503	0.711937		
FG31-2	角闪石	50.03	75.98	1.9064	0.71668	(158.5±2.2) Ma, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ =0.71238	本文
FG31-2	闪长岩全岩	135.3	259.7	1.5082	0.715773		
FG31-2	斜长石	60.46	372.1	0.4702	0.713439		

a) 本文 Rb-Sr 同位素分析在南京大学壳幔演化与成矿作用国家重点实验室进行, 测试仪器为 Finnigan Triton TI 表面热电质谱仪

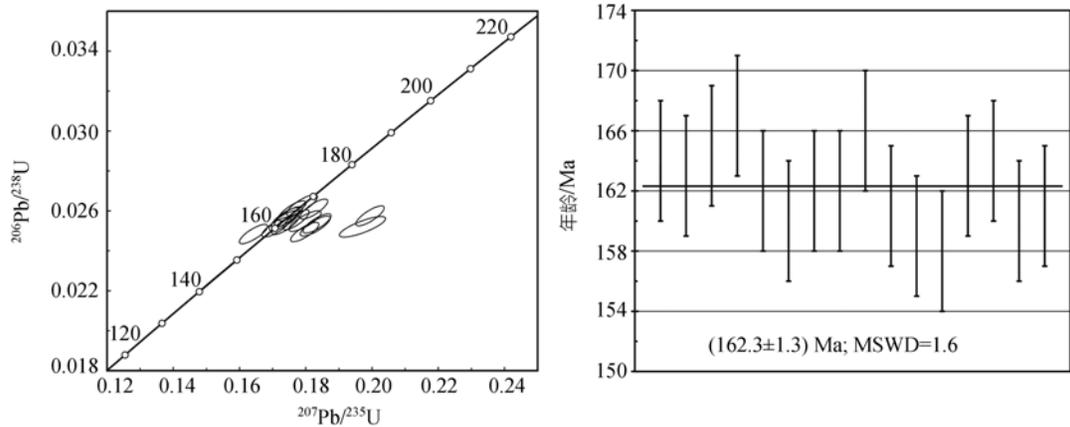


图 5 乌石闪长岩-角闪辉长岩锆石群的谐和曲线图解及加权平均年龄图解

表 5 乌石闪长岩-角闪辉长岩中锆石 U-Th-Pb 同位素定年结果

样品号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$
FG31-01	0.04929±0.00072	0.17470±0.00276	0.02571±0.00033	0.00818±0.00012	162±35	163±2	164±2	165±2
FG31-02	0.04915±0.00073	0.17388±0.00280	0.02566±0.00033	0.00819±0.00011	155±36	163±2	163±2	165±2
FG31-03	0.05003±0.00060	0.18176±0.00248	0.02635±0.00033	0.00830±0.00010	196±29	170±2	168±2	167±2
FG31-04	0.10702±0.00232	0.38962±0.00832	0.02641±0.00039	0.01340±0.00026	1749±41	334±6	168±2	269±5
FG31-05	0.04716±0.00065	0.17268±0.00264	0.02656±0.00034	0.00844±0.00011	57±34	162±2	169±2	170±2
FG31-06	0.04905±0.00070	0.1758±0.002760	0.02600±0.00033	0.00836±0.00011	150±34	164±2	165±2	168±2
FG31-07	0.04927±0.00069	0.17929±0.00277	0.02639±0.00034	0.00724±0.00011	161±34	167±2	168±2	146±2
FG31-08	0.04938±0.00079	0.17886±0.00307	0.02628±0.00035	0.00832±0.00012	166±38	167±3	167±2	167±2
FG31-09	0.04931±0.00080	0.17344±0.00298	0.02551±0.00033	0.00806±0.00012	163±39	162±3	162±2	162±2
FG31-10	0.04927±0.00076	0.17112±0.00288	0.02519±0.00033	0.00803±0.00011	161±37	160±2	160±2	162±2
FG31-11	0.05115±0.00086	0.17977±0.00323	0.02549±0.00034	0.00806±0.00012	248±40	168±3	162±2	162±2
FG31-12	0.04915±0.00057	0.18054±0.00241	0.02665±0.00033	0.00830±0.00010	155±28	169±2	170±2	167±2
FG31-13	0.05244±0.00073	0.18340±0.00280	0.02537±0.00032	0.00810±0.00010	305±32	171±2	162±2	163±2
FG31-14	0.05073±0.00069	0.18243±0.00277	0.02609±0.00033	0.00807±0.00010	229±32	170±2	166±2	162±2
FG31-15	0.04985±0.00069	0.17386±0.00267	0.02530±0.00032	0.00787±0.00010	188±33	163±2	161±2	158±2
FG31-16	0.05227±0.00075	0.17969±0.00282	0.02494±0.00032	0.00783±0.00011	297±33	168±2	159±2	158±2
FG31-17	0.04795±0.00077	0.16421±0.00282	0.02484±0.00032	0.00785±0.00011	97±39	154±2	158±2	158±2
FG31-18	0.05028±0.00066	0.17705±0.00263	0.02555±0.00033	0.00798±0.00010	208±31	166±2	163±2	161±2
FG31-19	0.05618±0.00070	0.19940±0.00283	0.02575±0.00033	0.00801±0.00010	459±28	185±2	164±2	161±2
FG31-20	0.05676±0.00130	0.19714±0.00460	0.02520±0.00034	0.00937±0.00019	482±52	183±4	160±2	189±4
FG31-21	0.05255±0.00079	0.18287±0.00300	0.02524±0.00033	0.00763±0.00010	309±35	171±3	161±2	154±2

代表性锆石颗粒U-Pb同位素LA-ICP-MS定年在澳大利亚Macquaire大学GEMOC研究中心进行, 分析结果如表 5. 分析方法、数据处理和铅校正方法见徐夕生等[15]. 21 颗锆石都投影在谐和曲线上或谐和曲线附近, 其中 16 颗谐和锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为(162.3±1.3) Ma(图 5). 显然, 乌石闪长岩-角闪辉长岩中锆石U-Pb同位素定年结果与该岩体全岩-角闪石-斜长石Rb-Sr同位素定年结果是基本一致的, 即乌石闪长岩-角闪辉长岩的形成年龄为 160 Ma 左右, 与

佛冈花岗岩基主体是同时期岩浆作用的产物.

### 3 岩浆起源

#### 3.1 源岩性质判别

岩浆成分差异可由不同源岩的部分熔融所致. 与变质泥质岩起源的熔体相比, 由变质玄武岩和安山岩部分熔融起源的熔体具低  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 、高  $\text{CaO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$  的特征[16]. 在由实验岩石学资料建立的相应的判别图解上(图 6), 佛冈花岗岩主体基本

上落入变质杂砂岩区, 但其中花岗闪长岩落入变质杂砂岩和变质玄武岩或变质英云闪长岩重叠区, 乌石闪长岩-角闪辉长岩则明显落入变质玄武岩或变质英云闪长岩区. 因此, 佛冈花岗岩主体和乌石闪长岩-角闪辉长岩的源区成分是有明显差别的.

岩浆岩的 Sr-Nd 同位素可用作示踪源岩物质成分, Nd 模式年龄通常代表其源区物质最初从地幔储库中分异出来的时间. 为了进一步认识佛冈花岗岩主体和乌石闪长岩-角闪辉长岩的源区成分特征, 我们选择代表性的岩石进行了 Sr-Nd 同位素分析(表 6). 所有样品的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  均以 160 Ma 进行了计算, 同时对它们分别进行了单阶段和两阶段 Nd 模式年龄计算.

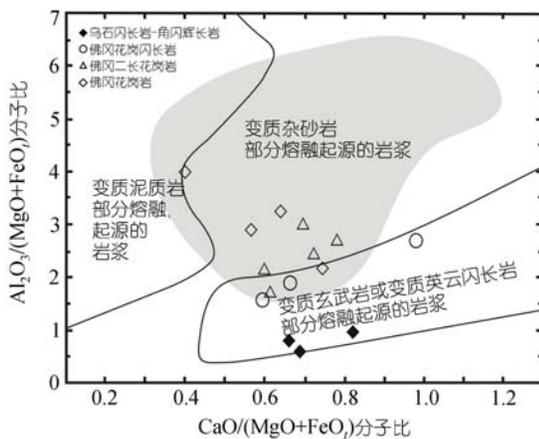


图 6 不同成分岩浆的源岩判别图解(据文献[16])

总体上看, 除了碱性长石花岗岩(FG29-1)的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 明显低于球粒陨石值(0.69897)外, 其余的佛冈花岗岩主体具较高的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值(0.70871~0.71570),  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化于-5.11~-8.93, 显示出壳源花岗岩的 Sr-Nd 同位素特点, 在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $t$  图(图 7)上, 位于南岭地区前寒武纪地壳演化区域[17]上部边缘, 反映它们是由成熟度较低的地壳物质熔融形成的, 或者是在其形成过程中有年轻地幔物质的加入. 它们的两阶段 Nd 模式年龄介于 1.37~1.68 Ga, 虽低于本区地壳基底的 Nd 模式年龄峰值(1.7~1.8 Ga), 但也表明源区物质可能是中元古代地壳. Sm-Nd 同位素体系有较强的抗热扰动能力, 因此,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  的不均匀性, 可能反映巨大的佛冈花岗岩主体的源区组成是不均匀的, 不同部位源区物质部分熔融产生的岩浆也没有达到同位素均一化; 同时, 巨大的佛冈花岗岩主体在

形成过程中可能有地幔物质的不均匀混合. 陈江峰等[18]在研究中国东南部花岗岩的 Nd 模式年龄时, 注意到横跨佛冈花岗岩主体的恩平-新丰断裂带中生代花岗岩具有低的 Nd 模式年龄, 并指出可能与地幔物质的混入有关.

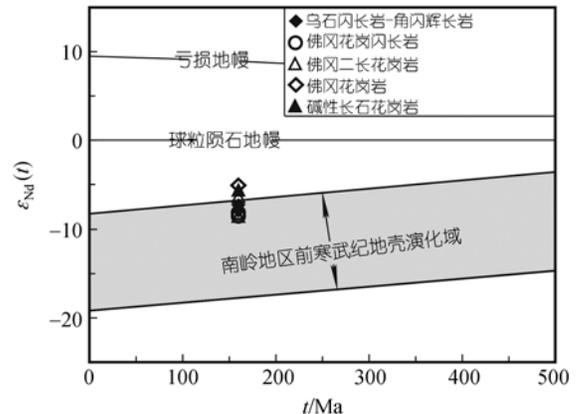


图 7 佛冈花岗岩主体、碱性长石花岗岩和乌石闪长岩-角闪辉长岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $t$  图

对于碱性长石花岗岩(FG29-1)样品, 仔细检查岩石薄片, 没有发现蚀变现象. 因此, 产生( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 明显低于球粒陨石值这种不合理现象的原因可能是因为样品具很高的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值, 放射性衰变产生的  $^{87}\text{Sr}$  很多, 衰变校正时微小的偏差有可能使获得的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值明显偏低, 相邻的连阳花岗岩体、冒峰岩体也有这种 Sr 同位素特征[19,20].

乌石闪长岩-角闪辉长岩 Sr-Nd 同位素初始值和 Nd 同位素模式年龄计算结果为( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>=0.71256~0.71318,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ =-7.32~-7.92,  $T_{2\text{DM}}$  为 1.54~1.59 Ga. 虽然其 Sr-Nd 同位素初始值和 Nd 同位素模式年龄值在佛冈花岗岩主体的变化范围内, 但不能说明其源岩为沉积变质岩, 因为沉积变质岩难以衍生如此低 Si, 高 Fe, Mg 的中基性岩浆. 这种主量元素和 Sr-Nd 同位素特征可能说明它们的源岩与富集的岩石圈地幔或具相似同位素特征的变质中基性火成岩有关.

### 3.2 佛冈花岗岩的起源

佛冈花岗岩主体的高 Si、富碱、准铝主量元素特征和上述 Sr-Nd 同位素地球化学特征, 说明它主要来源于地壳物质的部分熔融, 并有地幔物质的加入. 关于佛冈花岗岩的起源, 有过很多讨论[11~14]. 陈小明等[13]

讨论了佛冈花岗岩形成的地球动力学环境, 认为其岩浆起源可能受晚中生代古太平洋板块(向西)与欧亚大陆俯冲和菲律宾地块(向北)与中国-印支大陆边缘碰撞的联合制约。Zhou等<sup>[21]</sup>通过华南花岗岩的研究, 认为自中侏罗纪开始, 古太平洋板块对欧亚大陆板块的消减, 使华南地壳处于伸展应力环境, 并先后经历了两个时期, 即燕山早期的板内岩浆活动期和燕山晚期的陆缘弧岩浆活动期。它们是大洋板片对大陆消减过程中伸展造山的早、晚两个时期。地壳的伸展-减压熔融和作为热源的玄武岩浆对下地壳的底侵, 是产生燕山期花岗岩浆的两个主要原因。因此, 由古太平洋板块俯冲诱导的软流圈的上涌和幔源岩浆作用促使本区中-下地壳部分熔融, 形成了巨量的长英质岩浆-佛冈花岗岩主体。晚中生代晚期, 本区岩石圈进一步伸展, 形成了后续的壳幔混合源A型花岗岩岩浆和幔源的碱性岩岩浆, 构成了佛冈杂岩体复杂的岩性组合。

### 3.3 乌石闪长岩-角闪辉长岩的起源

乌石闪长岩-角闪辉长岩主量元素具低 Si(49%~55%)、高 Fe, Mg, Ca 的特征, 虽然其 Sr 同位素组成和周围佛冈花岗岩相似, 但它们的微量元素、稀土元素特征存在明显的差异, 如不同的稀土总量、不同的  $\delta\text{Eu}$  负异常、相反的 Zr 和 Hf 异常等。此外, 佛冈复式岩基出露的是大面积的酸性花岗岩, 中性岩石面积所占比例小于 1%, 基性岩更少。乌石岩体出露面积不足佛冈花岗岩主体出露面积的 1%。因此, 乌石闪长岩-角闪辉长岩与佛冈花岗岩不是岩浆结晶分异作用的产物, 用地幔部分熔融产生的基性岩浆与佛冈花岗岩岩浆的混合也很难解释其微量元素特征。

由富集地幔部分熔融可以产生这种高( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值闪长质-角闪辉长质岩浆。南岭北侧(湘南和赣南)晚中生代来自于软流圈和富集岩石圈地幔的玄武岩的同位素特征为 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> < 0.7090,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  > -1<sup>[22-24]</sup>; 南岭南侧桂东南、粤西由软流圈地幔与富集岩石圈地幔岩浆混合形成的 165 Ma 的钾玄岩和正长岩的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.7032~0.7082,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  = -4.07~-5.45<sup>[24,25]</sup>。乌石闪长岩-角闪辉长岩的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.71256~0.71318,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  = -7.32~-7.92, 因此, 乌石闪长岩-角闪辉长岩应起源于 Sr-Nd 同位素更为富集的岩石, 或者是来自富集地幔的岩浆比例较高。

具高( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值的闪长岩很少见, Jung等<sup>[26]</sup>在

研究 Namibia Damara 造山带中的闪长岩时, 发现其同位素具高 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值 (0.7094~0.7129)、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  = -9.1~-15.2。通过微量元素、Sr-Nd-Pb-O 同位素研究和岩浆分异结晶混染模拟, 认为这种高 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值的闪长岩起源于铁镁质下地壳物质的熔融。乌石闪长岩-角闪辉长岩和 Damara 造山带中闪长岩的同位素地球化学特征有相似之处。实验岩石学研究表明 (Jung 等<sup>[26]</sup>及相关参考文献), 位于下地壳的玄武质岩石脱水部分熔融可以形成镁铁质熔体, 它们具低 Si、高 Al、中高 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O、弱或无 Eu 负异常等特征, 这些特征正是乌石闪长岩-角闪辉长岩的元素地球化学特征。但实验岩石学研究<sup>[27-29]</sup>同时也表明, 由变质玄武岩脱水熔融形成低 Si 准 Al 铁镁质熔体需要超过 ~1100°C 的熔融温度。不管部分熔融程度如何, 熔体一般具低 Mg<sup>#</sup> [=100×MgO/(MgO+0.9FeO)<sub>i</sub> 分子数] (<44.0)、高 Na<sub>2</sub>O (>4.3 wt%) 的特征。在 1.0 GPa 以下的压力下, 熔体与麻粒岩残留物(单斜辉石、斜长石、斜方辉石、橄榄石)共存, 在更高压力下与石榴石麻粒岩或榴辉岩残留物共存<sup>[29]</sup>。乌石闪长岩-角闪辉长岩的 Mg<sup>#</sup> 值较高 (43.41~51.49), Na<sub>2</sub>O 较低 (<2.53 wt%), 轻重稀土比较低 ((La/Yb)<sub>N</sub> = 5.9~7.9), 重稀土配分曲线平坦 (即 (Tb/Yb)<sub>N</sub> ≈ 1)。因此, 即便乌石闪长岩-角闪辉长岩的源岩涉及下地壳变质玄武岩, 那么熔融压力也应在 1.0 GPa 以下, 并且必须有高 Mg 而低 Na 物质的混入, 而后者最可能是由富集地幔新生的幔源玄武质岩浆。

综合上述主量元素、Sr-Nd 同位素源岩性质判别讨论及其与实验岩石学资料的对比, 初步认为乌石闪长岩-角闪辉长岩岩浆是富集地幔部分熔融产生的新生幔源玄武质岩浆与下地壳玄武质岩石脱水部分熔融形成岩浆的混合物。两种源岩的混合比例, 有待于进一步研究。这一初步结论, 还得到如下佐证。

本区自中侏罗世起, 随着造山带崩塌、岩石圈的伸展和减薄, 处于拉张构造地质背景<sup>[14,30]</sup>, 软流圈的上涌<sup>[31,32]</sup>使本区具高的热流值, 同时使地幔部分熔融形成幔源玄武质岩浆, 并促使元古代下地壳玄武质岩石(由约 1.8 Ga 的地壳增生事件形成)在低压下脱水部分熔融。正是由于新生幔源玄武质岩浆的作用, 乌石闪长岩-角闪辉长岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值位于南岭地区前寒武纪地壳演化范围<sup>[17]</sup>上方, Nd 模式年龄  $T_{2\text{DM}}$  为 1.55 Ga 左右, 低于华南中生代花岗岩的 Nd 模式年龄

表 6 佛冈花岗岩及乌石闪长岩-角闪辉长岩的 Sr-Nd 同位素分析<sup>a)</sup>

样品号	样品	Rb / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Sr / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Nd / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}(t)}$	$T_{1\text{DM}}$ /Ga	$T_{2\text{DM}}$ /Ga	数据源
乌石闪长岩-角闪辉长岩:																
FG32	角闪辉长岩	31.11	286.7	0.3141	0.713898	13	0.71318	6.208	26.72	0.1405	0.512204	13	-7.32	2.08	1.54	本文
FG31-2	闪长岩	106.3	247.1	1.245	0.715397	11	0.71256	5.941	28.11	0.1278	0.512160	12	-7.92	1.86	1.59	本文
佛冈花岗岩:																
FG33-2	花岗闪长岩	254.0	142.9	5.153	0.725100	12	0.71338	8.501	39.25	0.1310	0.512150	13	-8.18	1.95	1.61	本文
FG22-1H	花岗闪长岩	230.6	217.4	3.072	0.718193	12	0.71121	8.552	40.59	0.1274	0.512128	13	-8.53	1.91	1.64	本文
FG2-1H	二长花岗岩	304.2	122.7	7.188	0.729837	8	0.71349	9.087	44.61	0.1232	0.512124	12	-8.53	1.83	1.64	本文
FG17-2H	二长花岗岩	256.5	157.3	4.722	0.719450	11	0.70871	7.016	38.34	0.1106	0.512221	12	-6.38	1.47	1.47	本文
FG38-5	花岗岩	466.5	130.4	10.38	0.732361	11	0.70876	11.41	51.26	0.1345	0.512311	13	-5.11	1.74	1.37	本文
FG29-1	碱性长石花岗岩	326.3	9.546	100.1	0.834369	12	0.60660	3.657	18.73	0.1181	0.512262	12	-5.74	1.52	1.42	本文
FG18-WR	黑云母花岗岩	393.6	136.5	8.347	0.730949	19	0.71113	11.15	64.94	0.1039	0.512079	10	-8.93	1.58	1.68	[13]
FG8-1WR	黑云母花岗岩	343.3	46.93	21.24	0.762014	15	0.71159	8.91	64.3	0.0838	0.512197	13	-6.20	1.21	1.46	[13]
LY-5	中粒黑云母花岗岩							11.33	54.39	0.127	0.512164	14	-7.83	1.84	1.59	[14]
Fu-12	粗粒黑云母花岗岩	22.2	108.8	6.08673	0.72954		0.71570	10.187	64.835	0.09504	0.512095	4	-8.52	1.44	1.64	[14]

a) 本文 Sr-Nd 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。同位素比值测定采用德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电质谱计。Nd 同位素比值测定采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$  进行质量分馏校正, 对 BCR-1 测定的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512638\pm 30$  ( $2\sigma$ ); Sr 同位素比值测定采用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$  进行质量分馏校正, 对 NBS987 测定的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710226\pm 12$

峰值(1.7~1.8 Ga).

因此, 虽然乌石闪长岩-角闪辉长岩与佛冈花岗岩主体总体上均属高钾钙碱系列岩石, 并形成于同一时期(160 Ma), 但不是岩浆结晶分异的产物, 而是由两种起源不同的岩浆结晶形成的. 在拉张构造地质背景下, 软流圈的上涌使本区地幔部分熔融形成幔源玄武质岩浆, 并高温烘烤(>1100°C)元古代下地壳玄武质岩石及其上覆成熟度较低的地壳物质, 由于两者熔点不同, 形成少量的闪长岩-角闪辉长岩和巨大的佛冈花岗岩主体; 同时, 由于源区成分和幔源岩浆混入的程度不同, 造成主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素成分的变化.

#### 4 结论

佛冈花岗岩主体的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值变化于 0.70871~0.71570,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化于 -5.11~-8.93, 显示出壳源花岗岩的 Sr-Nd 同位素特点. 它们的两阶段 Nd 模式年龄介于 1.37~1.68 Ga, 虽低于本区地壳基底的 Nd 模式年龄峰值(1.7~1.8 Ga), 但仍表明源区物质可能是中元古代地壳. ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和 Nd 模式年龄值的不均匀性, 可能反映巨大的佛冈花岗岩主体的源区组成是不均匀的, 不同部位源区物质部分熔融产生的岩浆也没有达到同位素均一化, 在其形成过程中可能有地幔物质的不均匀混合.

乌石闪长岩-角闪辉长岩的全岩-角闪石-斜长石 Rb-Sr 同位素定年和该岩体中锆石 U-Pb 同位素定年结果表明, 乌石闪长岩-角闪辉长岩的形成年龄为 160 Ma, 与佛冈花岗岩主体是同时形成的, 属同一次构造-岩浆活动事件.

乌石闪长岩-角闪辉长岩的 Sr-Nd 同位素特征为 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>=0.71256~0.71318,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ =-7.32~-7.92, 是一种少见的高  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值, 低  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值含角闪石钙碱性铁镁质岩石, 它可能由地幔部分熔融产生的新生幔源玄武质岩浆与下地壳玄武质岩石脱水部分熔融产生的岩浆混合形成.

**致谢** 中国科学院地质与地球物理研究所陈福坤研究员帮助进行了 Sr-Nd 同位素分析. 编委及评审专家对本文提出了十分有益的修改意见. 在此一并表示感谢.

#### 参 考 文 献

- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 广东龙口南昆山铝质 A 型花岗岩
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 广东南昆山 A 型花岗岩定年和环带云母研究. 地质论评, 2005, 51(2): 193—200
- 黄友义, 庄文明, 陈绍前, 等. 广东乌石岩体的地质地球化学特征及形成年代. 广东地质, 2000, 15(3): 13—19
- 徐夕生, 周新民, 王德滋. 花岗岩中的钾长石巨晶: 以南岭佛冈花岗质杂岩体中微斜长石巨晶为例. 高校地质学报, 2002, 8(2): 121—128
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 广东从化方钠石正长岩矿物学特征及成因. 矿物学报, 2002, 22(3): 261—269
- 周玲棣, 赵振华, 周国富, 等. 我国一些碱性岩的同位素年代学研究. 地球化学, 1996, 25(2): 162—171
- 王强, 赵振华, 简平, 等. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. 岩石学报, 2005, 21(3): 795—808
- Rollinson H. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Singapore: Longman, 1993. 56
- Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1985
- Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth C J, Norry M J, eds. Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Nantwich: Shiva, 1983. 230—249
- 庄文明, 陈绍前, 黄友义. 佛冈复式岩体地质地球化学特征及其成岩源岩. 广东地质, 2000, 15(3): 1—12
- 赵子杰, 马大拴, 林惠坤, 等. 广东龙窝、佛冈花岗岩体地球化学特征及其地质背景. 见: 宜昌地质矿产研究所编. 南岭地质矿产科研报告集(第一辑). 武汉: 武汉地质学院出版社, 1987. 28—68
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因. 高校地质学报, 2002, 8(3): 293—307
- 包志伟, 赵振华. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探. 地质地球化学, 2003, 31(1): 52—61
- 徐夕生, 邓平, O'Reilly S Y, 等. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义. 科学通报, 2003, 48(12): 1328—1334
- Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). Lithos, 2000, 50: 51—73[DOI]
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 等. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(12): 1209—1218
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 等. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. 南京大学学报(自然科学), 1999, 35(6): 649—658
- 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 等. 粤北帽峰花岗岩体地球化学特征及成因研究. 岩石学报, 2005, 21(3): 677—687
- 高剑峰, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 粤西连阳复式岩体的地球化学特征及其成因研究. 岩石学报, 2005, 21(6): 1645—1656
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic

- granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 2006, 29(1): 26—33
- 22 赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28 (增刊): 7—14
- 23 Wang Y J, Fan W M, Guo F, et al. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implication for the lithosphere boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks. *Int Geol Rev*, 2003, 45: 263—286
- 24 Li X H, Chung S L, Zhou H W, et al. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-Eastern Guangxi:  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for tectonic of SE China. In: Malpas J, Fietcher C J N, Ali J R, et al., eds. *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. London: Geological Society Special Publication, 2004, 226. 193—215
- 25 王岳军, 廖超林, 范蔚茗, 等. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义. *地球化学*, 2004, 33(2): 109—117
- 26 Jung S, Hoernes S, Mezger K. Synorogenic melting of mafic lower crust: Constraints from geochronology, petrology and Sr, Nd, Pb and O isotope geochemistry of quartz diorites (Damara orogen, Namibia). *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143(5): 551—566
- 27 Wolf M B, Wyllie J P. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 115: 369—383[DOI]
- 28 Rapp R P. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition, and source permeability. *J Geophys Res*, 1995, 100: 15601—15610[DOI]
- 29 Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust–mantle recycling. *J Petrol*, 1995, 36: 891—931
- 30 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. *科学通报*, 1999, 44(18): 1992—1998
- 31 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J<sub>2</sub> 早期玄武岩. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(7): 587—605
- 32 徐夕生, 谢昕. 中国东南部晚中生代–新生代玄武岩与壳幔作用. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 318—334