

赣南古家营盆地英安岩时代、成因及对早古生代构造演化的制约

张山¹, 巫建华², 刘帅^{1,2*}, 杨东光², 马树松², 祝东¹

ZHANG Shan¹, WU Jianhua², LIU Shuai^{1,2*}, YANG Dongguang², MA Shusong³, ZHU Dong¹

1. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室, 江西 南昌 330013

1. College of Earth Science, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China

摘要:华南板块早古生代的构造属性是长期存在争议的重大地质问题。以赣南古家营盆地英安岩作为研究对象,通过岩石学、野外实测剖面的测量、SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、主微量元素及 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析,对其岩石类型、地层归属、成因及构造环境进行了研究。结果表明:该火山岩具有富硅、富钾、低钠、贫镁的特点,属于高钾钙碱性英安岩;轻重稀土元素分馏明显($La/Yb=5.52\sim 15.08$),富集大离子亲石元素 Rb、Th、K,亏损高场强元素 Ta、Nb 及呈现明显的负 Eu 异常,显示出火山弧的特征;SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分析结果为 439.0 ± 4.0 Ma,与南迳英安岩、安山岩年龄一致,均为晚奥陶世末期—早志留世初期岩浆活动的产物,古家营剖面与南迳盆地乔子山标准剖面及中寨标准剖面相似,为一套灰白色英安岩、流纹岩、火山碎屑岩、浅变质岩系组合,在地层上归属于南迳组;负的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值 ($-6.5\sim -6.3$)、较小的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值 ($0.70624\sim 0.70704$)、较年轻的 T_{DM2} ($1685\sim 1703$ Ma),以及较高的 $(^{206}Pb/^{204}Pb)_i$ 、 $(^{207}Pb/^{204}Pb)_i$ 、 $(^{208}Pb/^{204}Pb)_i$ 值,指示古家营英安岩为中元古代地壳物质部分熔融形成。古家营英安岩形成于与俯冲有关的岛弧环境,赣南—粤北地区在晚奥陶世—早志留世存在洋陆俯冲作用。

关键词: 英安岩;加里东期;地球化学;锆石 U-Pb 年龄;同位素;古家营盆地;南迳组;江西

中图分类号: P588.14⁺2;P534.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)09-1459-17

Zhang S, Wu J H, Liu S, Yang D G, Ma S S, Zhu D. Age and genesis of dacite in Gujiaying Basin, southern Jiangxi Province, and its constraints on Early Paleozoic tectonic evolution. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9): 1459-1475

Abstract: The Early Paleozoic tectonic property of the South China Plate has been a major dispute for a long time. The dacite intrusive in the Gujiaying Basin in southern Jiangxi was selected as a case to study its rock type, strata attribution, genesis and structural environment based on petrology, field-measured profile measurement, SHRIMP zircon U-Pb chronology, major trace elements and Sr-Nd-Pb-O isotopic analysis. The analysis results show that the volcanic rock is rich in silicon and potassium, low in sodium, and poor in magnesium, and belongs to the high-K calc-alkaline dacite. Its light and heavy REE show obvious fractionation ($La/Yb=5.52\sim 15.08$), and it is rich in lithophile elements Rb, Th, K, loss of high field strength elements Ta, Nb, with obvious negative Eu anomalies, showing the characteristics of volcanic arc. SHRIMP zircon U-Pb dating yields 439.0 ± 4.0 Ma, similar to that of Nanying dacite and andesite, suggesting products of magmatic activity from the Late Ordovician to the Early Silurian. The Gujiaying section is similar to the

收稿日期:2020-02-27;修订日期:2020-07-03

资助项目:国家自然科学基金项目《赣南—粤北相邻区河南—南迳加东期火山岩研究与铀成矿关系》(批准号:41662006)、《相山铀矿田深部地质环境三维建模与多元地学信息融合分析研究》(批准号:41862013)

作者简介:张山(1995-),男,在读硕士生,从事矿产普查与勘探工作。E-mail:136756869@qq.com

* 通信作者:刘帅(1978-),男,博士,副教授,从事矿产普查与勘探工作。E-mail:liushuai7821@163.com

Qiaozishan standard section and the Zhongzhai standard section in the Nanjing Basin. It is a set of gray-white dacite, rhyolite, volcanic clastic rock, and shallow metamorphic rock series, which belongs to the Nanjing Formation. The negative $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value ($-6.5 \sim -6.3$), lower $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ value ($0.70624 \sim 0.70704$), younger T_{DM2} ($1685 \sim 1703$ Ma), and higher values ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ and ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$, indicating that the Gujiaying dacite was formed by partial melting of the Mesoproterozoic crustal material. It is inferred that the Gujiaying dacite was formed in an island-arc environment related to subduction, and ocean-continent subduction existed in southern Jiangxi-northern Guangdong during the Late Ordovician-Early Silurian period.

Key words: dacite; Caledonian; geochemistry; zircon U-Pb age; isotopes; Gujiaying Basin; Nanjing Formation; Jiangxi Province

华南地区经历了加里东运动已经得到广泛认可,但是对华南早古生代构造属性的认识一直存在争议。争议的焦点是:华南早古生代造山运动是陆内造山还是俯冲-碰撞造山?解决这一争议的关键性证据为是否存在同期岛弧火山岩及蛇绿岩。由于早期华南板块缺少早古生代火山岩的报道,原认为属于早古生代沿政和-大埔断裂、江绍断裂带、皖南-赣东北、江西新余等分布的加里东期蛇绿岩套,后经锆石 U-Pb 年龄测定,基性岩-超基性岩均显示新元古代年龄信息,大部分学者更赞同陆内造山作用观点^[1-7];近期随着对华南地区研究的深入,在赣南-粤北一带发现了与俯冲有关的火山岩^[8-10],桂东南和粤北一带也存在中酸性岛弧火山岩^[11-14],彭松柏等^[15]在桂东南岑溪糯垌一带发现了早古生代蛇绿岩残片,部分学者认为,华南板块早古生代造山运动的性质更倾向于俯冲-碰撞造山^[8-26]。对此问题目前还没有形成统一的认识,华南板块早古生代的构造属性如何,还需要进一步的研究。

古家营盆地位于南岭构造带东部,是研究华南地层划分、岩浆活动、构造环境等地质问题的重要区域。易立文等^[8]对河口、上洞(次)火山岩做过研究,但因盆地内岩石受到强烈风化,出露较差,无法判断其为英安岩或是英安斑岩,影响了对赣南-粤北一带早古生代构造属性的探讨。本文在前人研究的基础上,选择古家营地区的岩浆岩作为研究对象,通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年、地球化学研究、野外地质研究及实测剖面测量,对其时代、地层归属、岩石成因及构造环境进行了分析,可为探讨华南早古生代构造背景提供新资料。

1 区域地质背景及火山岩岩石学特征

华南板块在大地构造位置上位于欧亚板块的东南部,由东南侧的华夏古板块与西北部的扬子古板块在古生代沿绍兴-江山-萍乡最终拼合

而成^[4, 27-28]。

在中一新元古代,扬子古板块与华夏古板块沿钦-杭断裂碰撞,其原因可能是华夏古板块向扬子古板块的俯冲运动所致,此次运动使华南海东部完全闭合,但是华南海西部仍存在一个延续到加里东期的古洋盆,这是华南板块发生的第一次拼合事件^[28-30]。在新元古代晚期(约 825 Ma),全球 Rodinia 超大陆开始裂解,受其影响,华南板块开始裂解,形成武夷、云开、赣中南 3 个地块,各地块之间以裂谷和深海(洋)槽相分隔,同时还发现碎屑岩的堆积^[3, 31]。

早古生代的加里东运动对华南板块的构造演化起十分重要的作用,影响华南板块的基本构造格局^[32]。华南加里东运动包括台开运动、崇余运动及广西运动,且具有多幕次的特征^[33]。受该运动的影响,扬子地块向华夏地块俯冲-碰撞,导致残留洋盆不断缩减,华夏古板块的志留系沉积缺失,泥盆系不整合覆盖在更老地层之上,并随之发生一系列岩浆活动和变质事件,最终形成华南加里东期造山带^[34]。

古家营盆地位于江西省赣州市全南县南迳镇,与广东省始兴县、翁源县相邻。古家营盆地北东侧整合于上奥陶统龙头寨群之上,西南侧被印支早期下庄岩体和印支晚期冒峰花岗岩体侵入破坏(图 1)。古家营盆地岩石受到强烈风化影响,导致出露不好,同时由于技术方法的限制,缺少准确的年龄数据,一直以来被认为是中生代火山岩系的一部分,或被归为余田群(早-中侏罗世),或被归为武夷群(晚侏罗世)。近期研究发现,赣南南迳-粤北司前一带出露的火山岩在地质年代上不属于中生代,而应属于早古生代火山岩系的一部分^[8-9, 35-37],归属于南迳组。古家营盆地南迳组火山岩主要为一套灰白色英安岩、灰褐色流纹岩、灰白色英安质晶屑熔结凝灰岩及灰白色英安质凝灰岩,整合于黄竹洞组炭质板岩、变质页岩之上(图 2)。

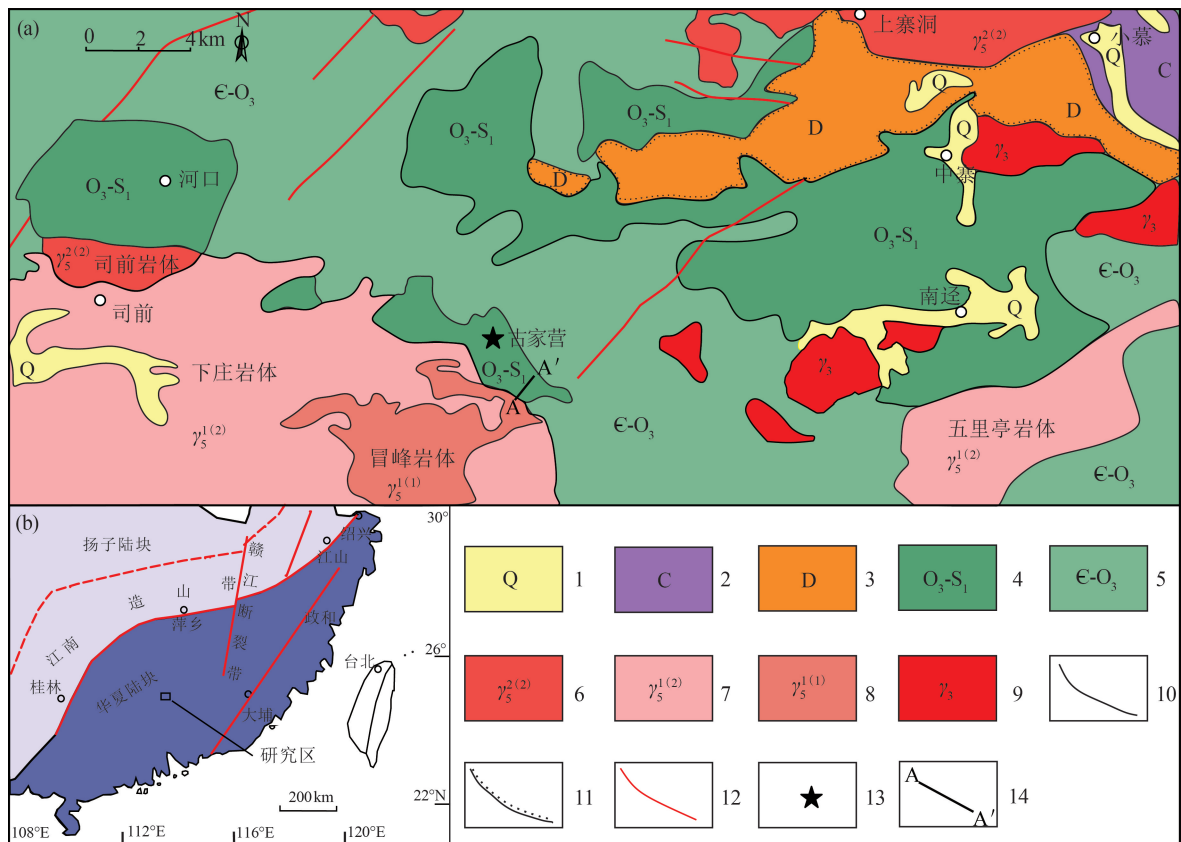


图 1 古家营盆地地质简图(a, 据参考文献[19]修改)和大地构造位置(b)

Fig. 1 Simplified geological map(a) and geotectonic location(b) of Gujiaying Basin

1—第四系; 2—石炭系; 3—泥盆系; 4—上奥陶统—下志留统火山岩; 5—寒武系—上奥陶统变质砂岩; 6—早燕山中期花岗岩; 7—印支晚期花岗岩; 8—印支早期花岗岩; 9—加里东期花岗岩; 10—地质界线; 11—角度不整合接触; 12—断层; 13—采样位置; 14—剖面位置

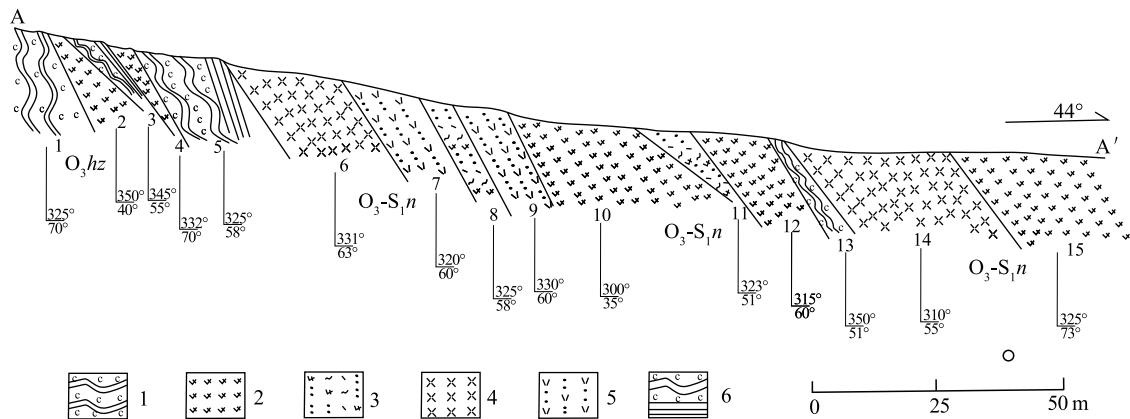


图 2 古家营盆地晚奥陶世晚期—早志留世南迳组实测剖面 A-A'

Fig. 2 Geological section A-A' of the Nanjing Formation in Gujiaying Basin

1—炭质板岩; 2—英安岩; 3—英安质晶屑熔结凝灰岩; 4—流纹岩; 5—英安质凝灰岩; 6—炭质板岩夹页岩; O_3-hz —黄竹洞组; O_3-S_1n —南迳组

古家营盆地英安岩主要出露于茅山林场、古家营村等地, 由于盆地内绝大部分英安岩受到风化蚀变的影响, 只有极少数有新鲜露头存在。古家营英安岩呈

灰白色(图 3-a, b), 具有斑状结构, 块状构造。斑晶矿物主要为石英和斜长石, 其次为钾长石; 石英斑晶占 6%~7%, 呈他形粒状, 表面较干净, 粒径长度集中

于 0.1~0.4 mm 之间,干涉色多为一级灰白,熔蚀呈不规则状(图 3-d),见波状消光现象;斜长石斑晶占 3%~5%,呈半自形板状,粒径为 0.3~0.9 mm,干涉色为一级灰,轻微绢云母化(图 3-c),常发育聚片双晶(图 3-d);钾长石斑晶占 2%~3%,呈半自形-他形,粒径长度多为 0.3~1.1 mm,干涉色为一级灰,可见卡式双晶(图 3-c);黑云母斑晶呈半自形板状,粒径长度多为 0.3~0.4 mm,发育一组完全解理,具有多色性,呈浅褐色;基质约占 80%,为隐晶质-显微晶质结构,主要由隐晶质、微晶石英和长石组成。

2 测试分析方法

2.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年

由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司进行 SHRIMP 锆石的挑选任务,取英安岩新鲜样品不少于 10 kg,破碎至 80~120 目,利用重力法、磁法挑选出锆石,最后使用双目镜筛选出晶形较完整的锆石。制靶工作在北京离子探针中心完成,并随之完

成透射光、反射光及阴极发光成像观察,随后进行 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 分析,测试仪器为 SHRIMP-II。详细分析流程及计算原理见宋彪等^[38],数据的处理分析运用 Ludwig^[39] 编写的 Squid 1.0 及 Isoplot 程序。古家营英安岩 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 分析结果见表 1。

2.2 主量和微量元素分析

古家营盆地英安岩主量元素分析在南京大学地球科学系中心实验室完成,采用湿化学方法(精度优于 1%)及 ICP-AES 方法,测试仪器为 JY38S 型电感耦合等离子体质谱仪。

全岩微量元素(包含稀土元素)在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,采用 ICP-MS 方法,测试仪器为德国生产的高分辨率电感耦合等离子体质谱仪(Finnigan Element II HRICP-MS)。样品制备及实验分析流程详见高剑峰等^[40]。古家营英安岩主量和微量元素分析结果见表 2。

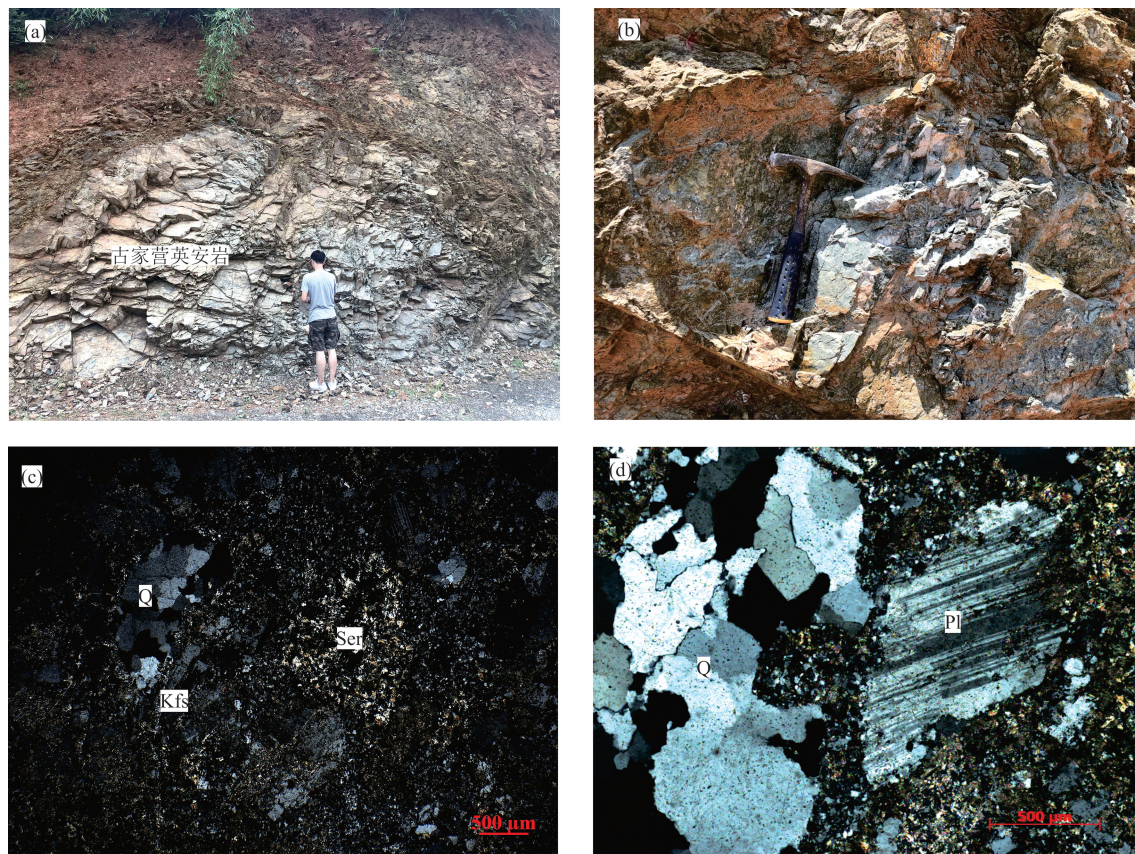


图 3 古家营英安岩野外露头及岩石学特征

Fig. 3 Outcrop and petrological characteristics of dacite in Gujiaying

a、b—英安岩野外露头照片;c—石英、钾长石、部分斜长石发生绢云母化(Ser),正交偏光;d—不规则状的石英斑晶(Q),斜长石具有明显的聚片双晶,正交偏光。Q—石英;Kfs—钾长石;Ser—绢云母;Pl—斜长石

表 1 古家营盆地英安岩 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 1 SHRIMP zircon U-Th-Pb analysis of Gujiaying dacite

点号	²⁰⁶ Pb _c /%	U /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	误差
1.1	0.35	290	134	0.48	17.8	443.8±7.4	0.530	3.9	0.0713	1.7	0.445
2.1	0.45	571	308	0.56	34.3	434.0±7.0	0.512	2.9	0.0696	1.7	0.571
3.1	1.04	274	133	0.50	16.9	443.3±7.5	0.498	5.6	0.0712	1.7	0.313
4.1	0.60	319	170	0.55	19.4	437.4±7.3	0.512	4.4	0.0702	1.7	0.392
5.1	0.31	610	390	0.66	36.6	433.5±6.9	0.510	2.6	0.0696	1.7	0.636
6.1	0.60	292	117	0.41	17.6	433.2±7.9	0.491	4.7	0.0695	1.9	0.396
7.1	0.59	288	143	0.51	17.6	441.0±7.4	0.491	4.3	0.0708	1.7	0.405
8.1	0.30	562	360	0.66	33.8	435.1±7.0	0.528	3.0	0.0698	1.7	0.559
9.1	0.34	462	261	0.58	28.4	443.3±7.2	0.517	2.4	0.0712	1.7	0.704
10.1	0.23	709	376	0.55	43.3	441.4±7.6	0.532	2.4	0.0709	1.8	0.756
11.1	0.32	362	173	0.49	22.4	446.8±7.4	0.543	3.7	0.0718	1.7	0.463
12.1	0.30	430	178	0.43	26.5	444.5±7.3	0.528	3.3	0.0714	1.7	0.520
13.1	0.16	458	260	0.59	27.6	436.7±7.2	0.527	2.8	0.0701	1.7	0.601

注: ²⁰⁶Pb_c 和 ²⁰⁶Pb* 分别表示普通铅和放射性成因铅;普通铅根据实测²⁰⁴Pb 进行校正

表 2 古家营盆地英安岩主量、微量和稀土元素分析结果
Table 2 Analysis results of major, trace elements and rare earth elements of Gujiaying dacite

样品号	GJY001	GJY002	GJY003	GJY004	GJY005	样品号	GJY001	GJY002	GJY003	GJY004	GJY005
SiO ₂	71.84	67.79	70.38	68.7	70.51	Σ REE	300	355	259	231	144
TiO ₂	0.46	0.4	0.45	0.51	0.45	LREE/HREE	7.00	7.82	6.30	8.40	5.34
Al ₂ O ₃	13.61	13.82	14.28	13.75	14.29	(La/Yb) _N	10.19	15.08	9.36	9.29	5.52
TFe ₂ O ₃	4.3	4.35	4.29	4.59	4.44	δEu	0.57	0.56	0.59	0.53	0.69
MnO	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	δCe	0.56	0.35	0.52	0.92	0.79
MgO	0.84	5.91	0.89	1.17	0.94	Sr	165	39.5	154	111	159
CaO	2.5	0.1	2.56	2.32	2.45	Rb	169	164	152	205	153
Na ₂ O	2.06	1.00	2.13	1.99	2.03	Th	19.2	19.2	17.6	18.2	17.0
K ₂ O	3.41	3.00	3.75	3.53	3.87	U	3.85	4.40	4.04	3.12	3.88
P ₂ O ₅	0.13	0.07	0.11	0.14	0.13	Nb	11.2	10.2	11.1	10.9	11.0
烧失量	0.97	3.50	1.03	3.34	0.96	Ta	1.09	1.03	1.06	0.93	1.05
总计	100	100	100	100	100	Ba	879	265	889	453	766
ALK	5.47	4.00	5.88	5.52	5.90	Ga	19.7	17.3	19.9	18.2	19.3
CaO/Na ₂ O	1.21	0.10	1.20	1.17	1.21	Hf	6.17	5.91	6.08	6.13	6.36
A/CNK	1.17	2.72	1.17	1.21	1.19	Zr	199	196	206	214	207
K ₂ O/Na ₂ O	1.66	3.00	1.76	1.77	1.91	Y	49.9	45.7	48.3	30.9	30.4
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	29.59	34.55	31.73	26.96	31.76	Cr	14.6	20.4	22.8	52.0	14.3
刚玉(c)	2.23	9.23	2.27	2.82	2.57	Co	6.63	6.58	6.25	9.08	6.85
T _{zr} /°C	857	874	858	863	858	Ni	7.52	23.7	12.1	38.1	8.07
La	79.1	104	67.2	49.4	29.8	Sc	13.5	11.0	13.8	14.9	12.9
Ce	93.0	80.3	74.4	97.2	51.8	Zr+Nb+Ce+Y	353.49	332.66	339.52	352.78	300.49
Pr	16.25	23.36	14.34	10.69	6.79	10000Ga/Al	2.74	2.36	2.63	2.49	2.55
Sm	11.62	16.14	10.31	7.58	5.45	Th/Ta	17.63	18.55	16.59	19.65	16.16
Eu	2.10	2.75	1.98	1.27	1.26	La/Nb	7.04	10.18	6.03	4.55	2.71
Gd	10.84	13.23	10.17	6.87	5.74	Ba/Nb	78.21	26.01	79.89	41.75	69.77
Tb	2.02	2.35	1.91	1.26	1.03	Ba/La	11.12	2.56	13.24	9.18	25.72
Dy	10.12	11.26	9.62	6.49	6.13	Th/Nb	1.71	1.88	1.58	1.68	1.55
Ho	2.04	2.05	1.98	1.38	1.32	Th/La	0.24	0.18	0.26	0.37	0.57
Er	5.76	5.36	5.47	3.87	3.79	Nb/La	0.14	0.10	0.17	0.22	0.37
Tm	0.81	0.72	0.75	0.55	0.54	Nb/Ta	10.32	9.86	10.52	11.69	10.45
Yb	5.17	4.58	4.79	3.54	3.60	Rb/Sr	1.02	4.16	0.99	1.84	0.97
Lu	0.74	0.71	0.72	0.56	0.53						

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

2.3 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析

样品的 Sr、Nd 同位素分析在南京大学现代分析中心完成,实验仪器为 VG354 同位素质谱仪。为去除岩石表面的污染物,避免对实验结果产生影响,首先采用 5% HF-HBr 混合液清洗样品,随后用 HF-HNO₃-HClO₄ 混合酸溶解 0.1 g 的粉末样品。分别采用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 及 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 对 Sr、Nd 同位素进行分馏校正, Sr 同位素标样 NBS987 的测定结果为 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710336 ± 7 (2σ), La Jolla Nd 同位素标样的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测定结果是 0.511864 ± 3 (2σ); 对 Pb 同位素使用硅胶-磷酸发射技术和单铯带单接收技术进行同位素质谱分析,用 NBS981 标样对测定值进行校正, NBS981 标样的标准为 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 16.939 ± 0.006, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.489 ± 0.009 和 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 36.698 ± 0.029。O 同位素测定在中国科学院南京地质古生物研究所完成,测试仪器为 MAT253 稳定同位素质谱仪。古家营英安岩 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析结果及其主要参数见表 3。

表 3 古家营盆地英安岩 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd-Pb-O isotope analysis of Gujiaying dacite

样品号	GJY001	GJY003	GJY005
Rb/10 ⁻⁶	207.8	154.7	149.8
Sr/10 ⁻⁶	113.2	155.9	152.7
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	5.409	2.916	2.898
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.740062	0.724871	0.725163
1σ	±7	±10	±9
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.70624	0.70664	0.70704
Sm/10 ⁻⁶	7.726	10.64	5.637
Nd/10 ⁻⁶	41.39	56.03	26.12
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1121	0.1147	0.0948
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512069	0.512071	0.512025
1σ	±8	±9	±10
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	0.511747	0.511741	0.511752
ε _{Nd} (t)	-6.4	-6.5	-6.3
f _{Sm/Nd}	-0.43	-0.42	-0.52
T _{DM1} /Ma	1621	1661	1442
T _{DM2} /Ma	1694	1703	1685
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	17.853	17.861	17.847
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15.931	15.933	15.925
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38.513	38.517	38.524
(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	17.187	17.151	17.181
(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	15.894	15.894	15.888
(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	37.443	37.521	37.584
δ ¹⁸ O _{VSMOW} /‰	9.17	8.12	8.64

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

样品 GJY001 的锆石颗粒长度 100 ~ 150 μm, 长宽比为 1.2 ~ 2.0, 多呈柱状或长柱状, 透明度良好, 在阴极发光图像(图 4)中, 被测锆石显示出清晰的环带结构, 表明其为典型的岩浆结晶锆石。样品 GJY001 锆石 U 含量为 274 × 10⁻⁶ ~ 709 × 10⁻⁶, 大多数变化范围为 288 × 10⁻⁶ ~ 562 × 10⁻⁶, Th 含量为 117 × 10⁻⁶ ~ 390 × 10⁻⁶, Th/U 值为 0.41 ~ 0.66, 平均值为 0.53, 均大于 0.4, 表明它们为典型的岩浆成因锆石^[41-43]。样品 GJY001 的 13 颗锆石的年龄变化范围为 447 ~ 433 Ma, 加权平均年龄值为 439.0 ± 4.0 Ma (MSWD = 0.42), 根据国际地层表^[44], 古家营盆地的英安岩形成的年代归属于晚奥陶世末期—早志留世初期, 是加里东期火山活动的产物。

3.2 主量元素

古家营盆地英安岩主量元素分析结果见表 2, 全岩 SiO₂ 含量较高, 为 67.79% ~ 71.84%, 平均含量为 69.84%; Al₂O₃ 含量为 13.61% ~ 14.29%, 平均含量为 13.95%; Fe 含量较低, TFe₂O₃ 含量为 4.29% ~ 4.59%, 平均含量为 4.39%; MgO 含量为 0.84% ~ 5.91%, 平均含量为 1.95%; TiO₂ 含量为 0.4% ~ 0.51%, 平均含量为 0.46%; CaO 含量为 0.1% ~ 2.56%, 平均含量为 1.99%; P₂O₅ 的含量为 0.07% ~ 0.14%, 平均含量为 0.12%; 全岩 Na₂O 含量为 1% ~ 2.13%, 平均含量为 1.84%, K₂O 含量为 3% ~ 3.87%, 平均含量为 3.51%, 全碱 (Na₂O + K₂O) 含量为 4% ~ 5.90%, 平均含量为 5.35%, K₂O/Na₂O 值为 1.66 ~ 3。A/NK 值为 1.89 ~ 2.82, A/CNK 值为 1.17 ~ 2.72, 在 A/CNK-A/NK 图解中, 投影点落入过铝质区域(图 5-c); 在 TAS 岩石分类判别图解中, 除样品 GJY001 投在流纹岩区域外, 其余样品均属于英安岩范围(图 5-a); 所有点在 SiO₂-K₂O 判别图解中均投入高钾钙碱性系列(图 5-b); 在 Na₂O-K₂O 判别图解(图 5-d)中, 样品投影点落在钾质或高钾质区域。综上所述, 古家营英安岩为过铝质高钾钙碱性系列火山岩。

3.3 微量和稀土元素

古家营盆地英安岩样品的微量和稀土元素分析测试结果及相关数据见表 2。样品稀土元素总量 ΣREE 变化范围为 144 × 10⁻⁶ ~ 355 × 10⁻⁶, 平均值为

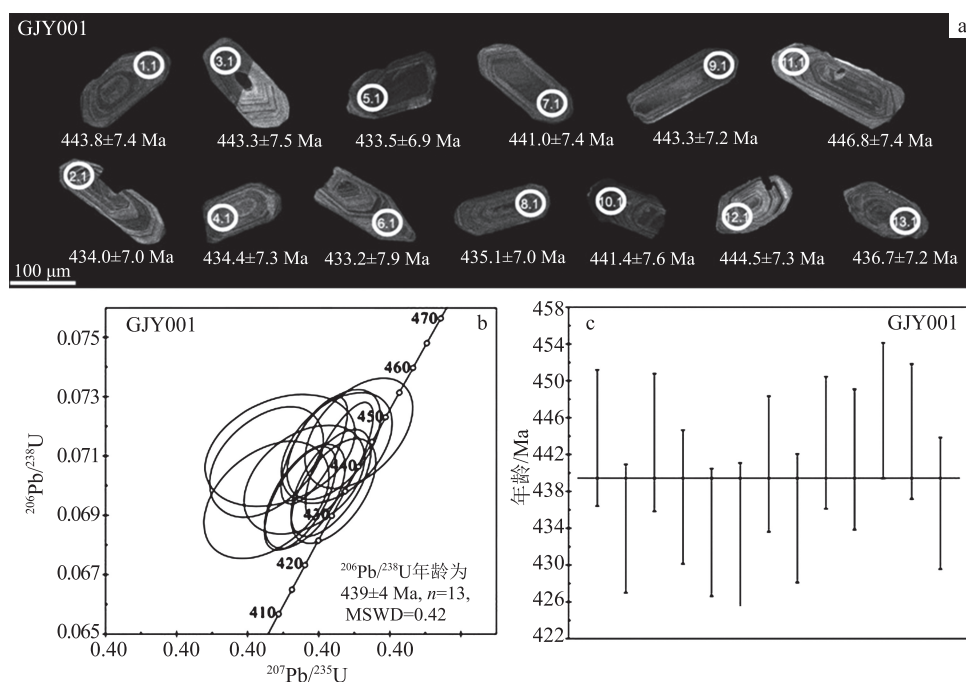
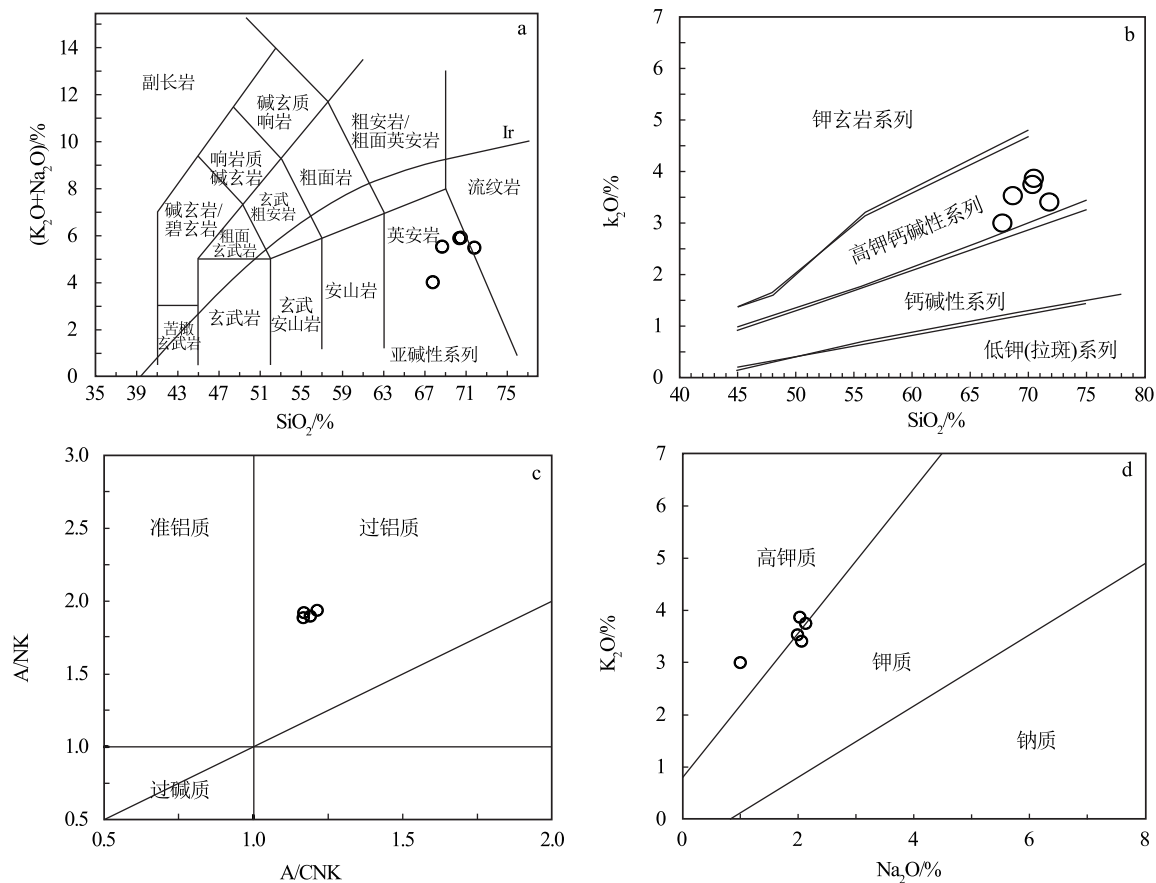


图 4 古家营英安岩锆石阴极发光图像(a)、谐和图(b)及年龄值(c)

Fig. 4 Cathodoluminescence images(a), concordia diagram(b) and age value(c) of zircons from Gujiaying dacite

图 5 古家营盆地英安岩 TAS 图解^[45](a)、 SiO_2 - K_2O 判别图^[46](b)、 A/CNK - A/NK 判别图^[46](c) 和 Na_2O - K_2O 判别图^[47](d)Fig. 5 TAS(a), SiO_2 - K_2O (b), A/CNK - A/NK (c) and Na_2O - K_2O (d) discriminant diagrams of dacite in Gujiaying Basin

258×10^{-6} ; 轻稀土元素含量为 $121 \times 10^{-6} \sim 314 \times 10^{-6}$, 平均值为 225×10^{-6} ; 重稀土元素含量为 $22 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$, 平均值为 32×10^{-6} , LREE/HREE 值为 $5.3 \sim 8.4$, 平均值为 6.97 , $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 $5.5 \sim 15$, 平均值为 9.89 , δEu 值为 $0.53 \sim 0.69$, Eu 显示出明显的负异常(图 6-a)。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6-b)显示, 古家营英安岩高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Ti)相对亏损, 大离子亲石元素(Rb、Th、U、K)相对富集。

3.4 同位素

古家营盆地英安岩 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析结果(表 3)显示, 样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值较均一, 介于 $0.70624 \sim 0.70704$ 之间, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-6.5 \sim -6.3$, 变化不大。在 $t-\varepsilon_{\text{Nd}}$ 图解(图 7-a)中, 投影点均落在华南元古宙地壳区域范围。在 $t-I_{\text{sr}}$ 图解(图 7-b)中, 投影点落

在大陆地壳演化线与地幔演化线之间。全岩 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 值为 $17.853 \sim 17.847$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 值为 $15.925 \sim 15.933$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 值为 $38.513 \sim 38.524$ 。古家营盆地英安岩的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ 值为 $8.12\text{‰} \sim 9.17\text{‰}$, 平均值为 8.64‰ , 大于地幔 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 5.7‰ , 与沉积岩接近。

4 讨论

4.1 英安岩时代及其地层归属

古家营英安岩锆石 U-Pb 年龄结果为 439.0 ± 4.0 Ma, 是早古生代岩浆活动的产物。

华南板块中生代发生过强烈的、多期多阶段的火山-侵入活动, 形成了既有呈面状分布的花岗岩区, 又有呈条带状分布的火山-侵入岩带, 具有“两区

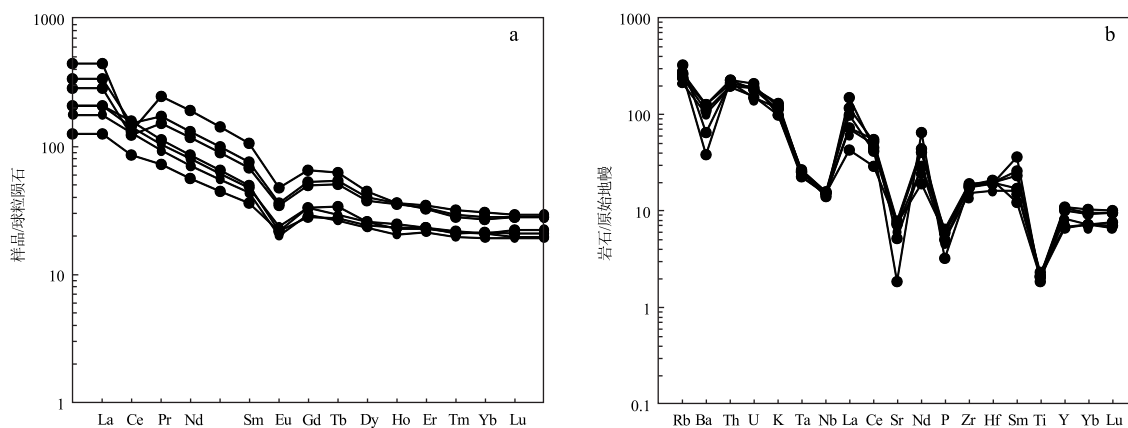


图 6 古家营英安岩稀土元素球粒陨石标准化(a)与微量元素原始地幔标准化图(b)(标准化值参考文献[48])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams(b) of dacite in Gujiaying Basin

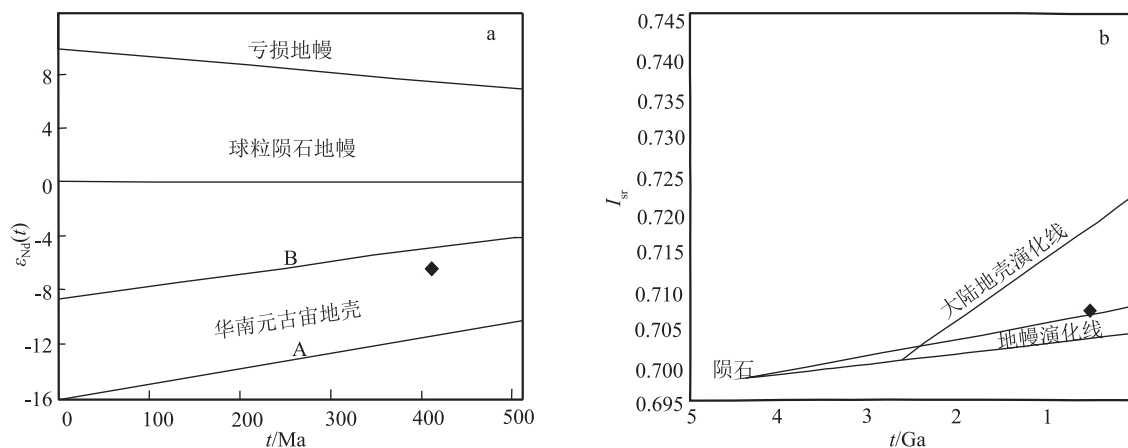


图 7 古家营盆地英安岩 $t-\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) 和 $t-I_{\text{sr}}$ (b) 图解

Fig. 7 Diagrams of $t-\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and $t-I_{\text{sr}}$ (b) in dacite, Gujiaying Basin

四带”的特点^[49]。前人根据岩石地层对比及岩性组合,将赣南—粤北一带出露的火山岩划归为中生代火山岩系的一部分。江西省区域地质调查大队^①在开展 1:20 万龙南幅地质调查时将其划归为余田群,时代为早侏罗世;江西省地质矿产局^[50]将其划归为晚侏罗世鸡笼嶂组;江西省地质矿产厅^[51]复称余田群,并将广东始兴—江西全南一带的火山岩归入余田群鸡笼嶂组,时代归于晚侏罗世。巫建华等^[52]将广东始兴—江西全南一带的火山岩与江西安远蔡坊、三百山盆地、广东龙川大长沙盆地的火山岩系对比,归入武夷群,地质时代为晚侏罗世。由于当时技术方法的限制,缺少准确的年代学数据,对地层的划分还存在争议。近期,部分学者通过赣南—粤北一带的火山岩年代学研究,发现其不属于中生代,应属于早古生代^[18-9, 36-37, 53-54]。

笔者通过大面积的野外勘查,在全南县南迳镇古家营村附近道路旁找到火山岩系出露较好的地段,并测制了剖面(A-A')(图 2)。剖面起点坐标为北纬 24°39'17"、东经 114°14'52",终点坐标为北纬 24°39'24"、东经 114°14'00",剖面层序描述如下。

南迳组	>190.7 m
15.灰白色英安岩(未见顶)	35.8 m
14.灰褐色流纹岩	34.1 m
13.灰黑色碳质板岩	0.9 m
12.灰白色英安岩	17.7 m
11.灰白色英安质晶屑熔结凝灰岩	11.5 m
10.灰白色英安岩	24.6 m
9.灰白色英安质凝灰岩	14.3 m
8.灰白色英安质晶屑熔结凝灰岩	9.7 m
7.灰白色英安质凝灰岩	16.7 m
6.灰褐色流纹岩	25.4 m
——— 整 合 ———	
下伏地层:黄竹洞组(O ₃ hz)	>45.2 m
5.灰黑色炭质板岩夹页岩	22.7 m
4.灰白色英安岩	2.3 m
3.灰黑色炭质板岩夹页岩	9.6 m
2.灰白色英安岩	3.2 m
1.灰黑色炭质板岩(未见底)	7.4 m

剖面实测结果表明,古家营盆地剖面主要出露灰白色英安岩、灰褐色流纹岩、灰白色英安质晶屑熔结凝灰岩,以及灰白色英安质凝灰岩夹灰黑色炭质板岩、变质页岩,为一套中酸性火山岩夹浅变质岩系组合。易立文等^[8]对河口、上洞(次)火山岩做过研究,但因盆地内岩石受到强烈风化影响,出露

不好,无法判断其为英安岩或英安斑岩。

本文将古家营盆地剖面(图 2)与丁辉^[37]建立的中寨剖面(图 8)、乔子山剖面(图 9)进行对比,发现古家营剖面岩性组合以中酸性火山岩夹浅变质岩为主,在变质岩中有火山岩夹层(图 10-a),火山岩、变质岩产状一致,与下伏地层呈整合接触;乔子山、中寨剖面岩性组合以基性—中酸性火山岩夹浅变质岩为主,在火山岩中发现变质岩夹层,在变质岩中发现火山岩夹层,火山岩、变质岩产状一致;古家营剖面与乔子山、中寨剖面岩性组合相近,在剖面中都发现了火山碎屑岩(图 10-c),且古家营英安岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 439.0±4.0 Ma,与南迳盆地安山岩 442.1±3.9 Ma、英安岩 439.9±3.7 Ma 年龄基本一致,所以将古家营盆地内出露的岩浆岩定为英安岩,并归入晚奥陶世末—早志留世初南迳组。

4.2 火山岩岩石成因

古家营英安岩呈灰白色,斑状结构,斑晶矿物主要为石英和斜长石,其次为钾长石。全岩主量元素具有富硅、富钾、低钠、贫镁的特点, SiO₂ 含量为 67.79%~71.84%,平均值为 69.84%, K₂O 的含量为 3%~3.87%,平均含量为 3.51%, Na₂O 含量为 1%~2.13%,平均含量为 1.84%,较低的 TiO₂ 含量(0.4%~0.51%),平均含量为 0.46%。在 A/NK-A/CNK 判别图解(图 5-c)中,投影点均落在过铝质区域,表现出了过铝质岩石的特征,推测源区可能与地壳物质有关。实验研究发现,可以用 TiO₂ 和 Al₂O₃ 的比值变化作为岩浆形成时温度的重要参数^[55]。古家营英安岩 Al₂O₃/TiO₂ 值的变化范围为 27~34.6,平均值为 30.94,当 Al₂O₃/TiO₂<100 时,岩浆温度为 900~950℃^[56],而本文岩浆温度为 857~874℃,说明其源区温度较高,在岩浆形成时可能伴随有幔源岩浆的底侵作用,为其提供了大量的热量。

古家营英安岩全岩 Zr+Nb+Ce+Y 值为 300.49×10⁻⁶~353.49×10⁻⁶(表 2),低于 A 型花岗岩的下限值 360×10⁻⁶, 10000 Ga/Al 值为 2.36~2.74(表 2),平均值为 2.55,低于 A 型花岗岩的最低值 2.6^[57],排除了古家营英安岩为 A 型花岗岩的可能性。全岩 A/CNK 值为 1.17~2.72,均大于 1.1^[58], Rb/Sr 值为 0.97~4.16,均大于 0.9(Rb/Sr>0.9 时,为 S 型花岗岩^[59]), C.I.P.W 标准矿物中见刚玉分子(2.23%~9.23%),含量均大于 1%,由此推测,古家营英安岩属于 S 型火山岩。通常认为, S 型花岗岩是地壳中

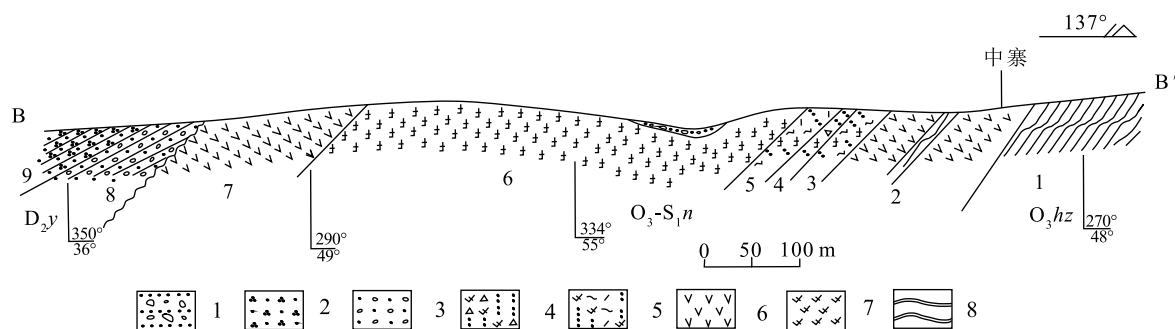
图8 南迳盆地晚奥陶世晚期—早志留世南迳组实测剖面 B-B'^[37]

Fig. 8 Geological section B-B' of the Nanjing Formation in Nanjing Basin

1—第四系沉积物;2—石英砂岩;3—砂砾岩;4—英安质角砾凝灰岩;5—英安质晶屑熔结凝灰岩;
6—安山岩;7—英安岩;8—板岩;O₃hz—黄竹洞组;O₃-S₁n—南迳组;D₂y—云山组

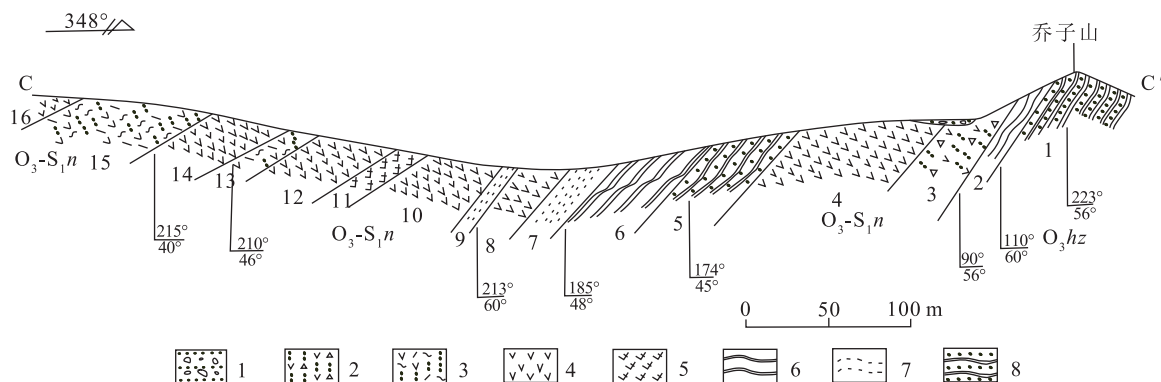
图9 南迳盆地晚奥陶世晚期—早志留世南迳组实测剖面 C-C'^[37]

Fig. 9 Geological section C-C' of the Nanjing Formation in Nanjing Basin

1—第四系沉积物;2—安山质角砾凝灰岩;3—安山质晶屑熔结凝灰岩;4—安山岩;5—英安岩;6—板岩;
7—千枚岩;8—变质砂岩;O₃hz—黄竹洞组;O₃-S₁n—南迳组

的沉积岩经过部分熔融后形成的,推测古家营英安岩的原岩可能以沉积岩为主。实验岩石学研究结果表明,对岩浆源区物质成分特征的研究,可以用 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值及 $\text{TFeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 含量进行判别^[55]。当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} > 0.3$, $\text{TFeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 > 4\%$ 时,推测源区可能以砂质岩石为主;当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0.3$, $\text{TFeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 < 4\%$ 时,推测源区可能以泥质岩石为主。古家营英安岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.1~1.21,平均值为 0.98, $\text{TFeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 值为 5.6%~10.66%,明显高于 4%,由此推测,古家营英安岩的源区物质应该以砂质岩石为主。古家营英安岩全岩 Rb/Sr 值为 0.97~4.16, Rb/Ba 值为 0.17~0.62,在 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解(图 11-a)中,大部分样品的投影点落在贫粘土矿物的砂质岩熔体区域;在 $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ 图

解(图 11-b)中,绝大多数投影点位于变质砂岩区域,没有数据点靠近基性岩区域。综上所述,推测古家营英安岩的原岩很可能是贫粘土矿物的砂质沉积岩。

在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 6-a)中,古家营英安岩轻稀土元素相对于重稀土元素明显富集,体现出了“右倾”配分模式,全岩微量元素比值 Th/Ta 的变化范围为 16.16~19.65,平均值为 17.72; La/Nb 值为 2.71~10.18,平均值为 6.1; Ba/Nb 值为 26.01~79.89,平均值为 59.13; Ba/La 值为 2.56~25.72,平均值为 12.36; Th/Nb 值为 1.55~1.88,平均值为 1.68; Th/La 值为 0.18~0.57,平均值为 0.33; Nb/La 值为 0.1~0.37,平均值为 0.2; Nb/Ta 值为 9.86~11.69,平均值为 10.57。这些数值与地壳微量

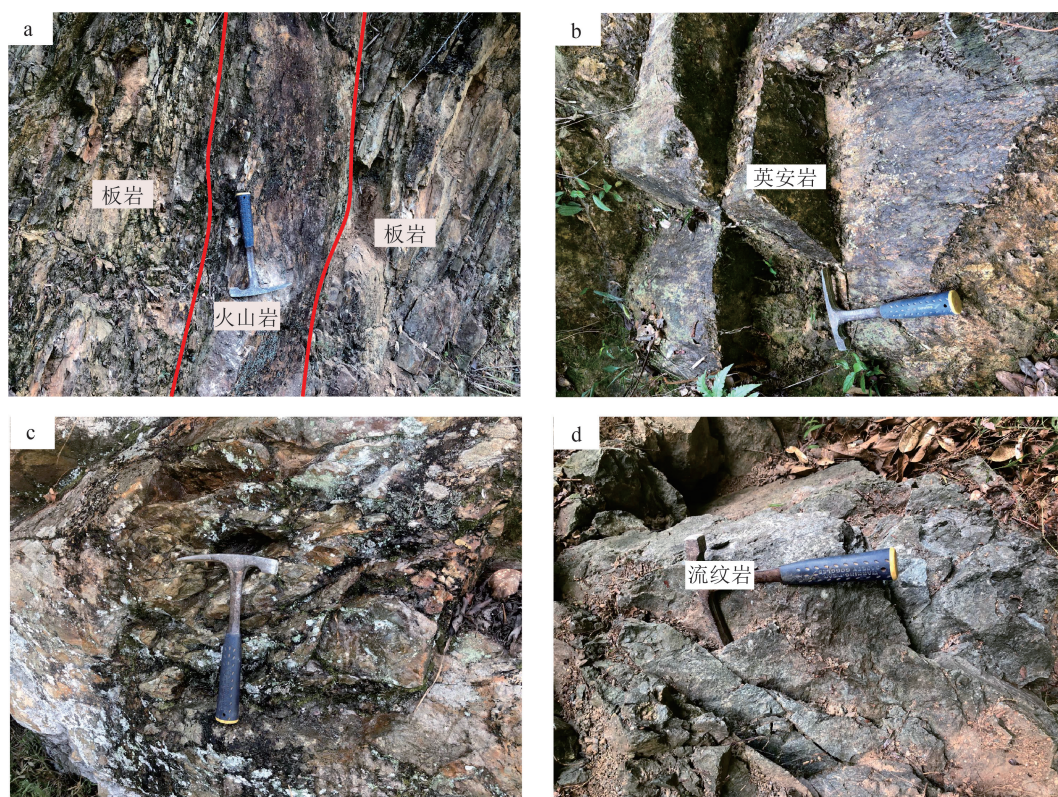


图 10 南迳组地质特征

Fig. 10 Geological characteristics of the Nanjing Formation

a—黄竹洞组板岩中的火山岩夹层;b—野外出露的英安岩;c—野外出露的英安质凝灰岩;d—野外出露的流纹岩

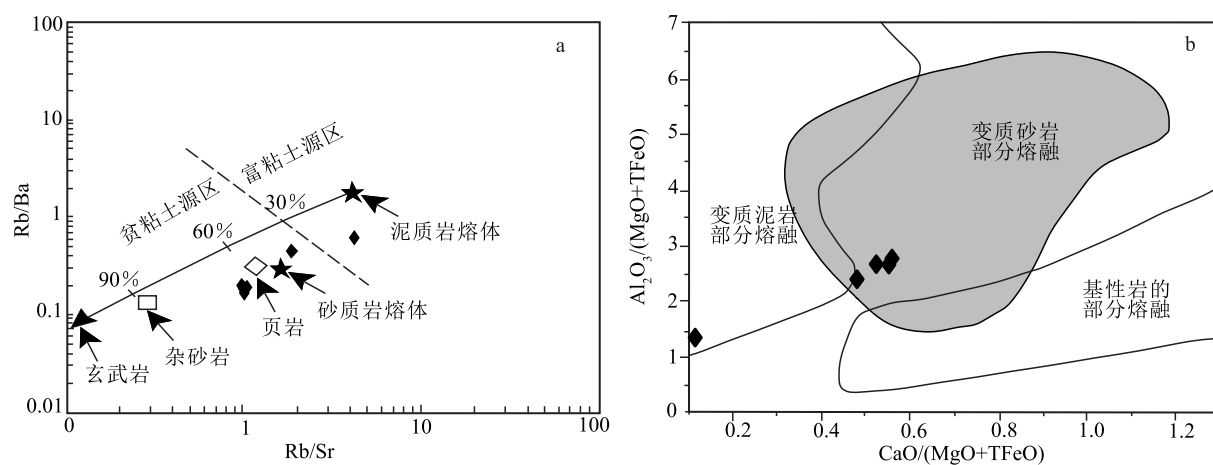


图 11 古家营英安岩 Rb/Sr-Rb/Ba (a) 和 C/MF-A/MF (b) 图解 (a 底图据参考文献 [54], b 底图据参考文献 [60])

Fig. 11 Rb/Sr-Rb/Ba (a) and C/MF-A/MF (b) diagrams of Gujiaying dacite

元素平均值接近^[61-66],说明古家营英安岩源区与地壳物质关系密切;在图幅形态上类似海鸥型,与地壳稀土元素的特征吻合^[67]。此外,古家营英安岩的 Rb/Sr 值较大,变化范围为 0.97~4.16,比值均大于

0.24,同样表明原岩可能来自地壳物质^[68]。结合 Zr-Zr/Sm 图解(图 12),表明古家营英安岩的母岩浆可能是大陆地壳物质部分熔融的产物。

古家营英安岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -6.5~-6.3,均为负

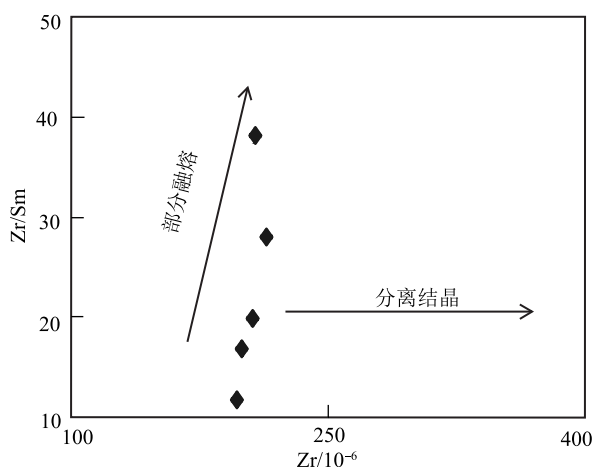
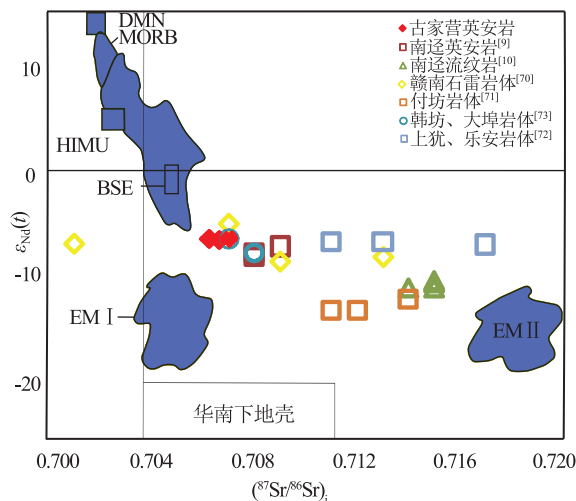


图 12 古家营英安岩 Zr-Zr/Sm 图解

Fig. 12 Zr-Zr/Sm diagram of Gujiaying dacite

值,指示母岩浆可能与地壳或富集地幔有关^[69]。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解中(图 13),古家营英安岩投影点与源区以壳源为主的南迳流纹岩、付坊岩体、上犹岩体及乐安岩体不太一致,而与源区为壳幔物质共同参与的南迳英安岩、赣南石雷岩体、韩坊、大埠岩体较相似,推测源区为幔源、壳源物质共同参与的结果。在 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图解中,投影点均落在上地壳范围(图 14-a);在 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图解(图 14-b)中,投影点落在下地壳和地幔演化线之间。研究表明,

图 13 古家营英安岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$

图解(底图据参考文献[74-75])

Fig. 13 The $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of Gujiaying dacite

DMN—亏损地幔;MORB—洋中脊玄武岩;HIMU—高 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值地幔;BSE—全硅酸盐地球;EM I—I型富集地幔;EM II—II型富集地幔

$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 相比于 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$,可以更有效地反映成岩中的物理性质^[77],所以根据 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图解(图 14-b),样品投影点落在下地壳与地幔演化线之间,推测古家营英安岩物质来源可能与地幔和下地壳有关。古家营英安岩的 $T_{\text{DM2}} = 1685 \sim 1703 \text{ Ma}$,指示岩浆来源于中元古代物质,与 $t - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 7-a)所示结果一致。综上所述,古家营英安岩成因可以解释为:幔源岩浆底侵提供热量并与中元古代下地壳砂质沉积岩发生混合,形成的壳幔混源岩浆经过部分熔融作用喷出地表,形成英安岩。

4.3 构造环境

华南板块早古生代构造属性一直以来存在较大的争议:由于早期华南板块缺少早古生代的蛇绿岩及岛弧火山岩,一些学者倾向于陆内造山作用的观点^[1-7];近年来,大量学者通过对华南地区地层学、岩石学等方面的研究(图 15),对华南板块早古生代构造属性的认识更倾向于俯冲-碰撞造山^[8-26]。

在岩浆岩方面,一系列早古生代与洋壳俯冲有关的火山岩陆续被发现。易立文等^[8]在粤北河口、上洞地区发现了与俯冲作用有关的英安岩,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $448.7 \pm 1.7 \text{ Ma}$;劳玉军^[9]根据对南迳盆地英安岩的研究,认为其具有大陆活动边缘的特征,SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $439.9 \pm 3.7 \text{ Ma}$;彭松柏等^[13]在桂东南岑溪大爽一带发现了一套形成于洋壳俯冲岛弧前环境的玄武安山岩-安山岩火山岩系,其中镁质安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $443 \pm 4 \text{ Ma}$;覃小锋等^[12]对桂东鹰扬关群火山岩进行了研究,获得的变角斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $415.1 \pm 2.1 \text{ Ma}$;覃小锋等^[11]在大爽、糯垌、洞尾地区发现了(变质)中-基性火山岩,对其中的斜长阳起石岩、斜长角闪岩、安山质晶屑凝灰岩分别进行测年,获得的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄分别为 $443.7 \pm 2.2 \text{ Ma}$ 、 $441.3 \pm 2.4 \text{ Ma}$ 、 $442.2 \pm 3.7 \text{ Ma}$;王存智等^[17]在浙江诸暨一带发现了一套斜长角闪岩,通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法获得其变质年龄为 $420.6 \pm 1.8 \text{ Ma}$;刘松峰^[14]对云开隆起西北缘一带的早古生代中-基性岩构造岩片、变形变质复理石沉积岩建造等进行了研究,认为形成于岛弧环境的玄武安山岩、安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄分别为 $460 \pm 6 \text{ Ma}$ 、 $443 \pm 4 \text{ Ma}$ 。此外,在侵入岩方面,覃小锋等^[16]

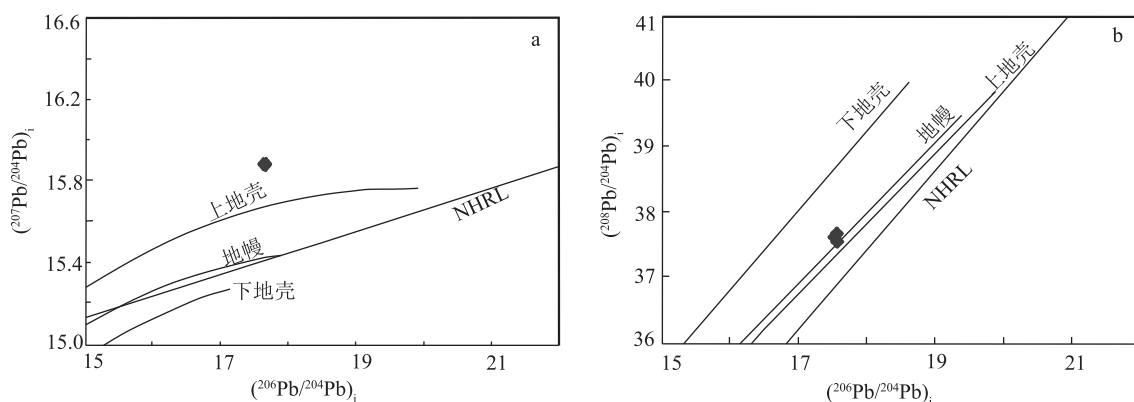


图 14 古家营英安岩 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (a) 和 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (b) 图解 (底图据参考文献[76])

Fig. 14 The $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (a) and $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (b) diagrams of Gujiaying dacite

在云开地区发现了形成于活动大陆边缘弧环境的壶洞片麻状复式岩体, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 443.1 ± 2.2 Ma; 马树松等^[19] 对南迳盆地苗云岩体进行了研究, 同样认为其具有岛弧花岗岩的特征, SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 442.7 ± 3.2 Ma; 刘松峰^[14] 在云开隆起西北缘首次发现形成于岛弧环境的斜长花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄为 459 ± 2 Ma; 许德如等^[78] 在湘东地区发现了具有岛弧花岗岩特征的花岗闪长岩。

在变质岩方面, 陈相艳等^[22] 和 Zhang 等^[23] 在浙江龙游发现了受早古生代高压榴辉岩相变质的石榴子石角闪岩 (440 Ma), 暗示加里东期俯冲-碰撞事件的存在; 汪建国等^[24] 在浙江溪口一带发现了岩块、透镜状的榴闪岩, 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得其主要变质年龄为 $451 \pm 8/-18$ Ma; 于津海等^[25] 在赣东北弋阳地区发现了早古生代高压麻粒岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果为 436 Ma; 姜杨等^[26] 在浙江龙游地区发现了加里东期榴闪岩, 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得其主要变质年龄为 454 ± 4 Ma。

在蛇绿岩方面, 彭松柏等^[15] 在桂东南岑溪糯垌一带发现了一套由变枕状玄武岩、辉绿岩墙及少量块状辉长岩和辉石岩组成的变基性岩系, 通过对变辉绿岩进行 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年, 获得其成岩年龄为 437 ± 5 Ma, 为华南早古生代洋盆的存在及俯冲-碰撞造山机制提供了关键性证据。

在地层方面, 张浅深等^[79] 在赣南崇义县测制长

径-古亭剖面时指出, 龙头寨群顶部存在火山岩, 但因缺少准确的年代学证据, 并未引起学者们的关注。通过对赣南—粤北一带地层的深入研究, 在黄竹洞组顶部发现了火山岩, 通过对其年代学研究, 认为属于晚奥陶世末—早志留世初火山岩浆活动的产物, 划归为南迳组^[37]。南迳组与下伏黄竹洞组整合接触, 南迳组以火山岩为主夹浅变质岩夹层, 黄竹洞组以浅变质岩为主夹火山岩夹层, 从黄竹洞组至南迳组, 火山岩不断增多, 火山活动由弱变强, 推测赣南—粤北一带在晚奥陶世可能为不稳定的活动大陆边缘构造环境。

前人通过对华南地区岩浆岩、变质岩、蛇绿岩、地层等多方面的研究, 揭示华南板块早古生代构造属性可能为俯冲-碰撞造山, 本文通过对古家营英安岩的研究, 为探讨华南板块早古生代构造属性增添了新的资料。

古家营英安岩主量元素 TiO_2 含量较低, 变化范围为 0.4% ~ 0.51%, 含量均小于 0.82%, Al_2O_3 含量为 13.61% ~ 14.29%, 平均含量为 13.95%, 结果均大于 13%, 微量元素中亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti, 呈现出典型的“TNT”异常, 具有岛弧环境的特征^[80]。将古家营英安岩微量元素 Sc ($11.0 \times 10^{-6} \sim 14.9 \times 10^{-6}$, 平均值为 13.2×10^{-6})、Nb ($10.2 \times 10^{-6} \sim 11.2 \times 10^{-6}$, 平均值为 10.88×10^{-6})、微量元素比值 Th/Ta、La/Nb、Ba/Nb、Ba/La、Th/Nb、Th/La、Nb/La、Nb/Ta, 与形成于岛弧环境的英安岩^[9] 及形成于后碰撞阶段向板内伸展转化环境的英安岩^[81] 进行比较, 与岛弧环境的英安岩微量元素更接近。

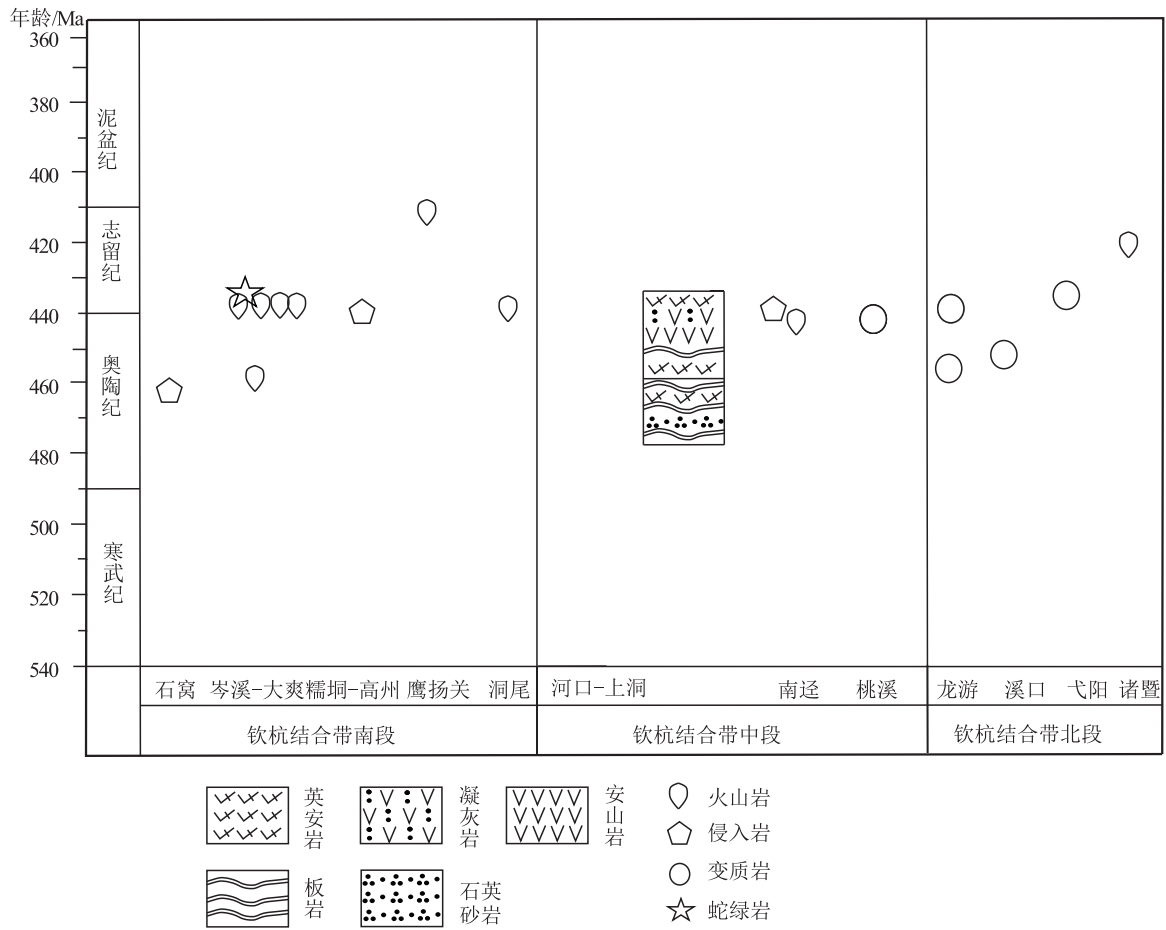


图 15 华南板块早古生代与俯冲有关的地质资料(火山岩数据据参考文献[8-9,11-14,17];侵入岩数据据参考文献[14,16,19];变质岩数据据参考文献[21-26];蛇绿岩数据据参考文献[16])

Fig. 15 Comprehensive geological data of subduction and early Paleozoic in South China plate

研究表明,大地构造环境与火山岩岩石组合具有十分密切的关系^[82-83]。古家营英安岩属于高钾钙碱性系列,亏损高场强元素 Ti,指示其大地构造背景可能与岛弧和活动大陆边缘有关^[84]。学者们根据岩石地球化学的不同,提出了大量的岩石构造环境判别图解。在古家营英安岩 Yb-Th/Ta 与 Ta/Yb-Th/Ta 构造环境判别图解(图 16-a、b)中,投影点均落在大陆活动边缘范围;在 Rb/30-Hf-3Ta 图解(图 16-c)中,投影点均落在火山弧花岗岩范围,结合英安岩的地球化学特征,推测古家营英安岩形成于与洋壳俯冲有关的大陆活动边缘构造环境,赣南—粤北一带在晚奥陶世—早志留世存在洋陆俯冲作用。

一个可能的构造模式为:在晋宁运动时期,华夏板块与扬子板块沿钦—杭断裂碰撞,此次运动使

华南海东段关闭,而此段以西仍然存在一个延续到加里东期的残留洋盆^[8,20,87-91];在南华纪接受沉积;早古生代,受到加里东运动的影响,扬子地块与华夏板块逐渐靠拢,残留洋盆不断俯冲—消减,至志留纪末关闭(钦防海槽除外),形成加里东褶皱带。

5 结 论

(1)古家营剖面与乔子山、中寨剖面岩性组合相近,为一套灰白色英安岩、流纹岩、火山碎屑岩、浅变质岩系组合,在剖面中均有火山碎屑岩出露,且古家营英安岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 439.0 ± 4.0 Ma,与南迳盆地安山岩(442.1 ± 3.9 Ma)、英安岩(439.9 ± 3.7 Ma)年龄基本一致,所以将古家营盆地出露的岩浆岩定为英安岩,并归入晚奥陶世末—早志留世初南迳组。

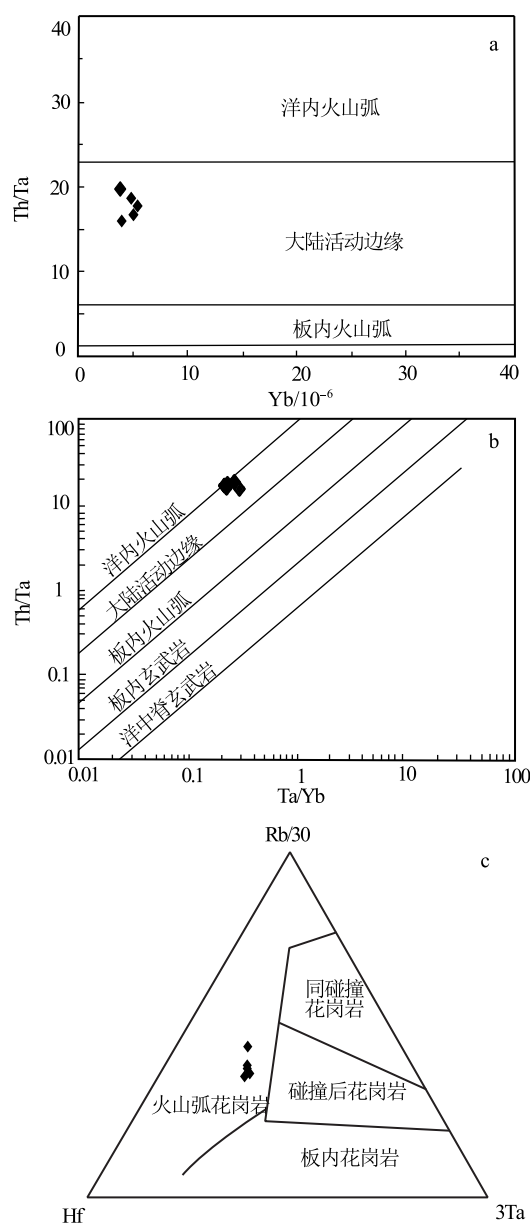


图 16 古家营英安岩 Yb-Th/Ta(a)、Ta/Yb-Th/Ta(b) 和 Hf-Rb/30-3Ta(c) 构造环境判别图解

(a、b 底图据参考文献[85], c 底图据参考文献[86])

Fig. 16 Yb-Th/Ta(a), Ta/Yb-Th/Ta(b) and Hf-Rb/30-3Ta(c) tectonic distinguish diagrams of Gujiaying dacite

(2) 古家营英安岩具有富硅、富钾、低钠、贫镁的特点,属于过铝质高钾钙碱性英安岩;高场强元素 Ta、Nb 相对亏损,大离子亲石元素 Rb、Th、K 等相对富集,具有岛弧火山岩的特征。

(3) 古家营英安岩的成因模式可以解释为:幔源岩浆底侵提供热量并与中元古代下地壳砂质沉

积岩发生混合,形成的壳幔混源岩浆经过部分熔融作用喷出地表形成英安岩。

(4) 通过古家营英安岩年代学、地质特征及地球化学研究,结合前人区域研究成果分析认为,在南岭构造带东部(赣南—粤北一带)存在早古生代洋盆,形成于大陆活动边缘环境的古家营英安岩是晚奥陶世—早志留世洋陆俯冲作用的产物。

致谢:北京离子探针中心杜利林老师在 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定过程中给予帮助和支持,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic Rift Basins in South China: Implications for Rodinia Break-Up[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1/4): 141-158.
- [2] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 556-565.
- [3] 舒良树. 华南前泥盆世构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 418-431.
- [4] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [5] 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 248-260.
- [6] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. 地球科学, 2013, 43(10): 1553-1582.
- [7] 李三忠, 李玺瑶, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(Ⅲ): 华南陆内造山[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 4: 1005-1025.
- [8] 易立文, 马昌前, 王连训, 等. 华南晚奥陶世火山岩的发现: 早古生代与俯冲有关的英安岩? [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 6: 637-653.
- [9] 劳玉军. 赣南南迳盆地加里东期英安岩地质、地球化学特征及地质意义[D]. 东华理工大学硕士学位论文, 2017.
- [10] 马树松. 赣南南迳盆地流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义[D]. 东华理工大学硕士学位论文, 2020.
- [11] 覃小锋, 王宗起, 宫江华, 等. 云开地块北缘加里东期中-基性火山岩的厘定: 钦-杭结合带南西段早古生代古洋盆存在的证据[J]. 岩石学报, 2017, 33(3): 791-809.
- [12] 覃小锋, 王宗起, 王涛, 等. 桂东鹰扬关群火山岩时代和构造环境的重新厘定: 对钦杭结合带西南段构造格局的制约[J]. 地球学报, 2015, 36(3): 283-292.
- [13] 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 等. 华夏早古生代俯冲作用(Ⅱ): 大爽高镁-镁质安山岩新证据[J]. 地球科学, 2016, 41(6): 931-947.
- [14] 刘松峰. 华南云开隆起西北缘早古生代构造混杂岩带成因及构造演化[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2018.
- [15] 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 等. 华夏早古生代俯冲作用(Ⅰ): 来自糯垌蛇绿岩的新证据[J]. 地球科学, 2016, 41(5): 765-778.
- [16] 覃小锋, 王宗起, 胡贵昂, 等. 两广交界地区壶洞片麻状复式岩体的年代学和地球化学: 对云开地块北缘早古生代构造-岩浆作用的启示[J]. 岩石学报, 2013, 9: 3115-3130.

- [17] 王存智,姜杨,赵希林,等.陈蔡岩群下河图斜长角闪岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J].岩石矿物学杂志,2016,(3): 425-442.
- [18] 杨瞳,虞鹏鹏.钦杭结合带加里东期造山运动构造属性探究[J].中山大学研究生学刊,2015,36(3): 1-7.
- [19] 马树松,刘帅,黄美化,等.赣南苗云岩体 U-Pb 年代学、地球化学特征及其成因[J].科学技术与工程,2019,19(26): 55-67.
- [20] 杜云,郭爱民,卢友月,等.湘西南苗儿山岩体加里东期花岗岩成因:来自岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学证据[J/OL].中国地质(网络首发),2019,1-28.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191223.1713.006.html>.
- [21] 于津海,周新民,O'Reilly Y S 等.南岭东段基底麻粒岩相变质岩的形成时代和原岩性质:锆石的 U-Pb-Hf 同位素研究[J].科学通报,2005,50: 1758-1767.
- [22] 陈相艳,全来喜,张传林,等.浙江龙游石榴石角闪岩(退变榴辉岩):华夏加里东期碰撞造山事件的新证据[J].科学通报,2015,60(13): 1207-1217.
- [23] Zhang C L, Santosh M, Zhu Q B, et al. The gondwana connection of south china: evidence from monazite and zircon geochronology in the cathaysia block[J]. Gondwana Research, 2014, 28(3): 1137-1151.
- [24] 汪建国,余盛强,胡艳华,等.江山-绍兴结合带榴闪岩的发现及岩石学、年代学特征[J].中国地质,2014,41(4): 1356-1363.
- [25] 于津海,楼法生,王丽娟,等.赣东北弋阳早古生代麻粒岩的发现及其地质意义[J].科学通报,2014,(35): 3508-3516.
- [26] 姜杨,陈志洪,谭桂丽,等.钦杭结合带加里东期榴闪岩超高压变质作用研究[J].资源调查与环境,2015,36(2): 79-88.
- [27] Zhang S B, Zheng Y F. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China. Gondwana Research [J]. 2013, 23: 1241-260.
- [28] 高彭.华南陆块南岭地区中生代花岗岩地球化学研究[D].中国科学技术大学博士学位论文,2016.
- [29] 吴荣新,郑永飞,吴元宝.皖南石耳山新元古代花岗岩锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究[J].高校地质学报,2005,11(3): 364-382.
- [30] 杜云,罗小亚,黄革非.湘西南苗儿山岩体北段新元古代晋宁期花岗岩岩石学、地球化学特征及其形成构造背景[J].地质科技情报,2017,36(6): 136-147.
- [31] 高万里,王宗秀,李春麟,等.浙东南印支期花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及构造意义[J].地质学报,2014,6: 1055-1067.
- [32] 杜远生,徐亚军.华南加里东运动初探[J].地质科技情报,2012,(5): 47-53.
- [33] 袁正新,钟国芳,谢岩豹,等.华南地区加里东造山运动时空分布的新认识[J].华南地质与矿产,1997,4: 19-25.
- [34] Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al. Kwangsiian crustal anatexis within the eastern South China Block: geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains[J]. Lithos, 2011, 127: 239-260.
- [35] 巫建华,徐勋胜,刘帅.赣南—粤北地区晚白垩世早期长英质火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质通报,2012,31(8): 1298-1305.
- [36] 伍静,王广强,梁华英,等.粤北大宝山矿区加里东期火山岩的厘定及其地质意义[J].岩石学报,2014,4: 1145-1154.
- [37] 丁辉.江西南部南迳盆地安山岩年代学、地球化学特征及岩石成因[D].东华理工大学硕士学位论文,2016.
- [38] 宋彪,张玉海,万渝生,等.锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J].地质论评,2002,48(增刊 1): 26-30.
- [39] Ludwig K R. User's manual for Isoplot/Ex (Version 2.05): A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Spec. Pub, Berkeley Geochronology Center Special publication, 2001: 1-55.
- [40] 高剑峰,陆建军,赖鸣远,等.岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析[J].南京大学学报(自然科学),2003,39(6): 844-850.
- [41] Williams I S, Claessens S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian Metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides III on micro-probe zircon U-Th-Pb [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1987, 97: 205-217.
- [42] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and link between U-Pb ages and metamorphism [J]. Chemical Geology, 2002, 184: 123-138.
- [43] 吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,2004,49(16): 1589-1604.
- [44] 章森桂,张允白,严惠君.“国际地层表”简介[J].地层学杂志,2008,33(1): 1-10.
- [45] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. Journal of Petrology, 1986, (3): 745-750.
- [46] Richwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. Lithos, 1989, 22 (4): 247-263.
- [47] Peccerillo A, Taylor R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamawarea, northern Turkey [J]. Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.
- [48] Sun S S, Mc Donough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implication for mantle composition and processes [J]. Magmatism in the Ocean, 1989, 42: 313-345.
- [49] 毛建仁,厉子龙,叶海敏.华南中生代构造-岩浆活动研究:现状与前景[J].中国科学:地球科学,2014,44(12): 2593-2617.
- [50] 江西省地质矿产局.江西省区域地质志[M].北京:地质出版社,1984.
- [51] 江西省地质矿产厅.江西省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997: 275-282.
- [52] 巫建华,周维勋,章邦桐.江西及广东北部中生代晚期地层层序和时代——兼论《江西省岩石地层》中存在的问题[J].地质论评,2002,48(1): 44-53.
- [53] 陈武钦,王漂元,林建.华粤北始兴县城南志留纪火山岩的基本特征[J].中国西部科技,2006,16: 29-30.
- [54] 吴继光.南岭贵东岩体北部英安斑岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄及其地质意义[J].铀矿地质,2013,5: 268-273, 262.
- [55] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45(1/4): 29-44.
- [56] 邓晋福,苏尚国,赵海玲,等.华北地区燕山期岩石圈减薄的深部

- 过程[J].地学前缘,2003,3: 41-50.
- [57] Whalen J B, Crurrie K L, Chappell B W. A - type granite: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [58] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granitotypes [J]. Pacific Geology, 1974, 8: 173-174.
- [59] 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. 岩石学报, 1993, 9(1): 44-54.
- [60] 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) [J]. Lithos, 2000, 50(1): 51-73.
- [61] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1-312.
- [62] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust - mantle system [J]. chemical Geology, 1995, 120: 347-359.
- [63] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]// Holland H D, Turekian K K. Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier - Pergamon, 2003: 1-64.
- [64] 崔泽宏, 唐跃. 塔河地区海西晚期火山岩地球化学特征及地质意义[J]. 中国地质, 2010, 2: 334-346.
- [65] 张芳荣. 江西中 - 南部加里东期花岗岩地质地球化学特征及其成因[D]. 南京大学博士学位论文, 2011.
- [66] 陈玉良, 康文彬, 梅华平, 等. 甘肃北山北部红石山地区泥盆系雀儿山群火山岩地球化学特征及构造环境分析[J]. 西北地质, 2015, 4: 50-60.
- [67] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. Geochimica et cosmochimica Acta, 1995, 59(7): 1217-1232.
- [68] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(2): 241-265.
- [69] 邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 等. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 649-656.
- [70] 李光来, 华仁民, 胡东泉, 等. 赣南地区石雷石英闪长岩的成因: 岩石化学、副矿物微量元素、锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2010, 3: 903-918.
- [71] 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等. 江西付坊花岗岩体的年代学、地球化学特征及其成因研究[J]. 高校地质学报, 2010, 2: 161-176.
- [72] 张芳荣, 沈渭洲, 舒良树, 等. 江西省早古生代晚期花岗岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(12): 3456-3468.
- [73] 王丽丽. 华南赣州地区早古生代晚期 - 中生代花岗岩类地球化学与岩石成因[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2015.
- [74] 李伍平, 路凤香, 孙善平, 等. 北京西山东岭台组 (J_3d) 火山岩的成因及其构造环境探讨[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 345-352.
- [75] 周云, 梁新权, 梁细荣, 等. 海南白垩纪六罗村组火山岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 5: 903-918.
- [76] 李龙, 郑永飞, 周建波. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. 岩石学报, 2001, 1: 61-68.
- [77] 章邦桐, 陈培荣, 凌洪飞, 等. 赣南中侏罗世玄武岩的 Pb-Nd-Sr 同位素地球化学研究: 中生代地幔源区特征及构造意义[J]. 高校地质学报, 2004, 10(2): 145-156.
- [78] 许德如, 陈广浩, 夏斌, 等. 湘东地区板杉铺加里东期埃达克质花岗岩闪长岩的成因及地质意义[J]. 高校地质学报, 2006, 4: 507-521.
- [79] 张浅深, 俞受黎, 黄建辉, 等. 江南南部泥盆系的初步认识[J]. 地质学报, 1964, 4: 388-404, 488.
- [80] 欧阳京, 汪双双, 于漫, 等. 岛弧环境中不同成因的火成岩组合及其地质意义[J]. 甘肃地质, 2010, 19 (2): 18-26.
- [81] 祁晓鹏, 杨杰, 范显刚, 等. 东昆仑造山带东段牦牛山组英安岩年代学和地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37 (3): 482-494.
- [82] Momme P, Tegner C C, Brooks C K R, et al. Two melting regimes during Paleogene flood basalt generation in East Greenland: combined REE and PGE modeling [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 15(1): 88-100.
- [83] Sigmarsson O, Steinthorsson S. Origin of Icelandic basalts: A review of their petrology and geochemistry [J]. Journal of Geodynamics, 2007, 43(1): 87-100.
- [84] 汤鸿伟, 康孔跃, 杨伟, 等. 西昆仑胜利桥一带晚三叠世侵入岩年代学、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15): 1-11.
- [85] Gorton M P, Schandl E S. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc - related and within - plate felsic to intermediate volcanic rocks [J]. Canada Mineral, 2000, 38: 1065-1073.
- [86] Harris, N B W. Geochemical characteristics of collision - zone magmatism [J]. Collision Tectonics, 1986, 19: 67-81.
- [87] 曾勇, 杨明桂. 赣中碰撞混杂岩带[J]. 地质通报, 1999, (1): 17-22.
- [88] 胡受奚, 叶瑛. 对“华夏古陆”、“华夏地块”及“扬子 - 华夏古陆统一体”等观点的质疑[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 432-439.
- [89] 于津海, 魏震洋, 王丽娟, 等. 华夏地块: 一个由古老物质组成的年轻陆块[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 440-447.
- [90] 马瑞士. 华南构造演化新思考兼论“华夏古陆”说中的几个问题[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 448-456.
- [91] 王鹤年, 周丽娅. 华南地质构造的再认识[J]. 高校地质学报, 2006, (4): 47-55.
- ①江西省区域地质调查大队. 龙南幅 1/20 万区域地质调查报告. 1970.