

doi:10.3799/dqkx.2014.003

桂北圆石山早侏罗世 A 型花岗岩的岩石成因及意义

贾小辉, 王晓地, 杨文强, 牛志军

中国地质调查局武汉地质矿产研究所, 湖北武汉 430223

摘要: 桂北圆石山花岗岩中发育大量镁铁质包体. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 花岗岩形成于早侏罗世(179±2 Ma). 花岗岩的地球化学特征表现为硅含量均一, 富碱更富钾、相对富铁而贫镁, 具有高的 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值和 Zr+Nb+Ce+Y 含量, 属于 A 型花岗岩. 圆石山花岗岩具有比较均一的 Sr、Nd 同位素组成 ($I_{\text{Sr}}=0.7017 \sim 0.7108$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-7.77 \sim -4.55$). 镁铁质包体则显示了稍低的 I_{Sr} 值(0.7050~0.7071)和稍高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-4.87~-2.63). 花岗岩的锆石原位 Hf 同位素组成为: ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i=0.28262~0.28270, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-1.68 \sim 1.17$, 相应的 Hf 同位素两阶段模式年龄 T_{DM2} 变化于 1.25~1.43 Ga 之间. 圆石山花岗岩可能是在伸展环境下由低成熟度的下地壳物质部分熔融所形成. 自早侏罗世(~200 Ma)以来, 伸展作用是华南内陆构造背景的主体, 多期次的玄武质岩浆底侵作用可能是燕山期伸展作用的直接诱因. 华南内陆早侏罗世时期可能仍处于板内“后碰撞”环境.

关键词: 早侏罗世; A 型花岗岩; 玄武质底侵; 伸展作用; 岩石学; 地球化学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2014)01-0021-16

收稿日期: 2013-07-30

The Early Jurassic A-Type Granites in Northern Guangxi, China: Petrogenesis and Implications

Jia Xiaohui, Wang Xiaodi, Yang Wenqiang, Niu Zhijun

Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Wuhan 430223, China

Abstract: The Yuanshishan granites have large amounts of mafic enclaves. This paper presents new zircon LA-ICP-MS U-Pb age, and the age analysis shows that the granites were generated in Early Jurassic (179±2 Ma). These granites are characterized by uniform silicon contents, enriched in alkali contents and more enriched in K contents, and enriched in iron and depleted in magnesium contents, with high $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ values and Zr+Nb+Ce+Y contents. The granites belong to A-type granite. The Yuanshishan granites have homogeneous Sr-Nd isotope compositions ($I_{\text{Sr}}=0.7017$ to 0.7108 , $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-7.77$ to -4.55). Mafic enclaves show lower I_{Sr} (0.7050 to 0.7071) and higher $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-4.87 to -2.63) values. In situ zircons Hf isotope compositions from these granites have limited ranges ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i=0.28262 to 0.28270, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-1.68$ to 1.17, and $T_{\text{DM2}}=1.25$ to 1.43 Ga. We suggest that the Yuanshishan granites were likely generated by partial melting of newly underplated basaltic lower crust in extension setting. Since Early Jurassic (~200 Ma), extension has been the major subject of the tectonic background in the interior of the South China. Multistage basaltic magma underplating is direct inducement to the Yanshanian extension. During the Early Jurassic, the South China interior was most likely in post-collisional setting.

Key words: Early Jurassic; A-type granite; basaltic magma underplating; extension; petrology; geochemistry.

华南缺乏(少见) J_1 时期(200~175 Ma)的岩浆活动, 被称为岩浆活动“宁静期”, 该时期也被认为是华南地区从特提斯构造域向古太平洋构造域转换的过渡期(周新民, 2003; Zhou *et al.*, 2006), 而印支期的构造-岩浆演化及其与燕山期岩浆作用的关系目

前尚无明确的认识(陈卫峰等, 2007), 因此通过对形成于该时期的岩浆岩的研究, 对于进一步了解华南地区早中生代大地构造演化及探讨其动力学机制有着重要意义. 近几年, 随着高精度同位素年龄的相继报道和研究的深入, 华南地区 J_1 时期岩浆岩的面貌

基金项目: 中国地质调查局基础地质综合研究项目《南岭成矿带基础地质综合研究》(No.1212011085356).

作者简介: 贾小辉(1980-), 助理研究员, 从事岩石学、地球化学相关研究. E-mail: jxh1226@126.com

也得以逐步展现,就目前报道资料而言,华南地区 J_1 时期岩浆岩主要分布于南岭东段的赣粤交界一带,华南内陆及东南沿海也有零星分布,如粤北霞岗辉长岩—花岗岩杂岩体(195~196 Ma)(余心起等, 2009)、赣南余田菖蒲盆地双峰式火山岩(191~195 Ma)(冀春雨和巫建华, 2010)、赣南柯树北花岗岩(189 Ma)(Li and Li, 2007)、全南黄埠正长岩(179.3 Ma)、车步辉长岩(175.5 Ma)、会昌粗面玄武岩(181 Ma)(贺振宇等, 2008; He *et al.*, 2010)、桂坑花岗岩(182.5 Ma)(周新民, 2007)、粤北大宝山花岗岩闪长斑岩(175.8 Ma)(王磊等, 2010)以及湖南白马山花岗岩(204.5 Ma)(陈卫峰等, 2007)和沱山花岗岩(187.4 Ma)(丁兴等, 2005)、宁远碱性玄武岩(205.5 Ma)(刘勇等, 2010)、浙东南松阳毛弄英安质晶屑凝灰岩(180 Ma)(陈荣等, 2007). 而南岭西段至今仍未有相关报道. 最近,笔者在对桂北恭城圆石山花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年研究时发现,其形成于早侏罗世(178.5 Ma),岩石地球化学指示该岩体为 A 型花岗岩,岩体中发育大量镁铁质暗色包体, Sr-Nd-Hf 同位素组成显示寄主岩与镁铁质

包体虽无直接的成因关系,但镁铁质包体的存在提供了花岗岩形成的热源及伸展机制的诱因. 这一成果对于研究南岭地区乃至整个华南内陆早侏罗世时期的壳幔相互作用及构造动力学机制具有重要意义.

1 岩体地质特征

圆石山岩体位于湘桂交界的广西恭城县北东约 25 km 处(图 1a),大地构造位置上属南华加里东准地台桂中—桂东台陷中的桂东北凹陷海洋山断褶带南部(黄汲清等, 1980). 岩体出露面积为 56.97 km², 沿银殿山穹窿侵入,栗木—恭城断裂带东缘(图 1b),平面上呈一长轴正南北向似椭圆状的岩柱(广西地质矿产勘查开发局,恭城瑶族自治县幅 1:5 万区域(G49E019012)地质调查报告, 1999),形状不规则(图 1a). 岩体侵入下奥陶统(O_1)砂岩夹板岩和下泥盆统(D_1)砂岩、粉砂岩地层中,岩体南西向有侏罗系地层出露. 1/5 万恭城瑶族自治县幅区调报告(广西地质矿产勘查开发局,恭城瑶族自治县幅 1:

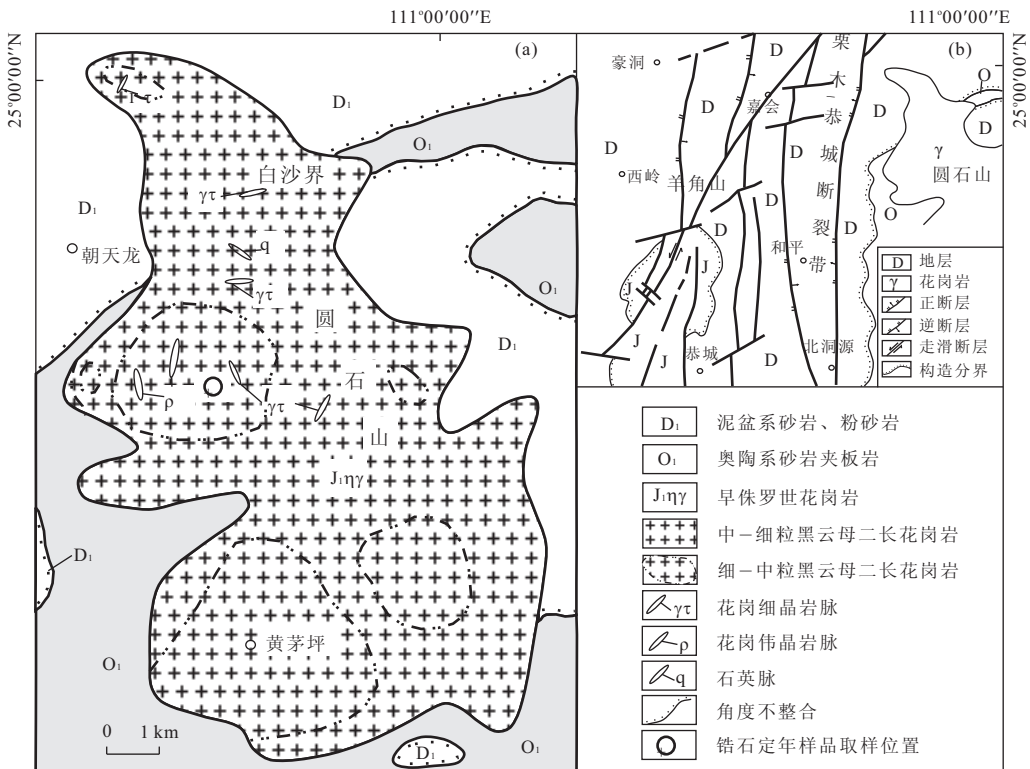


图 1 桂北恭城圆石山地质略图(a)及区域构造地质简图(b)(底图据广西地质矿产勘查开发局,恭城瑶族自治县幅 1:5 万区域(G49E019012)地质调查报告, 1999)

Fig.1 Sketch geological map of Yuanshishan (a) and sketch geological setting map (b) of the Gongcheng area, northern Guangxi

5 万区域(G49E019012)地质调查报告,1999)报道了 2 个 K-Ar 同位素年龄分别为 154 Ma 和 143 Ma,为晚侏罗世—早白垩世。

圆石山花岗岩主要岩性为一套似斑状黑云母二长花岗岩,1/20 万桂林幅区调报告根据岩性特征和岩相变化将之划分为边缘相、过渡相和中心相 3 个相带(广西壮族自治区地质局,桂林幅(G-49-XX-VII)1:20 万区域地质调查报告,1969),而 1/5 万恭城瑶族自治县幅区调报告则据“单元—超单元”的划分方式将之分为“银殿山独立侵入体”和“屋面前单元”,结合前人的资料及本次工作,圆石山岩体“各单元”的岩石学、矿物学、地球化学等特征是一致的,仅有的差别在于局部粒度的差异(图 1a),这种差异对于大的岩体或岩基是正常的,可能是结晶程度不同或局部物源组分的不同(张旗等,2008)。花岗岩主要造岩矿物为条纹长石、斜长石、石英和黑云母,斑晶主要为条纹长石,副矿物组合为独居石、锆石、钛铁矿、磁铁矿、电气石和黄铁矿等。岩体中包体非常发育,颜色呈灰色—灰黑色,明显比寄主岩深,与寄主岩界限不明显。包体形态多为椭圆状、等轴状、常见淬冷边、有时含有反向脉。大小不一,一般为 3 cm×5 cm,大者可达 20 cm×50 cm。常为闪长质,偶为花岗闪长质。包体主要矿物成分为黑云母、斜长石、钾长石和石英。镜下可见寄主岩斜长石斑晶穿插于包体中,长条状黑云母具弱定向排列,但未见角闪石。包体于镜下还可见少量针状磷灰石,长度不大于 50 μm。此外,可见少量围岩捕虏体,主要为硅化、角岩化砂岩。岩体内还发育一些脉岩,主要为细粒花岗岩脉、伟晶岩脉等。

2 分析方法

本次研究所采集的锆石 U-Pb 同位素年龄测试样品的坐标为 24°57′02.384″N、110°56′46.470″E,并对花岗岩和包体的岩石样品进行化学取样。

锆石样品挑选过程为:先将新鲜的岩石样品粉碎至 120 目以下,用常规的人工淘洗和电磁选方法富集锆石,再在双目镜下手工方法逐个精选锆石颗粒。本次锆石定年样品和主量元素和微量元素分析的样品相对应。锆石阴极发光(CL)图像研究在中国地质大学(武汉)JXA-8100 电子探针仪上完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Agilent7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 Compex102ArF 准分子

激光器(工作物质 ArF,波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas200M 光学系统的联机上进行。激光束斑直径为 44 μm,剥蚀深度为 20~40 μm。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行一起最佳化,使仪器达到最高的灵敏度、最小的氧化物产率、最低的背景值和稳定的信号,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式(peak jumping)。锆石 U-Pb 年龄测定采用标准锆石 91500 作为外标标准物,外标校正方法为每隔 6 个样品分析点测一次标准,保证标准和样品的仪器条件完全一致。元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标。锆石 U-Pb 年龄测试仪器的运行条件、详细的分析流程参见袁洪林等(2003)。样品的同位素比值采用软件 ICPMSData-Cal 完成(Liu *et al.*,2008),相关结果按照 Anderson(2002)的方法年龄计算及谐和图的绘制采用 Iso-plot(ver3.0)(Ludwig,2003)完成。分析数据列于表 1。在进行锆石 U-Pb 年龄测定的同时,在 LA-MC-ICPMS 上获得锆石原位 Hf 同位素组成。测定时采用标样 91500 和 GJ-1、MON-1 作为外标。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算中,采用 Blichert and Albarede(1997)所推荐的球粒陨石值,半衰期 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}$,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.033 2±2.亏损地幔模式年龄(T_{MD})计算采用 Griffin *et al.*(2000)的推荐值,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.038 4。分析数据列于表 2。

主元素分析在中国地质调查局宜昌地质矿产研究所中南检测中心完成。分析方法为 Si 和烧失量采用重量法,Al 和 Fe²⁺采用容量法,Fe³⁺、Ti 和 P 采用分光光度法,K、Na、Ca、Mg 和 Mn 采用原子吸收光谱法。分析数据列于表 3。

微量元素和 Sr-Nd 同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。微量元素采用酸溶法,制备好的样品溶液在 ICP-MS 上测试,所用仪器为 HR-ICP-MS (Element I),德国 Finnigan-MAT 公司制造,工作温度 20 °C,相对湿度分别为 30%,微量元素含量大于 10 μg/g 时的相对误差小于 5%,小于 10 μg/g 时的相对误差小于 10%,详细的分析流程见 Qu *et al.*(2004)。微量元素分析数据列于表 3。Sm 和 Nd 的分离使用常规的两次离子交换技术,质谱分析使用 7 个接收器的 Finnigan MAT-62 质量分光计,Sr 用静态模式而 Nd 用动态模式。Nd 同位素比值测定以 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 9 进行标准化,对 La Jolla 测定的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd =

表 1 圆石山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析数据
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb isotope for zircons of the Yuanshishan granites

点号	Th/U	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	比值(经普通铅校正过的)				年龄(经普通铅校正过的)(Ma)							
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
1	0.34	414	1214	0.04777	0.0010	0.19209	0.0041	0.02906	0.0002	88	49	178	3	185	1
2	0.37	291	791	0.04999	0.0020	0.21210	0.0088	0.03072	0.0002	195	97	195	7	195	1
3	0.15	517	3559	0.04730	0.0007	0.20962	0.0035	0.03201	0.0003	64	34	193	3	203	2
4	0.42	351	842	0.05121	0.0014	0.19821	0.0054	0.02801	0.0002	250	62	184	5	178	1
5	0.43	155	358	0.05328	0.0032	0.20465	0.0120	0.02786	0.0004	341	139	189	10	177	2
6	0.33	261	802	0.05397	0.0062	0.20488	0.0232	0.02753	0.0003	370	261	189	20	175	2
7	0.68	391	577	0.06131	0.0012	0.67446	0.0134	0.07956	0.0006	650	41	523	8	494	3
8	0.38	195	514	0.04991	0.0017	0.22029	0.0073	0.03206	0.0003	191	76	202	6	203	2
9	0.29	358	1248	0.05403	0.0030	0.23508	0.0124	0.03155	0.0005	372	126	214	10	200	3
10	0.22	390	1764	0.06411	0.0009	0.57221	0.0203	0.06333	0.0018	745	47	459	13	396	11
11	0.51	552	1087	0.07924	0.0010	1.95651	0.0333	0.17821	0.0022	1178	24	1101	11	1057	12
12	0.21	661	3117	0.04957	0.0010	0.19499	0.0038	0.02841	0.0002	175	43	181	3	181	1
13	0.28	908	3269	0.04628	0.0007	0.18263	0.0031	0.02848	0.0002	12	31	170	3	181	1
14	0.33	1926	5859	0.04742	0.0011	0.18400	0.0042	0.02809	0.0002	70	50	171	4	179	1
15	0.42	288	690	0.04730	0.0013	0.17690	0.0051	0.02704	0.0003	65	61	165	4	172	2
16	0.30	233	777	0.04965	0.0017	0.19229	0.0059	0.02818	0.0003	179	70	179	5	179	2
17	0.42	342	824	0.04684	0.0013	0.17735	0.0046	0.02750	0.0002	41	54	166	4	175	1
18	0.42	804	1918	0.05021	0.0017	0.17912	0.0056	0.02591	0.0002	205	72	167	5	165	1

表 2 圆石山花岗岩锆石的 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 2 Lu-Hf isotopic results for zircons of the Yuanshishan granites

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$T(\text{Ma})$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	$T_{\text{Hf1}}(\text{Ga})$	$T_{\text{Hf2}}(\text{Ga})$
01	0.023 623 1	0.000 64	0.282 68	0.000 013	185	0.82	0.5	0.80	1.29
02	0.019 189 8	0.000 53	0.282 67	0.000 011	195	0.53	0.4	0.82	1.32
03	0.037 283 0	0.000 97	0.282 75	0.000 010	203	3.52	0.4	0.71	1.14
04	0.028 904 5	0.000 80	0.282 68	0.000 012	178	0.60	0.4	0.80	1.29
05	0.015 244 8	0.000 44	0.282 68	0.000 011	177	0.44	0.4	0.80	1.30
06	0.022 838 5	0.000 65	0.282 62	0.000 013	175	-1.68	0.5	0.89	1.44
07	0.027 042 1	0.000 74	0.282 21	0.000 010	494	-9.16	0.3	1.46	2.34
08	0.018 991 9	0.000 55	0.282 67	0.000 011	203	1.74	0.4	0.78	1.26
09	0.020 045 5	0.000 57	0.282 62	0.000 009	200	-0.94	0.3	0.88	1.42
10	0.024 360 6	0.000 68	0.282 50	0.000 011	396	-0.01	0.4	1.01	1.63
11	0.030 998 2	0.000 88	0.282 09	0.000 012	1 178	1.33	0.4	1.63	2.61
12	0.030 248 4	0.000 83	0.282 69	0.000 010	181	0.81	0.4	0.80	1.28
13	0.032 045 2	0.000 91	0.282 69	0.000 012	181	0.83	0.4	0.80	1.28
14	0.052 384 5	0.001 46	0.282 70	0.000 009	179	1.17	0.3	0.79	1.25
15	0.017 786 9	0.000 51	0.282 63	0.000 010	172	-1.33	0.4	0.87	1.41
16	0.017 479 9	0.000 50	0.282 69	0.000 012	179	1.01	0.4	0.78	1.27
17	0.018 840 3	0.000 56	0.282 65	0.000 009	175	-0.63	0.3	0.85	1.37
18	0.026 798 1	0.000 76	0.282 69	0.000 010	165	0.75	0.3	0.79	1.27

$0.511\ 554 \pm 7(2\sigma, n = 8)$; Sr 同位素比值测定采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.119\ 4$ 进行质量分馏校正, Sr 同位素标准为 NBS607, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.200\ 35 \pm 1(2\sigma, n = 6)$. 实验室全流程本底: Rb、Sr 为 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ g, Sm、Nd 为 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ g. 详细的实验流程以及各类标准样品测定结果见 (倪智勇等, 2009). Sr-Nd 同位素分析结果列于表 4.

3 分析结果

3.1 年代学

本次对圆石山花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的样品为 N035-1z, 在取样过程中, 尽量剔除样品中的包体和捕虏体成分, 保证获取到岩体的主体锆石. 样品中锆石多呈长柱状, 晶形较完好, 颗粒相对较大, 一般为 $80\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$, 韵律环带发育. 在 CL 图像上大部分核部和边部无差异明显. 所测锆石的 18 个分析点中 Th 含量为 $155 \times 10^{-6} \sim 1\ 926 \times 10^{-6}$, U 含量为 $358 \times 10^{-6} \sim 5\ 859 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.15 \sim 0.68$. 所测试的 8 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主体变化于 $172 \sim 185$ Ma 之间, 在 U-Pb 谐和图上投于谐和线上或附近 (图 2), 得出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 178.5 ± 2.0 Ma (MSWD=1.3), 代表了侵入岩的形成时代. 偏离主体年龄值的 10 个分析点中, 其中 11 号点为老锆石, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1\ 178$ Ma, 与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

不太一致, 可能为 Pb 丢失所致; 07 号点和 10 号点年龄偏老, 分别为 494 Ma 和 396 Ma; 02、03、08 和 09 号点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 $195 \sim 203$ Ma 之间, 与主体锆石相近, 其成因有待 Hf 同位素验证; 还有 18 号点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏低, 为 165 Ma, 该分析点测试信号弱且杂乱, 可能代表后期变质年龄; 而 01 和 15 号点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分别为 185 Ma 和 172 Ma, 可能为分析误差所致, 为计入计算结果.

3.2 元素地球化学

圆石山花岗岩和包体均为橄榄玄粗质—高钾钙碱性 (图 3a) (Peccerillo and Taylor, 1976), 弱过铝质 ($A/\text{CNK} = 0.93 \sim 1.06$) (图 3b). 在 TAS 图解上, 花岗岩样品全部落入花岗岩图区, 而包体落入闪长岩、二长岩和花岗闪长岩区 (图略) (Middlemost, 1994). 花岗岩具有均一的硅含量 ($\text{SiO}_2 = 70.30\% \sim 74.06\%$), 富碱更富钾 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.17\% \sim 9.87\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.59 \sim 2.08$)、相对富铁而贫镁 ($(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})/\text{MgO} > 11.5$). 包体具有相对低的硅 ($\text{SiO}_2 = 56.12\% \sim 62.37\%$) 含量和高的铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.16\% \sim 16.61\%$) 和铁镁含量 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 7.53\% \sim 10.20\%$, $\text{MgO} = 1.33\% \sim 4.29\%$), 为镁铁质包体. Al_2O_3 、CaO、 FeO^T ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)、MgO、MnO、CaO、 P_2O_5 等均与 SiO_2 呈负相关关系, 表明岩浆经历了镁铁质矿物、斜长石、钛铁氧化物和磷灰石的结晶分异. 随 SiO_2 增加, LREE 含量降低而 δ_{Eu} 值增加, 表明富 LREE 矿物如磷灰石、榍石、独居

表 3 圆石山花岗岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 3 Chemical compositions of the Yuanshishan granites

样品	花岗岩							镁铁质包体			
	N035-1	N035-2	N035-3	N035-4	N035-8	N036-1	N036-2	N035-5	N035-6	N035-7	N035-9
SiO ₂	71.07	73.36	70.30	70.99	74.06	72.92	72.99	59.31	62.37	60.07	56.12
Al ₂ O ₃	14.62	13.48	14.88	14.72	13.05	13.84	13.47	16.02	12.16	16.61	15.87
Fe ₂ O ₃	0.66	0.05	0.15	1.35	1.15	0.91	0.10	0.88	0.13	0.67	1.66
FeO	2.06	2.68	3.07	1.79	1.70	1.64	2.69	9.32	9.00	6.86	7.87
CaO	0.94	1.01	1.11	1.12	1.06	0.90	0.91	2.94	2.77	4.09	4.42
MgO	0.22	0.22	0.27	0.26	0.25	0.17	0.18	1.33	4.29	2.02	2.53
K ₂ O	6.67	5.53	6.11	5.81	5.01	5.46	5.73	3.56	4.10	2.66	3.18
Na ₂ O	3.20	3.10	3.38	3.38	3.16	3.36	3.29	3.64	2.20	3.80	3.30
TiO ₂	0.150	0.150	0.200	0.190	0.166	0.122	0.120	0.910	0.990	1.080	1.480
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0.03	0.03	0.41	0.32	0.52	0.56
MnO	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.19	0.16	0.12	0.19
Total	99.68	99.66	99.59	99.72	99.71	99.39	99.56	98.51	98.49	98.51	97.18
Li	108.0	99.2	120.0	114.0	112.0	122.0	120.0	575.0	459.0	268.0	350.0
Be	10.10	9.05	9.42	10.60	8.05	7.19	7.36	16.00	7.55	5.72	10.20
Sc	5.67	5.96	6.98	7.30	6.78	6.19	6.21	24.30	20.90	10.40	15.40
V	11.30	10.70	12.40	12.50	12.30	9.03	9.59	64.70	117.00	109.00	160.00
Cr	19.90	17.40	12.20	6.92	7.32	12.80	20.50	9.75	338.0	0.87	14.60
Co	2.30	2.39	2.36	2.47	2.08	1.59	2.12	10.00	27.20	13.20	18.00
Ni	6.80	3.23	3.61	3.21	2.99	3.09	3.97	5.23	138.00	5.18	7.61
Cu	7.43	6.19	6.72	6.00	4.94	5.65	9.02	7.95	9.64	22.30	24.80
Zn	46.9	43.1	53.0	52.8	50.6	34.8	42.1	281.0	247.0	156.0	197.0
Ga	29.1	28.1	30.7	28.9	27.1	28.0	27.8	37.3	29.2	27.0	34.0
Rb	388	436	403	390	362	406	426	676	719	392	565
Sr	55.7	95.6	87.3	69.9	71.0	52.6	58.6	61.0	143.0	404.0	401.0
Y	61.9	70.4	68.8	63.3	48.0	79.6	95.2	109.0	82.1	62.7	88.6
Zr	172	183	198	180	148	136	165	531	278	311	311
Nb	51.4	37.0	40.0	40.1	48.0	44.1	49.2	92.2	71.0	43.2	70.1
Mo	1.17	1.04	1.18	1.20	0.73	0.58	0.55	0.28	1.22	1.00	1.88
Cd	0.07	0.18	0.08	0.10	0.06	0.11	0.15	0.34	0.18	0.40	0.26
In	0.11	0.09	0.09	0.12	0.10	0.06	0.06	0.41	0.27	0.17	0.38
Sb	0.58	0.56	0.81	0.84	0.65	0.51	0.59	0.25	0.23	0.36	0.72
Cs	36.1	36.5	41.5	42.7	38.0	21.4	22.2	131.0	139.0	32.4	78.4
Ba	537	525	778	423	333	316	357	491	387	898	801
La	51.3	59.8	49.9	55.0	57.6	44.0	44.2	37.8	49.7	51.3	65.7
Ce	114.0	123.0	105.0	116.0	117.0	93.1	93.7	82.1	105.0	94.1	120.0
Pr	13.2	15.3	12.7	14.0	14.8	11.7	11.7	11.6	13.2	12.7	16.1
Nd	52.5	60.6	50.5	53.9	59.2	47.9	48.7	52.4	56.6	54.3	67.7
Sm	13.2	14.4	13.0	13.6	14.2	13.0	13.8	18.8	15.7	12.5	16.6
Eu	0.840	0.790	1.070	0.780	0.680	0.650	0.640	0.470	0.799	1.790	2.060
Gd	11.3	12.0	11.4	11.1	11.4	12.2	13.1	19.5	14.7	11.2	15.9
Tb	2.13	2.35	2.34	2.07	1.96	2.52	2.68	3.98	2.92	2.18	2.94
Dy	12.2	13.3	13.1	11.8	11.1	15.0	17.0	21.9	16.8	12.7	17.4
Ho	2.25	2.49	2.39	2.12	1.84	2.89	3.33	3.88	3.05	2.26	3.22
Er	6.31	7.03	6.87	6.01	4.98	8.01	9.51	10.10	8.10	6.35	8.67
Tm	1.10	1.21	1.20	1.03	0.82	1.40	1.67	1.74	1.33	1.06	1.45
Yb	6.32	7.18	6.73	6.14	4.39	8.06	9.84	9.95	7.30	5.83	8.04
Lu	0.95	1.11	1.06	0.97	0.64	1.21	1.51	1.51	1.09	0.90	1.24
Hf	7.03	7.45	8.11	7.23	6.23	5.80	7.52	14.10	8.72	7.74	8.57
Ta	6.05	5.22	5.14	5.04	5.89	7.06	6.93	8.15	5.81	3.26	6.66
W	5.60	3.25	3.41	5.68	7.15	3.43	4.32	2.54	2.71	2.09	6.33
Tl	2.52	2.07	2.30	2.18	1.94	2.32	2.49	4.52	4.58	2.40	3.43
Pb	42.6	37.4	42.2	38.7	36.6	42.2	47.1	31.1	10.8	17.3	16.6
Bi	0.24	0.88	0.35	0.60	0.52	0.25	0.25	0.59	0.17	0.40	2.41
Th	35.1	40.0	39.3	39.3	39.8	38.7	40.5	14.9	26.9	17.6	24.6
U	14.30	13.50	14.20	12.70	18.30	12.00	13.40	6.43	8.70	12.10	12.70
10 ⁴ × Ga/Al	3.76	3.94	3.90	3.71	3.92	3.82	3.90	4.40	4.53	3.07	4.05
Zr+Nb+Ce+Y	399	413	411	399	361	352	403	814	536	511	589
T(°C)	814	820	824	816	799	796	811	852	773	775	745

表 4 圆石山花岗岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of the Yuanshishan granites

样品号	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$T(\text{Ma})$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
N035-2	14.4	60.6	0.144 6	0.512 272	0.000 007	178.5	-5.95	1.46
N035-4	13.6	53.9	0.153 6	0.512 354	0.000 007	178.5	-4.55	1.34
N036-1	13.0	47.9	0.165 2	0.512 203	0.000 012	178.5	-7.77	1.61
N036-2	13.8	48.7	0.172 5	0.512 307	0.000 007	178.5	-5.90	1.45
N035-5	18.8	52.4	0.218 4	0.512 414	0.000 005	178.5	-4.87	1.37
N035-6	15.7	56.6	0.168 8	0.512 382	0.000 007	178.5	-4.36	1.33
N035-7	12.5	54.3	0.140 1	0.512 437	0.000 007	178.5	-2.63	1.19

样品号	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$T(\text{Ma})$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$
N035-2	436	95.6	12.862	0.740 035	0.000 013	178.5	0.707 3
N035-4	390	69.9	15.734	0.741 760	0.000 008	178.5	0.701 7
N036-1	406	52.6	21.767	0.759 676	0.000 010	178.5	0.704 2
N036-2	426	58.6	20.501	0.763 087	0.000 014	178.5	0.710 8
N035-5	676	61.0	31.252	0.785 050	0.000 009	178.5	0.705 4
N035-6	719	143.0	14.179	0.743 271	0.000 010	178.5	0.707 1
N035-7	392	404.0	2.736	0.711 940	0.000 011	178.5	0.705 0

注: T_{DM} 值采用 (Depaolo *et al.*, 1991) 两阶段模式年龄。

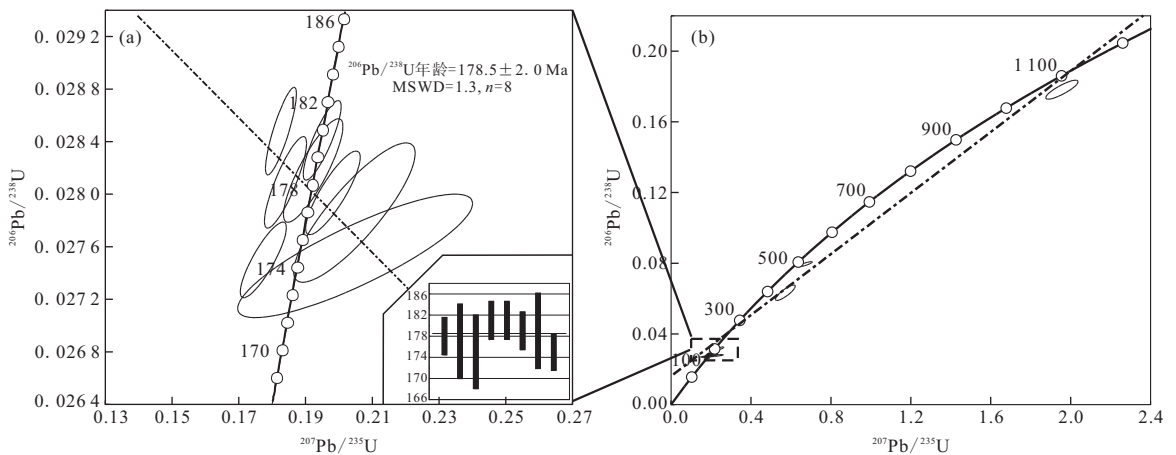


图 2 圆石山花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.2 The U-Pb concordant diagrams for the representative zircons of the Yuanshishan granites

石、电气石等结晶分异。寄主岩和镁铁质包体具有相似的稀土元素配分模式(图 4a),为轻稀土弱富集型((La/Yb)_N值分别为 3.22~9.41, 2.73~6.31),Eu 负异常明显(δ_{Eu} 分别为 0.14~0.26, 0.07~0.45)。寄主岩及镁铁质包体的微量元素特征相似,均表现为富集大离子亲石元素(LILE)(如 Rb、K 和 Th 等),亏损高场强元素(HFSE)(如 Nb、Ta、Zr、Hf、P、Ti)、过渡族元素(Cr、Co、Ni、V)和 Sr 等元素(图 4b)。Sr、Ba 和 Eu 等元素含量受控于斜长石/钾长石的结晶分异,Nb、Ta、P、Ti 等元素含量常受控于钛铁矿/榍石等矿物的结晶分异,岩体表现出 Sr、Eu 和 Nb、Ta、P、Ti 等元素的亏损,表明经历了长石和钛铁矿/榍石等矿物的结晶分异作用,与哈克图解结果一致。圆石山花岗岩微量元素的显著特征是富 Ga

($27.1 \times 10^{-6} \sim 30.7 \times 10^{-6}$), $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值变化于 3.71~3.94 之间(表 3),与 A 型花岗岩的平均值(3.75)相当,在 A 型花岗岩判别图解上($10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ vs. Zr、Nb、Ce、Y),花岗岩样品均落入 A 型花岗岩图区(图 5)(Whalen *et al.*, 1987)。

3.3 Sr-Nd-Hf 同位素

本文选择了部分花岗岩和镁铁质包体样品进行了全岩 Sr-Nd 同位素比值分析,分析结果见表 4。圆石山花岗岩具有比较均一的 Sr、Nd 同位素组成($I_{\text{Sr}}=0.7017 \sim 0.7108$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-7.77 \sim -4.55$)。镁铁质包体则显示了稍低的 I_{Sr} (0.7050~0.7071)和稍高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-4.87~-2.63)。

圆石山花岗岩主体锆石的原位 Hf 同位素组成变化不大:($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i = 0.282 62~0.282 70,

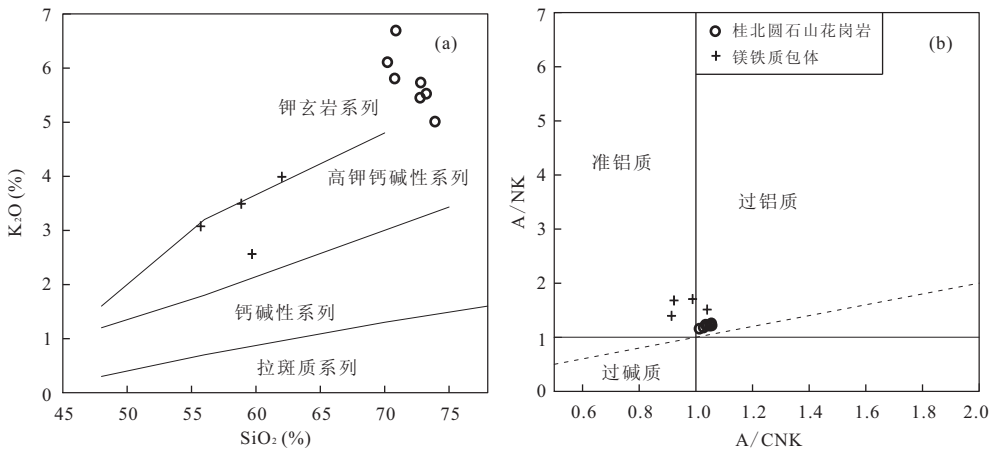


图 3 SiO₂ vs. K₂O(a)(Peccerillo and Taylor,1976)和 A/CNK vs. A/NK(b)

Fig.3 SiO₂ vs. K₂O diagrams (a) and A/CNK vs. A/NK diagrams (b) for the Yuanshishan granites

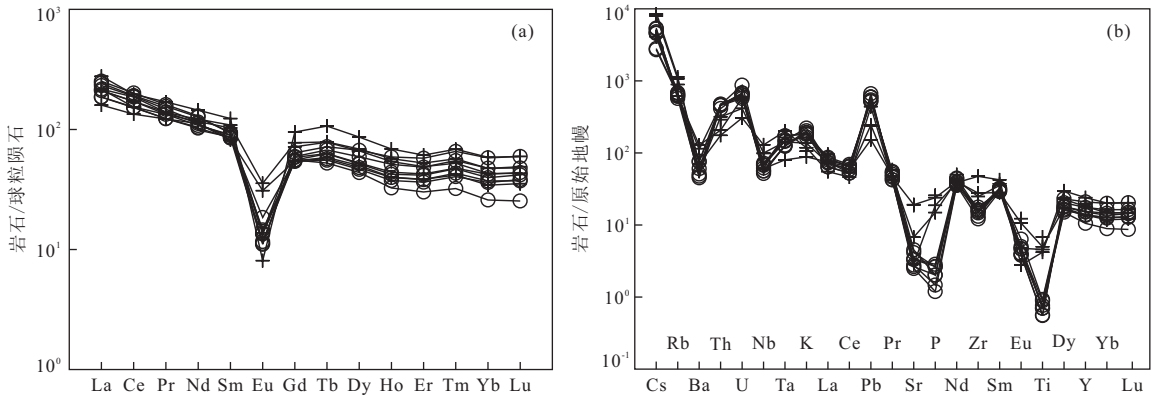


图 4 圆石山花岗岩稀土元素分布模式(a)和原始地幔标准化微量元素蜘蛛网(b)

Fig.4 The chondrite-normalized rare earth elements (REE) (a) and the primitive mantle-normalized multi-element diagrams (b) of the Yuanshishan granites

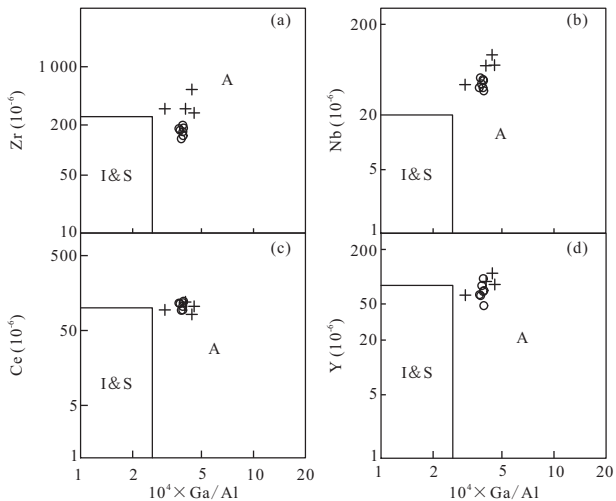


图 5 10⁴ × Ga/Al vs. Zr, Nb, Ce, Y 图解(Whalen *et al.*, 1987)
Fig.5 10⁴ × Ga/Al vs. Zr, Nb, Ce, Y diagrams for the Yuanshishan granites

$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -1.68 \sim 1.17$, 两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 为 1.25~1.43 Ga(表 2). 对于分析点 07、10 和 11 三颗明显偏老的锆石(年龄分别为 494 Ma, 396 Ma 和 1 178 Ma), 其 Hf 同位素组成也与主体锆石差别明显, ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值分别为 0.282 21、0.282 53 和 0.282 09, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -9.16、-0.01 和 +1.33, T_{DM2} 分别为 2.34 Ga、1.63 Ga 和 2.61 Ga. 02、03、08 和 09 号分析点(195~203 Ma)的 Hf 同位素组成与主体锆石相近(图 6): ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i = 0.282 62~0.282 75, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -0.94 \sim 3.52$, $T_{\text{DM2}} = 1.14 \sim 1.42$ Ga. 暗示着它们与花岗岩存在成因联系, 可能为源区残留锆石. 18 号点(165 Ma)的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 T_{DM2} 分别为 0.282 69 Ga、0.75 Ga 和 1.27 Ga, 与主体锆石一致, 表明该锆石颗粒可能为花岗岩的主体锆石, 在中侏罗世(165 Ma)经历了变质作用.

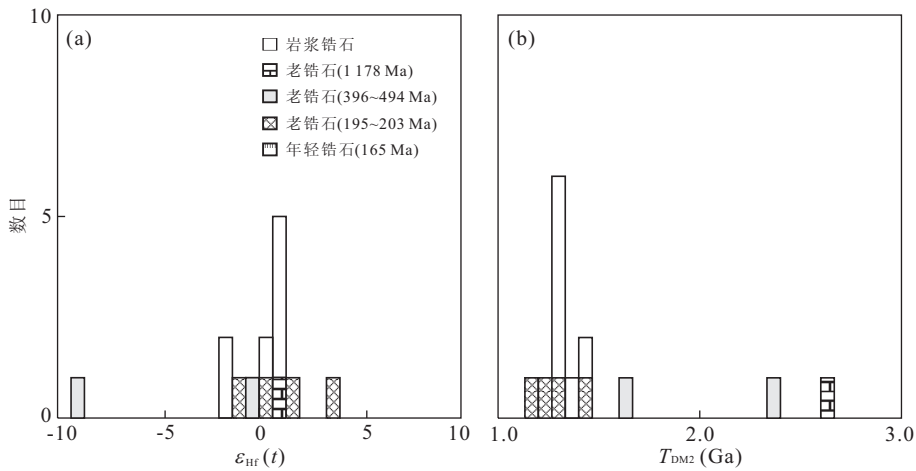


图 6 圆石山花岗岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 频谱图(a)和 T_{DM2} 频谱图(b)

Fig.6 The frequency diagrams for $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a) and T_{DM2} ages (b) of the Yuanshishan granites

4 讨论

4.1 岩石成因类型

高分异花岗岩经历了高度的分异结晶作用,矿物组成及化学成分都趋于低共结,从而对岩石成因类型的判别造成困难(吴福元等,2007).圆石山花岗岩具有高的 Rb 含量($362 \times 10^{-6} \sim 436 \times 10^{-6}$),但其 Rb/Sr 和 Rb/Ba 比值相对较低(分别变化于 4.56~7.72 和 0.52~1.28 之间),明显低于高分异的 I 花岗岩和 S 型花岗岩(Whalen *et al.*, 1987); SiO_2 含量并不十分高,在可区分 A 型花岗岩和高分异的 S 型和 I 型花岗岩的 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 和 $(\text{FeO}^{\text{T}})/\text{MgO}$ vs. $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 判别图解中(Whalen *et al.*, 1987),样品偏离高分异花岗岩区,而落入 A 型花岗岩区(图 7);此外,岩石样品的 Sr 同位素初始值比较正常,未出现异常高值和异常低值,表明分异结晶影响并不强烈(吴福元等,2007).因此,圆石山花岗岩虽然经历了一定程度的长石、铁钛氧化物和磷灰石、榍石等副矿物的分异结晶,但并不具有高分异花岗岩的特征,可以根据其矿物组成和化学成分进行岩石成因类型的判别。

依据岩石的矿物学和地球化学等特征,笔者认为圆石山岩体应为 A 型花岗岩,而非 S 型花岗岩(广西地质矿产勘查开发局,恭城瑶族自治县幅 1:5 万区域(G49E019012)地质调查报告,1999).矿物特征上,电子探针结果表明圆石山花岗岩中黑云母为富铁黑云母($\text{FeO}^{\text{T}} > 28.2\%$),未见 S 型花岗岩中常见矿物铁质白云母(陈建林等,2004),但由于岩体缺失碱性镁铁质矿物(如霓石、钠闪石、钠铁闪石

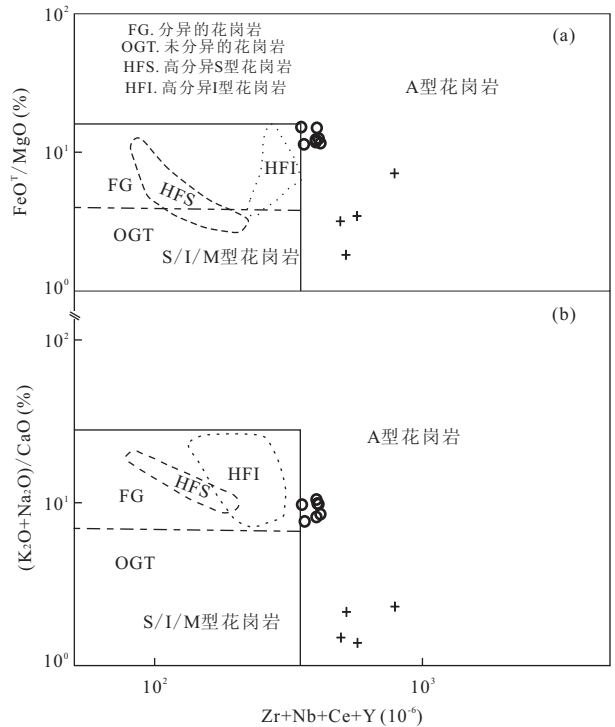


图 7 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ vs. $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ (a) 和 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ vs. $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ (b) 图解(Whalen *et al.*, 1987)

Fig.7 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ vs. $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ diagrams (a) and $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ vs. $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ diagrams for the Yuanshishan granites (b)

等),而不同于碱性 A 型花岗岩.吴福元等(2007)认为 S 型花岗岩的矿物学标志为堇青石,圆石山岩体除未见堇青石外,也未见石榴石、夕线石和红柱石等铝过饱和矿物,仅出现极少量电气石,与江西会昌密坑山铝质 A 型花岗岩相似(邱检生等,2005).此外,

岩体中锆石为低钽锆石, 具高的 U/Th 比值(2.31~4.71), 与东南沿海铝质 A 型花岗岩相似(Xie *et al.*, 2005), 而与碱性花岗岩存在较大差异(李艳军等, 2010). 地球化学特征上, (1) 圆石山花岗岩具富硅、碱, 贫钙、镁、铝, $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 值高(>11.5), 富 Rb、Th、Ga、Y, 贫 Sr、Ba、P、Ti 等元素(表 3), 并具有显著的负 Eu 异常, $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值高(3.71~3.94) 等特征, 总体表现出与 A 型花岗岩相当的特征(Whalen *et al.*, 1987) 等; (2) A 型花岗岩全铁(FeO^{T}) 含量高, 一般大于 1.00% (王强等, 2000), 圆石山花岗岩的全铁大于该值($\text{FeO}^{\text{T}} = 2.55\% \sim 3.22\%$); (3) 花岗岩具有相对高的 Na_2O 含量(3.10%~3.38%), 高于高分异 S 型花岗岩的平均值 2.81% (Whalen *et al.*, 1987), 与澳大利亚拉克兰地区铝质 A 性花岗岩相似(King *et al.*, 1997); (4) 花岗岩中 P_2O_5 的含量和含 P 矿物相是区分 A 型和 S 型花岗岩的有效标志(King *et al.*, 1997; Bonion, 2007), A 型花岗岩由于极低的 P_2O_5 含量而导致含 P 矿物稀少. 圆石山花岗岩具有极低的 P_2O_5 ($\leq 0.06\%$), 而大多数 S 型花岗岩大于 0.10% (Chappell and White, 2001), 且花岗岩样品的 P_2O_5 没有表现出随 SiO_2 增高而增高的趋势, 与 S 型花岗岩演化趋势不同, 而与含萤石花岗岩的低 P 亚类相似. 此外, A 型花岗岩形成温度一般较高(大于 800 °C), 圆石山花岗岩的锆石饱和温度为 796~824 °C (Watson and Harrison, 1983), 远高于 S 型花岗岩. 因此, 圆石山花岗岩应为 A 型花岗岩.

4.2 源区及热源

由于 A 型花岗岩形成于特殊的构造背景和具有重要的地球动力学意义, 一直广受国内外学者的关注(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992; King *et al.*, 1997; 刘昌实等, 2003; 王强等, 2005; 吴福元等, 2007; Bonin, 2007; Frost and Frost, 2011). 近些年来, 一些学者把 A 型花岗岩依据氧化还原状态分类, 即分为“还原型”和“氧化型”两个亚类的 A 型花岗岩(Frost and Frost, 1997; Frost *et al.*, 1999; Dall'Agnol *et al.*, 1999, 2005; Dall'Agnol and de'Oliveira, 2007). 这种分类抛开了构造环境对 A 型花岗岩亚类划分的约束, 将 A 型花岗岩作为一个整体, 综合野外地质、矿相学、地球化学以及物理化学条件等因素对 A 型花岗岩进行新的解析, 该分类方法仍在改进中(Dall'Agnol and de'Oliveira, 2007). 一般认为, 氧化型 A 型花岗岩源自下地壳氧化性质的长英质火成岩(Dall'Agnol *et al.*, 1999,

2005; Anderson and Morrison, 2005; Dall'Agnol and de'Oliveira, 2007), 还原型 A 型花岗岩源自还原性的长英质火成岩, 可能有变沉积物的参与(Anderson and Morrison, 2005), 或是源自分异的拉斑质源区(Frost and Frost, 1997; Frost *et al.*, 1999). 圆石山 A 型花岗岩的矿物组合与典型的还原型花岗岩相似(如, 巴西 Carajás 省的 Velho Guilherme 岩体), 地球化学特征也类似(如 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO}) > 0.92$), 在还原型和氧化型的判别图解(图 8) 中圆石山花岗岩样品绝大多数落入还原型 A 型花岗岩图区. 源自分异的拉斑质还原型花岗岩可由玄武质岩浆极度分异或者玄武质下地壳的部分熔融形成, 地球化学特征上表现为相对富铁、镁、钙(通常 $\text{FeO}^{\text{T}} > 3.0\%$ 、 $\text{MgO} > 0.2\%$ 、 $\text{CaO} > 1.5\%$), 相对富集过渡族元素(如 Cr、Ni、V 等), 具有高的成岩温度. 圆石山花岗岩具有与之相近的特征: $\text{FeO}^{\text{T}} = 2.55\% \sim 3.22\%$ 、 $\text{MgO} = 0.17\% \sim 0.27\%$ 、 $\text{CaO} = 0.90\% \sim 1.12\%$, 相对富集过渡族元素 Cr、Co、Ni、V 等(表 3), 相对高的形成温度(796~824 °C), 所以, 圆石山 A 型花岗岩可能源自分异的拉斑质源区, 但区域上没有更大规模的基性岩石端元发育, 仅出露少量煌斑岩岩脉(广西地质矿产勘查开发局, 恭城瑶族自治县幅 1:5 万区域(G49E019012) 地质调查报告, 1999), 也可以排除由玄武质岩浆极度分异的可能性, 较合理的解释是由玄武质下地壳物质的部分熔融所形成. 同时, 圆石山花岗岩具有相对低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-7.77~-4.55) 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-1.68~-1.17), 与江南造山带内新元古代花岗岩相似的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-9.0~-3.9) 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (-5.25~-3.70) (邱检生等, 2002; 王孝磊等, 2006), 结合上述地球化学特征, 暗示圆石山花岗岩与江南造山带内新元古代花岗岩可能具有相似的源区组成, 即源自于成熟度较低的地壳物质的部分熔融, 这种低的地壳成熟度可能是由下地壳夹杂了镁铁质—超镁铁质杂岩所致(邱检生等, 2002).

镁铁质包体与寄主岩矿物组合相似, 两者 Sr-Nd 同位素也非常相似, I_{Sr} 值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 0.7017~0.7108、-7.77~-4.55 和 0.7050~0.7071、-4.87~-2.63. 包体的 MgO 、 FeO^{T} 含量明显高于寄主岩, 但两者的 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 和 $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ 比值不同, 包体分别为 0.19~0.46 和 0.57~0.69, 寄主岩分别为 0.11~1.14 和 0.84~0.87, 表明镁铁质包体不可能为同源岩浆不混溶作用的产物(王德滋和谢磊, 2008), 更多的现象显示镁

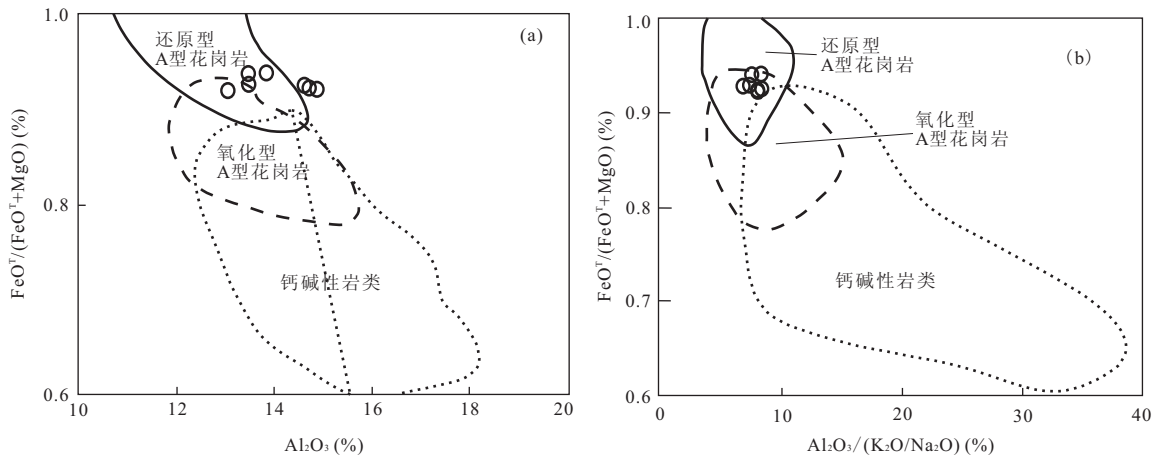


图 8 Al_2O_3 vs. $FeO^T/(FeO^T + MgO)$ 图解 (a) 和 $Al_2O_3/(K_2O/Na_2O)$ vs. $FeO^T/(FeO^T + MgO)$ 图解 (b) (Dall'Agnol and de'Oliveira, 2007)

Fig.8 Al_2O_3 vs. $FeO^T/(FeO^T + MgO)$ diagrams (a) and $Al_2O_3/(K_2O/Na_2O)$ vs. $FeO^T/(FeO^T + MgO)$ diagrams (b) for the Yuanshishan granites

铁质包体应为岩浆混合形成的,如:多为等轴状、常见淬冷边;发育针状磷灰石,针状磷灰石的出现,是岩浆混合作用的证据之一。实验岩石学结果表明,偏基性岩浆在花岗质岩浆中快速冷凝固结晶和成核密度大,缓慢结晶的磷灰石是短柱状的,而快速冷凝固结晶则为针状(杨策等,2006);有时含有反向脉,反向脉是由于偏基性岩浆在花岗质岩浆中快速冷凝固产生裂隙,花岗质岩浆则因受到基性岩浆加热而降低黏度,容易贯入裂隙中所形成;常见寄主岩长石捕虏晶等(王德滋和谢磊,2008)。而包体与寄主岩的化学成分一致,表明由玄武质岩浆和长英质岩浆混合而成的包体混合得较充分(mixing),化学成分上呈均一化(张旗等,2007)。因此,圆石山花岗岩中的镁铁质包体由深部岩浆房中镁铁质岩浆注入浅部长英质岩浆房的混合模式来解释更为合适(王德滋和谢磊,2008),深部基性岩浆由玄武质底侵形成。区域上发育的同期基性岩(脉),如分布于恭城孟家下侏罗统地层中的橄榄云煌岩脉(广西地质矿产勘查开发局,恭城瑶族自治县幅 1:5 万区域(G49E019012)地质调查报告,1999),也证实了玄武质岩浆底侵的存在。圆石山花岗岩高的形成温度(796~824℃)也为玄武质底侵作用提供了佐证。此外,以湖南宁远碱性玄武岩($SiO_2 = 44.80\%$ 和 $\epsilon_{Nd}(t) = 5.05$)(Li *et al.*, 2004)作为基性端元组分,通过简单的岩浆混合作计算,可以得出混合的圆石山花岗岩所需玄武岩浆的比例大概是 46%,表明圆石山花岗岩中的镁铁质包体可以由花岗质岩浆和玄武质岩浆直接混合所形成,且混合作用相对较充分。

圆石山花岗岩中普遍发育的镁铁质包体及存在 195~203 Ma 的偏老锆石及区域上早侏罗世煌斑岩,结合同时期的粤北辉长岩(196 Ma)、赣南玄武岩(196 Ma)、湘中玄武岩(204 Ma),暗示着华南内陆在~200 Ma 时期可能存在一期大规模的玄武质岩浆底侵活动,底侵的玄武质岩浆侵入下地壳,形成夹杂了镁铁质—超镁铁质杂岩的低成熟度的下地壳。之后~180 Ma 时期,又一次的玄武质岩浆底侵作用发生(可能是局部地区),加热夹杂了镁铁质—超镁铁质杂岩的低成熟度下地壳物质使得易熔组分熔融而形成了圆石山花岗岩浆,同时玄武质岩浆注入花岗质岩浆并与接触岩浆经过充分的混合作用,形成了花岗岩中大量的镁铁质包体。

4.3 构造意义

200~180 Ma 时期,华南内陆发育玄武岩、双峰式火山岩、A 型花岗岩和板内高钾钙碱性岩的岩石组合,指示该时期华南内陆处于伸展的构造背景。而粤北辉长岩、赣南玄武岩、赣南正长岩和辉长岩、湘中玄武岩以及桂北 A 型花岗岩中镁铁质包体的存在,表明早侏罗世时期华南内陆发育一期或多期大规模的玄武质岩浆底侵作用。地幔软流圈上涌诱发的岩石圈伸展,进而引发的玄武质岩浆底侵作用是华南地区早侏罗世伸展作用的诱因。自早侏罗世以来,华南内陆发育多期基性岩浆活动:~200 Ma、~175 Ma、~140 Ma、~120 Ma 和~90 Ma(李献华等,1997),这些基性岩浆是多期玄武质岩浆底侵作用的直接证据(周新民,2003)。结合 J_2 - K_2 时期广泛发育的双峰式火山岩、变质核杂岩、巨型链状火山岩

带和 A 型花岗岩带等岩石学标志(孙涛和周新民, 2002), 表明整个燕山期华南内陆构造背景以伸展为主, 但这种长达 120 Ma 的伸展作用及其动力学机制是难以理解的, 同时华南地区燕山期大量的构造变形的地质现象也被发现, 如, “江南古陆”北西缘陆内构造变形带(Yan *et al.*, 2003), 赣中南南丰—于都和崇安—顺昌构造带内的逆冲构造和走滑构造(张岳桥等, 2009), 指示了挤压环境的构造形迹. 对于这种看似矛盾的现象, 可能的理解是燕山期华南内陆地区的构造背景以伸展为主, 而“短时限”或“局部地区”则表现为挤压环境.

至于早侏罗世时期伸展作用的动力学机制, 仍存在较大争议. 是受特提斯构造域控制的印支造山运动的后造山伸展(Chen *et al.*, 2002; 陈培荣等, 2004), 还是古太平洋板块俯冲作用后期的板片折断(break-off)和拆沉(foundering)所引发的软流圈上涌和岩石圈伸展(Li, 2000; Li *et al.*, 2007; Meng *et al.*, 2012), 抑或是古太平洋板块俯冲作用深部挤压造成远程的伸展效应(丁兴等, 2005; Zhou *et al.*, 2006)? 还是中侏罗世(180 Ma)开始的古太平洋板块向大陆北西向的俯冲作用, 导致印支期的近东西向断裂复活拉张(谢昕等, 2005)? 平板俯冲模式对于解释华南内陆(特别是南岭地区)岩浆岩东西向展布、及幔源岩浆活动产物类似 OIB 的微量元素组成, 而明显缺乏与俯冲板片熔融或脱水作用有关的印迹等现象出现困难(Li *et al.*, 2003, 2004; 谢昕等, 2005). 不论是平板俯冲还是低角度俯冲, 即便是俯冲板块所影响的岩浆活动范围可达 1 000 km, 仍然影响不到桂北圆石山及其他广大内陆地区; 而俯冲板块的远程效应本身就是一个模糊用语, 其影响范围及影响能力有多大, 不得而知, 更遑论由俯冲引发的北东向的俯冲应力传递到华南内陆(地壳深度表现为伸展应力)(丁兴等, 2005), 这种伸展应力不能形成南岭地区东西向的岩浆岩带. 燕山早期, 南岭及其临区发育 A 型花岗岩、基性火山/侵入岩以及碱性岩, 构成了一个比较典型的板内非造山火成岩组合(李献华等, 2007). 因此, 早侏罗世时期的华南内陆不太可能受控于太平洋板块俯冲作用, 而更可能受印支运动之后的“后造山”伸展作用的影响. 桂北恭城圆石山花岗岩的构造环境判别图解结果也支持这一观点, 在花岗岩构造判别图解上(Pearce *et al.*, 1984), 圆石山 A 型花岗岩样品落入板内环境, 在 Eby(1992)A 型花岗岩判别图解上绝大部分样品落入 A₂(即后碰撞)图区(图略), 因此, 华南内陆早侏

罗世花岗岩可能与大多数印支晚期花岗岩一样形成于板内伸展环境, 仍然受控于印支运动之后的“后碰撞”作用.

致谢: 西北大学大陆动力学国家重点实验室袁洪林教授、赵敏硕士为锆石微区 U-Pb 同位素分析给予了大力帮助和指导, 审稿专家提出了很多宝贵的建议, 在此一并表示诚挚的感谢.

References

- Anderson, J. L., Morrison, J., 2005. Ilmenite, Magnetite, and Peraluminous Mesoproterozoic Anorogenic Granites of Laurentia and Baltica. *Lithos*, 80(1-4): 45-60. doi: 10.1016/J.Lithos.2004.05.008
- Anderson, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Blichert, T. J., Albarede, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00040-X
- Bonin, B., 2007. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of a Concept, Problems and Prospects. *Lithos*, 97(1-2): 1-29. doi: 10.1016/J.Lithos.2006.12.007
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489-499. doi: 10.1046/J.1440-0952.2001.00882.X
- Chen, J. L., Guo, Y. S., Fu, S. M., 2004. The Research Headway to Granitoid—Classification Review and Synthesis of ISMA Granitoid. *Acta Geologica Gansu*, 13(1): 67-73(in Chinese with English abstract).
- Chen, P. R., Hua, R. M., Zhang, B. T., et al., 2002. Early Yanshanian Post-Orogenic Granitoids in the Nanling Region: Petrological Constrains and Geodynamic Setting. *Science in China (Series D)*, 45(8): 755-768. doi: 10.1007/BF02878432
- Chen, P. R., Zhou, X. M., Zhang, W. L., et al., 2004. Petrogenesis and Significance of Early Yanshanian Syenite-Granite Complex in Eastern Nanling Range. *Science in China (Series D)*, 34(6): 493-503(in Chinese).
- Chen, R., Xing, G. F., Yang, Z. L., et al., 2007. Early Jurassic Zircon SHRIMP U-Pb Age of the Dacitic Volcanic Rocks in the Southeastern Zhejiang Province Determined Firstly and Its Geological Significances. *Geological Review*, 53(1): 31-35(in Chinese with English ab-

- stract).
- Chen, W. F., Chen, P. R., Huang, H. Y., et al., 2007. Chronological and Geochemical Studies of Granite and Enclave in Baimashan Pluton, Hunan, South China. *Science in China (Series D)*, 37(7): 873—893 (in Chinese).
- Dall'Agno, R., de'oliveira, D. C., 2007. Oxidized, Magnetite-Series, Rapakivi-Type Granites of Carajás, Brazil: Implications for Classification and Petrogenesis of A-Type Granites. *Lithos*, 93(3—4): 215—233. doi: 10.1016/J.Lithos.2006.03.065
- Dall'Agno, R., Rämö, O. T., de Magalhaes, M. S., 1999. Petrology of the Anorogenic, Oxidised Jamon and Musa Granites, Amazonian Craton: Implications for the Genesis of Proterozoic A-Type Granites. *Lithos*, 46(3): 431—462. doi: 10.1016/S0024—4937(98)0007—2
- Dall'Agno, R., Teixeira, N. P., Rämö, O. T., et al., 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic Rapakivi A-Type Granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos (Ilmari Haapala)*, 80(1—4): 101—129. doi: 10.1016/J.Lithos.2004.03.058
- Depaolo, D. J., Linn, A. M., Schubert, G., 1991. The Continental Crustal Age Distribution: Methods of Determining Mantle Separation Ages from Sm-Nd Isotopic Data and Application to the Southwestern United States. *Journal of Geophysical Research*, 96(B2): 2071—2088. doi: 10.1029/90JB02219
- Ding, X., Chen, P. R., Chen, W. F., et al., 2005. Single Zircon LA-ICPMS U-Pb Dating of Weishan Granite (Hunan, South China) and Its Petrogenesis Significance. *Science in China (Series D)*, 35(7): 606—616 (in Chinese).
- Eby, G. N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7): 641—644. doi: 10.1130/0091—7613(1992)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2
- Frost, C. D., Frost, B. R., 1997. Reduced Rapakivi-Type Granites: The Tholeiite Connection. *Geology*, 25(7): 647—650. doi: 10.1130/0091—7613(1997)025<0647:RRT-GTT>2.3.CO;2
- Frost, C. D., Frost, B. R., 2011. On Ferroan (A-Type) Granitoids: Their Compositional Variability and Modes of Origin. *Journal of Petrology*, 52(1): 39—53. doi: 10.1093/Petrology/Egq070
- Frost, C. D., Frost, B. R., Chamberlain, K. R., et al., 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman Batholith, SE Wyoming, USA: A Reduced, Rapakivi-Type Anorogenic Granite. *Journal of Petrology*, 40(12): 1771—1802. doi: 10.1093/Petrology/40.12.1771
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. doi: 10.1016/S0016—7037(99)00343—9
- He, Z. Y., Xu, X. S., Niu, Y. L., 2010. Petrogenesis and Tectonic Significance of a Mesozoic Granite-Syenite-Gabbro Association from Inland South China. *Lithos*, 119(3—4): 621—641. doi: 10.1016/J.Lithos.2010.08.016
- He, Z. Y., Xu, X. S., Wang, X. L., et al., 2008. Geochronology and Geochemistry of Shoshonitic Volcanics in Southern Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2524—2536 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. Q., Ren, J. X., Jing, C. F., et al., 1980. Geotectonic Evolution of China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ji, C. Y., Wu, J. H., 2010. The SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Felsic Volcanic Rocks and Its Geological Significance from Yutian Group in Southern Jiangxi. *Journal of East China Institute of Technology*, 33(2): 131—138 (in Chinese with English abstract).
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A Type Granites of the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371—391. doi: 10.1093/Petrology/38.3.371
- Li, X. H., 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293—305. doi: 10.1016/S1367—9120(99)00060—7
- Li, X. H., Chen, Z. G., Liu, D. Y., et al., 2003. Jurassic Gabbro-Granite-Syenite Suites from Southern Jiangxi Province, SE China: Age, Origin and Tectonic Significance. *International Geology Review*, 45(10): 898—921. doi: 10.2747/0020—6814.45.10.898
- Li, X. H., Chung, S. L., Zhou, H. W., et al., 2004. Jurassic Intraplate Magmatism in Southern Hunan-Eastern Guangxi: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating, Geochemistry, Sr-Nd Isotopes and Implications for Tectonic Evolution of SE China. In: Malpas, J., Fletcher, C. J., Aitchison, J. C., eds., Aspects of the Tectonic Evolution of China. *The Geological Society, Special Publications*, London, 226: 193—215. doi: 10.1144/GSL.SP.2004.226.01.11
- Li, X. H., Hu, R. Z., Rao, B., 1997. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous Mafic Dikes from Northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26(2): 14—31 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007. On the Genetic Classification and Tectonic Implications of the Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese*

- Science Bulletin*, 62(9):981—991 (in Chinese).
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300 km-Wide Intra-Continental Orogen and Post-Orogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35: 179—182. doi: 10.1130/G23193A.1
- Li, Y. J., Wei, J. H., Yao, C. L., et al., 2010. Genetic Relationship of the Huaixi Copper-Gold Deposit and the Caomen Alkaline Granite, Southeastern Zhejiang Province, China: Constraint from Geochronologies. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4):585—596 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. S., Chen, X. M., Chen, P. R., et al., 2003. Subdivision, Discrimination Criteria and Genesis for A Type Rock Suites. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573—591 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Li, T. D., Xiao, Q. H., et al., 2010. New Chronology of the Ningyuan Alkali Basalt in Southern Hunan, China: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating. *Geological Bulletin of China*, 29(6):833—841 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2):34—43. doi:10.1016/J.Chemgeo.2008.08.004
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center Special Publication, Berkeley.
- Meng, L. F., Li, Z. X., Chen, H. L., et al., 2012. Geochronological and Geochemical Results from Mesozoic Basalts in Southern South China Block Support the Flat-Slab Subduction Model. *Lithos*, 132—133: 127—140. doi: 10.1016/J.Lithos.2011.11.022
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth Science Review*, 37(3—4): 215—224. doi:10.1016/0012—8252(94)90029—9
- Ni, Z. Y., Li, N., Zhang, H., et al., 2009. Sr-Nd-Pb Isotope Constrains on the Source of Ore-Forming Elements of the Dahu Au-Mo Deposit, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2823—2832 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rock. *Journal of Petrology*, 25(4):956—983. doi:10.1093/Petrology/25.4.956
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions of Mineralogy and Petrology*, 58(1):63—81. doi:10.1007/BF00384745
- Qiu, J. S., McInnes, B. I. A., Jiang, S. Y., et al., 2005. Geochemistry of the Mikengshan Pluton in Huichang County, Jiangxi Province and New Recognition about Its Genetic Type. *Geochimica*, 34(1):20—32 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Zhou, J. C., Zhang, G. H., et al., 2002. Geochemistry and Petrogenesis of Precambrian Granitoid Rocks in Northern Guangxi. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(3):197—208 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Hou, Z. Q., Li, Y. G., 2004. Melt Components Derived from a Subducted Slab in Late Orogenic Ore-Bearing Porphyries in the Gangdese Copper Belt, Southern Tibetan Plateau. *Lithos*, 74(3—4):131—148. doi:10.1016/J.Lithos.2004.01.003
- Sun, T., Zhou, X. M., 2002. Late Mesozoic Extension in Southern China: Petrologic Symbols. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 38(6):737—746 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Z., Xie, L., 2008. Magma Mingling: Evidence from Enclaves. *Geological Journal of China Universities*, 14(1):16—21 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Hu, M. A., Yang, Z., et al., 2010. Geochronology and Its Geological Implications of LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Granodiorite Porphyries in Dabaoshan Polymetallic Ore Deposit, North Guangdong Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2):175—185 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2010.018
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2005. Geochronology of Cretaceous A-Type Granitoids or Alkaline Intrusive Rocks in the Hinterland, South China: Constraints for Late-Mesozoic Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):795—808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Xiong, X. L., 2000. The Ascertainment of Late-Yanshanian A-Type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4):297—306 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., Zhou, J. C., Qiu, J. S., et al., 2006. Petrogenesis of the Neoproterozoic Strongly Peraluminous Granitoids from Northern Guangxi: Constraints from Zircon Geochronology and Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2):326—342 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited; Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science*

- Letters*, 64(2):295—304. doi:10.1016/0012—821X(83) 90211—X
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95:407—419. doi:10.1007/BF00402202
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1217—1238(in Chinese with English abstract).
- Xie, L., Wang, R. C., Chen, X. M., et al., 2005. Th-Rich Zircon from Peralkaline A-Type Granite: Mineralogical Features and Petrological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(8):809—817. doi:10.1007/BF03183683
- Xie, X., Xu, X. S., Zou, H. B., et al., 2005. Early J₂ Basalts in SE China: Incipience of Large-Scale Late Mesozoic Magmatism. *Science in China (Series D)*, 35(7):587—605(in Chinese).
- Yan, P. Y., Zhou, M. F., Song, H. L., et al., 2003. Origin and Tectonic Significance of a Mesozoic Multi-Layer Over-Thrust System within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361(3—4):239—254. doi:10.1016/S0040—1951(02)00646—7
- Yang, C., Zhu, J. C., Zhang, P. H., et al., 2006. Geochemical Characteristics and Genesis of Dioritic Enclaves in Lingsong Granite, NE Guangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 12(3):310—318(in Chinese with English abstract).
- Yu, X. Q., Di, Y. J., Wu, G. G., et al., 2009. The Early Jurassic Magmatism in Northern Guangdong Province, Southeastern China: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Xialan Complex. *Science in China (Series D)*, 39(6):681—693(in Chinese).
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Determination of U-Pb Age and Rare Earth Element Concentrations of Zircon from Cenozoic Intrusions in Northeastern China by Laser Ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(14):1511—1520(in Chinese).
- Zhang, Q., Pan, G. Q., Li, C. D., et al., 2007. Granitic Magma Mixing versus Basaltic Magma Mixing: New Viewpoints on Granitic Magma Mixing Process; Some Crucial Question on Granites Study(1). *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):1141—1152(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Pan, G. Q., et al., 2008. Sources of Granites; Some Crucial Questions on Granite Study(4). *Acta Petrologica Sinica*, 24(6):1193—1204(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Xu, X. B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontier*, 16(1)234—247(in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., 2003. My Thinking about Granite Geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4):556—565(in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. M., 2007. Petrogenesis of Late-Mesozoic Granites in the Nanling Ranges and Lithospheric Dynamics Evolution. Science Press, Beijing(in Chinese).
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1):26—33.

附中文参考文献

- 陈建林, 郭原生, 付善明, 2004. 花岗岩研究进展——ISMA 花岗岩类分类综述. *甘肃地质学报*, 13(1):67—73.
- 陈培荣, 周新民, 张文兰, 等, 2004. 南岭东段燕山早期正长岩—花岗岩杂岩的成因和意义. *中国科学(D 辑)*, 34(6):493—503.
- 陈荣, 邢光福, 杨祝良, 等, 2007. 浙东南英安质火山岩早侏罗世锆石 SHRIMP 年龄的首获及其地质意义. *地质论评*, 53(1):31—35.
- 陈卫峰, 陈培荣, 黄宏业, 等, 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究. *中国科学(D 辑)*, 37(7):873—893.
- 丁兴, 陈培荣, 陈卫峰, 等, 2005. 湖南沩山花岗岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年: 成岩启示和意义. *中国科学(D 辑)*, 35(7):606—616.
- 贺振宇, 徐夕生, 王孝磊, 等, 2008. 赣南橄榄安粗质火山岩的年代学与地球化学. *岩石学报*, 24(11):2524—2536.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等, 1980. *中国大地构造及演化*. 北京: 科学出版社.
- 冀春雨, 巫建华, 2010. 江西南部余田群长英质火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 33(2):131—138.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰, 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. *地球化学*, 26(2):14—31.
- 李献华, 李武显, 李正祥, 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 62(9):981—991.
- 李艳军, 魏俊浩, 姚春亮, 等, 2010. 浙东南怀溪铜金矿床与曹门碱性花岗岩体成因关系的年代学制约. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(4):585—596.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等, 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因. *高校地质学报*, 9(4):573—591.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等, 2010. 湘南宁远地区碱性玄武岩形

- 成时代的新证据:锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年.地质通报,29(6):833—841.
- 倪智勇,李诺,张辉,等,2009.河南大湖金铜矿床成矿物质来源的铀钍铅同位素约束.岩石学报,25(11):2823—2832.
- 邱检生,McInnes,B.I.A.,蒋少涌,等,2005.江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识.地球化学,34(1):20—32.
- 邱检生,周金城,张光辉,等,2002.桂北前寒武花岗岩类岩石的地球化学与成因.岩石矿物学杂志,21(3):197—208.
- 孙涛,周新民,2002.中国东南部晚中生代伸展应力体制的岩石学标志.南京大学学报(自然科学版),38(6):737—746.
- 王德滋,谢磊,2008.岩浆混合作用:来自岩石包体的证据.高校地质学报,14(1):16—21.
- 王磊,胡明安,杨振,等,2010.粤北大宝山矿区花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地球科学——中国地质大学学报,35(2):175—185.
- 王强,赵振华,简平,等,2005.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,21(3):795—808.
- 王强,赵振华,熊小林,2000.桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定.岩石矿物学杂志,19(4):297—306.
- 王孝磊,周金城,邱检生,等,2006.桂北新元古代强过铝花岗岩的成因:锆石年代学和 Hf 同位素制约.岩石学报,22(2):326—342.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6):1217—1238.
- 谢昕,徐夕生,邹海波,等,2005.中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕:J₂早期玄武岩.中国科学(D辑),35(7):587—605.
- 杨策,朱金初,张佩华,等,2006.广西姑婆山里松花岗岩中闪长质包体的地球化学特征及其成因探讨.高校地质学报,12(3):310—318.
- 余心起,狄永军,吴淦国,等,2009.粤北存在早侏罗世的岩浆活动——来自霞岗杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学的证据.中国科学(D辑),39(6):681—693.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,2003.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析.科学通报,48(14):1511—1520.
- 张旗,潘国强,李承东,等,2007.花岗岩混合问题:与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一.岩石学报,23(5):1141—1152.
- 张旗,王焰,潘国强,等,2008.花岗岩源岩问题——关于花岗岩研究的思考之四.岩石学报,24(6):1193—1204.
- 张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录.地学前缘,16(1):234—247.
- 周新民,2003.对华南花岗岩研究的若干思考.高校地质学报,9(4):556—565.
- 周新民,2007.南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化.北京:科学出版社.