

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.05.006

江西宜黄强过铝质 S 型花岗岩成因及其对华南早古生代陆内造山运动的制约

何世伟¹, 王凯兴^{1, 2*}, 刘晓东², 雷勇亮¹HE Shiwei¹, WANG Kaixing^{1, 2*}, LIU Xiaodong², LEI Yongliang¹

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国家重点实验室, 江西 南昌 330013

1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

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

摘要: 宜黄花岗岩位于江西省中部宜黄县东南部, 属武夷地块, 主要岩石类型为二云母二长花岗岩。锆石 U-Pb 同位素测年表明, 宜黄岩体形成于 448 Ma。岩石具有高的 SiO_2 、 K_2O 、稀土元素总量 ($\Sigma\text{REE} = 164.29 \times 10^{-6} \sim 256.66 \times 10^{-6}$)、 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值、 A/CNK (1.23 ~ 1.45)、 Rb/Sr 值, 以及低的 P_2O_5 、 TiO_2 、 TFeO/MgO 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、Nb、Sr 等值; 轻稀土元素相对富集 ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 12.02 \sim 34.43$), 具有中等负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.38 \sim 0.77$), 低 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-8.22 \sim -13.93$), 高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = (0.71283 \sim 0.72410)$ 。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.28155 \sim 0.28250$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-33.15 \sim 10.45$ 。全岩 Nd 同位素二阶段模式年龄为 $1.99 \sim 2.31$ Ga, 锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄为 $1.24 \sim 3.48$ Ga。上述特征表明, 宜黄花岗岩具有与强过铝质 S 型花岗岩类似的特征。宜黄花岗岩中黑云母富含 Fe、Mg、Ti; 白云母 Ti、Al、Na 含量高, Fe 含量低。综合锆石饱和温度计、黑云母地质温度计、白云母地质压力计、锆石 Ce 异常等, 宜黄花岗岩可能为华南元古宙地壳长石石英质岩石在高温、中等压力 (9.5 kbar) 和低氧逸度条件下部分熔融而成。在华南早古生代陆内造山作用的背景下, 岩石圈拆沉作用引发上涌的地幔岩浆提供热, 使华南元古宙地壳岩石发生部分熔融, 形成宜黄花岗岩。

关键词: 强过铝质; S 型花岗岩; 岩石成因; 早古生代; 宜黄岩体; 江西

中图分类号: P534.4; P588.12⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)05-0788-22

He S W, Wang K X, Liu X D, Lei Y L. Genesis of the Yihuang strong peraluminous S-type granite in Jiangxi Province and its constraints on Early Paleozoic intracontinental orogeny in South China. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(5): 788-809

Abstract: The Yihuang granite is located in the southeast Yihuang county of central Jiangxi Province, which belongs to the Wuyi terranes. The main lithology of the Yihuang granitoids is two-mica monzogranite. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating indicates that the Yihuang granitoid formed at 448 Ma. The Yihuang granitoid is characterized by high contents of SiO_2 , K_2O , ΣREE ($164.29 \times 10^{-6} \sim 256.66 \times 10^{-6}$), $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$, A/CNK (1.23 ~ 1.45), and Rb/Sr , as well as low contents of P_2O_5 , TiO_2 , TFeO/MgO , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, Nb, and Sr. They are enriched in LREE relatively to HREE ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 12.02 \sim 34.43$) with moderate Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.38 \sim 0.77$). The Yihuang granite displays low $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = (-8.22 \sim -13.93)$ and high $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} = (0.71283 \sim 0.72410)$. Zircon $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the Yihuang granite are $0.28155 \sim 0.28250$ and $-33.15 \sim 10.45$, respectively, with the corresponding two-stage Nd isotopic model ages of $1.99 \sim 2.31$ Ga and two-stage Hf isotopic model ages of $1.24 \sim 3.48$ Ga. The characteristics mentioned above show that the Yihuang granite is similar to the strongly peraluminous S-type granitoid. The biotite in the Yihuang granite is enriched in Fe, Mg,

收稿日期: 2020-10-26; 修订日期: 2022-04-08

资助项目: 国家自然科学基金项目《青海海德拉地区 A 型中-酸性火山岩成因及其铀成矿作用研究》(批准号: 42072095) 和中国核工业集团公司项目《西北古生代铀成矿特征研究》(编号: 中核地[2008]74)

作者简介: 何世伟 (1997-), 男, 在读硕士生, 地质学专业。E-mail: 2234080826@qq.com

* 通信作者: 王凯兴 (1985-), 男, 博士, 副教授, 矿产普查与勘探专业。E-mail: xy2gmo02@ecut.edu.cn

and Ti, and the muscovite has high contents of Ti, Al, Na, and low content in Fe. Combined with zircon saturation thermometers, biotite geothermometer, muscovite geobarometer, and zircon Ce anomalies, the Yihuang granite may be formed by the partial melting of the Proterozoic felsic crust of South China under high temperature, medium pressure (9.5 kbar) and low oxygen fugacity. Under the Early Paleozoic intra-continental Orogeny, the upwelling of mantle caused by the lithospheric delamination provided heat that would have triggered the partial melting of the Proterozoic crust of South China to generate the Yihuang granite.

Key words: strong peraluminous S-type granite; petrogenesis; Early Paleozoic; Yihuang granitoid; Jiangxi Province

自扬子板块与华夏板块在新元古代拼接之后, 华南板块在显生宙主要经历了 3 次构造热事件(古生代、早中生代和晚中生代), 并产出了大规模的岩浆岩和相关的金属矿床^[1-5]。这些岩浆岩成因机制及其与金属矿化之间的关系一直以来是关注的焦点^[6-10]。关于华南古生代构造热事件的动力学机制依旧尚有争论^[11-17], 如部分学者认为华南早古生代构造热事件与俯冲-碰撞有关^[18-24], 但是越来越多的研究表明, 华南早古生代构造热事件属于陆内造山作用^[25-35]。

在华南, 早古生代陆内造山作用表现为前志留纪地层与泥盆纪地层之间的一系列不整合接触, 造山带内广泛发育角闪岩相-片麻岩相变质岩、混合岩和花岗岩^[36]。前期研究表明, 除少量铁镁质岩石、火山岩和准铝质花岗岩外, 华南古生代岩浆岩以强过铝质花岗岩为主^[14-15, 37-38]。强过铝质花岗岩通常被认为是沉积岩部分熔融的产物^[39-40], 实验和地球化学的证据显示, 强过铝质花岗岩也可能源自于火成岩的部分熔融^[41-42]。此外, 一些研究显示, 强过铝质花岗岩的形成也可能是幔源岩浆和地壳物质相互作用的产物^[43]。前人对华南古生代强过铝质花岗岩开展了大量的研究, 对其源区物质组成也众说纷纭, 如张芳荣等^[44]认为, 江西中南部早古生代 S 型花岗岩是地壳低成熟度泥砂质岩石在减压、导水等作用下部分熔融而成; Feng 等^[45]认为, 会同和鹅婆强过铝质花岗岩是麻粒岩化前寒武纪沉积岩部分熔融的产物; Yu 等^[46]认为, 白云山强过铝质花岗岩是伸展拉张环境下地幔岩浆热传导作用导致中-上地壳黑云母片麻岩部分熔融而成; 张苑等^[15]认为, 赣中南 4 个强过铝质花岗岩是强烈的挤压环境使地壳增厚, 高的地温梯度和高产热元素在加厚带浓聚, 导致上地壳砂屑质岩石软化并部分熔融而成。

鉴于此, 在详细野外观察的基础上, 本次选择宜黄花岗岩作为研究对象, 开展岩相学、矿物及岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素、

全岩 Sr-Nd 同位素地球化学等研究, 探讨其形成年代、岩浆作用性质、岩石成因、成岩物理化学条件, 并探讨华南古生代的构造演化意义。

1 地质背景及岩石、岩相学特征

1.1 地质背景

华南板块由华夏板块和扬子板块在新元古代沿江南造山带拼接而成。扬子板块基底由太古宙和古元古代 TTG、长英质片麻岩、角闪岩组成, 并被新元古代和古生代火山沉积岩不整合覆盖^[47]。华夏板块主要由显生宙火成岩和沉积岩组成, 前寒武纪基底变质岩出露较少^[48]。前人研究表明, 华夏板块可以进一步划分为武夷地块、云开地块和南岭地块^[49-50]。华夏板块古元古代岩石系列, 如古元古代花岗岩、变质沉积岩和角闪岩, 主要出现在武夷地块^[49]。华夏板块新元古代地层可能主要沉积于埃迪卡拉纪, 少量为拉伸纪和成冰纪沉积^[51]。寒武纪地层则在华夏板块广泛发育。

宜黄花岗岩位于江西省中部宜黄县城东南地区, 属于武夷地块范畴。岩体总体呈面状, 呈北东向展布(图 1), 岩体西部和东南部的局部地段被显生宙地层不整合覆盖。元古宙变质岩为区内出露最老的岩石, 包括中元古代千枚岩、片岩、片麻岩、角闪岩、混合岩夹基性火山岩, 以及新元古界浅变质复成分砾岩、长石砂岩、砂岩、含铁硅质岩等; 上三叠统粉砂岩、页岩、煤层等组合; 侏罗系长石石英砂岩; 白垩系杂色砾岩、砂岩、粉砂岩组合和古近系-新近系粉砂岩。

1.2 岩石、岩相学特征

宜黄岩体岩相面状发育, 岩性变化较单一, 主要呈灰白色、肉红色, 以中粒二云母二长花岗岩为主, 花岗结构、块状构造。矿物组成主要为碱性长石, 含量 25%~41%, 为条纹长石, 多呈半自形粒状, 单偏光下表面浑浊不清, 大多数可见格子双晶条纹结构(图 2-a); 斜长石含量 25%~43%, 大多数可见细密聚片双晶, 多为自形一半自形板柱状更长石;

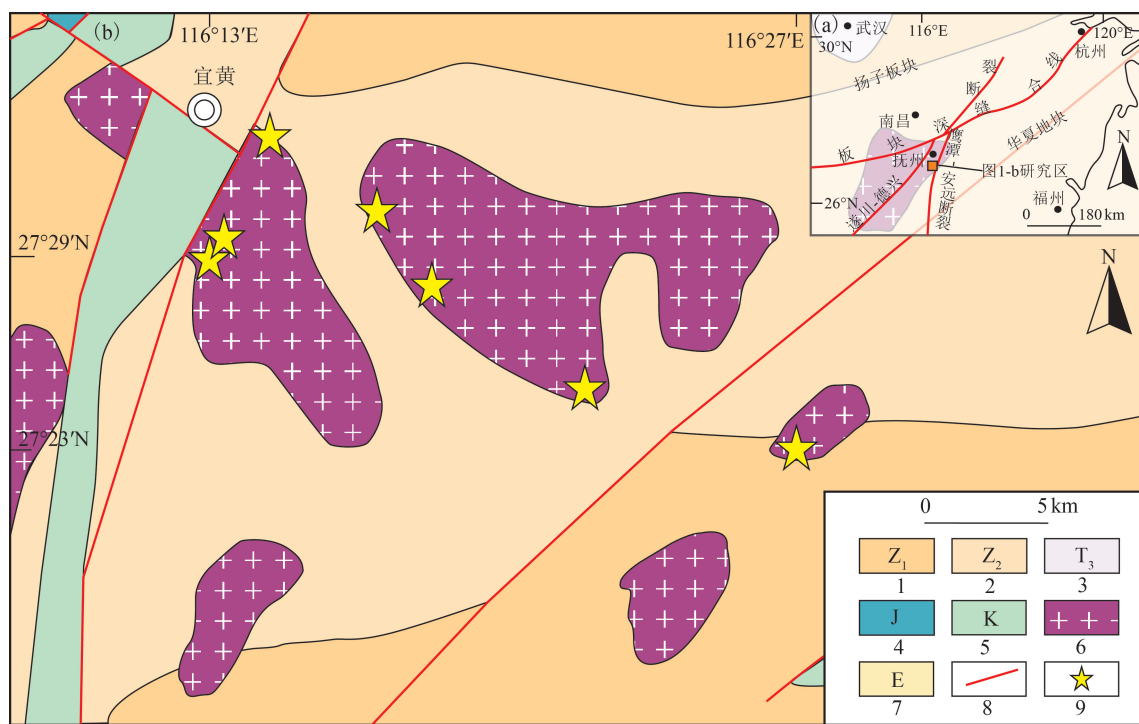


图1 华南构造格架图^[12](a)和研究区地质简图^[15](b)

Fig. 1 Tectonic framework map of South China(a)and geological sketch map of the study area(b)

1—中元古界;2—新元古界;3—上三叠统;4—侏罗系;5—白垩系;6—花岗岩;7—古近系;8—断裂;9—采样点

石英含量 25%,他形粒状充填于斜长石与碱性长石之间;黑云母含量 6%~8%,一组完全解理,多色性为褐色、暗褐色、干黄色,平行消光,干涉色多样(图 2-b),少数绿泥石化形成绿泥石,蚀变矿物含有绿泥石定向排列(图 2-c);白云母含量 1%~3%,无色透明,呈自形一半自形片状或长条状,完全解理,平行消光,正交偏光镜下干涉色鲜艳(图 2-d),颗粒粗大,片径可达 0.5~1 mm,边部出现不规则的港湾状,并被长石、石英包围(图 2-d)。副矿物以锆石、磷灰石为主。

2 分析方法

全岩地球化学前处理与主量、微量元素测定在南京聚谱检测科技有限公司完成。主量、微量和稀土元素分别利用荧光光谱仪(XRF)测试、ICP753-ES 仪器和 Elan 9000 检测。主量、微量元素分析方法为样品经硼酸锂-硝酸锂溶解消解后,利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS)测定多元素含量,稀土元素检测方法为碱熔法,即将岩石样品加入 LiBO_2 熔剂中,混合均匀,在 1000℃以上的熔炉中

熔化,利用电感耦合等离子体质谱仪检测多种元素含量。

在进行锆石 U-Pb 分析前,先进行阴极发光(CL)图像分析,确定锆石颗粒的内部结构,锆石 U-Pb 同位素分析在南京聚谱检测科技有限公司完成。锆石单矿物样品在前期淘洗和分选基础上,在双目镜下挑纯后选择具有代表性的锆石制成样品靶。其中,激光剥蚀系统为 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统,型号为 RESolution LR。四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)由安捷伦科技(Agilent Technologies)制造,型号为 Agilent 7700x。测试过程中,以标准锆石 91500(1062 Ma)为外标校正仪器质量分歧与元素分馏;以标准锆石 GJ-1(600 Ma)与 Plešovice(337 Ma)为盲样检验 U-Pb 定年数据质量;以 NIST SRM 610 为外标, ^{29}Si 为内标标定锆石中的微量元素含量。原始的测试数据经过 ICP-MS DataCal 软件离线处理后完成。

锆石 Lu-Hf 同位素分析、全岩 Sr-Nd 同位素化学前处理与质谱测定均在南京聚谱检测科技有限

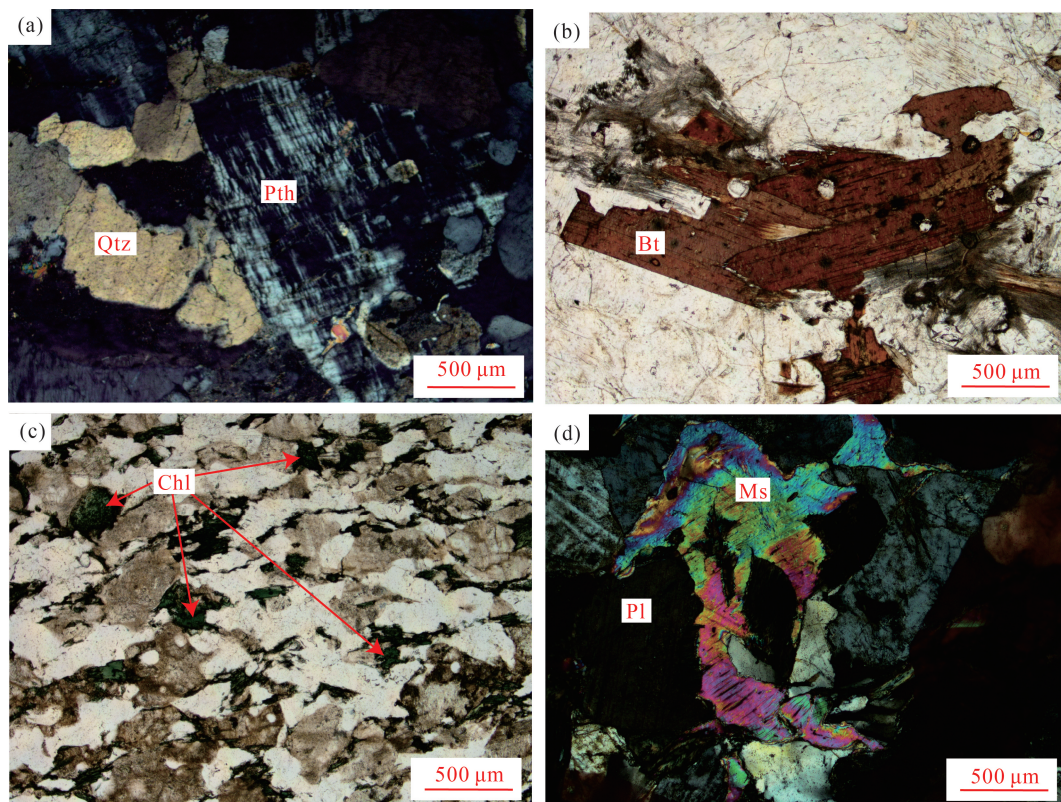


图 2 宜黄花岗岩镜下显微结构

Fig. 2 Microtextures of the Yihuang granite

Qtz—石英; Pth—条纹长石; Pl—斜长石; Ms—白云母; Chl—绿泥石; Bt—黑云母

公司完成。锆石 Lu-Hf 同位素分析的锆石点均为 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的有效点。使用 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统的多接收器电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 进行测试, 束斑直径为 50 μm , 准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面, 能量密度为 3.5 J/cm^2 , 频率为 8 Hz, 共剥蚀 40 s, 剥蚀气溶胶由氦气送入 MC-ICP-MS 完成。测试过程中每隔 5 颗样品锆石, 测试 1 颗标准锆石, 以检验锆石 Hf 同位素比值数据质量。详细的分析过程及步骤见参考文献[52]。全岩 Sr-Nd 同位素分析采用聚四氟乙烯溶样弹, 使用纯化 $\text{HF}-\text{HNO}_3-\text{HCl}$ 溶样, 经 Biorad AG50W-X8 阳离子交换柱进行分离。同位素溶液经 Cetac Aridus II 膜去溶系统引入, 在 Nu Plasma II MC-ICP-MS 上测定同位素比值。Sr-Nd 同位素比值测定过程中, 分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正仪器质量分馏。全岩 Sr-Nd 同位素分别使用国际标准物质 NIST SRM

987 和 JNdi-1 为外标, 校正仪器漂移。详细的操作流程及仪器情况见参考文献[53]。

云母成分分析测试在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室利用电子探针完成。电子探针仪器型号为 JEOL JXA-8100。实验条件为加速电压 15 kV, 电流 2.0×10^{-8} A, 束斑直径 2 μm 。云母测试标样采用橄榄石 (Si)、金红石 (Ti)、镁铝榴石 (Al)、铁铝榴石 (Fe)、硅灰石 (Mn)、透辉石 (Mg, Ca)、硬玉 (Na)、透长石 (K)、磷灰石 (P)、LiF (F) 和方柱石 (Cl), 校正方法为 ZAF 方法。

3 分析结果

3.1 年代学特征

从宜黄花岗岩样品 (17YH-03) 中选出 20 颗锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年 (图 3-a; 表 1)。在 CL 图像中, 多数锆石呈现典型明暗相间的岩浆韵律环带结构。被测锆石的 Th/U 值为 0.04~1.33,

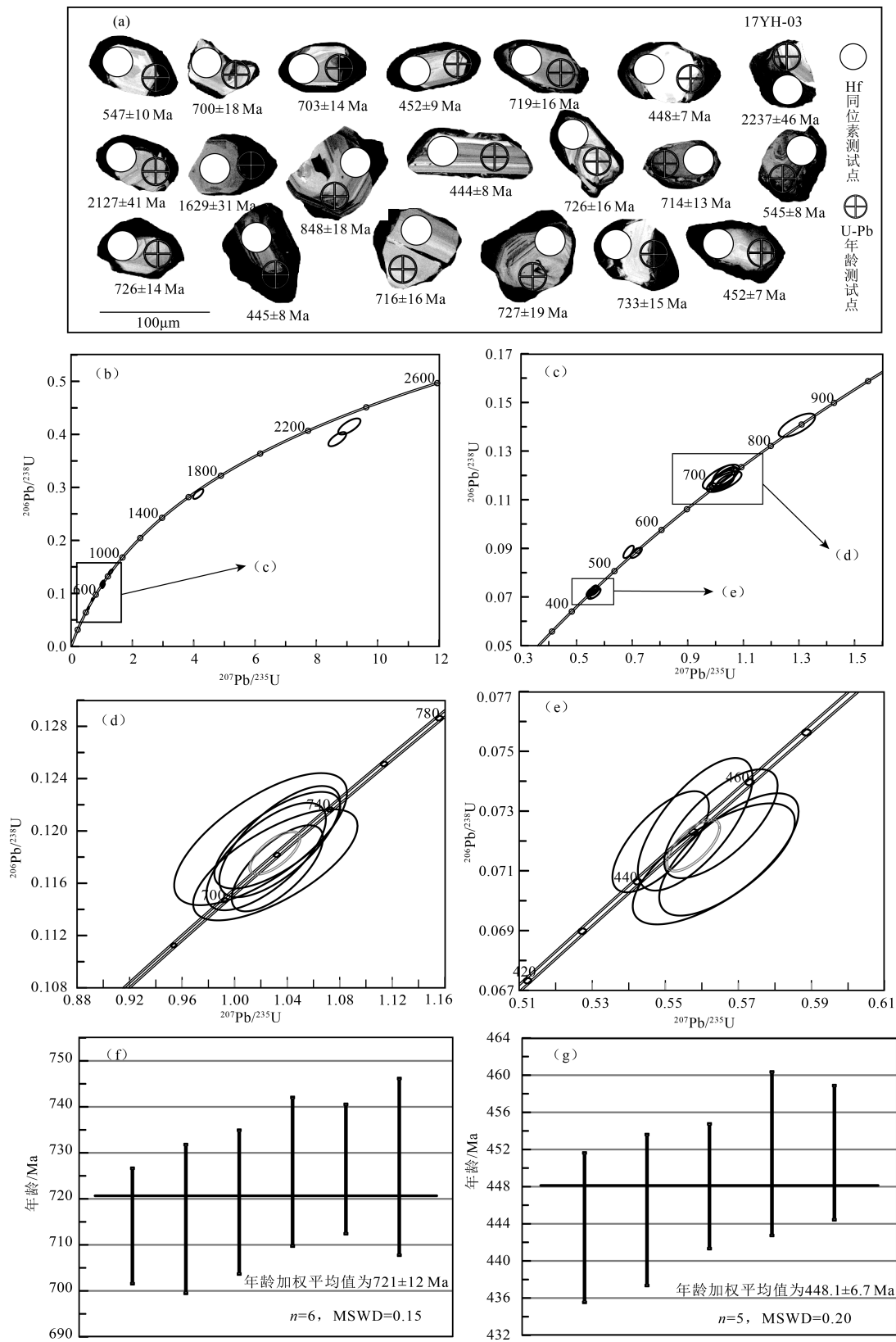


图3 宜黄花岗岩锆石阴极发光(CL)图像(a)、U-Pb 年龄谐和图(b~e)和年龄加权平均值图(f,g)

Fig. 3 CL images(a), U-Pb concordia diagrams(b~e) and weight mean age diagrams(f,g)

of zircons from the Yihuang granite

表 1 宜黄花岗岩 (17YH-03) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb results of the Yihuang granite (17YH-03)

样品点	含量/ 10^{-6}		同位素比值										年龄/Ma				$T_{\text{H}}/^{\circ}\text{C}$	氧逸度					
	U	Th	Th/U					$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$						$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Pb}$	1σ	$^{238}\text{Pb}/^{232}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
17YH-03-01	756.18	169.08	0.22	0.0563	0.0010	0.6871	0.0124	0.0886	0.0017	0.0400	0.0025	7.0139	0.5025	464	39	531	7	547	10	793	49		
17YH-03-02	111.71	130.88	1.17	0.0670	0.0016	1.0493	0.0316	0.1147	0.0032	0.0366	0.0008	0.8869	0.0321	837	51	729	16	700	18	726	17		
17YH-03-03	204.73	186.88	0.91	0.0670	0.0015	1.0589	0.0285	0.1153	0.0024	0.0392	0.0014	1.2381	0.0464	837	46	733	14	703	14	777	27		
17YH-03-04	1016.23	245.92	0.24	0.0561	0.0007	0.5582	0.0104	0.0726	0.0015	0.0228	0.0008	4.3833	0.1141	456	29	450	7	452	9	457	17		
17YH-03-05	118.50	111.83	0.94	0.0634	0.0019	1.0240	0.0300	0.1180	0.0027	0.0384	0.0020	1.1685	0.0314	722	62	716	15	719	16	761	38		
17YH-03-06	198.91	75.88	0.38	0.1595	0.0024	9.0771	0.2401	0.4149	0.0100	0.1317	0.0035	2.7373	0.0765	2450	25	2346	24	2237	46	2501	63		
17YH-03-07	134.65	83.16	0.62	0.1626	0.0025	8.6840	0.1921	0.3910	0.0088	0.1358	0.0051	1.7883	0.0692	2483	26	2305	20	2127	41	2573	91		
17YH-03-08	107.43	71.96	0.67	0.1046	0.0026	4.1470	0.1107	0.2876	0.0061	0.0941	0.0025	1.7361	0.0681	1707	46	1664	22	1629	31	1818	47		
17YH-03-09	75.43	42.73	0.57	0.0667	0.0023	1.2925	0.0433	0.1406	0.0032	0.0461	0.0015	2.0511	0.0607	827	73	842	19	848	18	912	29		
17YH-03-10	136.65	55.33	0.40	0.0634	0.0013	1.0343	0.0304	0.1192	0.0028	0.0411	0.0008	5.3034	0.8685	721	44	721	15	726	16	814	16		
17YH-03-11	164.25	92.88	0.57	0.0641	0.0009	1.0325	0.0229	0.1171	0.0022	0.0390	0.0007	2.3623	0.1625	745	30	720	11	714	13	773	13		
17YH-03-12	415.86	216.03	0.52	0.0574	0.0010	0.5633	0.0146	0.0712	0.0013	0.0236	0.0005	2.2082	0.0557	505	39	454	10	444	8	472	10		
17YH-03-13	194.82	57.91	0.30	0.0580	0.0010	0.5674	0.0126	0.0715	0.0014	0.0228	0.0005	3.9654	0.1839	529	37	456	8	445	8	456	10		
17YH-03-14	441.22	34.23	0.08	0.0589	0.0007	0.7144	0.0136	0.0882	0.0014	0.0374	0.0020	27.7100	2.5308	562	27	547	8	545	8	743	39		
17YH-03-15	160.47	212.97	1.33	0.0628	0.0016	1.0325	0.0316	0.1193	0.0024	0.0392	0.0013	0.8421	0.0511	700	54	720	16	726	14	778	25		
17YH-03-16	151.11	66.03	0.44	0.0639	0.0020	1.0310	0.0413	0.1174	0.0028	0.0427	0.0019	2.4157	0.1333	738	66	719	21	716	16	845	37		
17YH-03-17	153.67	65.03	0.42	0.0621	0.0020	1.0198	0.0434	0.1194	0.0033	0.0388	0.0014	3.2370	0.3983	679	68	714	22	727	19	769	27		
17YH-03-18	527.33	175.60	0.33	0.0615	0.0008	1.0280	0.0253	0.1204	0.0025	0.0381	0.0011	4.0031	0.2943	658	26	718	13	733	15	756	22		
17YH-03-19	1031.31	243.24	0.24	0.0553	0.0008	0.5487	0.0087	0.0720	0.0011	0.0220	0.0003	4.4331	0.1528	423	31	444	6	448	7	440	6		
17YH-03-20	967.27	37.99	0.04	0.0564	0.0009	0.5652	0.0103	0.0726	0.0012	0.0205	0.0008	57.5308	9.7256	467	35	455	7	452	7	409	16		

大多数大于岩浆成因锆石的 Th/U 值(0.4)。锆石的 CL 图像和 Th/U 值均表明,所测锆石为典型的岩浆锆石^[54]。

样品的锆石分析点集中分布于年龄谐和曲线或其附近(图 3-b~g)。除 3 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄数据为 2237 Ma、2127 Ma、1629 Ma 外,6 个分析点(17YH-03-05、10、11、15、16、17)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 714~727 Ma,年龄加权平均值为 721.0 ± 12 Ma (MSWD = 0.15); 5 个分析点(17YH-03-04、12、13、19、20) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 444~452 Ma,年龄加权平均值为 448.1 ± 6.7 Ma (MSWD=0.20)。笔者认为,最年轻的 448.1 ± 6.7 Ma 代表了该花岗岩体的结晶年龄,而其他年龄大于 448.1 ± 6.7 Ma 的锆石可能为源区残留锆石或岩浆上升过程中捕获的锆石。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

宜黄花岗岩主量元素测试结果见表 2。样品烧失量为 0.41%~2.08% (质量分数,下同), SiO_2 含量(66.18%~73.35%)较高且变化较大, K_2O 含量为 2.92%~4.43%,全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量为 5.50%~7.77%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值变化于 0.93~1.93 之间,表明宜黄花岗岩属于高硅富钾钙碱性花岗岩系列(图 4-a)。宜黄花岗岩的 A/CNK 值为 1.23~1.45,属于强过铝质花岗岩系列(图 4-b)。宜黄花岗岩具有高钙($\text{CaO} = 0.45\% \sim 1.94\%$)、低磷和钛($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.08\% \sim 0.64\%$, $\text{TiO}_2 = 0.33\% \sim 0.66\%$),高 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(0.20~0.86,除 1 个为 0.20 外,其余均大于 0.3)和低 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值的特征。此外,在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解(图 4-c)中,宜黄花岗岩显示钙碱

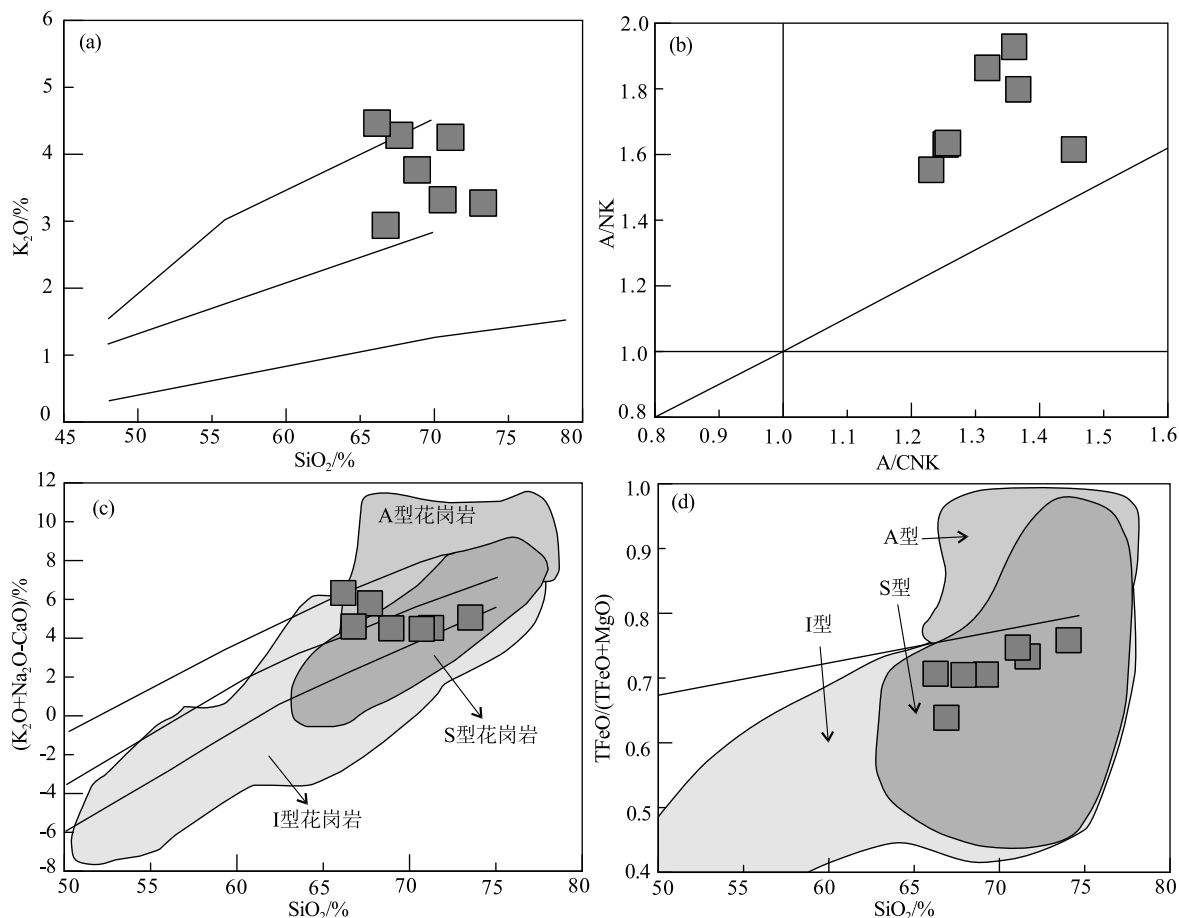


图 4 宜黄花岗岩 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解^[55] (a)、 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解^[56] (b)、 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解^[57] (c) 和 $\text{SiO}_2-(\text{TFE}/(\text{TFE}+\text{MgO}))$ 图解^[57] (d)

Fig. 4 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ (a), $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ (b), $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO})$, (c) and $\text{SiO}_2-\text{TFE}/(\text{TFE}+\text{MgO})$ (d) diagrams of the Yihuang granite

质 S 型花岗岩特征; 宜黄花岗岩具有较低的 TFeO/MgO 值 ($1.75 \sim 2.94$, 均小于 10), 在 $\text{SiO}_2 - \text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$ 图解 (图 4-d) 中属于镁质花岗岩范畴。在 CIPW 标准矿物计算中, 标准刚玉分子含量为 $2.73\% \sim 4.80\%$, 且未出现透辉石。

3.2.2 微量元素

宜黄花岗岩稀土元素测试结果见表 2。宜黄花岗岩的稀土元素总量 (ΣREE) 变化范围为 $164.29 \times 10^{-6} \sim 256.66 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $12.02 \sim 34.43$, 轻、重稀土元素分异明显, 且相对富集轻稀土元素, 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线为右倾模式, 并具有负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.38 \sim 0.77$) (图 5-a), 表明岩浆结晶分异过程中斜长石分异较明显。

宜黄花岗岩微量元素测试结果见表 2。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 宜黄花岗岩相对亏

损 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti 等元素, 相对富集 Rb、Th、K、U、Pb 等元素 (图 5-b)。Ba、Sr、Ti 的亏损显示了斜长石的结晶分异, Ti 相对于 Nb、Ta 强烈亏损表明钛铁矿的结晶分异^[60], P 亏损可能是源区磷灰石残留。宜黄花岗岩具有较高的 Rb/Sr 值 ($0.50 \sim 11.00$), 与陆壳重熔花岗岩的特征类似^[61]。

3.3 Sr-Nd-Hf 同位素特征

3.3.1 Sr-Nd 同位素特征

宜黄花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素测试结果见表 3。宜黄花岗岩具有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}$ 值 ($0.71283 \sim 0.72410$) 和较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-8.22 \sim -13.93$), Nd 同位素两阶段模式年龄 (T_{DM2}) 为 $1.99 \sim 2.31 \text{ Ga}$ 。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解 (图 6-a) 中, 宜黄花岗岩位于 S 型花岗岩区域内, 在 $t - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解 (图 6-b) 上, 全部样品点均位于中元古代地壳演化域。

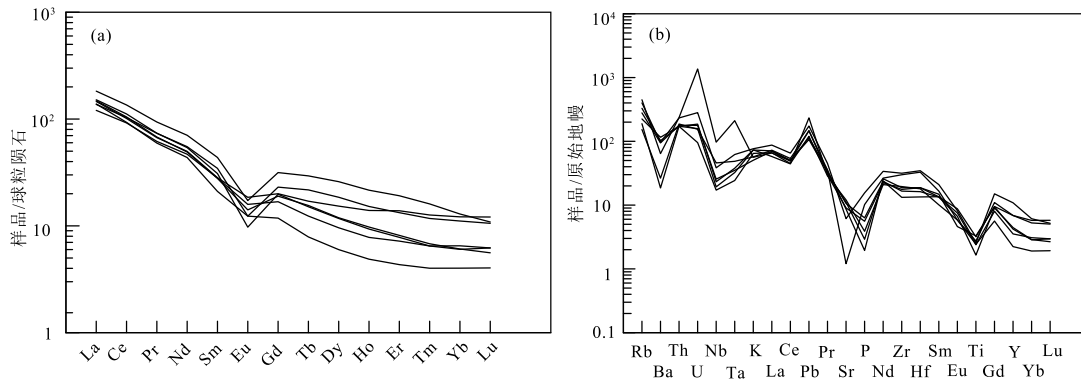


图 5 宜黄花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图解(a, 标准化值据参考文献[58])和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化值据参考文献[59])

Fig. 5 The chondrite-normalization rare earth element patterns (a) and the primary-mantle-normalization trace element patterns (b) of the Yihuang granite

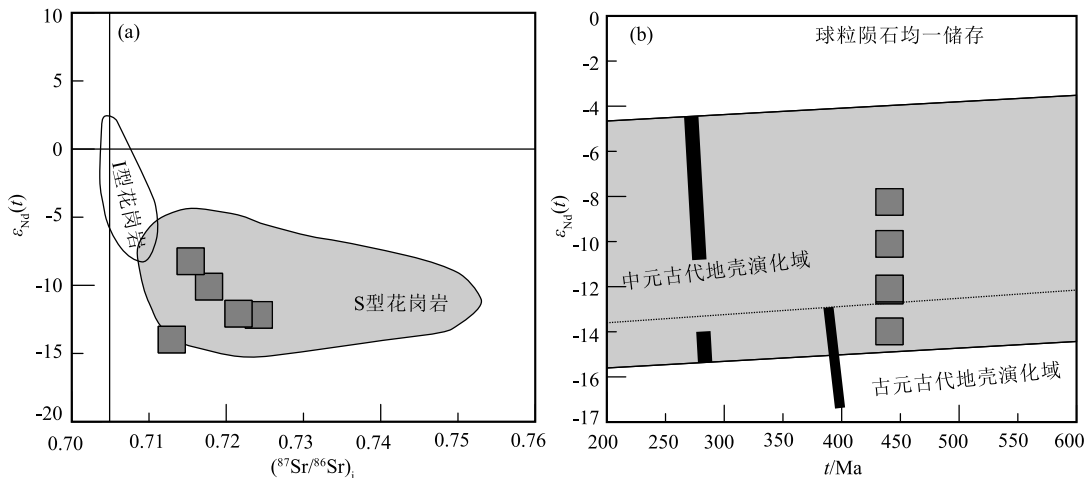


图 6 宜黄花岗岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(a) 和 $t - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解^[63] (b) (I 型和 S 型花岗岩范围据参考文献[62])

Fig. 6 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}} - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (a) and $t - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (b) diagrams of the Yihuang granite

表 2 宜黄花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果
Table 2 Major, trace elements and REE compositions of the Yihuang granite

样品号	17YH-02	17YH-03	17YH-05	17YH-06	17YH-07	17YH-08	17YH-10	样品号	17YH-02	17YH-03	17YH-05	17YH-06	17YH-07	17YH-08	17YH-10
SiO ₂	68.89	71.14	67.69	73.35	66.76	66.18	70.61	Nb	11.30	12.70	15.30	63.90	16.80	25.30	30.20
TiO ₂	0.49	0.33	0.48	0.55	0.64	0.51	0.66	Ta	0.90	1.20	1.40	7.80	1.30	2.30	1.80
Al ₂ O ₃	15.87	15.77	15.92	11.68	14.96	16.01	12.42	Zr	205.00	174.00	185.00	314.00	139.00	332.00	197.00
TFe ₂ O ₃	3.46	2.44	3.22	5.20	5.69	3.71	5.42	Hf	5.10	4.60	5.30	9.30	3.80	9.80	5.30
MnO	0.05	0.05	0.05	0.06	0.11	0.08	0.05	Pb	18.00	16.00	35.00	17.00	22.00	26.00	22.00
MgO	1.35	0.84	1.26	1.59	2.93	1.44	1.75	Th	13.65	13.70	13.65	18.75	14.20	18.50	14.85
CaO	1.94	1.88	1.62	0.45	1.45	1.49	1.26	U	1.94	3.21	3.78	27.70	3.61	5.72	3.14
Na ₂ O	2.71	2.19	3.13	2.25	3.13	3.34	2.44	La	42.90	46.00	37.40	42.50	45.30	56.60	47.00
K ₂ O	3.74	4.22	4.25	3.25	2.92	4.43	3.30	Ce	75.20	84.50	74.30	83.40	81.80	109.50	90.10
P ₂ O ₅	0.16	0.26	0.23	0.42	0.12	0.64	0.08	Pr	7.27	8.29	7.53	8.97	8.17	11.45	8.99
烧失量	0.94	1.27	2.08	0.41	1.67	1.23	0.95	Nd	26.20	29.50	28.10	33.10	29.90	42.30	32.40
总量	99.60	100.39	99.93	99.21	100.38	99.06	98.94	Sm	4.10	5.42	5.48	6.74	5.50	8.52	6.02
TFeO	3.11	2.20	2.90	4.68	5.12	3.34	4.88	Eu	0.90	1.03	1.16	0.90	1.35	1.26	0.71
A/NK	1.86	1.93	1.63	1.62	1.80	1.55	1.64	Gd	3.06	4.91	4.36	5.97	5.18	8.17	5.12
A/CNK	1.32	1.36	1.25	1.45	1.37	1.23	1.26	Tb	0.37	0.73	0.58	1.02	0.80	1.38	0.71
Co	9.00	6.00	6.00	7.00	13.00	8.00	12.00	Dy	1.93	3.83	3.09	5.97	4.93	8.34	3.78
Cr	23.00	8.00	16.00	50.00	66.00	22.00	52.00	Ho	0.35	0.70	0.56	1.09	1.00	1.55	0.67
V	45.00	28.00	35.00	55.00	79.00	43.00	67.00	Er	0.91	1.71	1.51	2.79	2.91	4.02	1.64
Ni	10.00	8.00	12.00	13.00	27.00	25.00	23.00	Tm	0.13	0.22	0.21	0.38	0.41	0.52	0.21
Zn	78.00	60.00	74.00	115.00	69.00	125.00	116.00	Yb	0.84	1.27	1.36	2.32	2.54	2.70	1.26
Cs	7.68	5.37	14.25	20.50	17.35	14.55	2.42	Lu	0.13	0.18	0.20	0.34	0.39	0.35	0.20
Sc	7.00	5.00	6.00	11.00	13.00	11.00	9.00	ΣREE	164.29	188.29	165.84	195.49	190.18	256.66	198.81
Ga	20.50	21.60	20.10	30.30	20.10	25.60	19.70	Sn	3.00	3.00	4.00	9.00	4.00	10.00	3.00
Ba	763.00	122.50	675.00	424.00	624.00	631.00	174.50	Cu	5.00	5.00	18.00	35.00	43.00	1.00	47.00
Rb	134.50	113.50	197.50	269.00	167.50	240.00	91.80	(La/Yb) _N	34.43	24.42	18.54	12.35	12.02	14.13	25.15
Sr	240.00	211.00	180.00	24.00	221.00	122.00	172.00	σEu	0.75	0.60	0.71	0.43	0.77	0.46	0.38
Y	9.60	19.10	15.20	29.60	29.50	46.80	18.10								

注: A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) (摩尔数); A/NK = Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O) (摩尔数); 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

3.3.2 锆石 Hf 同位素特征

宜黄花岗岩锆石 Hf 同位素测试结果见表 4。由于锆石 Lu-Hf 同位素体系封闭温度较高^[57], 可以为锆石成因演化提供重要的制约参数。在宜黄花岗岩 17YH-03 样品 20 个锆石 U-Pb 激光蚀蚀点附近, 再进行锆石 Hf 同位素测试。结果显示, ¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 值为 0.016447~0.101909, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.000843~0.003388 (小于 0.004)。上述结果显

示, 锆石在形成以后基本没有放射性成因 Hf 的积累。因此本次测定的结果可以代表其形成时的 Hf 同位素组成^[64]。锆石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.28155~0.28250, ε_{Hf}(*t*) 值为 -33.15~10.45, Hf 同位素二阶段模式年龄(*T*_{DM2}) 为 1.24~3.48 Ga。

3.4 云母特征

对宜黄花岗岩样品 17YH-03 的黑云母、白云母成分进行了电子探针分析, 用 11 个氧原子的基础

表 3 宜黄花岗岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr and Nd isotopic compositions of the Yihuang granite

样品号	t/Ma	⁸⁷ Se/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Se/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	(¹⁴⁴ Nd/ ¹⁴³ Nd) _i	ε _{Nd} (t)	T _{DM2} /Ga
17YH-01	440	0.728953	1.80	0.71765	0.511865	0.1074	0.511556	-10.07	1.99
17YH-03	440	0.724157	1.42	0.71527	0.511971	0.1112	0.511650	-8.22	1.84
17YH-06	440	0.926634	34.11	0.71283	0.511713	0.1232	0.511358	-13.93	2.31
17YH-07	440	0.737056	2.07	0.72410	0.511771	0.1113	0.511450	-12.13	2.16
17YH-08	440	0.754705	5.30	0.72146	0.511806	0.1219	0.511455	-12.04	2.15

计算得出黑云母、22 个氧原子的基础计算得出白云母,测试结果分别见表 5 和表 6。

(1) 黑云母

宜黄花岗岩中黑云母具有富铁、镁、钛的特点。 SiO_2 、 TiO_2 、 MgO 、 TFeO 、 Al_2O_3 含量分别为 34.51%~36.39%、2.65%~3.27%、7.47%~8.85%、18.72%~21.76%、17.11%~18.59%, FeO 含量为 15.19%~16.23%,相对高于 Fe_2O_3 的含量 2.03%~4.19%。 VI Al 、 IV Al 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ti^{4+} 阳离子数分别为 0.249~0.382、1.261~1.340、0.116~0.231、1.044~1.232、0.016~0.024、0.923~0.981、0.153~0.185。从 Foster^[65] 的黑云母分类图解(图 7)可以看出,宜黄花岗岩中的黑云母属于铁质黑云母。

(2) 白云母

宜黄花岗岩的白云母具有高钛、铝、和钠含量,相对低铁和锰含量的特点。化学分析结果显示, SiO_2 含量为 46.13%~48.79%、 TFeO 含量为 0.94%~2.18%、 Al_2O_3 含量为 31.94%~35.17%、 MgO 含量为 0.58%~1.60%。 VI Al 、 IV Al 、 Fe^{2+} 、 Ti^{4+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 阳离子数分别为 3.56~3.73、1.50~1.71、0.09~0.20、

0.04~0.16、0.11~0.32、0.07~0.14,化学成分判别都属于原生白云母^[66]。 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 、 $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Al}^{3+})$ 值分别为 0.39~0.46、0.04~0.08、0.0352~0.0933,说明宜黄花岗岩中白云母为一系列钠云母构成的类质同象系列的中间产物(图 8-a)。相对而言,宜黄花岗岩中的白云母更富钠云母成分。从 Na-Ti-Mg 图解(图 8-b)可以看出,宜黄花岗岩中的白云母属于原生白云母范畴。

4 讨论

4.1 成岩条件

4.1.1 温度

(1) 岩浆形成温度

强过铝质花岗岩可分为高压和高温过铝质花岗岩^[69],高压过铝质花岗岩,如欧洲阿尔卑斯造山带和喜马拉雅造山带内的过铝质花岗岩,具有高的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值和相对低的岩浆初始温度(<875℃);高温过铝质花岗岩,如海西期造山带和拉克兰造山带过铝质花岗岩,具有低的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值和相对高的岩浆初始温度(>875℃)^[69]。在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图 9-a)中,宜黄花岗岩位于拉克兰造山带高温过铝质花岗岩的范畴,属于高温花岗岩的范围,其岩浆初始温度应大于 875℃。

锆石是花岗质岩浆体系中较早结晶的副矿物,通常被镁铁质矿物、长英质矿物包裹,其晶体能够在很长的地质时间内保持稳定,锆石中锆的分配系数对温度极度敏感,而其他因素对其没有明显影响^[70],因此可以认为,锆石饱和温度近似代表花岗质岩石液相线的温度^[71]。根据 Watson 等^[72] 提出的锆石饱和温度计,宜黄花岗岩锆石饱和温度为 789~882℃。锆石 Ti 温度计也是估算岩浆初始温度的有效工具之一^[73]。基于宜黄花岗岩中存在大量石英,缺乏楣石和钛铁矿,因此 αSiO_2 和 αTiO_2 分别取值 1 和 0.5^[73],

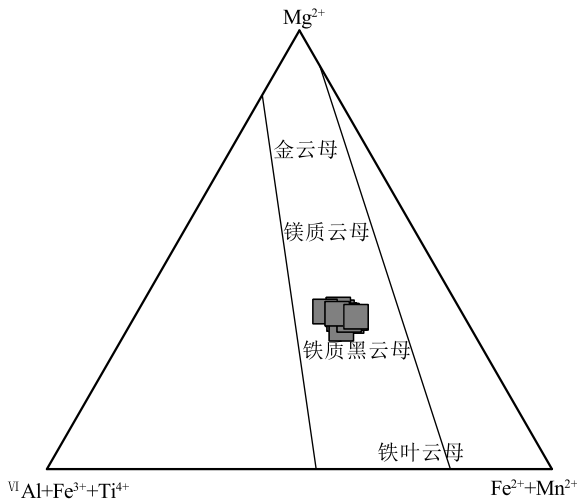


图 7 宜黄花岗岩黑云母分类图解^[65]

Fig. 7 Biotite classification diagram of the Yihuang granite

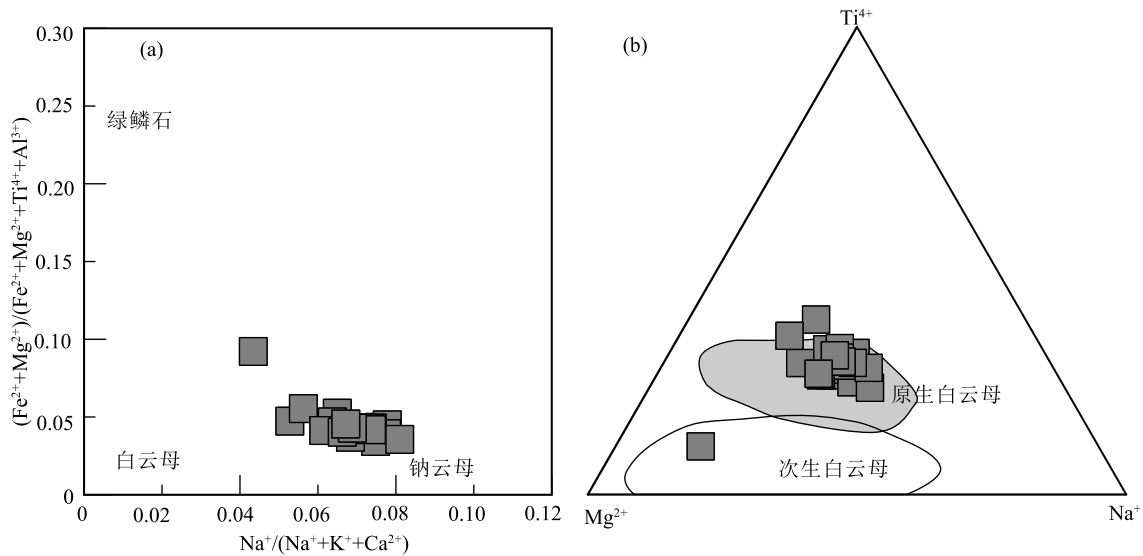


图 8 宜黄花岗岩白云母化学成分图解^[67] (a) 和原生、次生白云母判别图解^[68] (b)

Fig. 8 Chemical composition diagram of muscovite (a) and discriminant diagram of primary and secondary muscovite (b) of the Yihuang granite

表 4 宜黄花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 4 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Yihuang granite

测点	年龄/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} /Ma	T _{DM2} /Ma	f _{Lu/Hf}
17YH-03-01	547	0.101909	0.003388	0.282209	0.000029	0.282173725	-19.92757022	-9.12	1570	2071	-0.90
17YH-03-02	700	0.072115	0.002240	0.282230	0.000022	0.282200042	-19.18479717	-4.79	1491	1917	-0.93
17YH-03-03	703	0.079802	0.002504	0.282039	0.000023	0.282006102	-25.9147082	-11.58	1777	2341	-0.92
17YH-03-04	452	0.034057	0.001136	0.282466	0.000028	0.282456529	-10.81633903	-1.22	1115	1504	-0.97
17YH-03-05	719	0.056938	0.001908	0.282019	0.000023	0.281993294	-26.62629045	-11.68	1777	2360	-0.94
17YH-03-06	2237	0.033367	0.001084	0.281640	0.000024	0.281593529	-40.03990314	8.45	2263	2278	-0.97
17YH-03-07	2127	0.097041	0.003043	0.281844	0.000025	0.281720891	-32.81202255	10.45	2088	2068	-0.91
17YH-03-08	1629	0.037715	0.001000	0.281728	0.000029	0.281697445	-36.90859115	-1.74	2136	2437	-0.97
17YH-03-09	848	0.052735	0.001685	0.282341	0.000025	0.282314469	-15.22921407	2.56	1309	1570	-0.95
17YH-03-10	726	0.072647	0.002313	0.282142	0.000025	0.282110000	-22.29477075	-7.40	1620	2099	-0.93
17YH-03-11	714	0.037129	0.001252	0.282517	0.000023	0.282500605	-9.003460885	6.17	1046	1240	-0.96
17YH-03-12	444	0.016447	0.000500	0.282378	0.000023	0.282374333	-3.91608652	-4.30	1218	1692	-0.98
17YH-03-13	445	0.032198	0.000843	0.282395	0.000025	0.282387755	-13.33942868	-3.79	1206	1661	-0.97
17YH-03-14	545	0.047093	0.001494	0.282042	0.000025	0.282026926	-25.80900161	-14.37	1725	2394	-0.96
17YH-03-15	726	0.069833	0.002283	0.281975	0.000024	0.281943534	-28.19527687	-13.29	1859	2464	-0.93
17YH-03-16	716	0.032502	0.001029	0.282435	0.000023	0.282421019	-11.92260108	3.39	1156	1417	-0.97
17YH-03-17	727	0.090670	0.002446	0.282193	0.000024	0.282159618	-20.47421569	-5.62	1552	1989	-0.93
17YH-03-18	733	0.055080	0.001736	0.282411	0.000025	0.282387425	-12.75412659	2.58	1211	1481	-0.95
17YH-03-19	448	0.069807	0.002203	0.282261	0.000023	0.282242884	-18.05721116	-8.86	1443	1980	-0.93
17YH-03-20	452	0.054746	0.001825	0.281570	0.000023	0.281554421	-42.51203024	-33.15	2406	3475	-0.95

表 5 宜黄花岗岩中黑云母成分
Table 5 Compositions of biotite from the Yihuang granite

																%
点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	F	Cl	H ₂ O	F=O	Cl=O	总计
17YH-03-7.1	35.87	3.02	18.28	3.72	17.06	0.31	8.67	0.03	0.18	9.77	0.00	0.06	4.01	0.00	0.01	100.98
17YH-03-7.2	35.99	3.17	18.06	3.83	17.63	0.39	8.45	0.00	0.19	9.72	0.00	0.06	4.03	0.00	0.01	101.51
17YH-03-7.3	35.89	2.81	17.95	3.75	17.25	0.27	8.58	0.03	0.15	9.56	0.00	0.04	3.98	0.00	0.01	100.25
17YH-03-7.4	35.01	3.03	17.69	3.77	17.62	0.30	8.55	0.00	0.12	9.57	0.06	0.06	3.95	0.03	0.01	99.71
17YH-03-7.5	34.58	2.91	17.39	3.50	18.18	0.30	8.37	0.02	0.11	9.77	0.00	0.03	3.89	0.00	0.01	99.06
17YH-03-7.6	34.51	2.66	17.11	3.43	18.34	0.29	8.31	0.02	0.15	9.66	0.00	0.05	3.87	0.00	0.01	98.40
17YH-03-7.7	35.18	2.92	17.85	3.94	17.03	0.28	8.63	0.00	0.20	10.01	0.38	0.05	4.00	0.16	0.01	100.49
17YH-03-7.8	35.40	2.96	17.71	3.70	17.40	0.34	8.50	0.01	0.23	9.53	0.00	0.07	3.96	0.00	0.02	99.79
17YH-03-7.9	35.02	2.96	17.44	3.68	17.58	0.34	8.06	0.03	0.33	9.52	0.00	0.11	3.93	0.00	0.02	98.99
17YH-03-7.10	34.89	2.77	17.34	3.60	18.52	0.33	8.08	0.03	0.14	9.71	0.00	0.07	3.91	0.00	0.02	99.39
17YH-03-7.11	35.09	3.00	17.82	4.04	16.55	0.29	8.85	0.00	0.14	9.31	0.38	0.05	3.99	0.16	0.01	99.51
17YH-03-7.12	35.41	2.96	17.98	2.03	18.53	0.33	8.37	0.00	0.20	9.80	0.00	0.09	3.95	0.00	0.02	99.67
17YH-03-7.13	35.32	3.12	17.67	2.03	18.96	0.32	8.37	0.01	0.18	9.88	0.00	0.05	3.94	0.00	0.01	99.83
17YH-03-7.14	35.70	3.10	18.40	2.10	18.14	0.31	8.62	0.00	0.13	9.29	0.00	0.05	3.97	0.00	0.01	99.80
17YH-03-7.15	35.41	3.11	17.90	2.05	18.42	0.37	8.32	0.00	0.18	9.66	0.00	0.04	3.93	0.00	0.01	99.40
17YH-03-7.16	35.51	3.13	18.06	2.24	18.97	0.32	8.42	0.00	0.18	9.54	0.33	0.04	4.01	0.14	0.01	100.77
17YH-03-7.17	36.32	3.21	18.59	2.17	17.25	0.26	8.23	0.01	0.23	9.04	0.21	0.06	4.01	0.09	0.01	99.57
17YH-03-7.18	36.39	3.27	18.53	2.27	17.75	0.27	7.47	0.03	0.15	9.31	0.37	0.08	4.03	0.16	0.02	99.93
17YH-03-7.19	35.91	2.98	18.80	3.92	15.19	0.26	8.64	0.01	0.27	9.55	0.35	0.08	4.04	0.15	0.02	100.01
17YH-03-7.20	36.01	2.92	18.46	2.07	18.43	0.38	8.29	0.00	0.20	9.84	0.00	0.08	4.00	0.00	0.02	100.68
17YH-03-7.21	35.67	3.19	18.02	4.19	16.68	0.30	8.58	0.01	0.20	9.56	0.47	0.06	4.05	0.20	0.01	100.98
17YH-03-7.22	34.93	2.65	18.23	2.05	19.23	0.32	8.59	0.01	0.15	9.13	0.00	0.04	3.92	0.00	0.01	99.26
点号	Si	Ti	Al	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	F	Cl	OH			
17YH-03-7.1	2.69	0.17	1.61	0.21	1.07	0.02	0.97	0.00	0.03	0.93	0.00	0.01	1.00			
17YH-03-7.2	2.69	0.18	1.59	0.22	1.10	0.02	0.94	0.00	0.03	0.93	0.00	0.01	1.00			
17YH-03-7.3	2.71	0.16	1.60	0.21	1.09	0.02	0.97	0.00	0.02	0.92	0.00	0.00	1.00			
17YH-03-7.4	2.67	0.17	1.59	0.22	1.12	0.02	0.97	0.00	0.02	0.93	0.02	0.01	1.00			
17YH-03-7.5	2.67	0.17	1.58	0.20	1.17	0.02	0.96	0.00	0.02	0.96	0.00	0.00	1.00			
17YH-03-7.6	2.68	0.16	1.57	0.20	1.19	0.02	0.96	0.00	0.02	0.96	0.00	0.01	1.00			
17YH-03-7.7	2.66	0.17	1.59	0.22	1.08	0.02	0.97	0.00	0.03	0.97	0.09	0.01	1.01			
17YH-03-7.8	2.69	0.17	1.59	0.21	1.11	0.02	0.96	0.00	0.03	0.92	0.00	0.01	1.00			
17YH-03-7.9	2.69	0.17	1.58	0.21	1.13	0.02	0.92	0.00	0.05	0.93	0.00	0.01	1.01			
17YH-03-7.10	2.68	0.16	1.57	0.21	1.19	0.02	0.93	0.00	0.02	0.95	0.00	0.01	1.00			

续表 5

点号	Si	Ti	Al	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	F	Cl	OH
17YH-03-7.11	2.66	0.17	1.59	0.23	1.05	0.02	1.00	0.00	0.02	0.90	0.09	0.01	1.01
17YH-03-7.12	2.70	0.17	1.62	0.12	1.18	0.02	0.95	0.00	0.03	0.95	0.00	0.01	1.01
17YH-03-7.13	2.70	0.18	1.59	0.12	1.21	0.02	0.95	0.00	0.03	0.96	0.00	0.01	1.00
17YH-03-7.14	2.70	0.18	1.64	0.12	1.15	0.02	0.97	0.00	0.02	0.90	0.00	0.01	1.00
17YH-03-7.15	2.71	0.18	1.61	0.12	1.18	0.02	0.95	0.00	0.03	0.94	0.00	0.01	1.00
17YH-03-7.16	2.68	0.18	1.61	0.13	1.20	0.02	0.95	0.00	0.03	0.92	0.08	0.01	1.01
17YH-03-7.17	2.73	0.18	1.65	0.12	1.09	0.02	0.92	0.00	0.03	0.87	0.05	0.01	1.01
17YH-03-7.18	2.74	0.19	1.64	0.13	1.12	0.02	0.84	0.00	0.02	0.89	0.09	0.01	1.01
17YH-03-7.19	2.69	0.17	1.66	0.22	0.95	0.02	0.96	0.00	0.04	0.91	0.08	0.01	1.01
17YH-03-7.20	2.71	0.17	1.64	0.12	1.16	0.02	0.93	0.00	0.03	0.95	0.00	0.01	1.00
17YH-03-7.21	2.67	0.18	1.59	0.24	1.04	0.02	0.96	0.00	0.03	0.91	0.11	0.01	1.01
17YH-03-7.22	2.68	0.15	1.65	0.12	1.23	0.02	0.98	0.00	0.02	0.89	0.00	0.00	1.00
点号	以 22 个氧原子计算 Ti					Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe/(Fe+Mg)		Mg/(Mg+Fe)		T/℃	
17YH-03-7.1	0.34					1.31	0.30	0.52		0.48		676.67	
17YH-03-7.2	0.36					1.31	0.28	0.54		0.46		680.96	
17YH-03-7.3	0.32					1.29	0.30	0.53		0.47		665.50	
17YH-03-7.4	0.35					1.33	0.26	0.54		0.46		677.59	
17YH-03-7.5	0.34					1.33	0.25	0.55		0.45		671.01	
17YH-03-7.6	0.31					1.32	0.25	0.55		0.45		657.43	
17YH-03-7.7	0.33					1.34	0.25	0.53		0.47		672.78	
17YH-03-7.8	0.34					1.31	0.28	0.53		0.47		673.67	
17YH-03-7.9	0.34					1.31	0.27	0.55		0.45		672.96	
17YH-03-7.10	0.32					1.32	0.26	0.56		0.44		660.45	
17YH-03-7.11	0.34					1.34	0.26	0.51		0.49		680.05	
17YH-03-7.12	0.34					1.30	0.32	0.55		0.45		671.14	
17YH-03-7.13	0.36					1.30	0.29	0.56		0.44		678.43	
17YH-03-7.14	0.35					1.30	0.34	0.54		0.46		678.93	
17YH-03-7.15	0.36					1.29	0.32	0.55		0.45		678.88	
17YH-03-7.16	0.36					1.32	0.28	0.56		0.44		677.44	
17YH-03-7.17	0.36					1.27	0.38	0.54		0.46		683.58	
17YH-03-7.18	0.37					1.26	0.38	0.57		0.43		681.91	
17YH-03-7.19	0.34					1.31	0.35	0.50		0.50		679.74	
17YH-03-7.20	0.33					1.29	0.35	0.56		0.44		666.72	
17YH-03-7.21	0.36					1.33	0.26	0.52		0.48		685.29	
17YH-03-7.22	0.31					1.32	0.32	0.56		0.44		653.75	

注: $T = \{ [\ln(\text{Ti}) - a - c(X_{\text{Mg}})^3/b] \}^{0.333}$, 其中 Ti 以 22 个氧原子为基准计算, X_{Mg} 为 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$, $a = -2.3594$, $b = 4.6482 \times 10^{-9}$ 和 $c = -1.7283$

表 6 宜黄花岗岩中白云母成分

Table 6 Compositions of muscovites from the Yihuang granite

%

点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	F	Cl	P ₂ O ₅	H ₂ O [*]	总计	Fe ₂ O ₃	FeO
17YH-03-4.1	47.56	1.03	34.42	1.07	0.02	0.63	0.01	0.46	8.94	0.00	0.00	0.00	4.51	98.65	0.20	0.90
17YH-03-4.2	47.54	0.86	34.66	1.14	0.01	0.70	0.04	0.42	9.38	0.00	0.01	0.04	4.52	99.33	0.21	0.96
17YH-03-4.3	47.39	0.99	34.16	1.23	0.04	0.70	0.00	0.49	9.06	0.00	0.00	0.00	4.50	98.56	0.23	1.03
17YH-03-4.4	47.92	1.03	34.54	1.17	0.04	0.79	0.01	0.49	8.78	0.00	0.00	0.04	4.55	99.35	0.21	0.97
17YH-03-4.5	48.00	0.86	35.01	1.16	0.01	0.75	0.04	0.41	8.90	0.00	0.00	0.00	4.56	99.69	0.21	0.97
17YH-03-4.6	46.13	0.89	33.65	1.08	0.01	0.73	0.08	0.54	10.08	0.00	0.04	0.05	4.41	97.68	0.20	0.91
17YH-03-4.7	48.00	1.08	34.54	1.14	0.00	0.63	0.06	0.48	8.65	0.00	0.00	0.02	4.54	99.16	0.21	0.96
17YH-03-4.8	48.52	1.65	33.46	1.45	0.00	0.87	0.01	0.41	8.94	0.00	0.00	0.03	4.56	99.89	0.26	1.21
17YH-03-4.9	47.84	0.72	34.81	0.94	0.00	0.58	0.01	0.51	9.50	0.00	0.00	0.04	4.54	99.48	0.17	0.79
17YH-03-4.10	48.79	0.44	31.94	2.18	0.03	1.60	0.08	0.27	8.86	0.01	0.00	0.00	4.49	98.68	0.40	1.82
17YH-03-4.11	47.87	1.03	34.55	1.17	0.00	0.73	0.02	0.49	9.35	0.00	0.02	0.01	4.54	99.77	0.21	0.98
17YH-03-4.12	48.22	0.96	35.17	0.98	0.00	0.61	0.03	0.54	9.20	0.00	0.01	0.03	4.58	100.33	0.18	0.82
17YH-03-4.13	47.99	0.93	34.73	1.04	0.00	0.61	0.02	0.46	9.41	0.00	0.02	0.01	4.55	99.76	0.19	0.87
17YH-03-4.14	48.66	0.96	34.48	1.31	0.01	0.80	0.00	0.34	9.20	0.00	0.00	0.00	4.58	100.33	0.24	1.09
17YH-03-4.15	48.31	0.91	34.62	1.32	0.01	0.78	0.00	0.42	9.36	0.06	0.00	0.02	4.55	100.36	0.24	1.10
17YH-03-4.16	48.51	1.46	33.56	1.37	0.04	0.99	0.02	0.35	8.81	0.00	0.00	0.02	4.56	99.69	0.25	1.14
17YH-03-4.17	47.92	1.06	34.21	1.14	0.01	0.69	0.07	0.39	8.85	0.00	0.01	0.01	4.52	98.86	0.21	0.95
17YH-03-4.18	47.63	1.09	34.62	1.15	0.02	0.66	0.02	0.43	9.09	0.00	0.00	0.01	4.53	99.25	0.21	0.96
17YH-03-4.19	47.79	1.06	34.14	1.20	0.04	0.70	0.09	0.46	8.90	0.02	0.01	0.00	4.50	98.91	0.22	1.00
17YH-03-4.20	48.23	1.02	34.66	1.17	0.01	0.70	0.02	0.47	8.81	0.00	0.00	0.00	4.56	99.65	0.21	0.97
17YH-03-4.21	48.14	1.09	33.95	1.14	0.02	0.72	0.04	0.44	9.05	0.00	0.01	0.00	4.53	99.13	0.21	0.95
17YH-03-4.22	48.47	0.92	34.65	1.20	0.02	0.80	0.02	0.42	8.81	0.05	0.02	0.00	4.55	99.93	0.22	1.00

点号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	F	Cl	OH	以 11 氧原子 数计算 Si	P/kbar (计算温度 为 885℃)
17YH-03-4.1	6.32	1.68	3.71	0.10	0.02	0.10	0.00	0.12	0.00	0.12	1.51	0.00	0.00	4.00	3.16	9.28
17YH-03-4.2	6.29	1.71	3.70	0.09	0.02	0.11	0.00	0.14	0.01	0.11	1.58	0.00	0.00	4.00	3.15	8.92
17YH-03-4.3	6.31	1.69	3.68	0.10	0.02	0.11	0.00	0.14	0.00	0.13	1.54	0.00	0.00	4.00	3.16	9.23
17YH-03-4.4	6.32	1.68	3.68	0.10	0.02	0.11	0.00	0.16	0.00	0.13	1.48	0.00	0.00	4.00	3.16	9.26
17YH-03-4.5	6.31	1.69	3.73	0.09	0.02	0.11	0.00	0.15	0.01	0.10	1.49	0.00	0.00	4.00	3.15	9.11
17YH-03-4.6	6.25	1.75	3.63	0.09	0.02	0.10	0.00	0.15	0.01	0.14	1.74	0.00	0.01	3.99	3.13	8.38
17YH-03-4.7	6.33	1.67	3.70	0.11	0.02	0.11	0.00	0.12	0.01	0.12	1.46	0.00	0.00	4.00	3.17	9.47
17YH-03-4.8	6.38	1.62	3.56	0.16	0.03	0.13	0.00	0.17	0.00	0.10	1.50	0.00	0.00	4.00	3.19	10.05
17YH-03-4.9	6.32	1.68	3.73	0.07	0.02	0.09	0.00	0.11	0.00	0.13	1.60	0.00	0.00	4.00	3.16	9.24
17YH-03-4.10	6.50	1.50	3.52	0.04	0.04	0.20	0.00	0.32	0.01	0.07	1.51	0.00	0.00	3.99	3.25	11.74
17YH-03-4.11	6.31	1.69	3.67	0.10	0.02	0.11	0.00	0.14	0.00	0.13	1.57	0.00	0.00	4.00	3.15	9.13
17YH-03-4.12	6.30	1.70	3.72	0.09	0.02	0.09	0.00	0.12	0.00	0.14	1.53	0.00	0.00	4.00	3.15	9.05
17YH-03-4.13	6.32	1.68	3.71	0.09	0.02	0.10	0.00	0.12	0.00	0.12	1.58	0.00	0.00	4.00	3.16	9.26
17YH-03-4.14	6.36	1.64	3.67	0.09	0.02	0.12	0.00	0.16	0.00	0.09	1.53	0.00	0.00	4.00	3.18	9.86
17YH-03-4.15	6.33	1.67	3.67	0.09	0.02	0.12	0.00	0.15	0.00	0.11	1.56	0.02	0.00	3.98	3.16	9.39
17YH-03-4.16	6.38	1.62	3.58	0.14	0.02	0.13	0.00	0.19	0.00	0.09	1.48	0.00	0.00	4.00	3.19	10.09
17YH-03-4.17	6.35	1.65	3.69	0.11	0.02	0.11	0.00	0.14	0.01	0.10	1.50	0.00	0.00	4.00	3.17	9.68
17YH-03-4.18	6.30	1.70	3.69	0.11	0.02	0.11	0.00	0.13	0.00	0.11	1.53	0.00	0.00	4.00	3.15	8.99
17YH-03-4.19	6.34	1.66	3.67	0.11	0.02	0.11	0.00	0.14	0.01	0.12	1.51	0.01	0.00	3.99	3.17	9.53
17YH-03-4.20	6.34	1.66	3.70	0.10	0.02	0.11	0.00	0.14	0.00	0.12	1.48	0.00	0.00	4.00	3.17	9.51
17YH-03-4.21	6.37	1.63	3.66	0.11	0.02	0.10	0.00	0.14	0.01	0.11	1.53	0.00	0.00	4.00	3.18	9.96
17YH-03-4.22	6.35	1.65	3.70	0.09	0.02	0.11	0.00	0.16	0.00	0.11	1.47	0.02	0.01	3.98	3.17	9.70

注: $P(\text{kbar}) = -2.6786\text{Si}^2 + 43.975\text{Si} + 0.01253T(^\circ\text{C}) - 113.9995$, Si(11 个氧原子计算)、 T (锆石 Ti 温度 885℃)

得到具有古生代年龄的 5 个锆石的 Ti 温度介于 714~885℃之间(表 1)。

综上所述笔者认为,宜黄花岗岩岩浆的初始温度应该不低于 885℃,且宜黄花岗岩中存在的元古宙残留锆石应该是岩浆上升过程中捕获的围岩中的锆石,而不是源区残留的锆石。

(2) 岩浆固结温度

Henry 等^[74] 研究发现,黑云母在给定 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 值的条件下,Ti 含量的增加与温度呈非线性变化,在对于给定温度的条件下,Ti 含量随 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 的增加而减少,因此可得到 Ti—饱和曲线。在一定的 Ti—饱和曲线表面可以得出黑云母地质温度计的表达式:

$$T = \{ [\ln(Ti) - a - c(X_{Mg})^3/b] \}^{0.333}$$

式中: $T(^{\circ}C)$ 是在 Ti 为 22 个氧原子基础上计算的, X_{Mg} 为 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$, $a=-2.3594$, $b=4.6482 \times 10^{-9}$, $c=-1.7283$ 。

本次研究采用黑云母 Ti— $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 温度计算,温度在 660.50~685.29℃之间,考虑到误差因素,该结果能够代表岩浆固结温度^[75]。

4.1.2 压力

花岗岩中常见共生白云母,这些白云母可以作为限制岩体侵位深度的压力计矿物。但是,化学成分判别为原生的白云母计算的才是合理的,而次生白云母计算的的压力不合理。由前述可知,宜黄花岗岩都是过铝质花岗岩,且出现的白云母均为原

生。白云母压力计最早由 Velde^[76] 提出,Massonne 等^[77] 通过新的实验给出了白云母基于 Si(11 个氧原子计算)、T 用温度 885℃的压力计算关系式:

$$P(kbar) = -2.6786 \times Si^2 + 43.97 \times 5Si + 0.01253 \times T(^{\circ}C) - 113.9995$$

得到宜黄花岗岩岩浆形成压力为 9.05~11.74 kbar,平均值为 9.5 kbar,以平均地壳密度 $2.7 g/cm^3$ 为基准^[75],计算得到宜黄岩体侵位深度平均 29 km。结合岩相学观察,本次样品宜黄花岗岩含有表面干净、矿物颗粒较粗大的原生白云母,与石英、钾长石、斜长石颗粒度平均,表示白云母与石英、钾长石、斜长石同时结晶,对应于白云母是在较高压力条件下结晶^[78],得出的白云母等矿物开始结晶的形成压力。综上所述,白云母压力计计算结果与岩相学观察的矿物组合限制的的压力相对应,说明获得的形成深度(29 km)相对合理。

4.1.3 氧逸度

黑云母是宜黄花岗岩体中的主要暗色矿物。本文对黑云母进行了较系统的电子探针分析。黑云母氧逸度分析以 Wones 等^[79] 提出的 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg$ 氧逸度图解最具代表性。在黑云母的 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg$ 三角图解中,宜黄花岗岩黑云母测试点均落在 Ni—NiO 线附近(图 9-b)。

锆石的 Ce 异常也通常被用于计算岩浆形成的氧逸度。基于锆石 Ti 饱和温度和锆石的 δCe 异常,利用 Li 等^[81] 构建的锆石氧逸度计算软件,得到宜黄

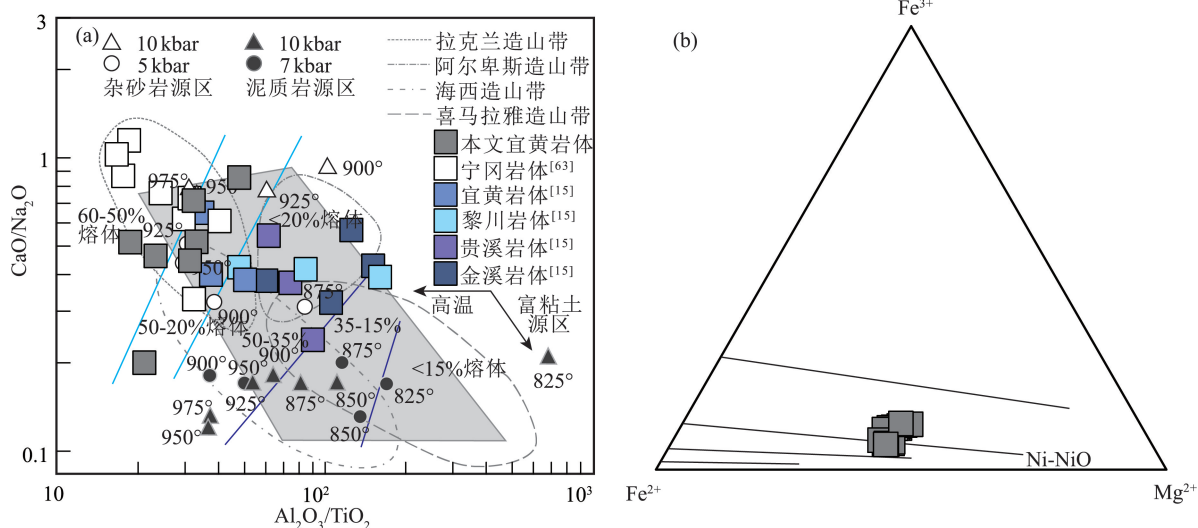


图 9 宜黄花岗岩 $Al_2O_3/TiO_2-CaO/Na_2O$ 图解^[80] (a) 和黑云母 $Mg^{2+}-Fe^{3+}-Fe^{2+}$ 图解^[79] (b)

Fig. 9 Diagrams of $Al_2O_3/TiO_2-CaO/Na_2O$ (a) and $Mg^{2+}-Fe^{3+}-Fe^{2+}$ (b) of biotite from the Yihuang granite

花岗岩早古生代岩浆锆石的氧逸度为 FMQ-11.7~FMQ-0.64 之间。

4.2 岩石类型

花岗岩成因类型目前最普遍接受的方案是 I-S-M-A 型划分^[82]。M 型花岗岩由玄武质岩浆分异形成,如蛇绿岩套中的大洋斜长花岗岩。在自然界中真正由地幔岩浆衍生的 M 型花岗岩极少,主要为 I、S 和 A 型,尤其以 S 型和 I 型为主^[83]。

I 型花岗岩是准铝—弱过铝钙碱性花岗岩岩石的总称,岩石中一般不含原生白云母, Sr 同位素初始值一般低于 0.708,标准矿物中刚玉分子的总量低于 1%。本次的宜黄花岗岩含有原生的白云母,显示强过铝质花岗岩的特征(A/CNK 值大于 1.1),并

具有较高的 Sr 同位素初始值和较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,其刚玉分子含量也大于 1%。 SiO_2 与 Pb 负相关, SiO_2 与 P_2O_5 正相关,Rb 和 Th 的趋势都明显趋向于 S 型花岗岩演化曲线上(图 10)。因而基本可以排除 I 型花岗岩的可能性。

A 型花岗岩在地球化学特征上表现为富含高场强元素和稀土元素,高 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 值(大于 2.6),相对富铁并具有高 $\text{Fe}^\#$ 指数($\text{TFeO}/(\text{TFeO} + \text{MgO})$),属于铁质花岗岩的范畴。尽管宜黄花岗岩具有较高的场强元素含量,但是其 $\text{Fe}^\#$ 指数普遍偏低, $\text{Fe}^\#$ 指数介于 0.64~0.75 之间,属于镁质花岗岩的范畴(图 4-d)。结合 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - 10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 图解(图 10-d),宜黄花岗岩不可能属于 A 型花

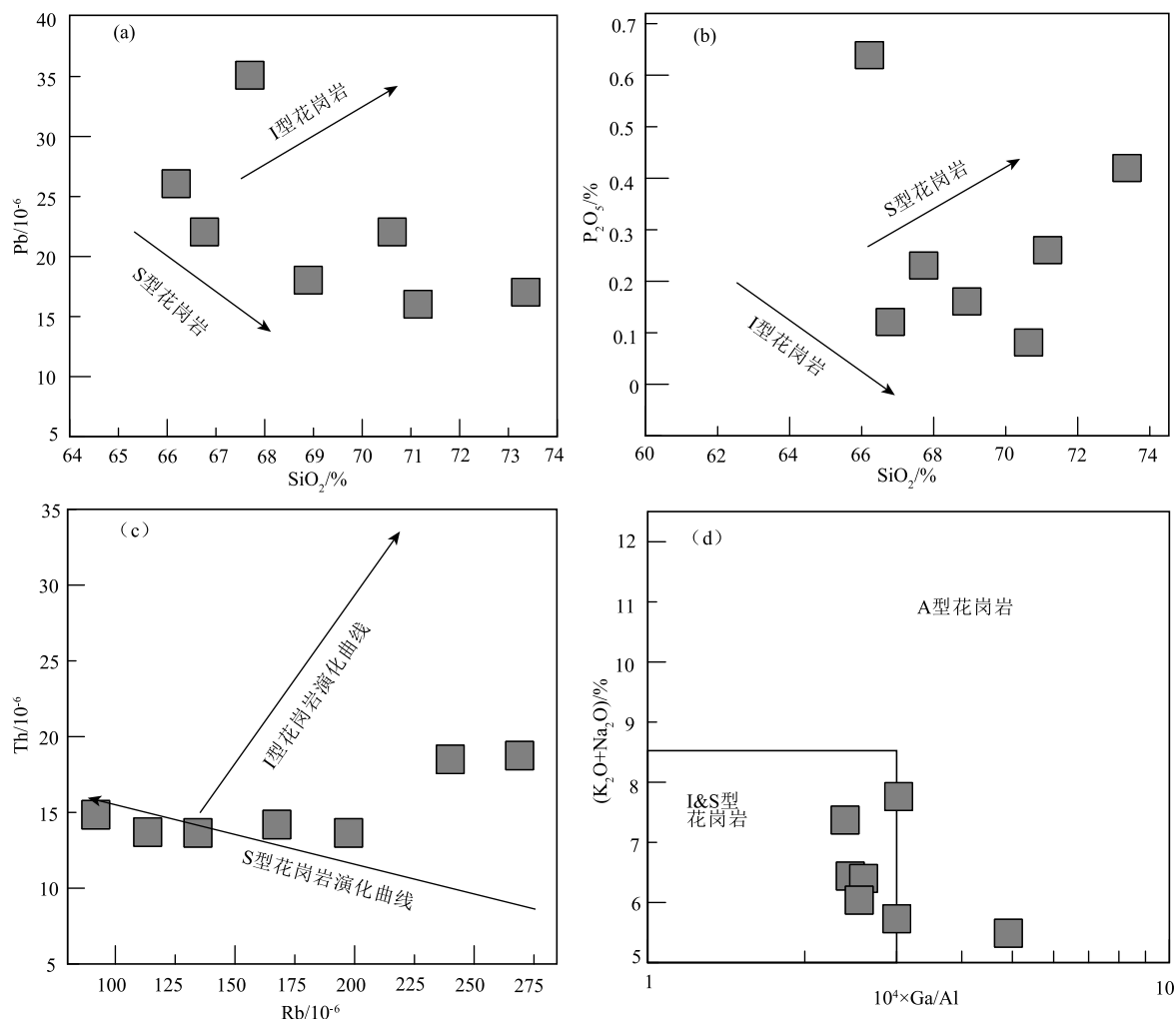


图 10 宜黄花岗岩 SiO_2 -Pb(a)、 SiO_2 - P_2O_5 图解(b)(I 型和 S 型花岗岩趋势据参考文献[84])、

Rb-Th 含量图解^[85](c)和 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解^[86](d)

Fig. 10 SiO_2 -Pb(a), SiO_2 - P_2O_5 (b), Rb-Th(c) and $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ (d)

diagrams of the Yihuang granite

岗岩。

宜黄花岗岩的负 Eu 异常显著、黑云母氧逸度分析测试点均落在 Ni-NiO 线附近,通过锆石 Ce 异常计算岩浆形成的氧逸度较低等特点均表明,宜黄花岗岩早古生代岩浆形成于还原环境。刘嘉玮^[87]研究认为,氧化性岩浆更多来自地幔成分或板块熔融(形成 I 型花岗岩),还原性岩浆则可能来自上地壳的部分熔融(形成 S 型花岗岩)。因此,低氧逸度下的还原性岩浆为宜黄花岗岩是 S 型花岗岩提供了有效的依据。

此外,宜黄花岗岩与大多数华南地块 S 型花岗岩具有相似的同位素地球化学特征(图 6-a),且从 ACF 图解可以看出,所有数据点均落于 S 型花岗岩区域(图 11)。综上认为,宜黄花岗岩属于强过铝质 S 型花岗岩。

4.3 岩石成因

微量元素方面,7 件样品的 Rb/Sr 值在 0.53~11.21 之间(平均值 2.38),Rb/Nd 值为 3.04~12.91(平均值 8.64),明显高于全球上地壳的平均值(分别为 0.32 和 4.5^[88]),宜黄花岗岩富集 K、Rb、Th、Pb 等元素,而亏损 Sr、Ba、Nb、Ta 等元素,显示源岩为陆壳物质^[89]。在黑云母 $\text{MgO} - \text{TFeO} / (\text{TFeO} +$

认为,宜黄岩体可能源自华南中元古代地壳演化物质部分熔融的产物。

宜黄强过铝质 S 型花岗岩中的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值绝大多数超过 0.3,只有 1 个样品的比值小于 0.3。宜黄花岗岩与拉克兰造山带过铝质花岗岩具有相似的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解(图 9-a)。因此,结合 Rb/Sr-Rb/Ba 图解(图 12-b),笔者认为,宜黄强过铝质 S 型花岗岩源自成熟度低的、富长石石英的源区(如杂砂岩、英云闪长岩和花岗闪长岩)。

如前所述,宜黄花岗岩属于高温强过铝质花岗岩,岩石和矿物地球化学特征说明其为长石石英质源区在高温(885℃)、中等压力(9.5 kbar)地壳物质部分熔融的产物。实验研究表明,在宜黄花岗岩岩浆形成压力 9.5 kbar 条件下,长石石英质岩石脱水熔融主要为黑云母+石英+斜长石,源区残留物组合为石榴子石+斜方辉石+斜长石+石英^[91-92]。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中,宜黄花岗岩显示 Y 负异常,说明在其形成过程中可能存在石榴子石或锆石的残留;其相对较高的 Zr 含量($174 \times 10^{-6} \sim 332 \times 10^{-6}$)显示不存在大量的锆石分异。在稀土元素球粒陨石标准化配分图解上,宜黄花岗岩显示明显的负 Eu 异常,说明存在斜长石的残留。

综上认为,宜黄花岗岩是高温和中等压力下(9.5 kbar)长石石英质岩石部分熔融的产物。在部分熔融的过程中,源区存在石榴子石、斜长石等矿物的残留。

4.4 构造意义

4.4.1 继承锆石对前寒武纪构造演化的指示

古生代长英质岩浆活动在武夷-云开地块广泛发育,包括宜黄、乐安、黎川、金溪、龙回、上犹、付仿、宁冈、大宝山等岩体。上述古生代长英质岩浆岩中或多或少存在继承锆石^[15, 93-94]。根据年代学特征,笔者将这些岩体所携带的继承锆石主要划分为 4 组:600~540 Ma、830~680 Ma、1202~850 Ma 及 2100~1500 Ma(图 13)。这 4 组年龄区间与泥盆纪跳马涧组合奥陶纪爵山沟组碎屑锆石 U-Pb 年龄的分布一致^[95],可能与元古宙以来超大陆形成及裂解有关。早古元古代—早中元古代(2100~1500 Ma),古元古代碎屑锆石的形成与哥伦比亚超大陆聚合有关,古元古代晚期—中元古代(1800~1500 Ma)的继承锆石年龄可能与哥伦比亚超大陆聚合后长时

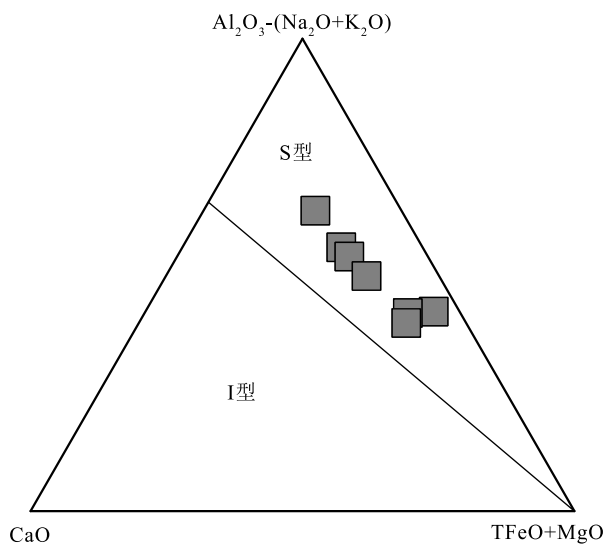


图 11 宜黄花岗 $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{CaO} - (\text{TFeO} + \text{MgO})$ 图解^[71]

Fig. 11 $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{CaO} - (\text{TFeO} + \text{MgO})$ diagram of the Yihuang granite

MgO)关系图解(图 12-a)中,宜黄花岗岩中的黑云母也落于壳源的范围。结合 $t - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 6-b)

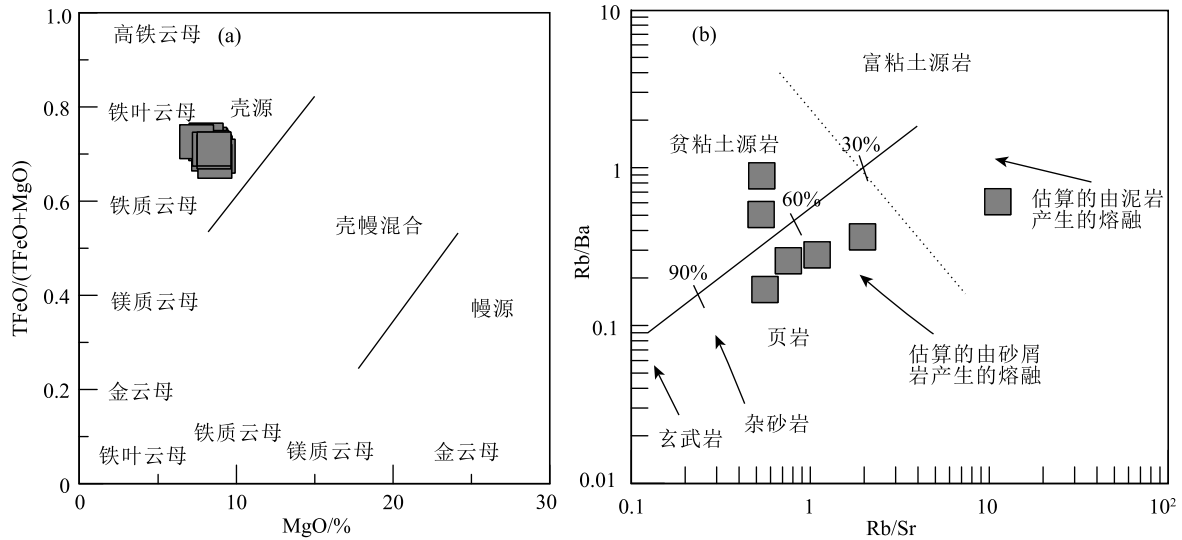


图 12 宜黄花岗岩黑云母 $\text{MgO}-\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 图解^[90] (a) 和 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解^[74] (b)
Fig. 12 $\text{MgO}-\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (a) and $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ (b) diagrams of biotite in the Yihuang granite

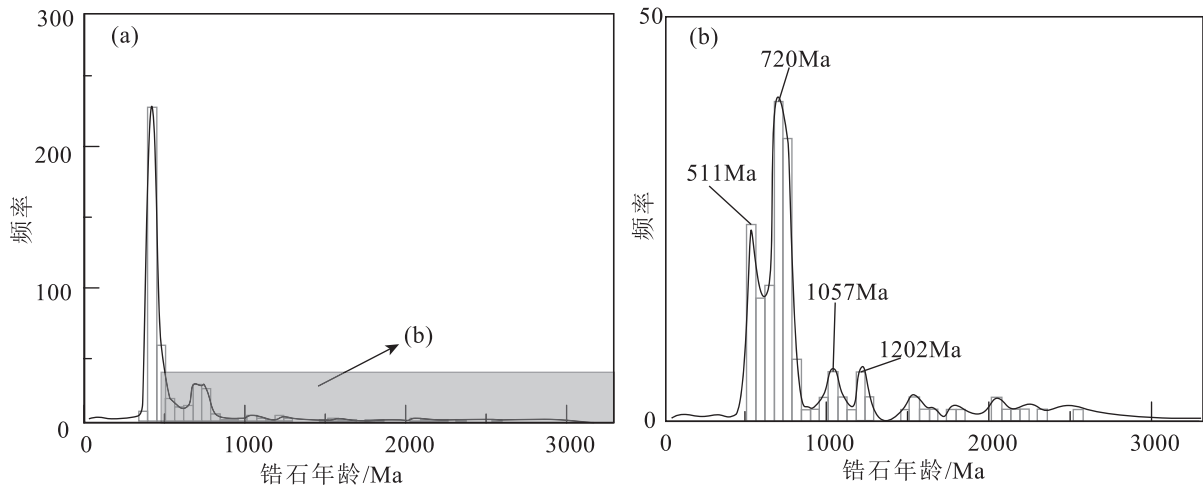


图 13 华南古生代花岗岩锆石年龄频率直方图^[31]
Fig. 13 Zircon age-frequency histogram of the Paleozoic granitoids in South China

期的地壳增生作用有关^[96-97]。新元古代早—中期 (1202~850 Ma 和 830~680 Ma), 华南板块经历了北西向的洋壳向洋壳的俯冲事件、东南向的洋壳向陆壳俯冲事件、陆壳-陆壳碰撞环境及后碰撞伸展裂谷环境, 并在华夏板块及其邻区形成一系列岩浆岩^[98-101]; 新元古代晚期 (600~540 Ma) 继承锆石可能与华夏板块受到弱的泛非运动有关^[102]。

4.4.2 对华南早古生代构造演化的指示

宜黄花岗岩与澳大利亚拉克兰造山带内的强过铝质花岗岩类似, 具有低的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值和高的

$\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值, 属于高温强过铝质 S 型花岗岩 (图 9-a)。前人研究认为, 包括宜黄花岗岩在内的赣中南 4 个强过铝质花岗岩的形成可能是由于增厚地壳产生的高热场使源区物质部分熔融^[15]。然而, 已有研究表明, 如此大面积的高温强过铝质 S 型花岗岩不可能在造山带内地壳增厚产生的高热场环境下产生^[74, 103], 其高温环境可能是由于岩石圈拆沉或俯冲板片折返导致的软流圈上涌所致^[104-105]。

华南早古生代构造演化事件的成因机制一直存在广泛争议, 主要有俯冲-碰撞造山模式、陆内造山模式等众多模式。近年, 从岩浆活动、构造变质

作用、沉积盆地演化等方面对华南早古生代构造演化事件进行了研究,大多数地质学家认为华南早古生代为陆内造山模式^[36, 106-113]。这也表明,宜黄高温 S 型花岗岩的形成可能与古生代华南陆内造山后的岩石圈拆沉有关。越来越多的研究表明,华南早古生代存在岩石圈拆沉作用,如 Yao 等^[110]认为,早古生代晚期枫湾茶园山组玄武岩的形成与造山后期岩石圈拆沉、造山带伸展垮塌减压,软流圈上涌,加热岩石圈地幔导致部分熔融有关;Xia 等^[114]通过华南早古生代花岗岩地球化学和同位素研究,并结合前人研究成果认为,华南早古生代晚期花岗岩可能是造山后期榴辉岩相下地壳和岩石圈地幔拆沉诱发软流圈上涌,加热岩石圈地幔产生玄武质岩浆,玄武质岩浆底侵使变质基底发生部分熔融形成。出露在武夷-云开造山带核部铁镁质岩石的形成与华南古生代存在岩石圈拆沉作用有关^[109-112]。因此,笔者认为,宜黄高温强过铝质 S 型花岗岩的形成,可能与早古生代碰撞挤压后的岩石圈拆沉导致的软流圈地幔上涌有关。在华南早古生代造山带陆内造山背景下,下地壳和岩石圈地幔拆沉引起软流圈物质上涌^[110],上涌的软流圈地幔提供了热量,使地壳发生部分熔融,产生了区域大规模 S 型花岗岩,可以很好地解释华南早古生代 S 型花岗岩面状分布的原因^[98, 109-110, 115]。

5 结 论

(1)江西宜黄花岗岩锆石 U-Pb 定年表明,华南早古生代造山带宜黄花岗岩体形成结晶时间为 448 Ma。

(2)宜黄花岗岩是典型的强过铝质 S 型花岗岩类,可能是华南元古宙地壳长石石英质岩石部分熔融形成的高温 and 中等压力(9.5 kbar)、低氧逸度环境的产物。

(3)宜黄岩体形成于华南早古生代造山带的陆内造山背景下,岩石圈拆沉引发的软流圈地幔上涌使地壳抬升,拆沉作用提供热量,导致下地壳部分熔融。

致谢:东华理工大学孙立强老师及张林、朱坤贺等同学给予了帮助和指导;南京聚谱检测科技有限公司完成了本文地球化学样品的测试分析,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(4): 279-289.
- [2] 王德滋. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 305-314.
- [3] 李剑锋, 付建明, 马昌前, 等. 南岭九嶷山地区砂子岭岩体成因与构造属性: 来自锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及 Sr, Nd, Hf 同位素证据[J]. 地球科学, 2020, (2): 374-388.
- [4] 徐德明, 蔺志永, 骆学全, 等. 钦-杭成矿带主要金属矿床成矿系列[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 7-24.
- [5] 张振杰, 左仁广. 闽西南地区大地构造演化和矿床时空分布规律[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 217-229.
- [6] 李建威, 赵新福, 邓晓东, 等. 新中国成立以来中国矿床学研究若干重要进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(11): 1720-1771.
- [7] 褚平利, 段政, 廖圣兵, 等. 江西大湖塘中生代花岗岩的成因与构造指示意义: 年代学、矿物化学、地球化学与 Lu-Hf 同位素制约[J]. 地质学报, 2019, 93(7): 1687-1707.
- [8] 周涛发, 范裕, 王伟, 等. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. 岩石学报, 2017, 33(11): 3353-3372.
- [9] 黄兰椿, 蒋少涌. 江西大湖塘钨矿床似斑状白云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 3887-3900.
- [10] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 636-658.
- [11] Grabau A W. Stratigraphy of China, Part I, Paleozoic and older[J]. The Geological Survey of Agriculture and Commerce, Peking, 1924, 528: 1-6.
- [12] 舒良树, 陈祥云, 楼法生. 华南前侏罗纪构造[J]. 地质学报, 2020, 94(2): 333-360.
- [13] 王帅. 华南加里东期花岗岩岩石学特征、成因类型及其构造动力学背景探讨[J]. 绿色科技, 2016, (22): 136-137.
- [14] 崔圆圆, 赵志丹, 蒋婷, 等. 赣南早古生代晚期花岗岩类年代学、地球化学及岩石成因[J]. 岩石学报, 2013, 29(11): 4011-4024.
- [15] 张苑, 舒良树, 陈祥云. 华南早古生代花岗岩的地球化学、年代学及其成因研究——以赣中南为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(8): 1061-1079.
- [16] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 332-335.
- [17] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 2003(4): 556-565.
- [18] Lin M, Peng S, Jiang X, et al. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of Neoproterozoic mafic - ultramafic rocks from the western Jiangnan orogen, South China [J]. Gondwana Research, 2016, 35: 338-356.
- [19] Zhang Q, Jiang Y H, Wang G C, et al. Origin of Silurian gabbros and I-type granites in central Fujian, SE China: Implications for the evolution of the early Paleozoic orogen of South China [J]. Lithos, 2015, 216/217: 285-297.
- [20] 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-铁质安山岩新证据[J]. 地球科学, 2016, 41(6): 931-947.
- [21] 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, 12(4): 507-521.
- [22] 彭松柏, 金振民, 付建明, 等. 两广云开隆起区基性侵入岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 2006, 25(4): 434-441.
- [23] 彭松柏, 金振民, 刘云华, 等. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(1): 110-120.
- [24] Guo L Z, Shi Y S, Lu H F, et al. The Pre-Devonian Tectonic Patterns and Evolution of South China[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1989, 3(89): 87-93.
- [25] Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al. Kwangian 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(1): 239-260.
- [26] Charvet J, Shu L S, Faure M, et al. Structural development of the lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39(4): 309-330.
- [27] Li Z X, Li X H, Wartho J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. Geological Society of America Bulletin, 2010, 122(5/6): 772-793.
- [28] 舒良树. 陆内造山带特征及其动力学讨论[J]. 地质学报, 2021, 95(1): 98-106.
- [29] 孙涛, 陈培荣, 周新民, 等. 南岭东段强过铝质花岗岩中白云母研究[J]. 地质论评, 2002, 48(5): 518-525.
- [30] 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, 46(4): 1005-1025.
- [31] 朱清波, 黄文成, 孟庆秀, 等. 华夏地块加里东期构造事件: 两类花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素制约[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1715-1739.
- [32] 关义立, 袁超, 龙晓平, 等. 华南地块东部早古生代的陆内造山作用: 来自 I 型花岗岩的启示[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 698-720.
- [33] 杜远生, 徐亚军. 华南加里东运动初探[J]. 地质科技情报, 2012, 31(05): 43-49.
- [34] 张爱梅, 王岳军, 范蔚茗, 等. 闽西南清流地区加里东期花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(3): 408-418.
- [35] Xu X B, Zhang Y Q, Shu L S, et al. LA-ICP-MS U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the sheared metamorphic rocks in the Wuyishan: Constraints on the timing of Early Paleozoic and Early Mesozoic tectonothermal events in SE China[J]. Tectonophysics, 2011, 501: 71-86.
- [36] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 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.
- [37] 舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1581-1593.
- [38] 王德滋, 林承毅, 周新民. 江西慈竹英云闪长岩体及其周围区域变质岩石的成因[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1978, 1(1): 81-99.
- [39] Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1992, 83(1/2): 1-26.
- [40] Clemens J D. S-type granitic magmas—petrogenetic issues, models and evidence[J]. Earth-Science Reviews, 2003, 61(1/2): 1-18.
- [41] Martínez E M, Villaseca C, Orejana D, et al. Tracing magma sources of three different S-type peraluminous granitoid series by in situ U-Pb geochronology and Hf isotope zircon composition: The Variscan Montes de Toledo batholith (central Spain)[J]. Lithos, 2014, 200: 273-298.
- [42] Simons B, Shail R K, Andersen J C Ø. The petrogenesis of the Early Permian Variscan granites of the Cornubian Batholith: lower plate post-collisional peraluminous magmatism in the Rhenohercynian Zone of SW England[J]. Lithos, 2016, 260: 76-94.
- [43] Patiño Douce A E. Experimental generation of hybrid silicic melts by reaction of high - Al basalt with metamorphic rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B8): 15623-15639.
- [44] 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.
- [45] Feng S J, Zhao K D, Ling H F, et al. Geochronology, elemental and Nd-Hf isotopic geochemistry of Devonian A-type granites in central Jiangxi, South China: Constraints on petrogenesis and post-collisional extension of the Wuyi-Yunkai orogeny[J]. Lithos, 2014, 206/207: 1-18.
- [46] Yu P P, Zhang Y Z, Zhou Y Z, et al. Melt evolution of crustal anatexis recorded by the Early Paleozoic Baiyunshan migmatite-granite suite in South China[J]. Lithos, 2019, 332/333: 83-98.
- [47] 王鸿祯, 莫宣学. 中国地质构造述要[J]. 中国地质, 1996, 000(8): 4-9.
- [48] 贺健, 李龙明, 林寿发, 等. 政和一大埔断裂带内变基性岩成因及构造属性研究[J]. 地质学报, 2018, 92(5): 946-963.
- [49] 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.
- [50] 于津海, 周新民, 赵蕾, 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(16): 1758-1767.
- [51] 殷继成, 何廷贵, 夏竹. 中国南方震旦纪大地构造单元划分与地层分区[J]. 安徽地质, 1994, (Z1): 91-95.
- [52] Geng J Z, Qiu K F, Gou Z Y, et al. Tectonic regime switchover of Triassic Western Qinling Orogen: Constraints from LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope of Dangchuan intrusive complex in Gansu, China[J]. Chemie der Erde - Geochemistry, 2017, 77(4): 673-651.
- [53] 李壮, 郎兴海, 章奇志, 等. 西藏浦桑果铜多金属矿床中酸性岩石成因及动力学背景——年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 2019, 35(3): 737-759.
- [54] 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.
- [55] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- [56] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.

- [57] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42: 2033–2048.
- [58] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[C]// *Developments in Geochemistry*. Elsevier, 1984, 2: 63–114.
- [59] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chem. Geol.*, 1995, 120: 223–253.
- [60] 许王, 刘福来, 刘超辉. 胶-辽-吉造山带北辽河变基性岩的成因、地球化学属性及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(9): 2743–2757.
- [61] Rudnick R L, Gao S, Ling W L, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton[J]. *Lithos*, 2004, 77(1/4): 609–637.
- [62] Ling H F, Shen W Z, Wang R C, et al. Geochemical characteristics and genesis of Neoproterozoic granitoids in the Northwestern margin of the Yangtze Block[J]. *Phys. Chem. Earth*, 2001, 26: 805–819.
- [63] 沈渭洲, 张芳荣, 舒良树, 等. 江西宁冈岩体的形成时代、地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(10): 2244–2254.
- [64] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- [65] Foster Margaret D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[J]. *U S Geological Survey Professional Paper*, 1960, 354B: 11–49.
- [66] 余振东, 项新葵, 谭荣, 等. 赣北大湖塘平苗矿段白云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(5): 1505–1517.
- [67] Clarke D B. The mineralogy of peraluminous granites: A review[J]. *Can Mineral*, 1981, 19: 3–17.
- [68] Miller C F, Stoddard E F, Bradfish L J, et al. Composition of plutonic muscovite: Genetic implications[J]. *Can Mineral*, 1981, 19: 25–34.
- [69] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 1998, 45: 29–44.
- [70] Calvin F M, McDowell S M, Mapes R W. Hot and cold Granites? Implication of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 2003, 31(6): 529–532.
- [71] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. *J. Petrol.*, 1997, 38: 371–391.
- [72] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1983, 64: 295–304.
- [73] Ferry J M, Watson E B. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 154(4): 429–437.
- [74] Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. The Ti-saturation surface for low- to medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(2/3): 316–328.
- [75] 豆敬兆, 付顺, 张华峰. 胶东郭家岭岩体固结冷却轨迹与隆升剥蚀[J]. *岩石学报*, 2015, 31(8): 2325–2336.
- [76] Velde B. Phengite micas: Synthesis, stability, and natural occurrence[J]. *Am. J. Sci.*, 1965, 263: 886–913.
- [77] Massonne H J, Schreyer W. Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and quartz[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1987, 96: 212–224.
- [78] Burnham C W. Hydrothermal fluid at the magmatic stage[C]// Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1967: 34–74.
- [79] Eugster H P, Wones D R. Stability Relations of the Ferruginous biotite, Annite[J]. *Journal of Petrology*, 1962, 3(1): 2648–2697.
- [80] 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[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(12): 1209–1218.
- [81] Li W, Cheng Y, Yang Z. Geo- fO_2 : Integrated software for analysis of magmatic oxygen fugacity[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(5): 2542–2555.
- [82] 马鸿文. 花岗岩成因类型的判别分析[J]. *岩石学报*, 1992, 4: 341–350.
- [83] 邱检生, 胡建, 王汝成. 江苏东海片麻状碱性花岗岩的年代学与地球化学: 对扬子板块东北缘新元古构造演化的启示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(z1): 173–174.
- [84] 邱检生, 胡建, 王孝磊, 等. 广东河源白石冈岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩[J]. *地质学报*, 2005, 79(4): 503–514.
- [85] Chappell B W. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 1999, 46: 535–551.
- [86] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407–419.
- [87] 刘嘉玮. 胶东和小秦岭花岗岩磷灰石标型特征及其地质意义[D]. 中国地质大学(北京), 2020.
- [88] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell: Oxford Press, 1985: 1–312.
- [89] 陈佩嘉, 戴朝成, 黄成, 等. 乌拉山地区古元古代 S 型花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *中国地质*, 2017, 44(5): 959–973.
- [90] 周作侠. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 1988, 4(3): 63–73.
- [91] Koester E, Pawley A R, Fernandes L A D, et al. Experimental melting of cordierite gneiss and the petrogenesis of syntranscurrent peraluminous granites in southern Brazil[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(8): 1595–1616.
- [92] 张家辉, 金巍, 王亚飞, 等. 鞍山地区始—古太古代花岗质地壳的形成及演化——深沟寺杂岩的岩石学、年代学及地球化学证据[J]. *地质学报*, 2018, 92(5): 887–907.
- [93] 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, 16(2): 161–176.
- [94] Su S, Qin K, Li G, et al. Geochronology and geochemistry of Early Silurian felsic volcanic rocks in the Dabaoshan ore district, South China: Implications for the petrogenesis and geodynamic setting[J]. *Geological Journal*, 2019, 54(6): 3286–3303.
- [95] 向磊, 舒良树. 华南东段前泥盆纪构造演化: 来自碎屑锆石的证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1377–1388.
- [96] Wang L J, Yu J H, Griffin W L, et al. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks[J]. *Precambrian Research*,

- 2012, 222: 368–385.
- [97] Zhao G, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleo – Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup [J]. *Earth – Science Reviews*, 2004, 67(1/2): 91–123.
- [98] 夏金龙, 黄圭成, 丁丽雪, 等. 云开地区早古生代宁潭片麻状花岗岩体锆石 U–Pb 定年、岩石成因及构造背景[J]. *地球科学*, 2018, 43(7): 2276–2293.
- [99] 舒良树, 邓兴梁, 马绪宣. 中天山基底与塔里木克拉通的构造亲缘性[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1584–1601.
- [100] 王森, 舒良树. 武夷山新元古代蛇绿混杂岩岩石地球化学特征[J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 572–583.
- [101] Yao J L, Cawood P, Shu L S, et al. Jiangnan Orogen, South China: A 970–820 Ma Rodinia margin accretionary belt [J]. *Earth – Science Reviews*, 2019, 196: 1028–72.
- [102] 丁兴, 周新民, 孙涛. 华南陆壳基底的幕式生长——来自广东古寨花岗闪长岩中锆石 LA–ICPMS 定年的信息[J]. *地质论评*, 2005, 51(4): 382–392.
- [103] Thompson A B, Connolly J A D. Melting of the continental crust: Some thermal and petrological constraints on anatexis in continental collision zones and other tectonic settings[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B8): 15565–15579.
- [104] Davies H J, Blanckenburg F V. Slab break off: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 129(1/4): 85–102.
- [105] Black R, Liegeois J P. Cratons, mobile belts, alkaline rocks and continental lithospheric mantle: the Pan – African testimony [J]. *Journal Geological Society London*, 1993, 150(1): 89–98.
- [106] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300–km–wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat–slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179–182.
- [107] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1553–1582.
- [108] Zhao G C. Jiangnan Orogen in South China: Developing from Divergent Double Subduction [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(3): 1173–1180.
- [109] Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al. Origin of paleosubduction–modified mantle for Silurian gabbro in the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence [J]. *Lithos*, 2013, 160: 37–54.
- [110] Yao W H, Li Z X, Li W X, et al. Post – kinematic lithospheric delamination of the Wuyi–Yunkai orogen in South China: evidence from ca. 435 Ma high–Mg basalts[J]. *Lithos*, 2012, 154: 115–129.
- [111] Zegers T E, Van Keken P E. Middle Archean continent formation by crustal delamination[J]. *Geology*, 2001, 29(12): 1083–1086.
- [112] 许德如, 林舸, 梁新权, 等. 海南岛前寒纪岩石圈演化的记录: 基性岩类岩石地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 598–608.
- [113] 柏道远, 周亮, 王先辉, 等. 湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代—早古生代构造背景的制约[J]. *地质学报*, 2007, 81(6): 755–771.
- [114] Xia Y, Xu X, Zou H, et al. Early Paleozoic crust–mantle interaction and lithosphere delamination in South China Block: Evidence from geochronology, geochemistry, and Sr–Nd–Hf isotopes of granites [J]. *Lithos*, 2014, 184: 416–435.
- [115] 魏春夏. 桂东北加里东期花岗岩岩石成因及其地质背景[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2016.