

doi:10.3799/dqkx.2016.002

南岭地区温公岩体的岩石成因及其构造指示

甘成势^{1,2,3}, 王岳军^{2*}, 蔡永丰⁴, 刘汇川², 张玉芝^{1,2}, 宋菁菁^{1,3}, 郭小飞^{1,3}

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广东广州 510640

2. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东省地质过程与矿产资源勘查重点实验室, 广东广州 510275

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004

摘要: 南岭构造带处于古特提斯构造域与古太平洋构造域的复合部位, 是研究古特提斯构造域向古太平洋构造域转换的理想地区。温公岩体位于广东省梅州兴宁地区的南岭构造带东段。该岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学定年结果为 196.9 ± 4.4 Ma, 具 A 型花岗岩的典型地球化学特征, 如富硅 (69.22%~76.33%)、高 Zr+Nb+Ce+Y 含量、高 FeO/MgO 和 $10\,000 \times \text{Ga/Al}$ 比值、亏损高场强元素和 Eu 负异常明显等。样品具高钾低镁、准铝质到弱过铝质的特征, 其 K_2O 含量为 3.81%~4.43%, MgO 为 0.20%~0.82%, A/CNK 比值为 0.95~1.10, 属于高钾钙碱性花岗岩。样品具相对亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-2.7 \sim -0.5$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $+2.1 \sim +7.7$ 。传统观点认为华南地区缺少 205~180 Ma 的岩浆记录, 而本文温公岩体的精确定年结果说明华南东南部地区存在早侏罗世 (~197 Ma) 岩浆活动。结合区域相关地质资料, 我们认为温公岩体形成于陆内伸展的构造背景, 主要是基性下地壳部分熔融的产物, 并在成岩过程中发生了分离结晶作用。~197 Ma 的温公 A 型花岗岩体是目前华南东南部燕山期识别出的最老 A 型花岗岩体, 结合区域内 196~156 Ma 的 A 型花岗岩的特征, 指示华南东南部从古特提斯构造域向古太平洋构造域转换的时限应晚于早侏罗世。

关键词: 温公 A 型花岗岩; 南岭构造带; 锆石 U-Pb 年代学; Sr-Nd-Hf 同位素; 岩石学。

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2016)01-0017-18

收稿日期: 2015-09-30

The Petrogenesis and Tectonic Implication of Wengong Intrusion in the Nanling Range

Gan Chengshi^{1,2,3}, Wang Yuejun^{2*}, Cai Yongfeng⁴, Liu Huichuan²,
Zhang Yuzhi^{1,2}, Song Jingjing^{1,3}, Guo Xiaofei^{1,3}

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-Sen University, Key Laboratory of Mineral Resources and Geological Process of Guangdong, Guangzhou 510275, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. College of Geosciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: The early Yanshanian geology of southeastern China is characterized by widespread igneous rocks, especially granites. However, the petrogenesis and tectonic implication of these granites in South China remain highly controversial. The A-type granites are the important carrier for better understanding the tectonic evolution of the South China block since the formation is commonly related to extensional tectonic setting. In this study, a set of new zircon U-Pb geochronological, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic data is presented for the Wengong A-type granite in eastern Nanling range in northern Guangdong Province. Laser zircon U-Pb dating for the Wengong granitic sample give a weighted mean age of 196.9 ± 4.4 Ma and in-situ zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranging from $+2.1$ to $+7.7$. Their whole rock $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values range from -2.7 to -0.5 . The Wengong granites are enriched in SiO_2 (69.22%–76.33%) and total alkalis (7.77%–8.35%). They are metaluminous-peraluminous with A/CNK val-

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (No.2014CB440901); 国家自然科学基金项目 (Nos.41372198, 41402165); 中山大学中央高校基本事业费。

作者简介: 甘成势 (1990-), 男, 硕士, 主要从事构造地质学研究。E-mail: ganchengshi@gig.ac.cn

* 通讯作者: 王岳军, E-mail: wangyuejun@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 甘成势, 王岳军, 蔡永丰, 等, 2016. 南岭地区温公岩体的岩石成因及其构造指示. 地球科学, 41(1): 17-34.

ues ranging from 0.95 to 1.10. These samples have high rare earth element contents, FeO_t/MgO (4.40–9.75) and 10 000× Ga/Al ratios (2.9–3.3), as well as significant Sr, Ti and Eu negative anomalies. Based on these geochemical data, it is proposed that the Wengong granites originated from mafic lower crust in response to the earliest Jurassic extensional setting. In combination with available data, it is inferred that the A-type granites in the Nanling range predominantly formed at 196–156 Ma, suggesting an early Yanshanian extensional event in SE China. These A-type granites probably formed in intra-plated extensional environment, indicating the transformation from Paleotethyan to Paleopacific domain after earliest Jurassic.

Key words: Wengong A-type granite; Nanling range; zircon U-Pb age; Sr-Nd-Hf isotope; petrology.

0 引言

华南陆块位于欧亚大陆的东南缘(张克信等, 2015),经历了 Columbia/Nuna 超大陆、Rodinia 超大陆、Gondwana 大陆、Pangea 超大陆聚合等多期构造运动(范蔚茗等, 2003),发育了多期次构造—岩浆活动,其中中生代的岩浆活动最为强烈.在华南陆块东南区域分布有大量中生代 I 型和 S 型花岗岩及同期火山岩(Zhou *et al.*, 2006),近年还陆续发现中生代 A 型花岗岩.华南陆块东南部中生代 A 型花岗岩主要呈两条带状分布,即北东向延伸的沿海 A 型花岗岩带和东西向延伸的南岭 A 型花岗岩带(胡建等, 2005).沿海 A 型花岗岩带与钙碱性 I 型花岗岩共生,其形成被认为与古太平洋板块的西向俯冲作用有关(邱检生等, 1999; 胡建等, 2005; Wong *et al.*, 2009).对于南岭 A 型花岗岩带,虽然前人对其中的花岗岩体(如寨背、陂头、柯树北、西山、南昆山岩体等)开展了大量研究工作,但是它们形成的构造背景仍存在着激烈争议.例如,有学者认为这些花岗岩形成于印支运动的后造山伸展背景或者陆内伸展背景下(付建明等, 2004a, 2004b; 余心起等, 2009);有的学者则认为它们的形成与古太平洋板块俯冲引发的弧后拉张背景有关(Jiang *et al.*, 2009; He *et al.*, 2010);也有学者提出这些花岗岩受古太平洋板块平板俯冲影响,与板片断离或板片破坏引起软流圈地幔物质的上涌有关(Li and Li, 2007; Li *et al.*, 2007b; Zhu *et al.*, 2010).以上争议的关键在于目前仍无确切的资料来限定古特提斯构造域向古太平洋构造域转换的时代.南岭构造带处于古特提斯构造域与古太平洋构造域的复合部位,是限定古特提斯构造域向古太平洋构造域转换时限的理想地区.南岭构造带东段的温公岩体出露面积较大,岩性复杂,笔者对其开展了系统的岩相学、锆石 U-Pb 年代学和原位 Lu-Hf 同位素、地球化学和 Sr-Nd 同位素分析,以查明其岩石成因及其动力学机制,进而揭示华南东南部早燕山期的大地构造背景.

1 地质背景与样品描述

南岭构造带呈东西向展布,其西侧以萍乡—桂林断裂与扬子新元古代造山带相接,东侧以政和—大埔断裂与东南沿海晚中生代火山—侵入杂岩带接触,北侧以茶陵—广昌隐伏断裂和武夷山褶皱带相连,南界为博白—岑溪断裂(舒良树等, 2006; Wang *et al.*, 2013b).该构造带发育在华南前震旦纪—早古生代褶皱基底之上(舒良树等, 2004),经历了早古生代末期、早中生代初期和晚中生代等多期构造—岩浆活动(Li *et al.*, 2004; 舒良树等, 2004; Wang *et al.*, 2013b; 陈国雄等, 2014).南岭构造带是研究华南东南部从古特提斯构造域向古太平洋构造域转换的关键地区,前人依据区内发育的双峰式火山岩和裂谷盆地认为它们的转换时间在 190~160 Ma 之间(舒良树, 2012).

温公岩体位于南岭构造带东段的梅州兴宁地区(图 1a).该区的基底岩石主要为晚新元古代变质碎屑岩、片麻岩和千枚岩,早古生代碎屑岩建造(Wan *et al.*, 2010),区内缺失奥陶系和志留系地层,泥盆系到早石炭世为碎屑岩沉积,中—晚石炭世为碳酸岩沉积,二叠系为碳酸岩和碎屑岩沉积,早中三叠世主要为泥岩和碎屑岩沉积,晚三叠世地层由于抬升剥蚀而缺失.侏罗系地层主要以基性、长英质火山岩为主,白垩系则为红盆沉积(陈忠权和李文辉, 2001; 孙强辉等, 2002).

温公岩体出露于兴宁市北西侧的温公村一带,呈南宽北窄的带状展布,中部为一东西向断裂所分割(图 1b),出露面积约 28 km²,为岩体侵入新元古代—古生代地层和霞岩基性侵入体(陈忠权等, 2002).温公花岗岩主要矿物成分有钾长石(52%~60%)、斜长石(5%~10%)和石英(22%~37%),次要矿物成分有黑云母(2%~5%)和角闪石(3%~6%),副矿物成分主要为磷灰石、磁铁矿和锆石等(1%~3%).其中角闪石的暗化边和熔蚀结构十分明显,石英和钾长石呈微文象结构,斜长石发育有聚片双晶,钾长石表面发生了高岭石化蚀变(图 2).

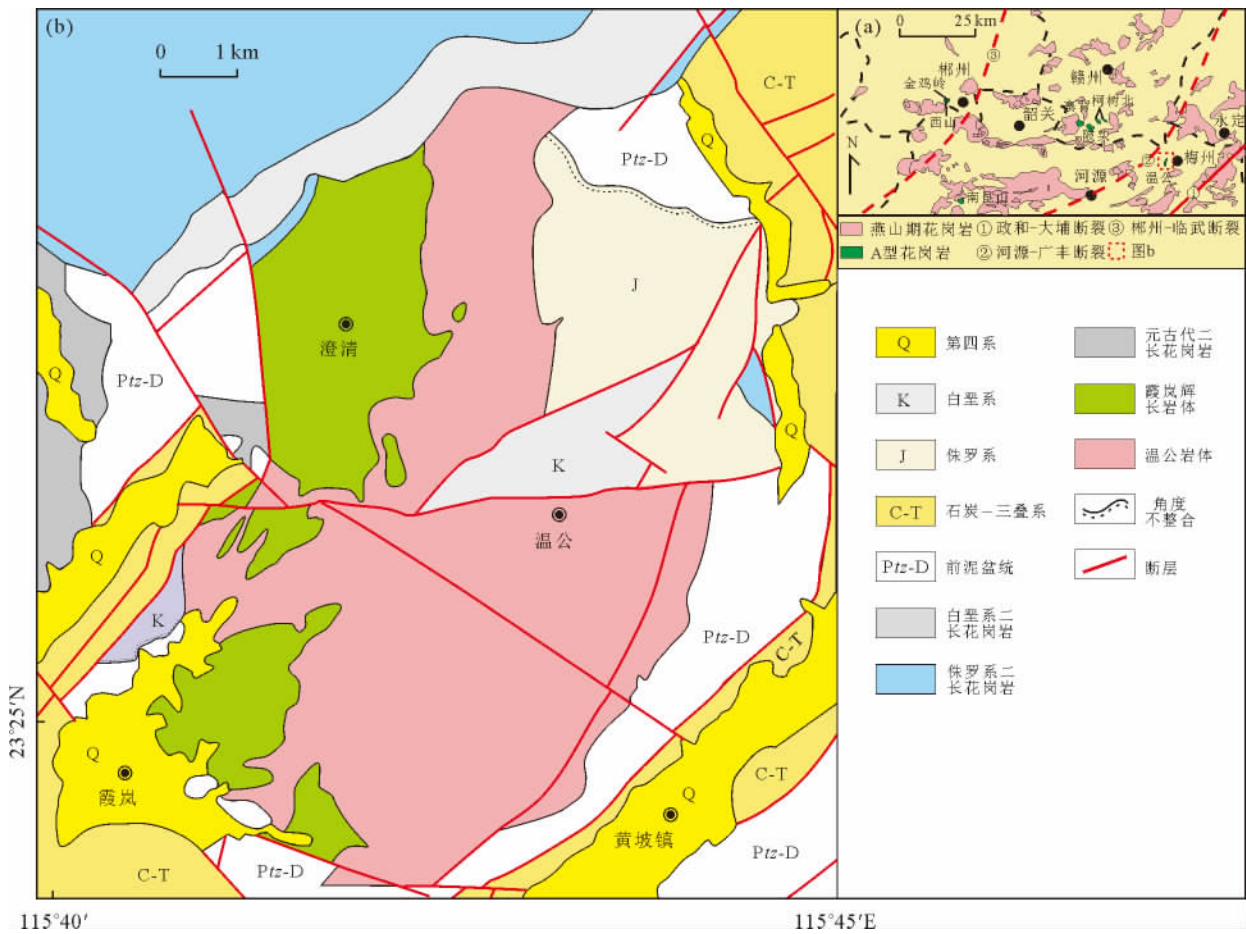


图 1 (a)南岭构造带内燕山期花岗岩分布;(b)南岭地区温公岩体地质简图

Fig.1 (a) Distributed pattern of the Yanshanian granites in the Nanling range and (b) geological map of the Wengong intrusions
据陈忠权等(2002);Zhu et al.(2010)修改

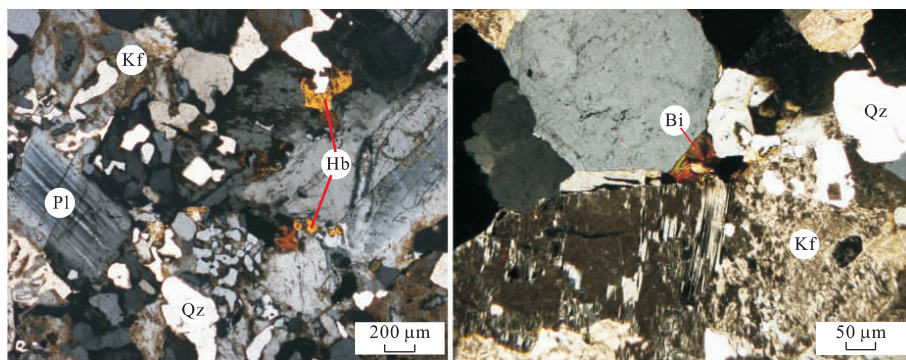


图 2 南岭地区温公 A 型花岗岩的显微岩相学特征

Fig.2 Photomicrographs of the Wengong A-type granite in the Nanling range
Qz.石英;Pl.斜长石;Kf.钾长石;Hb.角闪石;Bi.黑云母

2 分析方法

2.1 主微量元素和 Sr-Nd 同位素分析

首先选用无蚀变、无矿化的新鲜岩石样品,破碎至约 2 mm,然后用 5% HCl 浸泡至无气泡,以淋滤

掉碳酸盐矿物,最后等烘干后再用玛瑙研钵研磨成粒度细于 200 目的粉末,用于主微量元素和 Sr-Nd 同位素分析.

全岩主微量和 Sr-Nd 同位素分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点

实验室完成.全岩主量元素是在 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪(XRF)上测定,分析精度优于 2%~5%,详细实验步骤见李献华等(2005).微量元素的测试在 Perkin-Elmer ELAN 6000 型 ICP-MS 上完成,大部分元素分析精度高于 5%,详细分析流程参见刘颖等(1996).Sr-Nd 同位素分析在装有 9 个法拉第杯接收仪和 8 个电离计数器的 Neptune Plus 多接收电感耦合等离子体质谱仪上测试完成,详细分析流程参见韦刚健等(2002)和梁细荣等(2003).

2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素原位测定

选用新鲜的岩石样品,运用人工重砂法分选出锆石;然后在双目显微镜下挑选出无裂隙、透明干净的自形锆石颗粒,并用环氧树脂将其固定在玻璃板上,抛光至锆石中心,最后进行反射光和透射光照相,并用扫描电子显微镜上的阴极发光仪详细检查锆石内部结构,以选择最佳分析点.锆石阴极发光成像(CL)分析在中国科学院地质与地球物理研究所 CAMECA SX100 型电子探针上完成,工作条件是 15 kV 加速电压和 15~20 nA 电流.参照锆石阴极发光(CL)图像和 U-Pb 同位素测定的位置进行锆石 Hf 同位素原位测定.

锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP MS)、Agilent 7500a 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICP MS)和 193 nm 的 ArF 准分子激光系统上进行同时原位测定,具体分析流程见谢烈文等(2008).激光束斑直径为 50 μm ,频率为 6~8 Hz,采样方式为单点剥蚀,以 He 作为剥蚀物质的载气.实验中每完成 8 个测点,测定 1 次标准年龄样品 GJ-1 和 2 次标准锆石 91500.在样品测试开始和结束时各测定 2 次 NIST SRM610、2 次标准锆石 91500 和 1 次标准年龄样品 GJ-1.锆石的 U-Pb 同位素比值采用标样 91500 为外部标准校正,分馏校正和结果的计算利用 GLITTER(ver.4.0)软件(Jackson *et al.*, 2004)进行,普通 Pb 校正采用 Andersen (2002)介绍的方法,样品的 U-Pb 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot (rev. 2.50) 程序(Ludwig, 2009). $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用 ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-10}/a$ (Scherer *et al.*, 2001),球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用 0.282 772, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用 0.033 2(Blichert *et al.*, 1997),以锆石的 U-Pb 加权平均年龄计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值.单阶段 Hf 模式年龄

(T_{DM}) 计算时,亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用 0.283 25, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 的比值采用 0.038 4(Vervoort and Blichert-Toft, 1999).两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2}) 计算时,平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用 0.015, f_{cc} 取值为 -0.55(Griffin *et al.*, 2004).

3 地球化学特征

温公岩体的岩石化学分析结果及有关参数见表 1.温公花岗岩具富硅(69.22%~76.33%)、高钾(3.81%~4.43%)、高 FeOt/MgO 比值(4.40~9.75)和低 CaO(0.32%~1.96%)的特征,其 Al_2O_3 的含量介于 12.52%~14.29% 之间, A/CNK 为 0.95~1.10, A/NK 为 1.14~1.26,属于准铝质—弱过铝质高钾钙碱性花岗岩(图 3).在哈克图解上温公花岗岩的 Al_2O_3 、MgO、CaO、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 Na_2O 与 SiO_2 呈明显负相关关系,而 K_2O 与 SiO_2 表现出正相关关系(图 4).

温公花岗岩具高 REE 含量,在球粒陨石稀土元素配分图上,呈现出明显的轻稀土富集,重稀土平坦的特征(图 5b),其 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值为 5.9~10.1, Eu 负异常明显($\text{Eu}^* = 0.33 \sim 0.64$);由原始地幔标准化的微量元素蛛网图可见(图 5a),样品富集大离子亲石元素、亏损高场强元素, Sr、Ti 强烈亏损, Nb、Ta 负异常明显, Zr、Hf 无明显负异常.温公花岗岩的部分微量元素随 SiO_2 含量的增加也表现出有规律的变化趋势,如 Rb、Nb 含量增加,而 Zr、Ba 含量降低(图 6a~6d).

温公岩体的 Sr-Nd 同位素组成见表 2 和后文图,可以看出,温公花岗岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值介于 0.707 51~0.710 46 之间,具高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.7 \sim -0.5$,二阶段 Nd 模式年龄介于 0.99~1.41 Ga 之间.

4 锆石的 U-Pb 定年结果及 Lu-Hf 同位素组成

分选自上述样品 09XL-22 的锆石呈浅棕、浅褐或褐色,紫色和无色锆石少见,半透明至透明,以半透明为主.锆石成短柱状,长宽比为 1/1~1/3,长 80~150 μm .锆石 CL 图像上可见典型的韵律环带结构(图 7),为岩浆成因锆石.

锆石 U-Pb 定年分析结果见表 3.测定了 17 颗

表 1 南岭地区温公花岗岩的主微量测试结果

Table 1 Major oxides and trace element compositions of the Wengong granitic samples in the Nanling range

样品编号	09XL-18	09XL-19	09XL-22	09XL-24	09XL-31	09XL-32
主量元素(%)						
SiO ₂	72.99	73.16	76.12	76.33	69.34	69.22
TiO ₂	0.44	0.43	0.15	0.16	0.59	0.63
Al ₂ O ₃	12.92	12.80	12.61	12.52	14.08	14.29
Fe ₂ O ₃ t	3.30	3.25	1.32	1.16	4.06	4.01
CaO	1.27	0.77	0.32	0.36	1.81	1.96
MgO	0.34	0.30	0.23	0.20	0.71	0.82
K ₂ O	3.90	4.15	4.43	4.39	3.83	3.81
Na ₂ O	3.87	3.92	3.71	3.79	4.52	4.36
MnO	0.07	0.06	0.02	0.02	0.06	0.06
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.02	0.02	0.07	0.08
LOI	0.35	0.62	0.54	0.52	0.48	0.29
Total	99.50	99.51	99.47	99.47	99.55	99.53
FeOt	2.97	2.92	1.19	1.04	3.65	3.61
mg-number	0.19	0.18	0.29	0.29	0.29	0.32
FeOt/MgO	8.73	9.75	5.16	5.22	5.15	4.40
A/CNK	1.00	1.04	1.10	1.07	0.95	0.96
A/NK	1.22	1.17	1.16	1.14	1.21	1.26
微量元素(10⁻⁶)						
Sc	6.02	5.78	0.84	0.88	4.74	5.26
V	3.75	4.36	2.07	3.03	32.00	38.30
Cr	1.11	2.29	1.68	1.71	3.17	4.33
Co	1.63	1.46	0.43	0.46	5.35	6.09
Ni	0.71	0.83	0.12	0.06	2.03	7.78
Ga	20.5	19.4	21.5	21.7	23.3	22.4
Rb	141	153	191	175	103	121
Sr	117.00	123.00	25.40	29.20	113.00	101.00
Y	62.2	47.5	64.6	73.2	57.1	56.5
Zr	423	385	287	358	642	468
Nb	36.4	31.3	31.6	29.2	24.4	34.1
Cs	3.99	2.69	4.73	2.93	1.51	3.46
Ba	736	843	590	673	1 090	841
La	46.6	62.8	67.6	70.0	74.6	71.5
Ce	94.9	127.0	141.0	145.0	154.0	144.0
Pr	12.5	15.8	17.3	17.3	18.8	18.0
Nd	50.4	60.4	64.5	66.2	72.5	70.1
Sm	11.2	12.0	13.0	13.2	13.6	13.3
Eu	2.41	2.34	1.38	1.46	2.58	2.22
Gd	11.7	10.9	12.5	13.0	12.2	12.3
Tb	1.92	1.68	2.02	2.13	1.82	1.81
Dy	11.20	9.53	11.70	12.50	10.40	10.30
Ho	2.21	1.85	2.35	2.49	2.05	2.06
Er	6.14	4.90	6.34	6.81	5.59	5.72
Tm	0.90	0.74	0.96	0.99	0.83	0.85
Yb	5.65	4.86	6.00	6.24	5.32	5.50
Lu	0.84	0.75	0.88	0.93	0.83	0.83
Hf	9.71	10.70	9.01	9.92	13.30	11.70
Ta	2.37	2.17	2.56	2.12	1.50	2.18
Pb	27.7	20.8	29.7	20.9	17.7	23.1
Th	14.5	19.8	21.5	19.7	14.5	19.3
U	3.08	3.11	3.64	3.41	2.22	3.24
Mn	584	534	125	172	553	594
Ge	1.70	1.87	1.56	1.54	1.73	1.63
Zr+Nb+Ce+Y	617	591	524	606	878	703
Eu*	0.64	0.61	0.33	0.34	0.60	0.52
10 000×Ga/Al	3.00	2.90	3.20	3.30	3.10	3.00
T _{Zr} (°C)	890	898	888	909	911	875
(La/Yb) _N	5.90	9.30	8.10	8.00	10.10	9.30

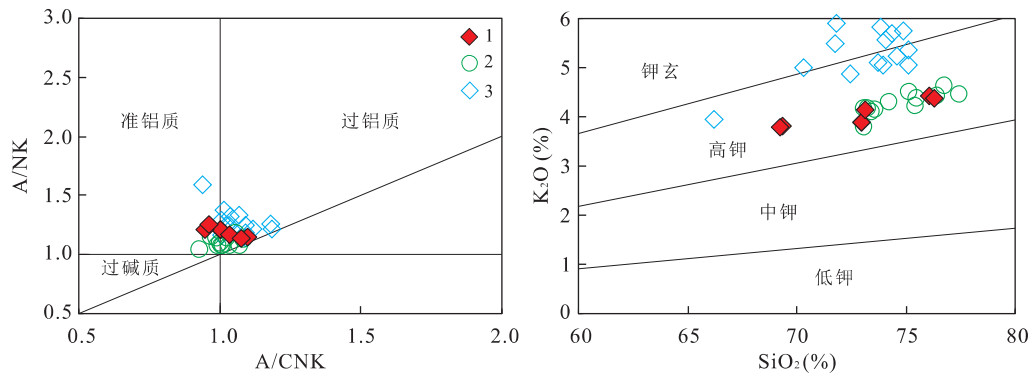


图 3 A/CNK-A/NK 和 SiO₂-K₂O

Fig.3 A/CNK versus A/NK and SiO₂ versus K₂O for the Wengong A-type granite
1.温公 A 型花岗岩(本文);2.温公 A 型花岗岩(Zhu *et al.*,2010);3.西山岩体(Jiang *et al.*,2009)

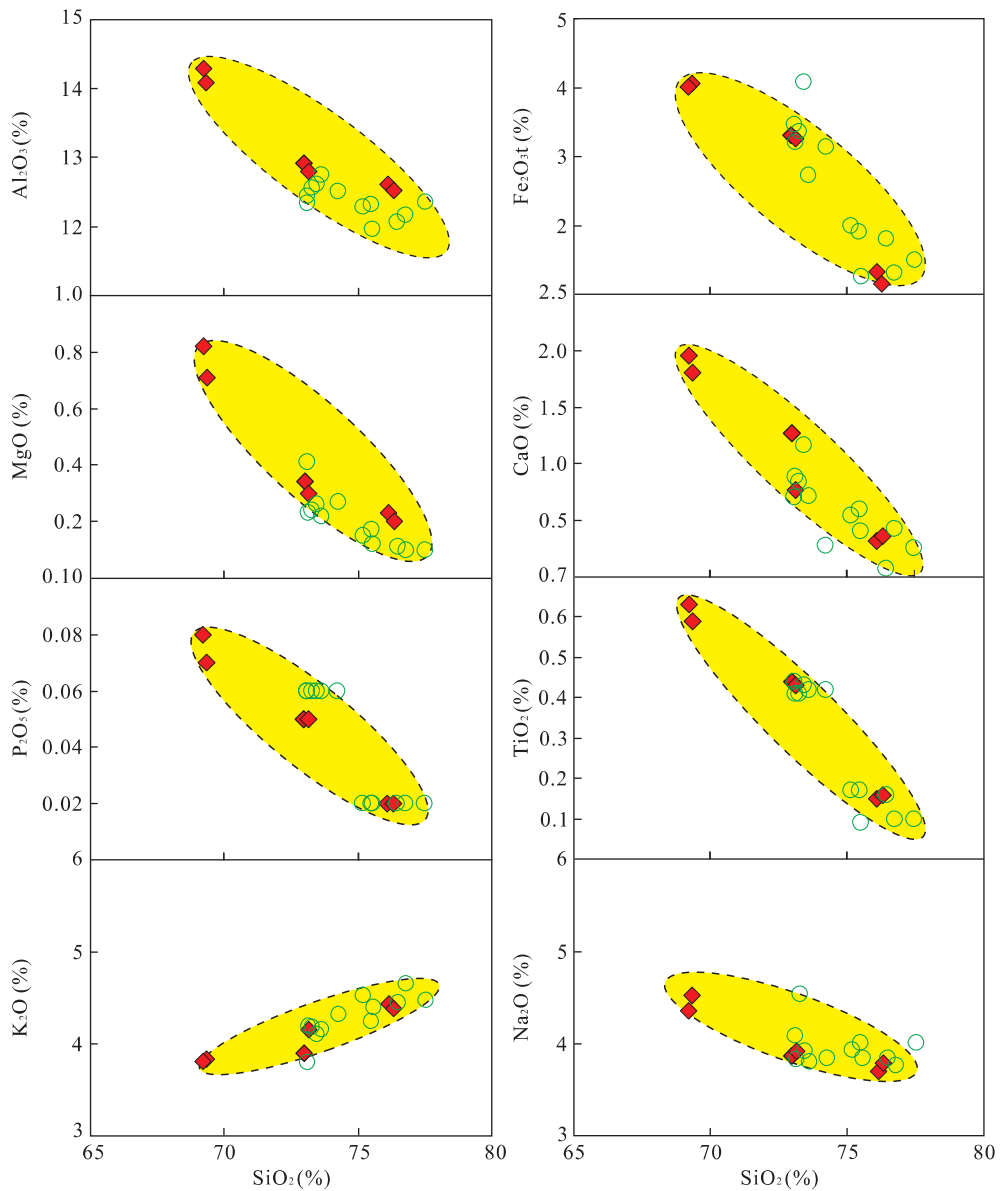


图 4 南岭地区温公 A 型花岗岩的 Harker 图(图例同图 3)

Fig.4 Harker diagrams for the Wengong A-type granite in the Nanling range

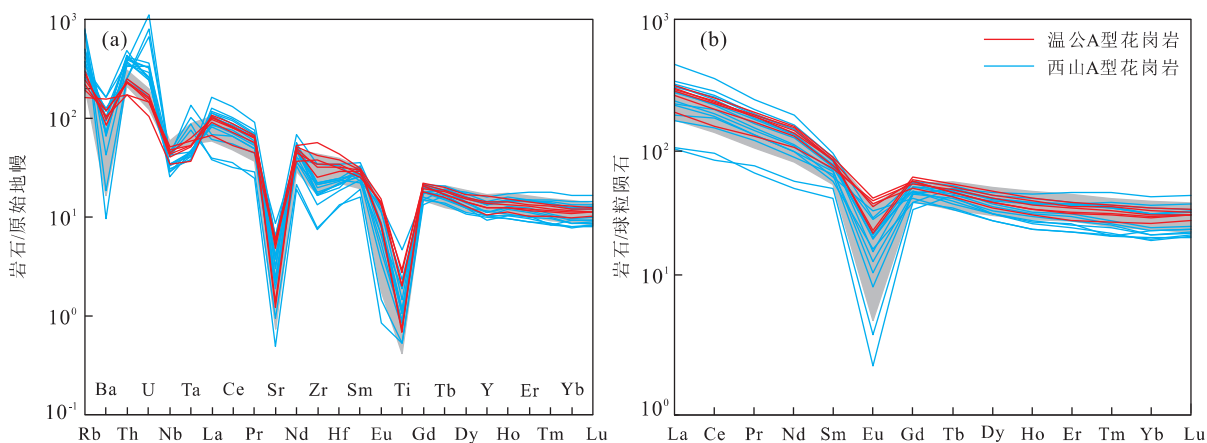


图 5 (a)原始地幔标准化微量元素蛛网图;(b)球粒陨石标准化稀土元素配分曲线

Fig.5 Primitive mantle-normalized spidergram (a) and chondrite-normalized REE pattern (b) for the Wengong A-type granite in the Nanling range

灰色数据引自 Zhu *et al.*(2010);西山 A 型花岗岩数据引自 Jiang *et al.*(2009);球粒陨石和原始地幔标准化数据引自文献 Sun and McDonough(1989)

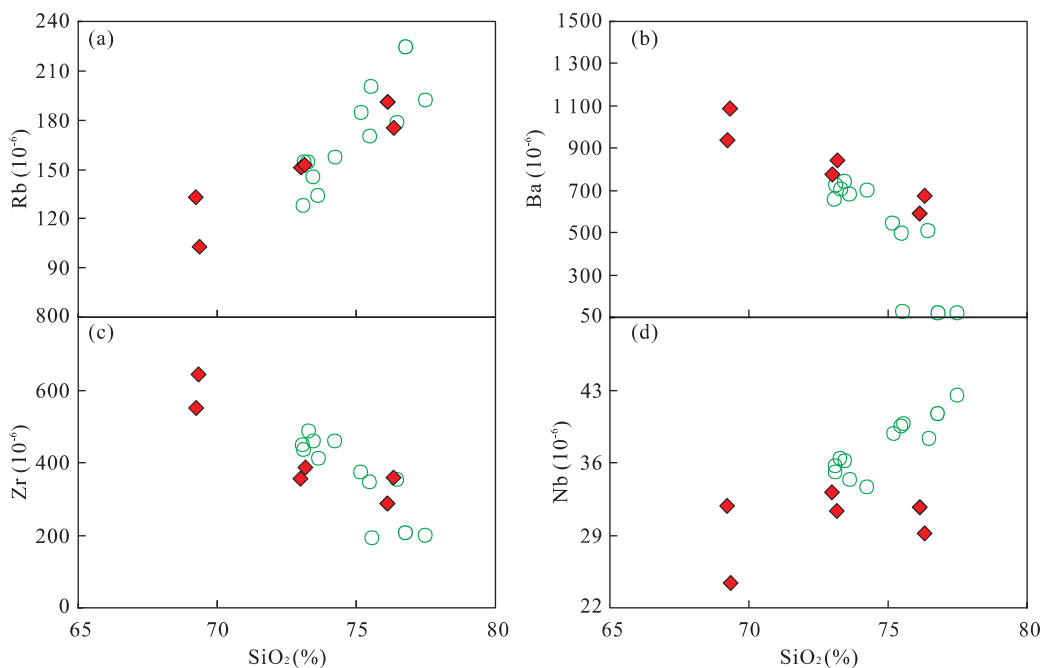


图 6 (a)SiO₂-Rb 图解;(b)SiO₂-Ba 图解;(c)SiO₂-Zr 图解;(d)SiO₂-Nb 图解(图例同图 3)

Fig.6 Variation diagrams of trace elements versus SiO₂ for the Wengong A-type granite in the Nanling range

锆石,它们的 Th 和 U 含量分别为 $(315 \sim 1365) \times 10^{-6}$ 和 $(384 \sim 1134) \times 10^{-6}$; Th/U 比值为 0.68 ~ 1.20,均大于 0.1,进一步表明其为岩浆成因锆石.除 13 号点明显偏离谐和线,未纳入加权平均年龄的计算,其余 16 个分析测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄为 185.5~211.8 Ma,加权平均年龄为 196.9 ± 4.4 Ma (MSWD=2.9, $n=16$; 图 8),该年龄代表了温公岩体的形成年龄.

样品 09XL-22 的锆石原位 Lu-Hf 同位素分析

结果见表 4.样品所测的锆石具有非常低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值,介于 0.000985~0.002298 之间,显示锆石在形成后基本没有放射性成因的 Hf 积累(吴福元等,2007); $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.28272~0.28287 之间.以样品形成年龄(~ 197 Ma)计算出其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值介于 0.28271~0.28287 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 +2.1~+7.7 之间(表 4);两阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 介于 743~1105 Ma 之间.

表 2 南岭地区温花岗岩的 Sr-Nd 同位素测试结果

Table 2 Sr and Nd isotopic compositions of the Wengong granitic samples in the Nanling range

样品号	年龄(Ma)	Rb	Sr	Rb/Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	T _{DM} (Ga)	ε _{Nd} (t)
09XL-18	197	141	117	1.2	3.501	0.720 264	6	0.710 461	11.2	50.4	0.135	5	1.41	-2.7
09XL-32	197	121	101	1.2	3.452	0.717 175	6	0.707 509	13.3	70.1	0.114	4	0.99	-0.5

表 3 南岭地区温花岗岩 (09XL-22) 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 3 Laser zircon U-Pb dating results for the Wengong granitic sample (09XL-22) in the Nanling range

分析点	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U			
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ
温花岗岩(09XL-22)															
1	619	648	1.05	0.049 51	0.002 20	0.219 80	0.009 10	0.032 20	0.000 82	172.0	100.7	204.3	5.2	201.7	7.6
2	417	380	0.91	0.050 02	0.001 99	0.230 42	0.008 59	0.033 40	0.000 80	196.1	89.9	211.8	5.0	210.5	7.1
3	607	660	1.09	0.050 03	0.002 61	0.220 66	0.010 68	0.031 98	0.000 89	196.5	116.9	202.9	5.6	202.5	8.9
4	712	657	0.92	0.049 63	0.002 01	0.213 61	0.008 02	0.031 21	0.000 77	177.6	91.8	198.1	4.8	196.6	6.7
5	601	651	1.08	0.051 97	0.003 64	0.237 19	0.015 27	0.033 09	0.001 15	284.1	152.6	209.9	7.2	216.1	12.5
6	468	316	0.68	0.049 15	0.001 93	0.223 24	0.008 28	0.032 93	0.000 76	155.0	89.3	208.9	4.8	204.6	6.9
7	721	710	0.98	0.052 73	0.002 76	0.217 81	0.010 46	0.029 95	0.000 86	317.2	114.4	190.2	5.4	200.1	8.7
8	704	631	0.90	0.051 29	0.002 05	0.214 47	0.007 96	0.030 31	0.000 75	253.8	89.5	192.5	4.7	197.3	6.7
9	630	590	0.94	0.052 29	0.001 84	0.229 29	0.007 51	0.031 79	0.000 74	297.9	78.1	201.7	4.6	209.6	6.2
10	1 134	1 365	1.20	0.051 50	0.001 62	0.211 85	0.006 22	0.029 82	0.000 67	263.5	70.8	189.4	4.2	195.1	5.2
11	594	507	0.85	0.051 50	0.005 54	0.216 21	0.021 33	0.030 43	0.001 48	263.5	229.3	193.2	9.2	198.8	17.8
12	700	717	1.02	0.051 58	0.002 41	0.207 77	0.008 95	0.029 19	0.000 78	267.0	103.5	185.5	4.9	191.7	7.5
13	428	405	0.95	0.053 51	0.004 32	0.202 74	0.015 09	0.027 46	0.001 03	350.6	172.8	174.6	6.5	187.4	12.7
14	663	604	0.91	0.049 91	0.002 04	0.212 44	0.008 09	0.030 85	0.000 75	190.6	92.3	195.9	4.7	195.6	6.8
15	384	344	0.90	0.049 17	0.002 19	0.207 69	0.008 73	0.030 61	0.000 74	156.1	101.0	194.4	4.7	191.6	7.3
16	501	499	1.00	0.050 85	0.001 84	0.221 06	0.007 48	0.031 50	0.000 73	234.2	81.4	199.9	4.6	202.8	6.2
17	827	771	0.93	0.049 74	0.001 38	0.200 96	0.005 27	0.029 28	0.000 62	183.0	63.5	186.0	3.9	185.9	4.5

表 4 南岭地区温公花岗岩(09XL-22)的 LA-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素测试结果

Table 4 Laser zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Wengong granitic sample (09XL-22) in the Nanling range

分析点	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i - \epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	
09XL-22-01	197	0.041 161	0.001 394	0.282 811	0.000 034	0.282 806	1.4	5.5	632	886	-0.96
09XL-22-02	197	0.032 502	0.001 114	0.282 786	0.000 032	0.282 782	0.5	4.7	663	939	-0.97
09XL-22-03	197	0.050 930	0.001 711	0.282 762	0.000 030	0.282 756	-0.3	3.8	708	999	-0.95
09XL-22-04	197	0.052 799	0.001 723	0.282 748	0.000 033	0.282 742	-0.8	3.3	728	1 030	-0.95
09XL-22-05	197	0.059 279	0.002 011	0.282 787	0.000 034	0.282 780	0.5	4.6	678	945	-0.94
09XL-22-06	197	0.029 062	0.000 985	0.282 820	0.000 029	0.282 816	1.7	5.9	613	862	-0.97
09XL-22-07	197	0.068 443	0.002 298	0.282 717	0.000 037	0.282 709	-1.9	2.1	785	1 105	-0.93
09XL-22-08	197	0.041 146	0.001 385	0.282 821	0.000 034	0.282 816	1.7	5.9	618	863	-0.96
09XL-22-09	197	0.063 868	0.002 145	0.282 842	0.000 033	0.282 834	2.5	6.5	601	822	-0.94
09XL-22-10	197	0.065 760	0.002 176	0.282 794	0.000 034	0.282 786	0.8	4.8	671	931	-0.93
09XL-22-11	197	0.033 654	0.001 124	0.282 739	0.000 030	0.282 735	-1.2	3.0	730	1 047	-0.97
09XL-22-12	197	0.047 202	0.001 588	0.282 741	0.000 033	0.282 735	-1.1	3.0	736	1 045	-0.95
09XL-22-13	197	0.039 899	0.001 351	0.282 874	0.000 037	0.282 869	3.6	7.7	542	743	-0.96
09XL-22-14	197	0.058 096	0.001 972	0.282 798	0.000 043	0.282 790	0.9	5.0	662	921	-0.94
09XL-22-15	197	0.040 332	0.001 396	0.282 812	0.000 033	0.282 806	1.4	5.5	632	884	-0.96
09XL-22-16	197	0.058 469	0.001 998	0.282 857	0.000 035	0.282 850	3.0	7.1	575	786	-0.94
09XL-22-17	197	0.052 682	0.001 758	0.282 776	0.000 034	0.282 770	0.2	4.3	689	967	-0.95

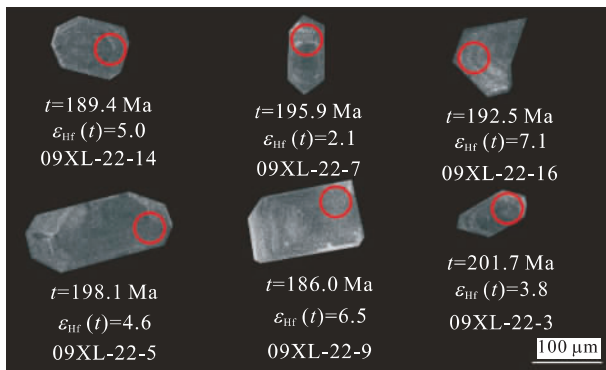


图 7 代表性锆石的阴极发光照片

Fig.7 Representative cathodoluminescence images for the Wengong A-type granite

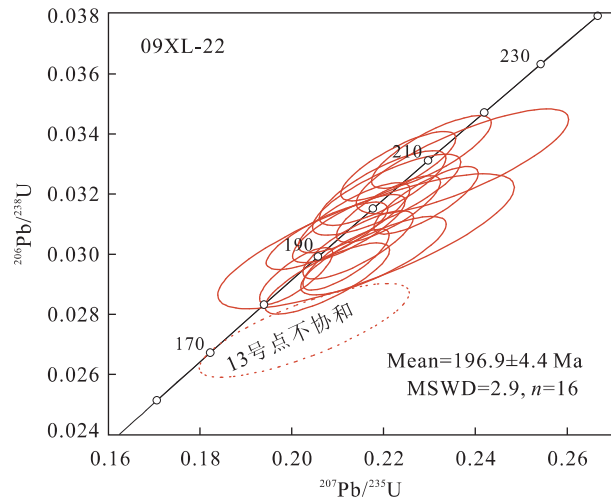


图 8 南岭地区温公 A 型花岗岩的锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig.8 U-Pb concordia diagram for the Wengong A-type granite in the Nanling range

5 分析与讨论

5.1 温公岩体为 A 型花岗岩

S 型花岗岩常具高 P_2O_5 含量,且随分异程度的增加而增大(King *et al.*, 1997),而温公岩体样品具低 P_2O_5 含量(0.02%~0.08%),不同于 S 型花岗岩.镜下观察样品不含石榴子石、白云母、堇青石等富铝矿物.温公岩体为准铝质到弱过铝质,也差异于 S 型花岗岩.高分异 I 型花岗岩通常具低的 FeOt 含量(<1.00%)和相对低的(Zr+Nb+Ce+Y)含量(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990; 王强等, 2000),本文样品 FeOt 含量均大于 1.00%, (Zr+Nb+Ce+Y)含量大于 350×10^{-6} (表 1),有别于高分异 I 型花岗岩.根据锆石饱和温度(Watson and Harrison,

1983)计算获得样品的锆石饱和温度为 875~911 °C(表 1),大于 830 °C,也高于 I 型花岗岩(Clemens *et al.*, 1986; King *et al.*, 1997, 2001),岩石样品中没有继承锆石也与其形成于高温条件一致.

温公岩体具高 Rb、REE、Y 含量和高 FeOt/MgO 比值,亏损 Ba、P、Eu 和 Sr,样品的 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值介于 2.9~3.3 之间(表 1),高于一般 A 型花岗岩的 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值(~2.6),这些地球化学特征与典型 A 型花岗岩相似(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992; King *et al.*, 2001).样品的微量和稀土元素变化特征也与华南地区典型的西山 A 型

花岗岩相似(图 5)。样品的 Y/Nb 比值均大于 1.2, 类似于 A_2 型花岗岩特征(Eby, 1992)。在相关判别图解中, 所有样品点均落入了 A_2 型花岗岩区域范围内(图 9; Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990)。因此, 温公岩体属于典型的 A_2 型花岗岩。

5.2 源区特征及其岩石成因

目前有关 A 型花岗岩的成因模式主要有以下 5 种:(1)幔源的碱性岩浆直接分异(Turner *et al.*, 1992; Mushkin *et al.*, 2003);(2)拉斑质岩浆极度分异或者由亏损地幔演化而来的基性下地壳部分熔融(Frost and Frost, 1997; Frost *et al.*, 1999);(3)上地壳钙碱性岩石低压熔融(Skjerlie and Johnston, 1992);(4)岩石经部分熔融抽取了 I 型花岗质岩浆后, 富氟的麻粒岩残残留物再次部分熔融(Collins *et al.*, 1982; Clemens *et al.*, 1986; Whalen *et al.*, 1987);(5)深熔的花岗质岩浆与幔源的基性岩浆混合(Wickham *et al.*, 1996; Yang *et al.*, 2006)。前人关于温公岩体的源区特征及其岩石成因进行过一些探讨, 但仍未达成一致意见。陈忠权等(2002)认为其

主要由壳幔混熔或下地壳物质部分熔融形成; 余心起等(2009)和 Yu *et al.*(2010)认为是基性岩浆侵入引起深部陆壳物质熔融的产物; Zhu *et al.*(2010)提出其源岩为区域内古元古代角闪岩的部分熔融, 并且混染了部分侏罗纪新生玄武质岩浆。

虽然温公岩体的微量元素表现出 Nb、Ta 亏损等“岛弧”岩浆特征, 但目前尚无确切的资料证明本区存在同期岛弧岩浆作用(Wang *et al.*, 2003a, 2005; Li *et al.*, 2007a, 2007b; Chen *et al.*, 2008), 因此温公岩体不太可能是同期岛弧岩浆作用的产物, 其 A 型花岗岩特征也不支持其产出于岛弧环境。样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-0.5 \sim -2.7$, 明显高于南岭地区古老地壳物质的 ϵ_{Nd} 值(图 10), 因此它不可能是南岭地区古老地壳物质直接部分熔融的产物。地幔物质部分熔融形成的岩石往往具有高的 MgO 和 $Mg^\#$, 而温公岩体具有低 MgO 含量(0.20%~0.82%) 和 $Mg^\#$ (0.18~0.32), 反映它不是地幔物质直接熔融的产物。此外, 目前区域上也没有发现同期基性—超基性岩、中性岩和酸性岩的连续演化岩石组合, 故温公岩体不太可能是由同期

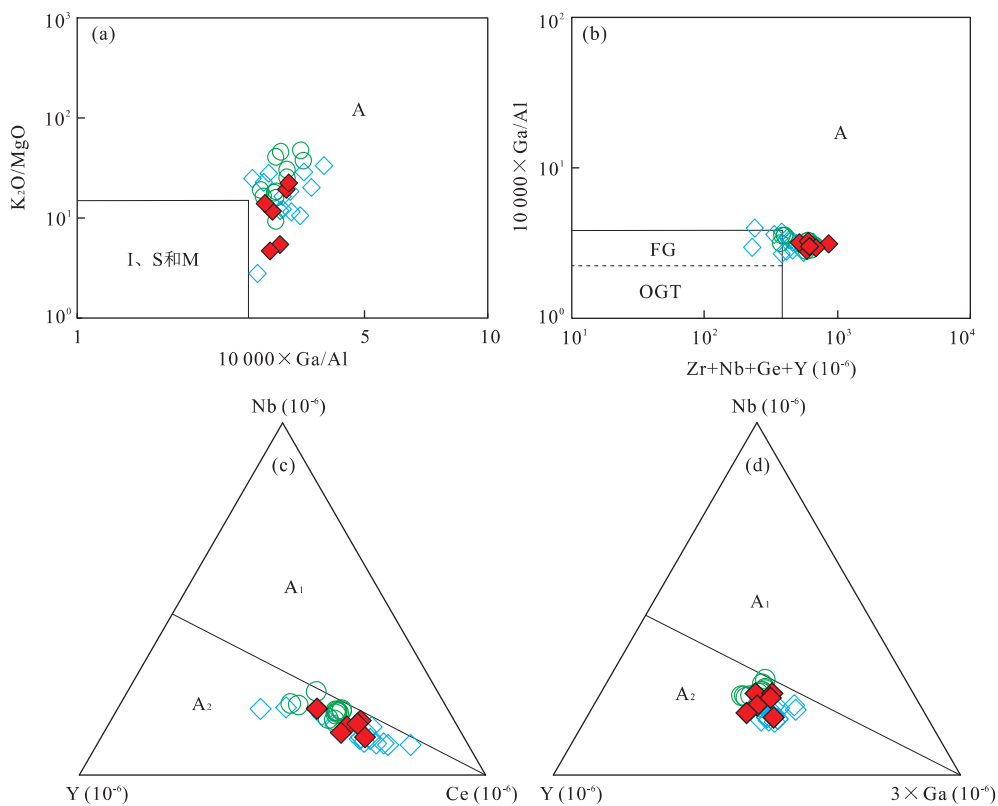


图 9 (a) $10\,000 \times Ga/Al - K_2O/MgO$ 图解; (b) $(Zr+Nb+Ce+Y) - 10\,000 \times Ga/Al$ 图解; (c) Nb-Y-Ce 图解; (d) Nb-Y- $3 \times Ga$ 图解(图例同图 3)

Fig.9 Plots of (a) $10\,000 \times Ga/Al - K_2O/MgO$; (b) $(Zr+Nb+Ce+Y) - 10\,000 \times Ga/Al$; (c) Nb-Y-Ce and (d) Nb-Y- $3 \times Ga$ for the Wengong A-type granite in the Nanling range

FG. 高分异的 I 型花岗岩; OGT. 未分异的 I, S 和 M 型花岗岩

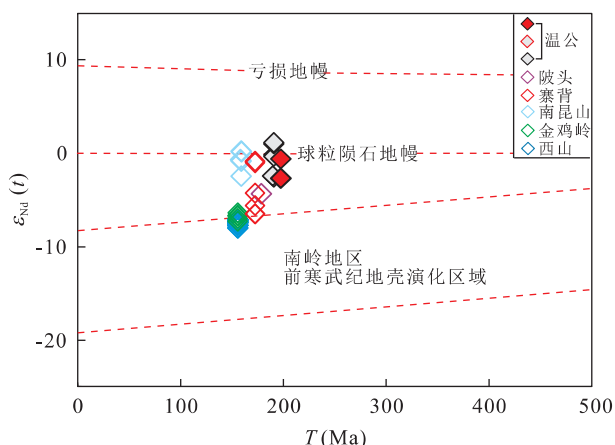


图 10 南岭地区温公 A 型花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)-T$ 图解

Fig.10 Plot of $\epsilon_{Nd}(t)-T$ for the Wengong A-type granite in the Nanling range

南岭地区前寒武纪地壳演化域,据孙涛等(2003);温公岩体数据引自 Zhu *et al.*(2010)和 Yu *et al.*(2010);南昆山岩体数据引自 Li *et al.*(2007b);陂头岩体数据引自 He *et al.*(2010);西山岩体数据引自 Jiang *et al.*(2009)和付建明等(2004a);寨背岩体数据引自 Li *et al.*(2003);金鸡岭岩体数据引自 Jiang *et al.*(2009)

基性岩浆直接分离结晶作用而成。

花岗岩锆石具有较高的初始 Hf 同位素比值和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值,主要与两种因素有关:(1)高级变质作用对岩浆锆石的改造,从而引起岩浆锆石增生区域 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的显著升高,导致变质增生锆石或重结晶锆石区域具有类似于新生地壳的高 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值假象 (Rubatto and Hermann, 2007; Chen *et al.*, 2010, 2011);(2)由亏损地幔演化而来的新生地壳发生部分熔融或物质再循环(吴福元等,2007)。温公岩体宏观方面均未显示出明显变形变质特征,锆石 CL 图像也显示其没有变质增生边,为典型岩浆成因锆石,因而可推断其在形成过程中并未经历高级变质作用改造,其较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值应反映其原始属性。本文研究的温公花岗岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 +2.1~+7.7 之间,略低于新生地壳,我们认为温公岩体更可能是由基性下地壳熔融产出,主要依据如下:(1)样品具有低的 $\text{Mg}^\#$ (0.18~0.32),与高压条件下的变玄武质熔体及起源于基性下地壳的埃达克质岩石具有相似性 (Muir *et al.*, 1995; Martin *et al.*, 2005);(2)区域内发育有同期的霞岩基性岩体 (陈忠权和李文辉,2001;余心起等,2009; Zhu *et al.*, 2010),反映本区存在同期基性岩浆活动,能为熔融基性下地壳提供热源;(3)样品具有较高的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(+2.1~+7.7),介于基性地壳和亏损地幔之间(图 11),其 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 比值落于

球粒陨石 Hf 同位素演化曲线之上,暗示有地幔或新生的地壳物质加入。

进一步分析表明,样品的 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 P_2O_5 、 Na_2O 等氧化物与 SiO_2 均呈明显的负相关性,而 K_2O 与 SiO_2 呈正相关性(图 4),这些特征说明岩浆作用过程中存在 Ti-Fe 氧化物、斜长石、磷灰石等矿物的分离结晶作用。样品强烈的 Eu、Sr 异常也指示其发生了斜长石的分离结晶作用,相关图解也说明了这一点(图 12a~12d)。

综上所述,笔者认为温公岩体是基性下地壳熔融的产物,成岩过程中发生了分离结晶作用。

5.3 构造意义

从华南东南部 A 型花岗岩的年龄组成可以看出(表 5),华南东南部 A 型花岗岩主要形成于 3 个时期,即 229~215 Ma、196~156 Ma 和 135~92 Ma。其中,229~215 Ma 期间的 A 型花岗岩主要分布于华南内部,与印支运动后造山的伸展作用有关(王丽娟等,2007; Zhao *et al.*, 2013)或与古太平洋板块的俯冲作用有关(Sun *et al.*, 2011; 李万友等,2012),而 135~92 Ma 期间的 A 型花岗岩主要分布于东南沿海一带,与古太平洋板块北西向俯冲的弧后扩张有关(邱检生等,1999; Zhou *et al.*, 2006; Wong *et al.*, 2009)。但是,目前关于 196~156 Ma 的 A 型花岗岩的形成机制仍存在着激烈争议。

本文的研究表明温公岩体具 A 型花岗岩特征,形成于 197 Ma,具有富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, Nb、Ta 亏损等“岛弧”岩浆特征,但是区域地质资料表明本区并不存在同期的岛弧岩浆作用(Li

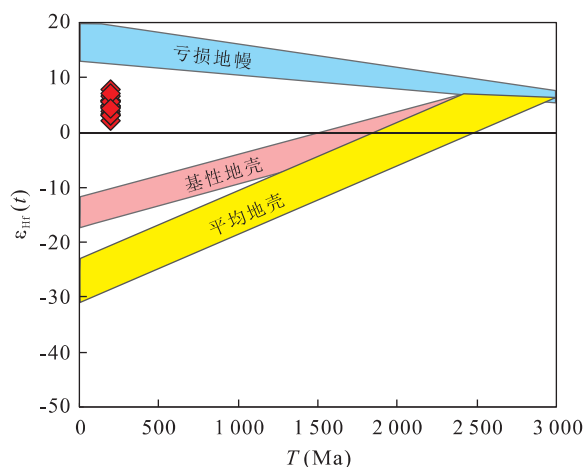


图 11 南岭地区温公 A 型花岗岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)-T$ 图解

Fig.11 Plot of $\epsilon_{Hf}(t)-T$ for the Wengong A-type granite in the Nanling range

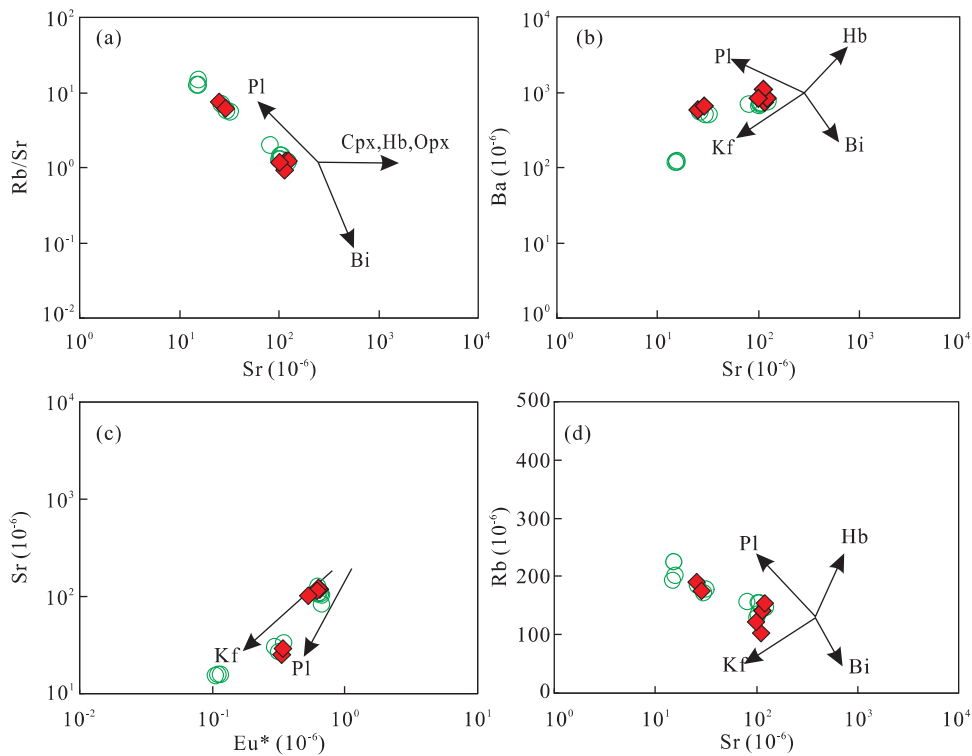


图 12 (a) Sr-Rb/Sr 图解; (b) Sr-Ba 图解; (c) Eu^* -Sr 图解; (d) Sr-Rb 图解(图例同图 3)

Fig.12 Sr-Rb/Sr, Sr-Ba, Eu^* -Sr and Sr-Rb plots for the Wengong A-type granite in the Nanling range

Pl 为斜长石; Kf 为钾长石; Hb 为角闪石; Bi 为黑云母; Cpx 为单斜辉石; Opx 为斜方辉石

et al., 2003, 2007a, 2007b; Wang *et al.*, 2003a, 2005), 其 Nb-Ta 亏损并非反映其形成于岛弧环境。与温公岩体紧密伴生同期发育的霞岩辉长岩具 OIB 特征 (Yu *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2010)。一般而言, A 型花岗岩形成于裂谷带和稳定大陆内部拉张环境 (Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992), 因此温公 A 型花岗岩应形成于拉张背景。在花岗岩构造环境判别图解中 (Pearce *et al.*, 1984), 所有样品也落入板内花岗岩 (WPG) 区域 (图 13), 进一步说明其构造属性为拉张背景。

这种拉张背景是与古太平洋板块俯冲作用有关还是与印支运动后的陆内伸展作用有关? Wang *et al.* (2003b) 在华南地区识别出了一套约 175 Ma 的镁铁质岩浆岩, 并认为其形成于陆内拉张背景, 是岩石圈减薄和软流圈物质上涌的产物, 与古太平洋板块俯冲作用关系不大, 这说明古太平洋板块北西向俯冲的时间晚于 175 Ma。湖南南部和广西东南部地区出露有早中生代具 OIB 特征的碱性玄武岩和正长岩 (Li *et al.*, 2003; 王岳军等, 2004), 说明早中生代华南地区并不受古太平洋板块俯冲影响。Wang *et al.* (2013b) 和徐先兵等 (2009) 根据叠加褶皱构造分析, 认为华南东部地区东西向褶皱代表印支运动

构造线, 叠加在其上的 NE-NNE 向褶皱是早燕山运动构造线 (徐先兵等, 2009)。张岳桥等 (2009) 的研究给出了侵入 WE 向褶皱而呈 NNE 向展布的湘中骑田岭花岗岩体的侵位时代为 155~161 Ma, 限制了 NE-NNE 向褶皱构造形成时代的上限, 进一步限制了古太平洋板块 NW 向俯冲的时间晚于 155 Ma。此外, 中国东南部 196~156 Ma 期间的 A 型花岗岩和火山岩主要呈 EW 向展布, 指示了近 SN 向的伸展拉张作用, 与古太平洋板块 NW 向的俯冲方向并不垂直, 说明本区在 196~156 Ma 期间的岩浆活动并不受控于古太平洋板块的俯冲, 而更有可能受控于印支运动后的陆内拉张作用。这说明 196~156 Ma 间华南东南部处于印支运动后的陆内拉张背景, 发育了强烈的岩浆活动。而在 156~135 Ma, 本区 A 型花岗岩几乎不发育, 暗示本区的构造体制可能发生了转变了约 135 Ma 时期, 本区发育了新一期的 A 型花岗岩浆作用, 而这一期的 A 型花岗岩浆活动主要与古太平洋板块的俯冲作用有关 (邱检生等, 1999; Zhou *et al.*, 2006; Wong *et al.*, 2009), 因此华南东南部从古特提斯构造域向古太平洋构造域转换的时限很可能在早侏罗世之后。

表 5 华南东南部中生代 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学统计

Table 5 Synthesis of zircon U-Pb age data of the Mesozoic A-type granites in SE South China

岩体名称	岩石类型	测试方法	年龄值 (Ma)	参考文献	省份
高溪	碱性花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	229.0±2.0	Zhao <i>et al.</i> (2013)	福建
蔡江	二长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	228.0±2.0	Zhao <i>et al.</i> (2013)	江西
翁山	二长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	225.0±1.0	Sun <i>et al.</i> (2011)	浙江
靖居	正长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	215.0±2.0	李万友等(2012)	浙江
温公	石英二长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	196.0±2.0	余心起等(2009)	广东
	钾长花岗岩	SIMS 锆石 U-Pb	192.0±1.0	Zhu <i>et al.</i> (2010)	广东
柯树北	黑云母花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	189.0±3.0	Li <i>et al.</i> (2007)	江西
陂头	碱长花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb 锆石	178.6±1.5	He <i>et al.</i> (2010)	江西
寨背	钾长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	171.6±4.6	Li <i>et al.</i> (2003)	江西
菜岭	二长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	160.0±2.0	付建明等(2004c)	湖南
南昆山	铝质花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	158.0±5.0	Li <i>et al.</i> (2007)	广东
芙蓉	二长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	157.0±3.0	Zhu <i>et al.</i> (2009)	湖南
金鸡岭	铝质花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	156.0±2.0	付建明等(2004b)	湖南
西山	铝质花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	156.0±2.0	付建明等(2004a)	湖南
杨梅湾	花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	135.1±1.7	Yang <i>et al.</i> (2012)	浙江
大桥坞	花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	134.3±1.2	Yang <i>et al.</i> (2012)	浙江
大洲	流纹岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	127.3±1.7	Yang <i>et al.</i> (2013)	浙江
白菊花尖	准铝质花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	126.0±3.0	Wong <i>et al.</i> (2009)	浙江
城山	碱性花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb 锆石	124.8±2.1	Wu <i>et al.</i> (2012)	安徽
花山	碱性花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	125.0±2.0	王强等(2005)	安徽
新村	碱性花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	105.0±1.0	Chen <i>et al.</i> (2013)	福建
青田	碱性花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	101.2±2.0	邱检生等(1999)	浙江
普陀岛	碱性花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	93.4±0.6	邱检生等(1999)	福建
桃花岛	碱性花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	92.9±0.6	邱检生等(1999)	浙江

注:数据来自邱检生等,1999;Li *et al.*,2003,2007b;付建明等,2004a,2004b,2004c;王强等,2005;Li and Li,2007;Wong *et al.*,2009;余心起等,2009;Zhu *et al.*,2009,2010;He *et al.*,2010;Sun *et al.*,2011;李万友等,2012;Yang *et al.*,2012,2013;Chen *et al.*,2013;Zhao *et al.*,2013.

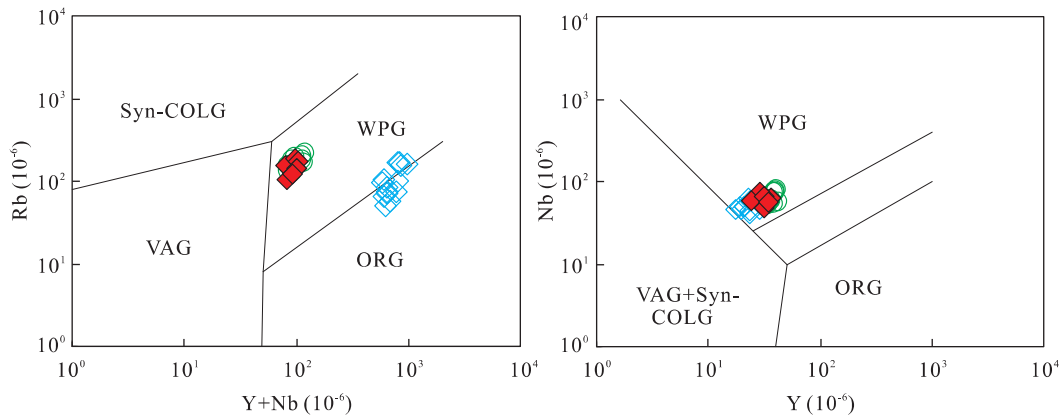


图 13 南岭地区温公 A 型花岗岩的构造判别图(图例同图 3)

Fig.13 Discrimination diagrams for the Wengong A-type granite in the Nanling range
WPG.板块内花岗岩;VAG.火山弧火山岩;ORG.洋中脊花岗岩;Syn-COLG.同构造的碰撞带花岗岩

6 结论

(1)南岭构造带东段温公岩体为 A 型花岗岩,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 196.9 ± 4.4 Ma,说明华南东南部存在早侏罗世早期(~ 197 Ma)的岩浆活动;

(2)温公岩体具亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素组成,

主要是基性下地壳熔融的产物,并形成于陆内拉张背景下;

(3)早侏罗世早期(~ 197 Ma)华南东南部处于印支运动后的陆内伸展环境,推测华南东南部由古特提斯构造域向古太平洋构造域的转换发生在早侏罗世之后。

致谢:野外工作得到了国家海洋局第三海洋研究所张爱梅博士和西北大学张菲菲博士的帮助,审稿专家和编辑部提出的建设性意见和建议促进了本文的提高,在此表示衷心的感谢。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi:10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Blichert, T. J., Chauvel, C., Albarede, F., 1997. Separation of Hf and Lu for High-Precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-Multiple Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(3): 248-260. doi:10.1007/s004100050278
- Chen, C. H., Lee, C. Y., Lu, H. Y., et al., 2008. Generation of Late Cretaceous Silicic Rocks in SE China: Age, Major Element and Numerical Simulation Constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4): 479-498. doi:10.1016/j.lithos.2008.06.009
- Chen, G. X., Liu, T. Y., Sun, J. S., et al., 2014. Characteristics of Multi-Scale Gravity Field and Deep Structures in Nanling Metallogenic Belt. *Earth Science*, 39(2): 240-250 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2014.023
- Chen, J. Y., Yang, J. H., Zhang, J. H., et al., 2013. Petrogenesis of the Cretaceous Zhangzhou Batholith in Southeastern China: Zircon U-Pb Age and Sr-Nd-Hf-O Isotopic Evidence. *Lithos*, (162-163): 140-156. doi:10.1016/j.lithos.2013.01.003
- Chen, R. X., Zheng, Y. F., Xie, L. W., 2010. Metamorphic Growth and Recrystallization of Zircon: Distinction by Simultaneous In-Situ Analyses of Trace Elements, U-Th-Pb and Lu-Hf Isotopes in Zircons from Eclogite-Facies Rocks in the Sulu Orogen. *Lithos*, 114(1-2): 132-154. doi:10.1016/j.lithos.2009.08.006
- Chen, Y. X., Zheng, Y. F., Chen, R. X., et al., 2011. Metamorphic Growth and Recrystallization of Zircons in Extremely ^{18}O -Depleted Rocks during Eclogite-Facies Metamorphism: Evidence from U-Pb Ages, Trace Elements, and O-Hf Isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(17): 4877-4898. doi:10.1016/j.gca.2011.06.003
- Chen, Z. Q., Li, W. H., 2001. Granite of Proterozoic Eon Found in Northeast Guangdong. *Guangdong Geology*, 16(4): 16-21 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. Q., Li, W. H., Guo, L., 2002. Geological and Geochemical Characteristics of Wengong Pluton and the Relation with Xianlan Pluton in Xingning. *Guangdong Geology*, 17(3): 15-20 (in Chinese with English abstract).
- Clemens, J. D., Holloway, J. R., White, A. J. R., 1986. Origin of an A-Type Granite: Experimental Constraints. *American Mineralogist*, 71: 317-324.
- Collins, W., Beams, S., White, A., et al., 1982. Nature and Origin of A-Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189-200. doi:10.1007/Bf00374895
- Eby, G. N., 1990. The A-Type Granitoids: A Review of Their Occurrence and Chemical Characteristics and Speculations on their Petrogenesis. *Lithos*, 26(1-2): 115-134. doi:10.1016/0024-4937(90)90043-z
- 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
- Fan, W. M., Wang, Y. J., Guo, F., et al., 2003. Mesozoic Mafic Magmatism in Hunan-Jiangxi Provinces and the Lithospheric Extension. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 159-169 (in Chinese with English abstract).
- 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/ptroj/40.12.1771
- Frost, C. D., Frost, B. R., 1997. Reduced Rapakivi-Type Granites: The Tholeiite Connection. *Geology*, 25(7): 647. doi:10.1130/0091-7613(1997)025<0647:rrtgtt>2.3.co;2
- Fu, J. M., Ma, C. Q., Xie, C. F., et al., 2004a. Geochemistry and Tectonic Setting of Xishan Aluminous A-Type Granitic Volcanic-Intrusive Complex, Southern Hunan. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 26(4): 15-23 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J. M., Ma, C. Q., Xie, C. F., et al., 2004b. Shrimp U-Pb Zircon Dating of the Jiuyishan Composite Granite in Hunan and Its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(4): 370-378 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J. M., Ma, C. Q., Xie, C. F., et al., 2004c. Zircon SHRIMP Dating of the Cailing Granite on the Eastern Margin of the Qitianling Granite, Hunan, South China, and Its Significance. *Geology in China*, 31(1): 96-100 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282. doi:10.1016/j.precamres.2003.12.011

- 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
- Hu, J., Qiu, J. S., Wang, D. Z., et al., 2005. Comparative Investigations of A-Type Granites in the Coastal and the Nanling Inland Areas of SE China, and Their Tectonic Significances. *Geological Journal of China Universities*, 11 (3): 404-414 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211 (1-2): 47-69. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
- Jiang, Y. H., Jiang, S. Y., Dai, B. Z., et al., 2009. Middle to Late Jurassic Felsic and Mafic Magmatism in Southern Hunan Province, Southeast China: Implications for A Continental Arc to Rifting. *Lithos*, 107 (3-4): 185-204. doi: 10.1016/j.lithos.2008.10.006
- King, P. L., Chappell, B. W., Allen, C. M., et al., 2001. Are A-Type Granites the High-Temperature Felsic Granites? Evidence from Fractionated Granites of the Wangrah Suite. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48 (4): 501-514. doi: 10.1046/j.1440-0952.2001.00881.x
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38 (3): 371-391. doi: 10.1093/ptroj/38.3.371
- Li, W. Y., Ma, C. Q., Liu, Y. Y., et al., 2012. Discovery of the Indosinian Aluminum A-Type Granite in Zhejiang Province and Its Geological Significance. *Science China: Earth Science*, 42 (2): 164-177 (in Chinese).
- 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 the Tectonic Evolution of SE China. *Geological Society, London, Special Publications*, 226 (1): 193-215. doi: 10.1144/Gsl.Sp.2004.226.01.11
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007a. On the Genetic Classification and Tectonic Implications of the Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52 (14): 1873-1885. doi: 10.1007/s11434-007-0259-0
- Li, X. H., Li, Z. X., Li, W. X., et al., 2007b. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab? *Lithos*, 96 (1): 186-204. doi: 10.1016/j.lithos.2006.09.018
- Li, X. H., Qi, C. S., Liu, Y., et al., 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic Bimodal Volcanic Rocks along the Western Margin of the Yangtze Block: New Constraints from Hf Isotopes and Fe/Mn Ratios. *Chinese Science Bulletin*, 50 (19): 109-114 (in Chinese).
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300 km Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-slab Subduction Model. *Geology*, 35 (2): 179-182. doi: 10.1130/G23193a.1
- Liang, X. R., Wei, G. J., Li, X. H., et al., 2003. Precise Measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd Ratios Using Multiple-Collectors Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32 (1): 91-96 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Liu, H. C., Li, X. H., 1996. Simultaneous and Precise Determination of 40 Trace Elements in Rock Samples Using ICP-MS. *Geochimica*, 25 (6): 552-558 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K., 2009. *Squid 2: A User's Manual*, Berkeley Geochron Center Special Publication, German.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution. *Lithos*, 79 (1-2): 1-24. doi: 10.1016/j.lithos.2004.04.048
- Muir, R. J., Weaver, S. D., Bradshaw, J. D., et al., 1995. The Cretaceous Separation Point Batholith, New Zealand: Granitoid Magmas Formed by Melting of Mafic Lithosphere. *Journal of the Geological Society*, 152 (4): 689-701. doi: 10.1144/gsjgs.152.4.0689
- Mushkin, A., Navon, O., Halicz, L., et al., 2003. The Petrogenesis of A-Type Magmas from the Amram Massif, Southern Israel. *Journal of Petrology*, 44 (5): 815-832. doi: 10.1093/ptrology/44.5.815
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25 (4): 956-983. doi: 10.1093/ptrology/25.4.956
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., Brent, I. A. M., 1999. Geochemistry and

- Petrogenesis of the I- and A-Type Composite Granite Masses in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian Province. *Acta Petrological Sinica*, 15(2): 237–246 (in Chinese with English abstract).
- Rubatto, D., Hermann, J., 2007. Experimental Zircon/Melt and Zircon/Garnet Trace Element Partitioning and Implications for the Geochronology of Crustal Rocks. *Chemical Geology*, 241(1–2): 38–61. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.01.027
- Scherer, E., Munker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *American Association for the Advancement of Science, Washington D. C.*, 293(5530): 683–687.
- Shu, L.S., 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035–1053 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., Deng, P., Wang, B., et al., 2004. The Constrains of Late Mesozoic Basin Evolution on Petrochemistry, Kinematics and Geochronology. *Science in China (Series D)*, 34(1): 1–13 (in Chinese).
- Shu, L.S., Zhou, X.M., Deng, P., et al., 2006. Principal Geological Features of Nanling Tectonic Belt, South China. *Geological Review*, 52(2): 251–265 (in Chinese with English abstract).
- Skjerlie, K.P., Johnston, A.D., 1992. Vapor-Absent Melting at 10 kbar of A Biotite- and Amphibole-Bearing Tonalitic Gneiss: Implications for the Generation of A-Type Granites. *Geology*, 20(3): 263–266. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0263:Vamako>2.3.Co;2
- Sun, Q.H., Yang, Z.L., Chen, Y., et al., 2002. Metallogenic Geology of the Xianlan-Yonghe Vanadic Titanomagnetite Deposit Belt in Xingning of Guangdong Province. *Resources Survey and Environment*, 23(4): 266–271 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Sun, T., Zhou, X.M., Chen, P.R., et al., 2003. The Petrogenesis and Their Implication of Mesozoic Strongly Peraluminous Granites in Eastern Nanling Region. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1209–1218 (in Chinese).
- Sun, Y., Ma, C., Liu, Y., et al., 2011. Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Late Triassic Aluminous A-Type Granites in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1117–1131. doi: 10.1016/j.jseaes.2011.06.007
- Turner, S.P., Foden, J.D., Morrison, R.S., 1992. Derivation of Some A-Type Magmas by Fractionation of Basaltic Magma; An Example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2): 151–179. doi: 10.1016/0024-4937(92)90029-x
- Vervoort, J.D., Blichert-Toft, J., 1999. Evolution of the Depleted Mantle: Hf Isotope Evidence from Juvenile Rocks through Time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 533–556. doi: 10.1016/S0016-7037(98)00274-9
- Wan, Y.S., Liu, D.Y., Wilde, S.A., et al., 2010. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Nd Isotope. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 140–153. doi: 10.1016/j.jseaes.2009.08.002
- Wang, L.J., Yu, J.H., Xu, X.S., et al., 2007. Formation Age and Origin of the Gutian-Xiaotao Granitic Complex in the Southeastern Fujian Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1470–1484 (in Chinese with English abstract).
- 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, 315 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Guo, F., 2003a. Geochemistry of Early Mesozoic Potassium-Rich Diorites-Granodiorites in Southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Geochemical Journal*, 37: 427–448.
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Guo, F., et al., 2003b. Geochemistry of Mesozoic Mafic Rocks Adjacent to the Chenzhou-Linwu Fault, South China: Implications for the Lithospheric Boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *International Geology Review*, 45(3): 263–286. doi: 10.2747/0020-6814.45.3.263
- Wang, Y.J., Liao, C.L., Fan, W.M., et al., 2004. Early Mesozoic OIB-Type Alkaline Basalt in Central Jiangxi Province and Its Tectonic Implications. *Geochimica*, 33(2): 109–117 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Peng, T.P., et al., 2005. Elemental and Sr-Nd Isotopic Systematics of the Early Mesozoic Volcanic Sequence in Southern Jiangxi Province, South China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Internation-*

- tional Journal of Earth Sciences (Geol.Rundsch.)*, 94 (1): 53—65. doi: 10.1007/s00531—004—0441—4
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies. *Gondwana Research*, 23 (4): 1273—1305. doi: 10.1016/j.gr.2012.02.019
- 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
- Wei, G. J., Liang, X. R., Li, X. H., et al., 2002. Precise Measurement of Sr Isotopic Compositions of Liquid and Solid Base Using (LP) MC-ICP-MS. *Geochimica*, 31 (3): 295—305 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95 (4): 407—419. doi: 10.1007/Bf00402202
- Wickham, S. M., Alberts, A. D., Zanvilevich, A. N., et al., 1996. A Stable Isotope Study of Anorogenic Magmatism in East Central Asia. *Journal of Petrology*, 37 (5): 1063—1095. doi: 10.1093/petrology/37.5.1063
- Wong, J., Sun, M., Xing, G. F., et al., 2009. Geochemical and Zircon U-Pb and Hf Isotopic Study of the Baijuehuajian Metaluminous A-Type Granite, Extension at 125—100 Ma and Its Tectonic Significance for South China. *Lithos*, 112 (3—4): 289—305. doi: 10.1016/j.lithos.2009.03.009
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Xie, L. W., Zhang, Y. B., Zhang, H. H., et al., 2008. In Situ Simultaneous Determination of Trace Elements, U-Pb and Lu-Hf Isotopes in Zircon and Baddeleyite. *Chinese Science Bulletin*, 53 (2): 220—228 (in Chinese).
- Xu, X. B., Zhang, Y. Q., Jia, D., et al., 2009. Early Mesozoic Geotectonic Processes in South China. *Geology in China*, 36 (3): 573—593 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2006. A Hybrid Origin for the Qianshan A-Type Granite, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Evidence. *Lithos*, S89 (1—2): 89—106. doi: 10.1016/j.lithos.2005.10.002
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Zhao, K. D., et al., 2012. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Two Early Cretaceous A-Type Granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China. *Lithos*, 150: 155—170. doi: 10.1016/j.lithos.2012.01.028
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Zhao, K. D., et al., 2013. Petrogenesis and Tectonic Significance of Early Cretaceous High-Zr Rhyolite in the Dazhou Uranium District, Gan-Hang Belt, Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 303—315. doi: 10.1016/j.jseas.2012.12.024
- Yu, X. Q., Di, Y. J., Wu, G. G., et al., 2009. The Early Jurassic Magmatism in Northern Guangdong Province, South-eastern China: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Xialan Complex. *Science in China (Series D)*, 39 (6): 681—693 (in Chinese).
- Yu, X. Q., Wu, G. G., Zhao, X. X., et al., 2010. The Early Jurassic Tectono-Magmatic Events in Southern Jiangxi and Northern Guangdong Provinces, SE China: Constraints from the SHRIMP Zircon U-Pb Dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39 (5): 408—422. doi: 10.1016/j.jseas.2010.04.008
- Zhang, K. X., Pan, G. T., He, W. H., et al., 2015. New Division of Tectonic-Strata Superregion in China. *Earth Science*, 40 (2): 206—233 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2015.016
- 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 Frontiers*, 16 (1): 234—247 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K. D., Jiang, S. Y., Chen, W. F., et al., 2013. Zircon U-Pb Chronology and Elemental and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry of Two Triassic A-Type Granites in South China: Implication for Petrogenesis and Indosinian Transensional Tectonism. *Lithos*, 160—161: 292—306. doi: 10.1016/j.lithos.2012.11.001
- 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.
- Zhu, J. C., Wang, R. C., Zhang, P. H., et al., 2009. Zircon U-Pb Geochronological Framework of Qitianling Granite Batholiths, Middle Part of Nanling Range, South China. *Science in China (Series D)*, 52 (9): 1279—1294.
- Zhu, W. G., Zhong, H., Li, X. H., et al., 2010. The Early Jurassic Mafic-Ultramafic Intrusion and A-Type Granite from Northeastern Guangdong, SE China: Age, Origin, and Tectonic Significance. *Lithos*, 119 (3—4): 313—329. doi: 10.1016/j.lithos.2010.07.005

附中文参考文献

- 陈国雄,刘天佑,孙劲松,等,2014.南岭成矿带多尺度重力场及深部构造特征.地球科学,39(2):240-250.
- 陈忠权,李文辉,2001.粤东北发现元古宙花岗岩.广东地质,16(4):16-21.
- 陈忠权,李文辉,郭良,2002.兴宁温公岩体的地质地球化学特征及与霞岗岩体的关系.广东地质,17(3):15-20.
- 范蔚茗,王岳军,郭锋,等,2003.湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展.地质前缘,10(3):159-169.
- 付建明,马昌前,谢才富,等,2004a.湘南西山铝质 A 型花岗质火山—侵入杂岩的地球化学及其形成环境.地球科学与环境学报,26(4):15-23.
- 付建明,马昌前,谢才富,等,2004b.湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义.大地构造与成矿学,28(4):370-378.
- 付建明,马昌前,谢才富,等,2004c.湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义.中国地质,31(1):96-100.
- 胡建,邱检生,王德滋,等,2005.中国东南沿海与南岭内陆 A 型花岗岩的对比及其构造意义.高校地质学报,11(3):404-414.
- 李万友,马昌前,刘园园,等,2012.浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义.中国科学(D 辑),42(2):164-177.
- 李献华,祁昌实,刘颖,等,2005.扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩成因:Hf 同位素和 Fe/Mn 新制约.科学通报,50(19):109-114.
- 梁细荣,韦刚健,李献华,等,2003.利用 MC-ICP MS 精确测定¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 和 Sm/Nd 比值.地球化学,32(1):91-96.
- 刘颖,刘海臣,李献华,1996.用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素.地球化学,25(6):552-558.
- 邱检生,王德滋,Brent, I. A. M.,1999.浙闽沿海地区 I 型-A 型复合花岗岩体的地球化学及成因.岩石学报,15(2):237-246.
- 舒良树,2012.华南构造演化的基本特征.地质通报,31(7):1035-1053.
- 舒良树,邓平,王彬,等,2004.南雄—诸广地区晚中生代盆山演化的岩石化学,运动学与年代学制约.中国科学(D 辑),34(1):1-13.
- 舒良树,周新民,邓平,等,2006.南岭构造带的基本地质特征.地质论评,52(2):251-265.
- 孙强辉,杨祝良,陈荣,等,2002.广东省兴宁市霞岗—永和钽钛磁铁矿带成矿地质特征.资源调查与环境,23(4):266-271.
- 孙涛,周新民,陈培荣,等,2003.南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义.中国科学(D 辑),33(12):1209-1218.
- 王丽娟,于津海,徐夕生,等,2007.闽西南古田—小陶花岗质杂岩体的形成时代和成因.岩石学报,23(6):1470-1484.
- 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):297-306,315.
- 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.
- 王岳军,廖超林,范蔚茗,等,2004.赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义.地球化学,33(2):109-117.
- 韦刚健,梁细荣,李献华,等,2002.(LP)MC-ICP MS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成.地球化学,31(3):295-299.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185-220.
- 谢烈文,张艳斌,张辉煌,等,2008.锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定.科学通报,53(2):220-228.
- 徐先兵,张岳桥,贾东,等,2009.华南早中生代大地构造过程.中国地质,36(3):573-593.
- 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.
- 张克信,潘桂堂,何卫红,等,2015.中国构造—地层大区划分新方案.地球科学,40(2):206-233.
- 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.地质前缘,16(1):234-247.