

doi:10.3799/dqkx.2014.108

云开地区燕山晚期花岗岩的岩石成因及构造意义： 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据

杨 振¹, 刘 锐¹, 王新宇^{2,3}, 周国发³

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 广西壮族自治区地质勘查总院, 广西南宁 530023

摘要: 相比较丰富的前寒武纪和早古生代地质记录, 云开地区燕山晚期花岗岩类分布很少, 且未见详细的研究报道. 对云开地区广西陆川米场、三叉冲钨矿床以及松旺钨锡钼矿床等 3 个典型地区的燕山晚期花岗岩进行了系统的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素研究. 定年结果表明, 米场黑云母花岗岩、三叉冲黑云母花岗岩和松旺花岗岩的侵位年龄分别为 113 ± 1 Ma, 103 ± 1 Ma 和 88 ± 1 Ma, 为燕山晚期岩浆作用的产物. 三叉冲黑云母花岗岩和松旺花岗岩具有较一致锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(分别为 $-5.2 \sim -2.7$ 和 $-5.2 \sim -3.6$)和二阶段模式年龄 T_{DM2} (分别为 $1.3 \sim 1.5$ Ga 和 $1.4 \sim 1.5$ Ga), 指示为中元古代地壳物质再造的产物. 米场黑云母花岗岩具有相对较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-2.3 \sim 1.4$)和 T_{DM2} ($1.1 \sim 1.3$ Ga), 并且其含有大量的镁铁质微粒包体(MME), 表明米场黑云母花岗岩很可能是壳源—幔源岩浆混合的产物. 结合中国东南部构造—岩浆演化来看, 云开地区燕山晚期花岗岩的形成可能与白垩纪时太平洋板块向华南板块俯冲后板片的折返—断离有关.

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 地质年代学; Hf 同位素; 燕山晚期; 云开地区; 地球化学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2014)09-1258-19

收稿日期: 2014-01-15

Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Yanshanian Granites in Yunkai Area, Southeast China: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes

Yang Zhen¹, Liu Rui¹, Wang Xinyu^{2,3}, Zhou Guofa³

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning 530023, China

Abstract: Compared with abundant Precambrian and Early Paleozoic geological records in the Yunkai area, southeast China, Late Yanshanian granitoids are sparsely distributed in the area and are thus reported less. In this study, we present LA-MC-ICP-MS U-Pb age and Hf isotope data of zircons from three representative granites in the Yunkai area, southeastern Guangxi, each from the Michang area, Sanchachong W and Songwang W-Sn-Mo deposits respectively. Zircon U-Pb results indicate that all the granites were formed in Late Yanshanian period, with emplacement ages of 113 ± 1 Ma (Michang biotite granite), 103 ± 1 Ma (Sanchachong biotite granite) and 88 ± 1 Ma (Songwang granite) respectively. The Sanchachong biotite granite and Songwang granite have consistent zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (-5.2 to -2.7 and -5.2 to -3.6 respectively) and two-stage Hf modal ages (T_{DM2}) ($1.3 \sim 1.5$ Ga and $1.4 \sim 1.5$ Ga respectively), indicating that they were formed by reworking of Mesoproterozoic juvenile crust; whereas the Michang biotite granite has relatively higher zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -2.3 to 1.4 and corresponding T_{DM2} of $1.1 \sim 1.3$ Ga, which, combined with widespread microgranular mafic enclaves (MMEs) in the granite, suggests that it was formed by mixing of crust- and mantle-derived magmas. In combination of Mesozoic tectono-magmatic evolution in southeast China, the Late Yanshanian magmatism in the Yunkai area was likely related to the rollback and break-off of the subducted

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(No. CUGL120256); 国家自然科学基金青年科学基金(No. 41002025); 中央高校基本科研业务费专项资金优秀青年教师特色学科团队(No. CUG120702); 广西壮族自治区地质勘查院地质科研合作项目(No. 201002).

作者简介: 杨振(1979-), 男, 讲师, 主要从事矿床学和岩石学研究. E-mail: yangzhyf2007@hotmail.com

Pacific plate during the Cretaceous.

Key words: zircon U-Pb age; geochronology; Hf isotope; Late Yanshanian; Yunkai area; geochemistry.

云开地区地处华南板块西南端,华夏地块与南华活动带的交接部位(图1a). 自早古生代以来,该

区受到了加里东造山运动、印支期造山运动和燕山期构造-岩浆作用的强烈影响(邓希光等, 2004;

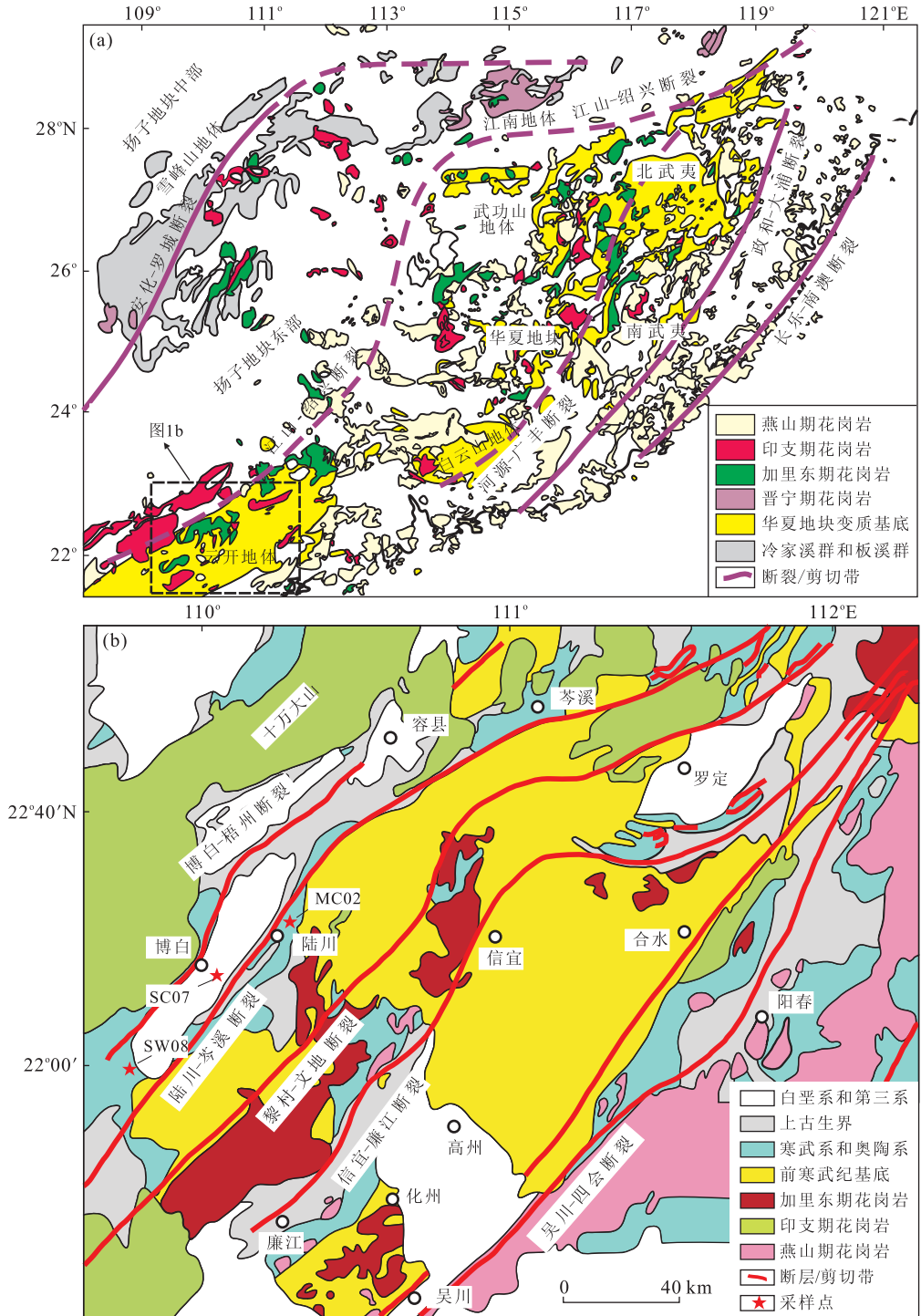


图 1 华南板块东南部地质简图(a)和云开地区地质简图(b)(据 Wang et al., 2011 修改)
Fig. 1 Simplified geological map showing the Yanshanian granitoids in the southeastern South China Block and the Precambrian basement in the Cathaysia Block (a) and simplified geological map of the Yunkai area (b)

凌洪飞等, 2006; 祁昌实等, 2007; Wang *et al.*, 2007, 2012; 李青等, 2009; Wan *et al.*, 2010; 张达等, 2012; Zhang *et al.*, 2012), 造就了不同时代的花岗岩和丰富的矿产资源. 因此, 云开地区既处于华南加里东期造山带(Li *et al.*, 2010c)的西南段, 又处在著名的“钦杭成矿带”(毛景文等, 2011)的西南端. 相比较丰富的前寒武纪和早古生代地质记录, 该区燕山晚期花岗岩类分布很少, 且未见详细、系统的研究报告. 这一特征与中国东南沿海地区广泛发育燕山晚期花岗岩类(Dong *et al.*, 1997; 邱检生等, 1999; Li *et al.*, 2012b)明显不同. 另外, 云开地区大部处于覆盖区, 风化剥蚀较强烈, 即使有燕山期花岗岩出露, 也很难采集到新鲜的花岗岩岩石样品, 导致传统地球化学方法(元素, 全岩同位素)在研究时遇到了困难.

锆石是花岗质岩浆结晶过程中产生的一种常见的副矿物. 由于其具有较高的 U-Pb 同位素体系封闭温度(可达 900 °C; Cherniak and Watson, 2001), 其形成后往往较稳定且不会受到后期地质热事件的影响. 因此, 锆石 U-Pb 定年是确定花岗岩浆结晶和侵位时间的理想手段. 特别是最近发展起来的高分辨离子探针(SIMS)(Ireland and Williams, 2003; Li *et al.*, 2010a, 2010b)及激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)(Horn *et al.*, 2000; Yuan *et al.*, 2008)方法, 大大提高了年龄测定的准确度和可信度. 另外, 锆石的结晶析出受控于温度和岩浆成份的化学演化. 在岩浆结晶过程中形成的锆石, 其同位素组成可能记录岩浆演化过程中同位素组成的变化(Griffin *et al.*, 2000; 祁昌实等, 2007). 特别地, 锆石具有高 Hf 含量(通常 1%~2%)和低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值(通常 < 0.001), 因此其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素比值演化类似“普通 Hf”而可忽略放射成因同位素的累积. 锆石 Lu-Hf 同位素体系已被证明是研究壳—幔分异和花岗岩浆物质来源的有效手段之一(Kinny and Maas, 2003; Kemp *et al.*, 2005, 2007).

广西南部地处云开地区西部. 该区出露一些小规模的燕山晚期花岗岩类, 同时产出有相当数量的钨锡钼矿床(叶振广, 2005; 钟卡彬和黄芳燕, 2007; 钱建平等, 2009; 唐应亮, 2009). 2004 年广西壮族自治区地质矿产勘查开发局的《广西云开地区成矿地质条件及成矿区划科研究报告》表明, 一些矿区深部还有隐伏的花岗岩体. 广西区域地质调查队(1986)曾采用黑云母 K-Ar 法测得广西陆川米场黑

云母花岗岩的形成年龄为 120 Ma, 但考虑到同位素体系的封闭温度和准确度, 该年龄值的可靠性还需用高精度的定年方法来检验. 鉴于此, 本文选取云开地区广西陆川米场、三叉冲钨矿床以及松旺钨锡钼矿床等 3 个典型地区的燕山晚期花岗岩为研究对象, 对其进行系统的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素研究, 以探讨岩浆作用的时间、岩浆来源以及成岩地球动力学背景.

1 区域地质特征及样品

云开地区以博白—岑溪断裂带和吴川—四会断裂带为界划分为桂东南、云开和粤中 3 个地质单元(图 1b). 根据岩石组合和变质变形特征, 云开地区的岩石建造可划分为两大套: 上部主要为一套绿片岩相(局部绿帘角闪岩相)的变质火山—沉积建造, 称为云开群; 下部为角闪岩相—麻粒岩相变质岩和侵入其中的片麻状、条带状和眼球(球斑)状花岗质岩石(含紫苏花岗岩)组成, 广泛出露于信宜、高州一带, 称为信宜—高州杂岩(彭松柏等, 2006; Chen *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013a). 云开群下部岩性主要为变质长石砂岩、云母石英片岩、云母石英岩、石榴云母石英片岩和石英岩(硅质岩), 夹透闪辉石岩、变基性岩(变辉长岩、变玄武岩和斜长角闪岩等)、条带状磁铁矿层、磷矿层及白云质大理岩, 未见底, 厚度 > 1 307 m; 上部岩性主要为变质粉砂岩, 石英绢云千枚岩, 硅质岩、含榴石英片岩, 厚度 > 1 343 m(彭松柏等, 2006). 此外, 云开地区分布有大量的加里东期—燕山期花岗岩体.

米场岩体出露于广西陆川县米场一带, 大地构造位置处于陆川—岑溪断裂带西南段(图 1b). 出露地层主要有寒武系片岩、混合质片岩和片麻岩; 奥陶系千枚岩、片岩; 志留系片岩夹砂岩; 泥盆系碎屑岩; 白垩系砾岩及酸性火山岩; 第三系砾岩等(付强等, 2011). 区域性陆川—岑溪深大断裂纵贯全区, 多期次活动明显. 其中成矿有关的主要是燕山晚期第 2 次侵入的花岗岩类, 包括黑云母花岗岩、花岗闪长斑岩等(付强等, 2011). 米场岩体与地层呈侵入接触, 接触面一般为波状弯曲或港湾状, 多倾向围岩. 岩石主要为黑云母花岗岩, 其次为花岗闪长岩. 米场岩体中发育大量的镁铁质微粒包体(MME)(图 2a), 另外岩体内还见有花岗斑岩、霏细斑岩脉等沿北北东向或北北西向节理产出.

博白县三叉冲钨矿床地处博白—梧州断裂带的

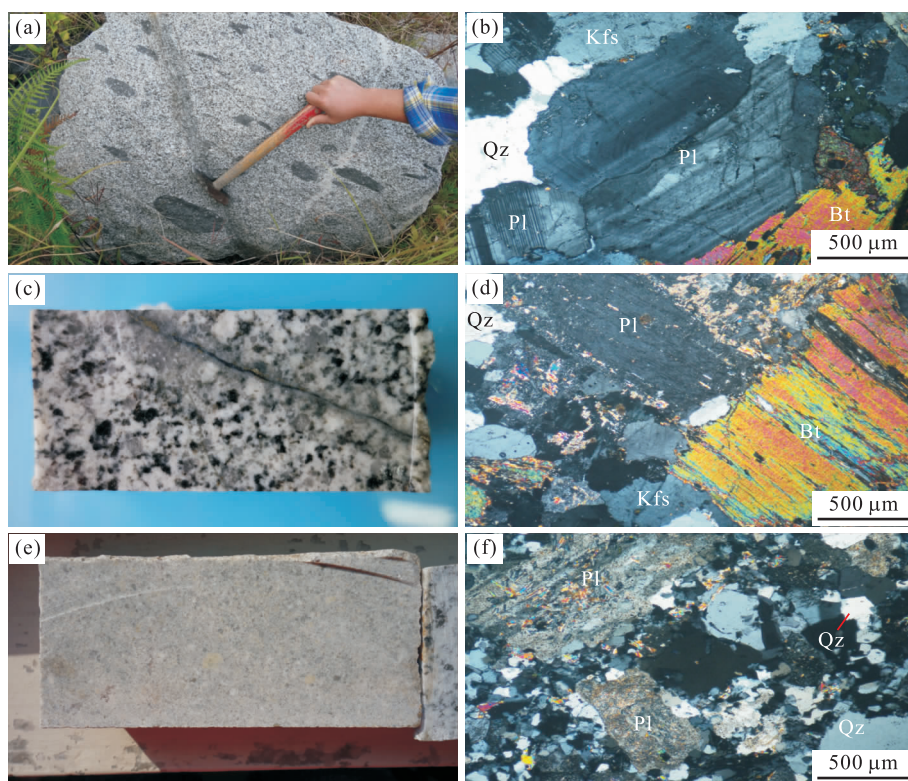


图 2 云开地区燕山晚期花岗岩的野外地质、样品及镜下特征

Fig. 2 Field geological, sample and microscopic characteristics of the Late Yanshanian granites in the Yunkai area

a. 米场黑云母花岗岩中含有大量的镁铁质微粒包体; b. 米场黑云母花岗岩显示典型的花岗结构; c. 三叉冲黑云母花岗岩岩心样品; d. 三叉冲黑云母花岗岩的镜下特征,局部可见黑云母绿泥石化,斜长石绢云母化; e. 松旺花岗岩岩心样品; f. 松旺花岗岩镜下特征,显示强烈的蚀变特征. 矿物代号据 Whitney and Evans, 2000

西南段(图 1b). 该矿床属砂卡岩型钨矿床,局部含钼矿. 矿体产于岩体外接触带的砂卡岩中,受断裂控制. 断裂构造以 NE 向压扭性断层为主. 区内出露地层主要有奥陶系、泥盆系. 原岩为一套滨海—浅海相的砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩夹灰岩,经过区域变质作用形成各类片岩(叶振广, 2005). 矿区出露大小 5 个岩株,属燕山晚期第 1 次侵入体,岩性主要为黑云母花岗岩. 岩株出露面积最大为 0.1 km²,其他均小于 0.1 km².

博白县松旺钨锡钼矿床位于东桃背斜的南西倾伏端,陆川—岑溪深大断裂的东南侧(图 1b). 该矿床属斑岩型—高温热液型矿床. 矿体主要赋存在花岗岩及其附近围岩中. 矿区断裂构造发育,以近 SN 向断裂为主,其次为近 EW 向断裂. 出露地层主要为下古生界区域变质形成的混合岩,其次为泥盆系中—下统区域浅变质岩(唐应亮, 2009). 矿区岩浆岩广泛分布,产出形态多种多样,主要有燕山晚期侵入的松旺细粒黑云母花岗岩体和锅盖岭花岗岩斑岩体.

本研究共采集 3 件花岗岩样品(样品 MC02、

SC07 和 SW08)用于锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素分析. 采样点位置和经纬度如图 1b 和表 1 所示. 样品 MC02 采自米场岩体,岩性为黑云母花岗岩,具花岗结构、块状构造(图 2a). 主要矿物组成为钾长石(约 40%)、斜长石(约 20%)、石英(约 25%)以及黑云母(约 10%)(图 2b). 副矿物主要有磁铁矿、磷灰石、榍石和锆石(总计约 5%). 样品 SC07 采自博白县三叉冲钨矿床钻孔 ZK906 岩心 550 m 处,岩性为黑云母花岗岩,具花岗结构、块状构造(图 2c). 主要矿物组成为钾长石(约 40%)、斜长石(约 18%)、石英(约 32%)以及黑云母(约 8%)(图 2d). 副矿物主要有磷灰石、榍石和锆石(总计约 2%). 局部可见黑云母绿泥石化,斜长石绢云母化. 样品 SW08 采自博白县松旺钨锡钼矿床钻孔 ZK002 岩心 27 m 处,岩性为花岗岩,具花岗结构、块状构造(图 2e). 主要矿物组成为钾长石(约 45%)、斜长石(约 20%)、石英(约 30%)以及黑云母(约 3%)(图 2f). 副矿物主要有磷灰石、榍石和锆石(总计约 2%). 岩石蚀变较强烈,可见明显的斜长石绢云母化、粘土化和黑云母绿泥石化.

表 1 云开地区燕山晚期花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测定结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data for zircons from the Late Yanshanian granites in the Yun kai area, southeast China

点号	Th ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	U ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
米场黑云母花岗岩(MC02)22°24'45.3"N, 110°15'13.1"E															
1	1 569	4 884	0.32	0.047 94	0.001 94	0.114 56	0.004 42	0.017 30	0.000 19	95	96	110	4	111	1
2	861	4 355	0.20	0.047 92	0.001 71	0.120 37	0.004 30	0.018 06	0.000 20	95	83	115	4	115	1
3	1 565	5 366	0.29	0.048 61	0.001 72	0.117 63	0.004 12	0.017 46	0.000 16	128	83	113	4	112	1
4	907	3 863	0.23	0.049 49	0.002 03	0.121 82	0.004 95	0.017 91	0.000 22	172	96	117	4	114	1
5c	102	231	0.44	0.066 54	0.005 46	0.973 51	0.073 24	0.109 43	0.002 37	833	172	690	38	669	14
6	1 040	4 046	0.26	0.049 20	0.001 97	0.121 06	0.004 76	0.017 89	0.000 20	167	97	116	4	114	1
7	1 050	5 840	0.18	0.046 24	0.001 54	0.114 78	0.003 83	0.017 91	0.000 18	9	78	110	3	114	1
8	219	1 446	0.15	0.055 30	0.003 18	0.136 47	0.007 99	0.017 80	0.000 27	433	123	130	7	114	2
9	1 689	5 643	0.30	0.047 39	0.001 93	0.117 11	0.004 76	0.017 85	0.000 22	78	87	112	4	114	1
10	1 444	5 523	0.26	0.047 86	0.001 88	0.119 53	0.004 63	0.018 01	0.000 20	100	83	115	4	115	1
11	1 093	4 690	0.23	0.048 84	0.001 89	0.119 34	0.004 62	0.017 65	0.000 20	139	86	114	4	113	1
12	1 775	5 475	0.32	0.061 56	0.002 23	0.152 46	0.005 47	0.017 78	0.000 18	657	78	144	5	114	1
13c	1 151	3 709	0.31	0.050 22	0.002 06	0.138 26	0.006 04	0.019 79	0.000 35	206	96	131	5	126	2
14	832	4 127	0.20	0.047 66	0.001 81	0.116 51	0.004 46	0.017 66	0.000 20	83	85	112	4	113	1
15	869	3 745	0.23	0.052 74	0.002 24	0.125 72	0.005 14	0.017 21	0.000 18	317	98	120	5	110	1
16	1 264	5 048	0.25	0.046 64	0.001 66	0.113 82	0.004 02	0.017 61	0.000 18	32	91	109	4	113	1
三叉冲黑云母花岗岩(SC07)22°18'08.9"N, 110°10'05.7"E															
1	304	2 358	0.13	0.051 72	0.002 60	0.117 09	0.006 08	0.016 24	0.000 22	272	115	112	6	104	1
2	618	1 851	0.33	0.050 01	0.002 97	0.112 95	0.006 42	0.016 47	0.000 28	195	139	109	6	105	2
3c	358	1 367	0.26	0.056 27	0.002 64	0.256 67	0.017 38	0.030 98	0.001 52	461	106	232	14	197	9
4	543	4 737	0.11	0.046 96	0.001 87	0.102 83	0.003 99	0.015 79	0.000 17	56	83	99.4	3.7	101	1
5	200	920	0.22	0.060 63	0.004 30	0.131 69	0.009 56	0.015 95	0.000 34	628	154	126	9	102	2
6	582	1 951	0.30	0.051 18	0.003 14	0.112 48	0.006 54	0.016 11	0.000 24	256	141	108	6	103	2
7	897	3 178	0.28	0.049 38	0.002 32	0.107 55	0.004 77	0.015 99	0.000 20	165	109	104	4	102	1
8	612	3 327	0.18	0.049 72	0.002 13	0.109 70	0.004 51	0.015 94	0.000 18	189	100	106	4	102	1
9	624	2 638	0.24	0.048 80	0.002 68	0.109 38	0.005 91	0.016 33	0.000 22	139	-69	105	5	104	1
10	1 185	2 505	0.47	0.046 44	0.002 23	0.103 85	0.004 87	0.016 30	0.000 21	20	111	100	4	104	1
11	783	2 797	0.28	0.048 16	0.002 33	0.107 74	0.005 03	0.016 24	0.000 20	106	111	104	5	104	1
12	532	2 541	0.21	0.047 46	0.002 68	0.106 98	0.005 87	0.016 40	0.000 29	72	139	103	5	105	2
13c	383	384	1.00	0.080 83	0.002 97	2.254 76	0.080 82	0.201 13	0.002 49	1 218	72	1 198	25	1 181	13
14	338	1 858	0.18	0.051 39	0.003 09	0.115 03	0.006 62	0.016 36	0.000 25	257	134	111	6	105	2
15	357	1 279	0.28	0.061 05	0.006 82	0.138 09	0.016 05	0.016 25	0.000 25	643	238	131	14	104	2
松旺花岗岩(SW08)21°53'32.8"N, 109°45'01.0"E															
1	151	241	0.63	0.100 71	0.013 63	0.179 77	0.028 16	0.012 95	0.000 51	1 637	253	168	24	83	3
2c	416	2 011	0.21	0.052 62	0.002 17	0.328 45	0.014 35	0.045 37	0.000 65	313	90	288	11	286	4
3	393	683	0.58	0.062 38	0.006 33	0.115 15	0.013 36	0.013 39	0.000 38	687	213	111	12	86	2

2 分析方法

笔者利用重液和磁选法分离技术进行锆石样品分选,然后在双目镜下根据晶形、颜色、透明度和有无明显包裹体挑选出不同类型的锆石,在玻璃板上用环氧树脂固定,并抛光至锆石中心.在原位分析之前,通过双目镜和阴极发光(CL)图像详细研究锆石的晶体形貌和内部结构特征,以选择同位素分析的最佳点.锆石阴极发光(CL)照相在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室完成.

锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 分析完成.激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7 500 a.激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合.在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008a).每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号.对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010a)完成.详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.* (2008, 2010a, 2010b).U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500.对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu *et al.*, 2010a).锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck *et al.* (1995).锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成.

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成.激光剥蚀系统为 GeoLas 2005(Lambda Physik, 德国),MC-ICP-MS 为 Neptune Plus(Thermo Fisher Scientific, 德国).该系统配备了本实验室自主研发的信号平滑装置.采用该装置即使激光脉冲频率降到 1 Hz,还可以获得平稳的信号(Hu *et al.*, 2012a).对于 193 nm 的激光,在给定的仪器条件下,使用氦气作为载气比使用氩气的信号灵敏度提高了 2 倍.研究还表明,少量氮气的

引入还可进一步提升大部分元素的灵敏度(Hu *et al.*, 2008b).相对于 Neptune Plus 的标准锥组合,新设计的 X 截取锥和 Jet 采样锥组合在少量氮气加入的条件下能分别提高 Hf、Yb 和 Lu 的灵敏度 5.3 倍、4.0 倍和 2.4 倍.激光输出能量可以调节,实际输出能量密度为 5.3 J/cm².采用单点剥蚀模式,斑束固定为 44 μm.详细仪器操作条件和分析方法可参照 Hu *et al.* (2012b).

采用 LA-MC-ICP-MS 准确测试锆石 Hf 同位素的难点在于¹⁷⁶Yb 和¹⁷⁶Lu 对¹⁷⁶Hf 的同量异位素的干扰扣除.研究表明,Yb 的质量分馏系数(β_{Yb})在长期测试过程中并不是一个固定值,而且通过溶液进样方式测试得到的 β_Y 并不适用于激光进样模式中的锆石 Hf 同位素干扰校正(Woodhead *et al.*, 2004). β_{Yb} 的错误估算会明显地影响¹⁷⁶Yb 对¹⁷⁶Hf 的干扰校正,进而影响¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值的准确测定.在本次试验中,笔者实时获取了锆石样品自身的 β_{Yb} 用于干扰校正.¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf = 0.732 5 和 ¹⁷³Yb/¹⁷¹Yb = 1.130 17(Segal *et al.*, 2003)被用于计算 Hf 和 Yb 的质量分馏系数 β_{Hf} 和 β_{Yb} .¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf 和¹⁷³Yb/¹⁷¹Yb 的比值被用于计算 Hf(β_{Hf})和 Yb(β_{Yb})的质量偏差.使用¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb = 0.793 81(Segal *et al.*, 2003)来扣除¹⁷⁶Yb 对¹⁷⁶Hf 的同量异位干扰.使用¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.026 56 来扣除干扰程度相对较小的¹⁷⁶Lu 对¹⁷⁶Hf 的同量异位干扰.由于 Yb 和 Lu 具有相似的物理化学属性,因此在本实验中采用 Yb 的质量分馏系数 β_{Yb} 来校正 Lu 的质量分馏行为.分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICPMS-DataCal(Liu *et al.*, 2010a)完成. $\epsilon_{Hf}(t)$ 计算采用的¹⁷⁶Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001),球粒陨石现今的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282 772、¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.033 2.亏损地幔 Hf 模式年龄(T_{DM1})计算采用的现今亏损地幔¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.283 25 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.038 4 进行计算;二阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})采用平均大陆壳¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.015 进行计算(Griffin *et al.*, 2002).

3 实验结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

样品 MC02 中的的锆石大多无色透明,部分略带深褐色,呈自形一半自形长柱状,极少数为短柱

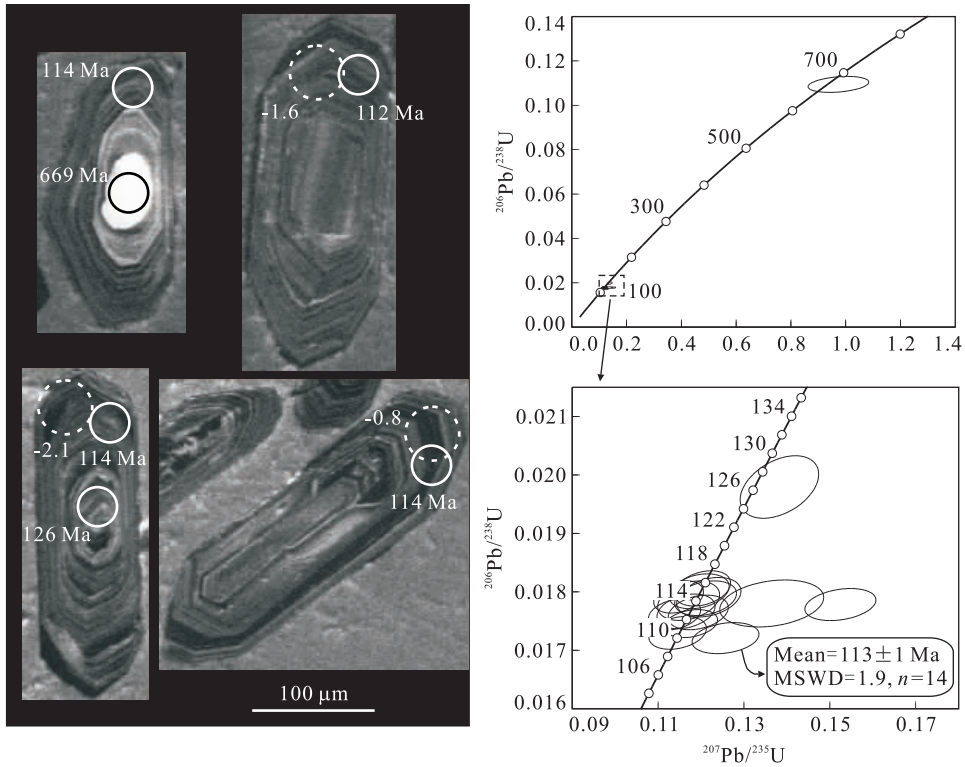


图 3 米场黑云母花岗岩样品 MC02 中锆石代表性阴极发光(CL)图像和锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons in sample MC02 and concordia diagrams of LA-ICPMS zircon U-Pb data

左图中的实线圈是定年点,虚线圈是 Hf 同位素分析点;小圈中的数据是年龄值,大圈中的数据是以结晶年龄 t 计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值;小圈和大圈的直径分别为 32 μm 和 44 μm ,下同

状,粒径范围为 50~300 μm ,长短轴之比为 1:1~5:1. 在阴极发光图像(CL)中,几乎所有的锆石都显示典型的韵律振荡环带(图 3),说明这类锆石为岩浆成因(Wu and Zheng, 2004). 另外,可见少量锆石具有明显的核一边结构(图 3). 对花岗岩样品中的 13 颗锆石的 16 次 U-Pb 定年结果显示,其中 14 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 110~115 Ma(表 1). 在谐和图上,这些分析点谐和或近谐和,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $113 \pm 1 \text{ Ma}$ (MSWD=1.9)(图 3),代表花岗岩的侵位年龄. 另外 2 个分析点位于继承锆石上,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $126 \pm 2 \text{ Ma}$ 和 $669 \pm 14 \text{ Ma}$.

样品 SC07 中的锆石大多无色透明或半透明,呈自形一半自形长柱状,部分为短柱状. 粒径范围为 30~300 μm ,长短轴之比为 1:1~4:1. 在阴极发光图像(CL)中,几乎所有的锆石都显示典型的韵律振荡环带(图 4),表明这类锆石为岩浆成因(Wu and Zheng, 2004). 另外,可见少量锆石具有继承锆石核,锆石核无环带或显示弱的震荡环带(图 4). 总计对花岗岩样品中的 13 颗锆石进行了 15 次 U-Pb 定

年分析,其中 13 个分析点位于新生岩浆锆石上,2 个分析点位于继承锆石核上. 13 个岩浆锆石分析点谐和或近谐和,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $103 \pm 1 \text{ Ma}$ (MSWD=0.98)(图 4),代表花岗岩的侵位年龄. 另外 2 个继承锆石分析点位于继承锆石上,其给出的年龄分别为 $197 \pm 9 \text{ Ma}$ ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)和 $1218 \pm 72 \text{ Ma}$ ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)(表 1,图 4).

样品 SW08 中的锆石大多无色透明或半透明,部分为浅褐色,呈自形一半自形长柱状,部分为短柱状. 粒径范围为 40~300 μm ,长短轴之比为 1:1~5:1. 在阴极发光图像(CL)中,几乎所有的锆石都显示典型的韵律振荡环带(图 5),表明这类锆石为岩浆成因(Wu and Zheng, 2004). 另外,可见少量锆石具有继承锆石核,锆石核无环带或显示弱的震荡环带(图 5). 总计对花岗岩样品中的 17 颗锆石进行了 20 次 U-Pb 定年分析,其中 17 个分析点位于新生岩浆锆石上,3 个分析点位于继承锆石核上. 17 个岩浆锆石分析点谐和或近谐和,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $88 \pm 1 \text{ Ma}$ (MSWD=1.4)(图 5),代表花岗岩的侵位年龄. 3 个继承锆石分析点中,2 个

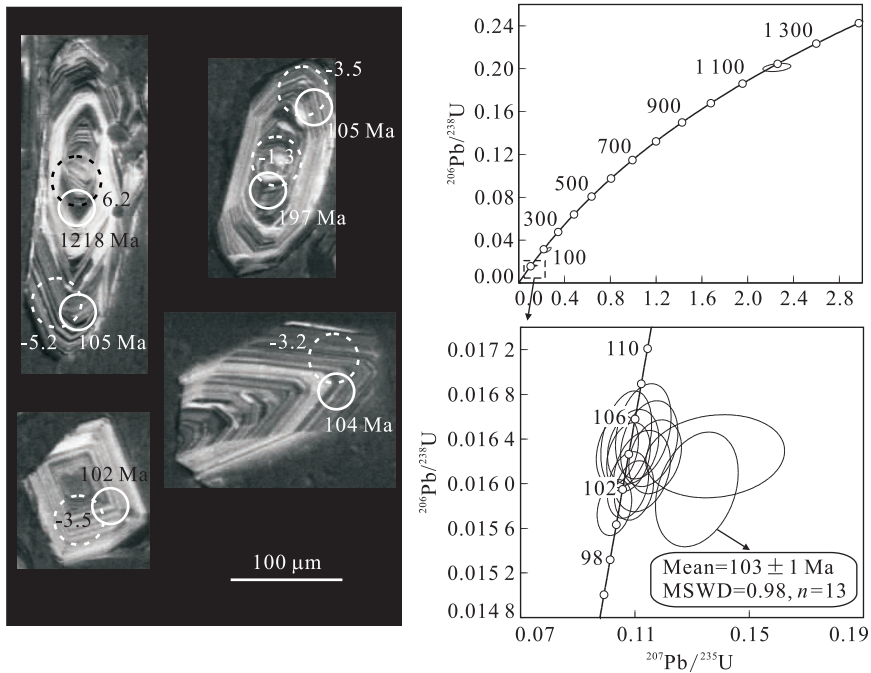


图 4 三叉冲黑云母花岗岩样品 SC07 中锆石代表性阴极发光(CL)图像和锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons in sample SC07 and concordia diagrams of LA-ICP-MS zircon U-Pb data

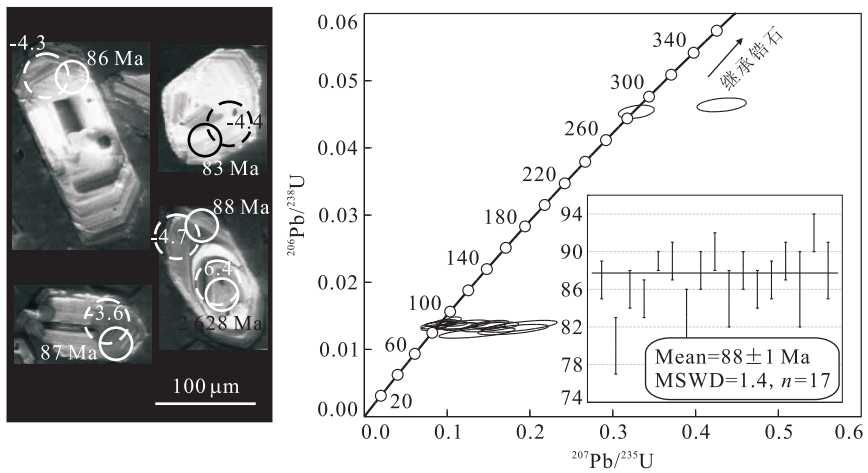


图 5 松旺花岗岩样品 SW08 中锆石代表性阴极发光(CL)图像和 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons in sample SW08 and concordia diagrams of LA-ICP-MS zircon U-Pb data

分析点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $286 \pm 4 \text{ Ma}$ 和 $292 \pm 4 \text{ Ma}$; 另外一个分析点给出的年龄较老, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2628 \pm 54 \text{ Ma}$ (表 1, 图 5).

3.2 锆石 Hf 同位素

在 U-Pb 年龄的基础上, 笔者选择 3 个样品中具有代表性的锆石颗粒, 对其进行了锆石 Hf 同位素分析, 结果列于表 2.

对样品 MC02 中的 13 颗新生岩浆锆石进行了 14 次 Lu-Hf 同位素分析. 除其中一个点位于锆石核

部外(分析点 13), 其他均位于岩浆锆石边部(具震荡环带). 13 个岩浆锆石边部的分析点给出的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较一致, 范围为 $0.282640 \sim 0.282692$, 以 $t=113 \text{ Ma}$ 计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-2.3 \sim -0.5$, 相应的二阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 T_{DM2} 范围为 $1200 \sim 1314 \text{ Ma}$ (图 6a, 6b, 7a, 7b), 指示其源岩可能是中元古代地壳物质. 另外一个锆石核部(113 Ma)的分析点给出相对较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值(0.282746)和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(1.4), 较年轻的 Hf 模式年龄 T_{DM2}

表 2 云开地区燕山晚期花岗岩中锆石 LA-MC-ICP-MS Hf 同位素测定结果

Table 2 Hafnium isotope analyses of zircons from the Late Yanshanian granites in the Yunkai area, southeast China

序号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)^a$	$\pm 2\sigma$	T_{DM1} (Ma)	$\pm 2\sigma$	T_{DM2} (Ma)	$\pm 2\sigma$	U-Pb 分析点
米场黑云母花岗岩(MC02)											
1	0.282 666	0.000 008	0.001 863	0.049 169	-1.4	0.3	850	22	1 260	35	1
2	0.282 664	0.000 007	0.001 749	0.046 481	-1.5	0.2	850	20	1 263	31	2
3	0.282 659	0.000 007	0.001 184	0.032 406	-1.6	0.2	844	20	1 271	32	3
4	0.282 640	0.000 007	0.001 206	0.033 077	-2.3	0.2	872	20	1 314	31	4
5	0.282 670	0.000 007	0.001 159	0.031 322	-1.2	0.3	829	21	1 247	33	6
6	0.282 654	0.000 008	0.000 522	0.013 455	-1.7	0.3	838	21	1 281	34	7
7	0.282 645	0.000 008	0.001 275	0.034 986	-2.1	0.3	866	24	1 303	37	8
8	0.282 665	0.000 007	0.001 981	0.053 591	-1.5	0.2	855	19	1 262	30	9
9	0.282 644	0.000 007	0.001 083	0.029 848	-2.1	0.3	864	21	1 306	33	10
10	0.282 684	0.000 007	0.001 856	0.050 236	-0.8	0.2	824	20	1 219	31	12
11	0.282 658	0.000 007	0.001 133	0.031 479	-1.6	0.3	845	20	1 274	32	14
12	0.282 692	0.000 009	0.001 537	0.039 525	-0.5	0.3	806	25	1 200	39	16
13	0.282 746	0.000 008	0.002 065	0.058 448	1.4	0.3	739	22	1 081	34	15
14	0.282 685	0.000 008	0.001 619	0.045 048	-0.7	0.3	818	23	1 216	36	11
三叉冲黑云母花岗岩(SC07)											
1	0.282 621	0.000 008	0.001 751	0.052 075	-3.2	0.3	913	24	1 366	37	1
2	0.282 585	0.000 007	0.001 396	0.040 504	-4.4	0.3	955	21	1 444	33	2
3	0.282 619	0.000 008	0.001 381	0.039 415	-1.3	0.3	906	24	1 314	37	3
4	0.282 611	0.000 006	0.001 490	0.043 578	-3.5	0.2	920	18	1 387	28	4
5	0.282 611	0.000 008	0.001 357	0.040 013	-3.5	0.3	917	24	1 387	37	5
6	0.282 635	0.000 009	0.001 458	0.041 999	-2.7	0.3	886	25	1 334	39	6
7	0.282 607	0.000 007	0.001 473	0.043 716	-3.7	0.2	926	19	1 396	30	7
8	0.282 626	0.000 006	0.001 723	0.050 824	-3.0	0.2	904	18	1 353	28	8
9	0.282 568	0.000 006	0.001 266	0.038 634	-5.0	0.2	976	17	1 482	27	9
10	0.282 617	0.000 008	0.001 427	0.043 266	-3.3	0.3	910	22	1 373	35	10
11	0.282 203	0.000 010	0.000 829	0.026 779	6.2	0.4	1 474	28	1 628	44	13
12	0.282 563	0.000 007	0.001 284	0.037 851	-5.2	0.2	984	20	1 494	31	12
13	0.282 570	0.000 006	0.000 949	0.028 518	-4.9	0.2	965	16	1 476	26	11
14	0.282 615	0.000 007	0.001 758	0.051 455	-3.4	0.3	921	21	1 378	33	14
15	0.282 594	0.000 006	0.001 244	0.036 480	-4.1	0.2	939	18	1 424	28	15
松旺花岗岩(SW08)											
1	0.282 603	0.000 008	0.001 435	0.043 672	-4.1	0.3	930	23	1 412	37	20
2	0.282 602	0.000 008	0.001 708	0.051 302	-4.2	0.3	939	24	1 416	37	19
3	0.282 613	0.000 006	0.001 433	0.043 770	-3.8	0.2	916	17	1 391	27	18
4	0.282 591	0.000 008	0.001 331	0.041 517	-4.5	0.3	945	23	1 439	37	17
5	0.281 310	0.000 010	0.000 506	0.013 333	6.4	0.4	2 678	27	2 708	43	16c
6	0.282 572	0.000 007	0.001 419	0.043 717	-5.2	0.3	974	21	1 482	33	7
7	0.282 610	0.000 007	0.000 625	0.019 498	-3.8	0.2	901	19	1 395	30	14
8	0.282 591	0.000 007	0.000 445	0.013 804	-4.5	0.2	923	19	1 437	31	13
9	0.282 617	0.000 006	0.001 470	0.045 928	-3.6	0.2	911	17	1 381	26	12
10	0.282 597	0.000 009	0.000 489	0.015 190	-4.3	0.3	916	25	1 424	40	11
11	0.282 612	0.000 008	0.000 766	0.025 093	-3.8	0.3	901	21	1 391	34	9
12	0.282 594	0.000 009	0.000 818	0.026 854	-4.4	0.3	928	24	1 431	39	6
13	0.282 599	0.000 014	0.000 790	0.024 339	-4.2	0.5	920	40	1 420	64	1
14	0.282 585	0.000 007	0.000 647	0.020 822	-4.7	0.3	936	20	1 451	32	3
15	0.282 602	0.000 008	0.000 630	0.020 282	-4.1	0.3	912	22	1 412	35	4

注:a 初始 Hf 同位素比值 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 以锆石结晶年龄 t 计算(详见文中)。

(1 081 Ma)(图 6a, 6b)。

对样品 SC07 中的 13 颗锆石进行了 15 次 Lu-Hf 同位素分析,其中 13 个分析点位于新生岩浆锆

石,另 2 个分析点(分析点 3、11)位于继承锆石核上。13 个新生岩浆锆石分析点给出 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围为 0.282 563~0.282 635,以 $t=103$ Ma 计算的

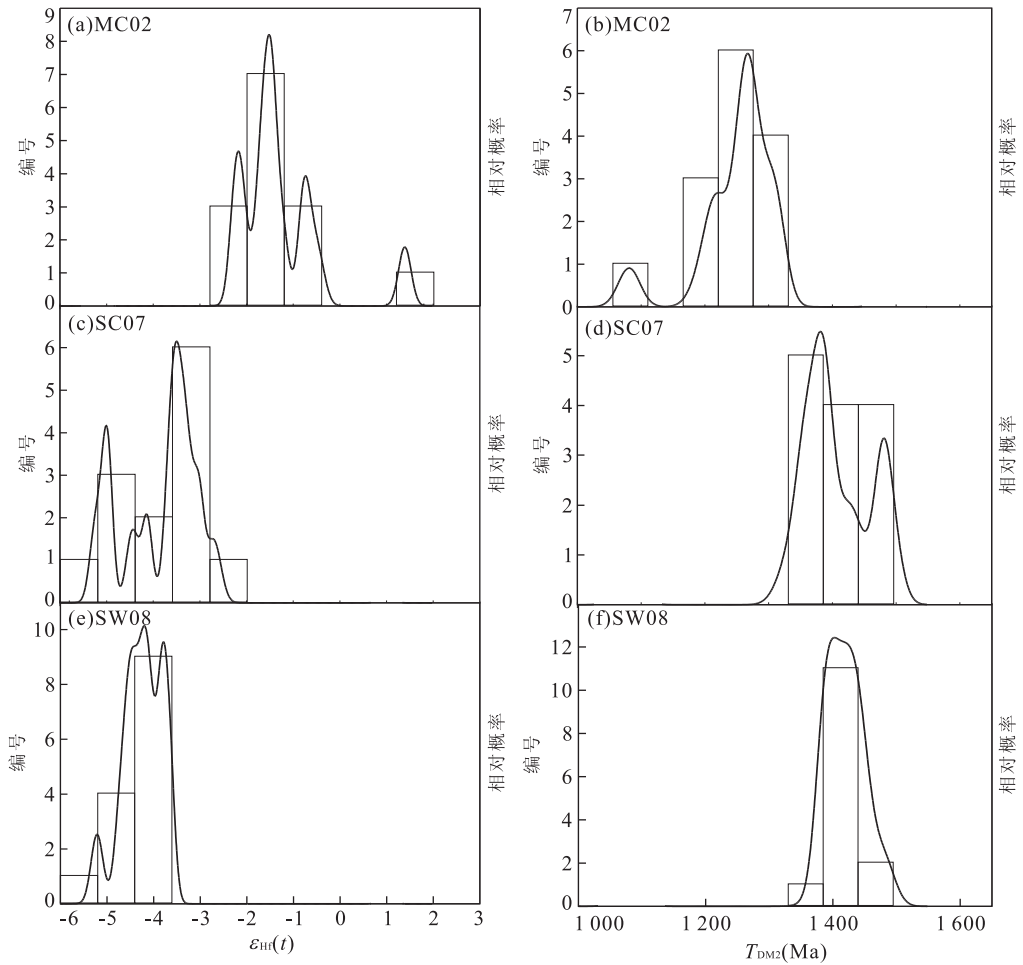


图 6 云开地区燕山晚期花岗岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 频谱

Fig. 6 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and two stage Hf model ages (T_{DM2}) for granite samples from the Yunkai area

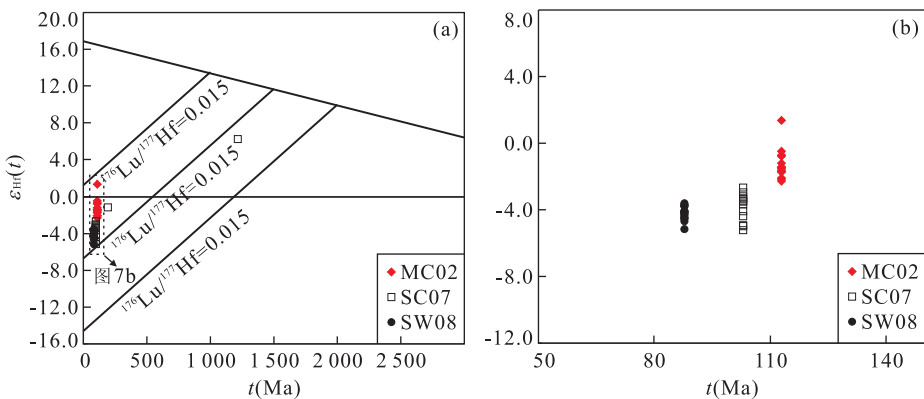


图 7 云开地区燕山晚期花岗岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 关系

Fig. 7 Relation of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values versus U-Pb ages for granite samples from the Yunkai area

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-5.2 \sim -2.7$, 相应的二阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 T_{DM2} 范围为 $1334 \sim 1494$ Ma (图 6c, 6d, 7a, 7b), 指示其源岩可能是中元古代地壳物质. 另外 2 个继承锆石核 (分别为 197 Ma 和 1218 Ma) 分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为

0.282 619 和 0.282 203, 相应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 T_{DM2} 分别为 $-1.3, 6.2$ 和 1314 Ma、 1628 Ma (表 2).

对样品 SW08 中的 14 颗锆石进行了 15 次 Lu-Hf 同位素分析, 其中 14 个分析点位于新生岩浆锆石, 另 1 个分析点 (分析点 5) 位于继承锆石核上. 14

个新生岩浆锆石分析点给出较集中的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值,范围为0.282 572~0.282 617,以 $t=88\text{ Ma}$ 计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-5.2~-3.6,相应的二阶段亏损地幔 Hf 模式年龄 T_{DM2} 范围为 1 381~1 482 Ma(图 6e, 6f, 7a, 7b),指示其源岩可能是中元古代地壳物质. 另外 1 个继承锆石核(2 628 Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.281 310,相应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 T_{DM2} 分别为 6.4 和 2 708 Ma(表 2).

4 讨论与结论

4.1 云开地区燕山晚期岩浆作用

云开地块广西地区 3 个典型花岗岩(米场、三叉冲和松旺)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,其侵位年龄分别为 113 Ma、103 Ma 和 88 Ma,这表明广西地区存在燕山晚期岩浆作用. 结合区域晚中生代构造-岩浆演化来看,中国东南部广泛存在的同时期的岩浆作用与之相对应.

值得注意的是,本文用 LA-ICP-MS 方法得到的米场岩体的侵位年龄为 $113 \pm 1\text{ Ma}$,明显年轻于广西区域地质调查队(1986)采用黑云母 K-Ar 法得到的年龄(120 Ma),也比后者具有更高的精度. 因此,113 Ma 代表了米场岩体准确的侵位时间. 在中国东南部也存在约 113 Ma 的岩浆活动记录. 例如,福建东南沿岸泉州辉长岩和二长花岗岩的结晶年龄分别为 $111 \pm 1\text{ Ma}$ 、 $109 \pm 1\text{ Ma}$ 和 $108 \pm 1\text{ Ma}$ (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb; Li *et al.*, 2012b);福建东南平潭角闪辉长岩的结晶年龄为 $115.2 \pm 1.2\text{ Ma}$ (TIMS 锆石 U-Pb; Dong *et al.*, 1997);浙江沿海普陀山石英二长闪长岩侵位年龄为 $110.2 \pm 1.1\text{ Ma}$ (TIMS 锆石 U-Pb; 邱检生等, 1999);浙东新昌儒岙辉绿岩、花岗岩的侵位年龄分别为 $109.1 \pm 2.8\text{ Ma}$ (全岩 Ar-Ar)和 $116 \pm 3\text{ Ma}$ (SHRIMP 锆石 U-Pb)(董传万等, 2007);浙东南龙王堂岩体的侵位年龄为 $109.8 \pm 0.4\text{ Ma}$ (黑云母 Ar-Ar; 陈江峰等, 1991). 另外,徐夕生等(1999)从广东麒麟新生代玄武质角砾岩筒中的辉长质麻粒岩捕虏体获得其 Sm-Nd 等时线年龄为 $112.3 \pm 17.8\text{ Ma}$,认为中国大陆边缘存在这一时期基性岩浆的底侵作用.

三叉冲黑云母花岗岩的结晶年龄为 $103 \pm 1\text{ Ma}$,为早白垩世晚期. 早期的同位素年代学研究表明,东南沿海地区可能广泛存在一套早白垩世晚期高钾钙碱性 I 型花岗岩,如福建的福州岩体($104 \pm 5\text{ Ma}$)、丹阳岩体($103 \pm 10\text{ Ma}$)(全岩 Rb-Sr;

Martin *et al.*, 1994)、浙江的梁弄岩体($101.2 \pm 0.3\text{ Ma}$)(黑云母 Ar-Ar; 陈江峰等, 1991)等. 最近的研究表明,早白垩世晚期是中国东南部重要的构造-岩浆活动期,这一时期形成了大量的基性-酸性岩浆岩. 例如广西龙头山流纹斑岩($103.3 \pm 2.4\text{ Ma}$)和花岗斑岩($100.3 \pm 1.4\text{ Ma}$)(SHRIMP 锆石 U-Pb; 陈富文等, 2008)、大厂笼箱盖复式岩体第 1 阶段($103 \sim 102\text{ Ma}$)(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb; 梁婷等, 2011)、赣西北基性岩脉($110 \sim 100\text{ Ma}$)(黑云母 Ar-Ar; 谢桂青等, 2002)、粤西火山-侵入岩($99 \sim 104\text{ Ma}$)(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb; Geng *et al.*, 2006)和粤北基性岩脉($103 \sim 110\text{ Ma}$)(角闪石 Ar-Ar; 李献华等, 1997)、浙东南石平川花岗岩($103 \pm 1\text{ Ma}$)(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb; 李艳军等, 2009)、青田碱性 A 型花岗岩($101.2 \pm 2.1\text{ Ma}$)(TIMS 锆石 U-Pb; 邱检生等, 1999)、雁荡山火山岩($97.2 \sim 105.6\text{ Ma}$)(SHRIMP 锆石 U-Pb; 余明刚等, 2006)和广东东-福建的长英质火山岩($104 \sim 95\text{ Ma}$)(SIMS 锆石 U-Pb; Guo *et al.*, 2012). 另外,我国最南端的海南岛也有早白垩世晚期基性岩墙群(101 Ma)的报道(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb; 唐立梅等, 2010).

大量的年代学资料表明,晚白垩世(约 90 Ma; 松旺花岗岩侵位年龄为 $88 \pm 1\text{ Ma}$)是中国东南部晚中生代另一重要的构造-岩浆活动期. 这一时期岩浆活动记录有:广西社山花岗岩和大厂中酸性侵入岩的侵位年龄分别为 $91.1 \pm 0.3\text{ Ma}$ (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb; 陈懋弘等, 2011)和 $93 \sim 91\text{ Ma}$ (SHRIMP 锆石 U-Pb; 蔡明海等, 2006);粤北基性岩脉侵位年龄为 $91 \sim 88\text{ Ma}$ (全岩 K-Ar; 李献华等, 1997);郴州-宁芜断裂附近的玄武岩和基性岩脉的结晶年龄为 $93 \sim 90\text{ Ma}$ (全岩 K-Ar; Wang *et al.*, 2003);浙江桃花岛、瑶坑和大和山等碱性花岗岩和普陀山晶洞花岗岩的侵位年龄集中于 $94 \sim 86\text{ Ma}$ (邱检生等, 1999; 王强等, 2005; 肖娥等, 2007);福建的碱性花岗岩和高分异 I 型花岗岩的侵位年龄为 $96 \sim 92\text{ Ma}$ (Martin *et al.*, 1994; 邱检生等, 2008);海南岛叉河和三亚基性岩墙群形成于约 93 Ma (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb; 唐立梅等, 2010). 另外,台湾岛的变质花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年表明,其原岩形成于 $88 \sim 87\text{ Ma}$ (Yui *et al.*, 2009).

笔者将中国东南部晚中生代(侏罗纪和白垩纪)岩浆作用时间统计后发现,在约 100 Ma 和约 90 Ma

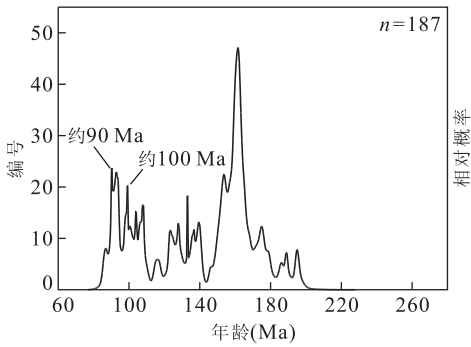


图 8 中国东南部燕山期岩浆岩同位素年龄频谱图(引自 Li *et al.*, 2010a)

Fig. 8 Histograms and cumulative probability plots of isotopic ages for Yanshanian igneous rocks in SE China

处出现明显的峰值(图 8)。综上所述,中国东南部在燕山晚期发生了广泛而强烈的(双峰式)岩浆作用。本文所获得的三叉冲黑云母花岗岩和松旺花岗岩的侵位年龄(103 Ma 和 88 Ma)分别与这 2 个峰值相应,表明云开地区白垩纪岩浆活动是中国东南部构造—岩浆演化的一个重要组成部分。

4.2 花岗岩浆物质来源

米场黑云母花岗岩的新生岩浆锆石二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 集中于 1.3~1.2 Ga(除一个分析点外),而三叉冲黑云母花岗岩和松旺花岗岩则具有相对较老但一致的锆石 T_{DM2} (1.5~1.3 Ga)(图 6, 7)。详细的岩心编录以及矿区地质特征研究表明,三叉冲黑云母花岗岩和松旺花岗岩岩性较均一,其中仅有少量的围岩包体,不含有镁铁质微粒包体。这与米场岩体含有大量的镁铁质微粒包体(付强等, 2011)明显不同。

三叉冲黑云母花岗岩和松旺花岗岩较均一的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和 T_{DM2} 表明其源岩可能是新生的中元古代地壳物质。那么一个重要的问题是,云开地区是否存在新生的中元古代地壳物质呢?覃小峰等(2006)对桂东南云开群洋中脊型变质基性火山岩(斜长角闪岩)进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,结果表明其原岩的喷发年龄为 1462 ± 28 Ma,证明云开地区确实存在新生的中元古代地壳物质。Gilder *et al.* (1996)对华南 23 个代表性中生代花岗岩进行了 Sr-Nd 同位素分析,结果表明这些花岗岩具有非常集中的 Nd 模式年龄(1.4 ± 0.3 Ga),他认为华南存在广泛的中元古代地壳。另外,王德滋和沈渭州(2003)根据中国东南部花岗岩的 Nd 模式年龄以及地壳岩石中继承锆石的 U-Pb 年龄,认为中国东南部地壳具有幕式生长特征,其中中元古代(约 1.4 Ga)是一

个重要的地壳生长期。值得注意的是,在扬子地块南部和华夏地块的武夷山、南岭和云开等地区的新元古代沉积岩中也发现有相当数量的 1.3~1.4 Ga 的碎屑锆石具有正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和较年轻的 T_{DM2} (Yu *et al.*, 2008, 2010; Liu *et al.*, 2010c; Wang *et al.*, 2010),也表明华南板块东南部存在增生的中元古代地壳。上述表明,中国东南部(至少云开地区)存在新生的中元古代地壳物质,并且这些中元古代地壳物质为该区燕山晚期的岩浆岩提供了重要的物质来源。

对已有米场黑云母花岗岩及其镁铁质微粒包体的地球化学特征和成因分析表明,花岗岩及其镁铁质微粒包体是底侵的幔源岩浆与其诱发的壳源酸性岩浆混合作用的产物(付强等, 2011)。本文的 Hf 同位素结果也支持上述结论:米场黑云母花岗岩具有相对较年轻的二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} ,暗示其岩浆来源中可能有年轻物质的加入;另外,米场黑云母花岗岩中一个新生岩浆锆石核(113 Ma)给出相对较高正值(1.4)(图 6a),也表明花岗岩在成岩过程中可能有亏损地幔物质的加入。前述,在约 113 Ma 中国东南部存在广泛的双峰式岩浆作用以及基性岩浆的底侵作用。这些底侵的基性岩浆一方面可以为中下地壳物质的熔融形成花岗岩浆提供深部热能,另一方面可以与其诱发的花岗岩浆混合,从而为成岩提供物质来源。

4.3 构造意义

已有大量研究表明,云开地区及整个中国东南部至少从早白垩世开始就处于张性构造环境。证据有:(1)浙西白菊花尖准铝质 A 型花岗岩侵位年龄为 126 Ma(Wong *et al.*, 2009);(2)白垩纪(140~81 Ma)存在广泛而且强烈的双峰式岩浆作用(包括 A 型花岗岩以及基性岩浆作用等)(李献华等, 1997; Li, 2000; 葛小月等, 2003);(3)早白垩世晚期,中国东南部一系列北东向伸展拉张断陷盆地开始形成,如浙江武义盆地(汪庆华, 2001)、湖南衡阳盆地(葛同明等, 1994)等。

对于白垩纪中国东南部岩石圈伸展的动力学机制,越来越多的研究者认为可能与太平洋板块俯冲形成的弧后环境(Zhou *et al.*, 2006),或者与俯冲板片的折返或后撤有关(Martin *et al.*, 1994; 王强等, 2005; Wong *et al.*, 2009; Yui *et al.*, 2009)。但也有不同意见(Li, 2000)。然而,目前对于太平洋板块俯冲的时限、方向以及过程还有不同看法并存在争论(Chen *et al.*, 2005; Li and Li, 2007; Sun *et*

al., 2007; Wong *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012a). 最近, Wang *et al.* (2013b) 对华南板块显生宙岩浆作用、变质作用以及变形作用进行了综述, 基于此笔者认为在早—中侏罗世华南板块总体处于伸展构造背景, 可能与太平洋板块俯冲造山后的岩石圈垮塌或弧后伸展有关; 至晚侏罗世—早白垩世, 俯冲的太平洋板片开始后撤, 在东南沿海形成了广泛的岩浆岩。因此, 太平洋板块可能从约 180 Ma (Wang *et al.*, 2013b) 之前就开始俯冲。至白垩纪时, 俯冲的板片已开始折返—断离, 幔源岩浆沿板片窗上涌底侵至中下地壳, 导致地壳物质广泛熔融, 在云开地区形成了燕山晚期花岗岩(幔源岩浆提供了部分成岩物质)。

References

- Cai, M. H., He, L. Q., Liu, G. Q., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Intrusive Rocks in the Dachang Tin-Polymetallic Ore Field, Guangxi and Their Geological Significance. *Geological Review*, 52(3): 409—414 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C. H., Liu, Y. H., Lee, C. Y., et al., 2012. Geochronology of Granulite, Charnockite and Gneiss in the Poly-Metamorphosed Gaozhou Complex (Yunkai Massif), South China: Emphasis On the In-Situ EMP Monazite Dating. *Lithos*, 144: 109—129. doi: 10.1016/j.lithos.2012.04.009
- Chen, F. W., Li, H. Q., Mei, Y. P., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Chronology of Diagenetic Mineralization of the Longtoushan Porphyry Gold Orefield, Gui County, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 921—926 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. F., Zhou, T. X., Yin, C. S., et al., 1991. ⁴⁰Ar-³⁹Ar Dating of Several Mesozoic Plutons in Southeastern Zhejiang Province. *Acta Petrologica Sinica*, 7(3): 37—44 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Mo, C. S., Huang, Z. Z., et al., 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of Granitoid Rocks and Molybdenite Re-Os Age of Shedong W-Mo Deposit in Cangwu County of Guangxi and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 30(6): 963—978 (in Chinese with English abstract).
- Chen, P. R., Zhou, X. M., Zhang, W. L., et al., 2005. Petrogenesis and Significance of Early Yanshanian Syenite-Granite Complex in Eastern Nanling Range. *Science in China (Series D)*, 48(7): 912—924.
- Cherniak, D. J., Watson, E. B., 2001. Pb Diffusion in Zircon. *Chemical Geology*, 172(1—2): 5—24. doi: 10.1016/S0009—2541(00)00233—3
- Deng, X. G., Chen, Z. G., Li, X. H., et al., 2004. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of the Darongshan-Shiwandashan Granitoid Belt in Southeastern Guangxi, China. *Geological Review*, 50(4): 426—432 (in Chinese with English abstract).
- Dong, C. W., Xu, X. S., Yan, Q., et al., 2007. A New Case of Late Mesozoic Crust-Mantle Interaction in Eastern Zhejiang: Geochronology and Geochemistry of the Ru'ao Diabase-Granite Composite Intrusions. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1303—1312 (in Chinese with English abstract).
- Dong, C. W., Zhou, X. M., Li, H. M., et al., 1997. Late Mesozoic Crust-Mantle Interaction in Southeastern Fujian. *Chinese Science Bulletin*, 42(6): 495—498. doi: 10.1007/BF02882602
- Fu, Q., Ge, W. S., Wen, C. S., et al., 2011. Geochemistry and Genesis of Michang Granites and Their Dark Microgranular Enclaves in Guangxi. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(3): 293—303 (in Chinese with English abstract).
- Ge, T. M., Liu, J., Fan, L. M., et al., 1994. Magnetostratigraphy of the Red Beds in Hengyang Basin. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 379—388 (in Chinese with English abstract).
- Ge, X. Y., Li, X. H., Zhou, H. W., 2003. Geochronologic, Geochemistry and Sr-Nd Isotopes of the Late Cretaceous Mafic Dike Swarms in Southern Hainan Island. *Geochimica*, 32(1): 11—20 (in Chinese with English abstract).
- Geng, H. Y., Xu, X. S., O'Reilly, S. Y., et al., 2006. Cretaceous Volcanic-Intrusive Magmatism in Western Guangdong and Its Geological Significance. *Science in China (Series D)*, 49(7): 696—713. doi: 10.1007/s11430—006—0696—7
- Geology Survey Team of Guangxi Regzonal, 1986. Reports on 1: 50 000 Regional Geological Surveys of Yulin, Longsheng, Shatian, Michang. Guangxi Regzonal Geology Survey Team, Nanning (in Chinese).
- Gilder, S. A., Gill, J., Coe, R. S., et al., 1996. Isotopic and Paleomagnetic Constraints on the Mesozoic Tectonic Evolution of South China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B7): 16137—16154. doi: 10.1029/96JB00662
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—

147. doi:10.1016/S0016-7037(99)00343-9
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China; In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61 (3-4): 237-269. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00082-8
- Guo, F., Fan, W. M., Li, C. W., et al., 2012. Multi-Stage Crust-Mantle Interaction in SE China; Temporal, Thermal and Compositional Constraints from the Mesozoic Felsic Volcanic Rocks in Eastern Guangdong-Fujian Provinces. *Lithos*, 150: 62-84. doi: 10.1016/j.lithos.2011.12.009
- Horn, I., Rudnick, R. L., McDonough, W. F., 2000. Precise Elemental and Isotope Ratio Determination by Simultaneous Solution Nebulization and Laser Ablation-ICP-MS; Application to U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 164 (3-4): 281-301. doi: 10.1016/S0009-2541(99)00168-0
- Hu, Z. C., Gao, S., Liu, Y. S., et al., 2008a. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23 (8): 1093-1101. doi: 10.1039/B804760J
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2008b. A Local Aerosol Extraction Strategy for the Determination of the Aerosol Composition in Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23 (9): 1192-1203. doi: 10.1039/b803934h
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012a. Improved In Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27 (9): 1391-1399. doi: 10.1039/C2JA30078H
- Hu, Z. C., Liu, Y. S., Gao, S., et al., 2012b. A "Wire" Signal Smoothing Device for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50-57. doi: 10.1016/j.sab.2012.09.007
- Ireland, T. R., Williams, I. S., 2003. Considerations in Zircon Geochronology by SIMS. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 215-241. doi: 10.2113/0530215
- Kemp, A. I. S., Hawkesworth, C. J., Foster, G. L., et al., 2007. Magmatic and Crustal Differentiation History of Granitic Rocks from Hf-O Isotopes in Zircon. *Science*, 315(5814): 980-983. doi: 10.1126/science.1136154
- Kemp, A. I. S., Wormald, R. J., Whitehouse, M. J., et al., 2005. Hf Isotopes in Zircon Reveal Contrasting Sources and Crystallization Histories for Alkaline to Peralkaline Granites of Temora, Southeastern Australia. *Geology*, 33(10): 797-800. doi: 10.1130/G21706.1
- Kinny, P. D., Maas, R., 2003. Lu-Hf and Sm-Nd Isotope Systems in Zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327-341. doi: 10.2113/?0530327
- Li, C. Y., Zhang, H., Wang, F. Y., et al., 2012. The Formation of the Dabaoshan Porphyry Molybdenum Deposit Induced by Slab Rollback. *Lithos*, 150 (si): 101-110. doi: 10.1016/j.lithos.2012.04.001
- Li, Q., Duan, R. C., Ling, W. L., et al., 2009. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of the Early Paleozoic Strata in Eastern Guangxi and Its Constraint on the Caledonian Tectonic Nature of the Cathaysian Continental Block. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 189-202 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293-305. doi: 10.1016/S1367-9120(99)00060-7
- Li, X. H., Hu, R. Z., Rao, B., 1997. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous Mafic Dikes from Northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26 (2): 14-31 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., Wang, X. C., et al., 2010a. SIMS U-Pb Zircon Geochronology of Porphyry Cu-Au-(Mo) Deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, Eastern China; Magmatic Response to Early Cretaceous Lithospheric Extension. *Lithos*, 119 (3-4): 427-438. doi: 10.1016/j.lithos.2010.07.018
- Li, X. H., Long, W. G., Li, Q. L., et al., 2010b. Penglai Zircon Megacrysts: A Potential New Working Reference Material for Microbeam Determination of Hf-O Isotopes and U-Pb Age. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(2): 117-134. doi: 10.1111/j.1751-908X.2010.00036.x
- Li, Y. J., Wei, J. H., Yao, C. L., et al., 2009. Zircon U-Pb Dating and Tectonic Significance of the Shipingchuan Granite in Southeastern Zhejiang Province, SE China. *Geological Review*, 55(5): 673-684 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Qiu, J. S., Xu, X. S., 2012. Geochronological, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Petrogenesis of Late Mesozoic Gabbro-Granite Complexes on the Southeast Coast of Fujian, South China; Insights in-

- to a Depleted Mantle Source Region and Crust-Mantle Interactions. *Geological Magazine*, 149(3): 459—482. doi:10.1017/S0016756811000793
- 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
- Li, Z. X., Li, X. H., Wartho, J., et al., 2010. Magmatic and Metamorphic Events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, Southeastern South China: New Age Constraints and Pressure-Temperature Conditions. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5—6): 772—793. doi:10.1130/B30021.1
- Liang, T., Wang, D. H., Hou, K. J., et al., 2011. LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Longxianggai Pluton in Dachang of Guangxi and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1624—1636 (in Chinese with English abstract).
- Ling, H. F., Shen, W. Z., Sun, T., et al., 2006. Genesis and Source Characteristics of 22 Yanshanian Granites in Guangdong Province: Study of Element and Nd-Sr Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2687—2703 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R., Zhou, H. W., Zhang, L., et al., 2010. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions of the Mayuan Migmatite Complex, NW Fujian Province, Southeast China: Constraints on the Timing and Nature of a Regional Tectonothermal Event Associated with the Caledonian Orogeny. *Lithos*, 119(3—4): 163—180. doi:10.1016/j.lithos.2010.06.004
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010a. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In-situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010b. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535—1546. doi:10.1007/s11434—010—3052—4
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, 4: 1—71.
- Mao, J. W., Chen, M. H., Yuan, S. D., et al., 2011. Geological Characteristics of the Qinhang (Or Shihang) Metallogenic Belt in South China and Spatial-Temporal Distribution Regularity of Mineral Deposits. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636—658 (in Chinese with English abstract).
- Martin, H., Bonin, B., Capdevila, R., et al., 1994. The Kuiqi Peralkaline Granitic Complex (SE China): Petrology and Geochemistry. *Journal of Petrology*, 35(4): 983—1015. doi:10.1093/petrology/35.4.983
- Peng, S. B., Jin, Z. M., Fu, J. M., et al., 2006. The Geochemical Evidences and Tectonic Significance of Neoproterozoic Ophiolite in Yunkai Area, Western Guangdong Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 814—825 (in Chinese with English abstract).
- Qi, C. S., Deng, X. G., Li, W. X., et al., 2007. Origin of the Darongshan-Shiwandashan S-Type Granitoid Belt from Southeastern Guangxi: Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 403—412 (in Chinese with English abstract).
- Qian, J. P., Chen, H. Y., Xie, B. W., et al., 2009. Regional Metallogenic Characteristics and Ore Prospecting Direction in Southeastern Guangxi. *Acta Mineralogica Sinica* (Suppl. 1): 455—457 (in Chinese).
- Qin, X. F., Pan, Y. M., Li, J., et al., 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of the Yunkai Metamorphic Complex in Southeastern Guangxi, China. *Geological Bulletin of China*, 25(5): 553—559 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., McInnes, B. I. A., 1999. Geochemistry and Petrogenesis of the I- and A-Type Composite Granite Masses in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237—246 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated L-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468—2484 (in Chinese with English abstract).
- Scherer, E., Muenker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293(5530): 683—687. doi:10.1126/science.1061372
- Segal, I., Halicz, L., Platzner, I. T., 2003. Accurate Isotope Ratio Measurements of Ytterbium by Multiple Collection Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

- Applying Erbium and Hafnium in an Improved Double External Normalization Procedure. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18(10): 1217—1223. doi: 10.1039/B307016F
- Sun, W. D., Ding, X., Hu, Y. H., et al., 2007. The Golden Transformation of the Cretaceous Plate Subduction in the West Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3—4): 533—542. doi: 10.1016/j.epsl.2007.08.021
- Tang, L. M., Chen, H. L., Dong, C. W., et al., 2010. Late Mesozoic Tectonic Extension in SE China; Evidence from the Basic Dike Swarms in Hainan Island, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1204—1216 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. L., 2009. Geological Characteristics and Ore Controlling Factors of the Songwang W-Sn-Mo Deposit in Bobai County, Guangxi. *Mineral Resources and Geology*, 23(2): 158—162 (in Chinese).
- 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, D., Zheng, J. P., Ma, Q., et al., 2013a. Early Paleozoic Crustal Anatexis in the Intraplate Wuyi-Yunkai Orogen, South China. *Lithos*, 175—176; 124—145. doi: 10.1016/j.lithos.2013.04.024
- Wang, D. Z., Shen, W. Z., 2003. Genesis of Granitoids and Crustal Evolution in Southeast China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 209—220 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. Y., Ling, M. X., Ding, X., et al., 2011. Mesozoic Large Magmatic Events and Mineralization in SE China; Oblique Subduction of the Pacific Plate. *International Geology Review*, 53(5—6): 704—726. doi: 10.1080/00206814.2010.503736
- Wang, L. J., Griffin, W. L., Yu, J. H., et al., 2010. Precambrian Crustal Evolution of the Yangtze Block Tracked by Detrital Zircons from Neoproterozoic Sedimentary Rocks. *Precambrian Research*, 177(1—2): 131—144. doi: 10.1016/j.precamres.2009.11.008
- 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 from Late-Mesozoic Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795—808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. H., 2001. Discussion of Ages of the Jiande group and the Moshishan Group in Zhejiang. *Volcanology & Mineral Resources*, 22(3): 163—169 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Guo, F., et al., 2003. 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., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013b. 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
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhao, G. C., et al., 2007. Zircon U-Pb Geochronology of Gneissic Rocks in the Yunkai Massif and Its Implications on the Caledonian Event in the South China Block. *Gondwana Research*, 12(4): 404—416. doi: 10.1016/j.gr.2006.10.003
- Wang, Y. J., Wu, C. M., Zhang, A. M., et al., 2012. Kwang-sian and Indosinian Reworking of the Eastern South China Block; Constraints on Zircon U-Pb Geochronology and Metamorphism of Amphibolites and Granulites. *Lithos*, 150: 227—242. doi: 10.1016/j.lithos.2012.04.022
- Wang, Y. J., Zhang, A. M., Fan, W. M., et al., 2011. Kwang-sian 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. *Lithos*, 127(1—2): 239—260. doi: 10.1016/j.lithos.2011.07.027
- Whitney, D. L., Evans, B. W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185—187. doi: 10.2138/am.2010.3371
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1—23. doi: 10.1111/j.1751—908X.1995.tb00147.x
- Wong, J., Sun, M., Xing, G. F., et al., 2009. Geochemical and Zircon U-Pb and Hf Isotopic Study of the Baijuehua-jian 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
- Woodhead, J., Hergt, J., Shelley, M., et al., 2004. Zircon Hf-isotope Analysis with an Excimer Laser, Depth Profiling, Ablation of Complex Geometries, and Concomitant Age Estimation. *Chemical Geology*, 209(1—2):

- 121—135. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.04.026
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F. 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49 (15): 1554—1569. doi: 10.1007/BF03184122
- Xiao, E., Qiu, J. S., Xu, X. S., et al., 2007. Geochronology and Geochemistry of the Yaokeng Alkaline Granitic Pluton in Zhejiang Province: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1431—1440 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. Q., Hu, R. Z., Jia, D. C., 2002. Geological and Geochemical Characteristics and Its Significance of Mafic Dikes from Northwest Jiangxi Province. *Geochimica*, 31(4): 329—337 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. S., Zhou, X. M., O'Reilly, Y. S., et al., 1999. Genesis of Granitoids and Crustal Evolution in Southeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 217—223 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Z. G., 2005. Geological Characteristics and Ore Controlling Factors of the Sanchachong W Deposit in Bobai County, Guangxi. *Land and Resources of Southern China*, 12: 31—34 (in Chinese).
- Yu, J. H., O'Reilly, S. Y., Wang, L. J., et al., 2008. Where was South China in the Rodinia Supercontinent? Evidence from U-Pb Geochronology and Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 164(1—2): 1—15. doi:10.1016/j.precamres.2008.03.002
- Yu, J. H., O'Reilly, S. Y. O., Wang, L. J., et al., 2010. Components and Episodic Growth of Precambrian Crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from U-Pb Ages and Hf Isotopes of Zircons in Neoproterozoic Sediments. *Precambrian Research*, 181(1—4): 97—114. doi:10.1016/j.precamres.2010.05.016
- Yu, M. G., Xing, G. F., Shen, J. L., et al., 2006. Chronologic Study on Volcanic Rocks in the Mt. Yandangshan World Geopark. *Acta Geologica Sinica*, 80(11): 1683—1690 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Dai, M. N., et al., 2008. Simultaneous Determinations of U-Pb Age, Hf Isotopes and Trace Element Compositions of Zircon by Excimer Laser-Ablation Quadrupole and Multiple-Collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1—2): 100—118. doi:10.1016/j.chemgeo.2007.10.003
- Yui, T. F., Okamoto, K., Usuki, T., et al., 2009. Late Triassic-Late Cretaceous Accretion/Subduction in the Taiwan Region along the Eastern Margin of South China—Evidence from Zircon SHRIMP Dating. *International Geology Review*, 51(4): 304—328. doi:10.1080/00206810802636369
- Zhang, D., Wu, G. G., Di, Y. J., et al., 2012. Geochronology of Diagenesis and Mineralization of the Luoyang Iron Deposit in Zhangping City, Fujian Province and Its Geological Significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(6): 1217—1231 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. F., Wang, Y. J., Zhang, A. M., et al., 2012. Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Middle Paleozoic (Kwanghsian) Massive Granites in the Eastern South China Block. *Lithos*, 150: 188—208. doi:10.1016/j.lithos.2012.03.011
- Zhong, K. B., Huang, F. Y., 2007. Geological Characteristics and Prospecting Potential of the Michang W-Mo Deposit in Luchuan County, Guangxi. *Land and Resources of Southern China*, 9: 27—31 (in Chinese).
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1): 26—33.

附中文参考文献

- 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 等, 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义. *地质论评*, 52(3): 409—414.
- 陈富文, 李华芹, 梅玉萍, 2008. 广西龙头山斑岩型金矿成矿成矿锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. *地质学报*, 82(7): 921—926.
- 陈江峰, 周泰禧, 印春生, 等, 1991. 浙东南某些中生代侵入岩体的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄测定. *岩石学报*, 7(3): 37—44.
- 陈懋弘, 莫次生, 黄智忠, 等, 2011. 广西苍梧县社洞钨钼矿床花岗岩类锆石 LA-ICP-MS 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. *矿床地质*, 30(6): 963—978.
- 邓希光, 陈志刚, 李献华, 等, 2004. 桂东南地区大容山—十万大山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. *地质论评*, 50(4): 426—432.
- 董传万, 徐夕生, 闫强, 等, 2007. 浙东晚中生代壳幔相互作用的新例证——新昌儒岙辉绿岩—花岗岩复合岩体的年代学与地球化学. *岩石学报*, 23(6): 1303—1312.
- 付强, 葛文胜, 温长顺, 等, 2011. 广西米场花岗岩及其暗色微粒包体的地球化学特征和成因分析. *地球学报*, 32(3): 293—303.
- 葛同明, 刘坚, 樊利民, 等, 1994. 衡阳盆地红层的磁性地层学研究. *地质学报*, 68(4): 379—388.
- 葛小月, 李献华, 周汉文, 2003. 琼南晚白垩世基性岩墙群的年代学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素研究. *地球化学*, 32(1): 11—20.
- 广西区域地质调查队, 1986. 玉林、隆盛、沙田、米场幅 1/5 万

- 区域地质调查报告. 南宁: 广西区域地质调查队.
- 李青, 段瑞春, 凌文黎, 等, 2009. 桂东早古生代地层碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学及其对华夏陆块加里东期构造事件性质的约束. 地球科学——中国地质大学学报, 34(1): 189—202.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰, 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. 地球化学, 21(2): 14—31.
- 李艳军, 魏俊浩, 姚春亮, 等, 2009. 浙东南石平川花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及构造意义. 地质论评, 55(5): 673—684.
- 梁婷, 王登红, 侯可军, 等, 2011. 广西大厂笼箱盖复式岩体的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 27(6): 1624—1636.
- 凌洪飞, 沈渭洲, 孙涛, 等, 2006. 广东省 22 个燕山期花岗岩的源区特征及成因: 元素及 Nd-Sr 同位素研究. 岩石学报, 22(11): 2687—2703.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等, 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85(5): 636—658.
- 彭松柏, 金振民, 付建明, 等, 2006. 云开地区新元古代蛇绿岩的地球化学证据及其构造意义. 地质学报, 80(6): 814—825.
- 祁昌实, 邓希光, 李武显, 等, 2007. 桂东南大容山—十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 23(2): 403—412.
- 钱建平, 陈宏毅, 谢彪武, 等, 2009. 桂东南地区区域成矿特征和找矿方向. 矿物学报, (增刊 1): 455—457.
- 邱检生, 王德滋, McInnes, B. I. A., 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.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 等, 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(11): 2468—2484.
- 覃小锋, 潘元明, 李江, 等, 2006. 桂东南云开地区变质杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学. 地质通报, 25(5): 553—559.
- 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等, 2010. 中国东南部晚中生代构造伸展作用——来自海南岛基性岩墙群的证据. 岩石学报, 26(4): 1204—1216.
- 唐应亮, 2009. 广西博白县松旺钨锡钼矿床地质特征及控矿因素分析. 矿产与地质, 23(2): 158—162.
- 汪庆华, 2001. 试论浙江建德群和磨石山群时代. 火山地质与矿产, 22(3): 163—169.
- 王德滋, 沈渭洲, 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地质前缘, 10(3): 209—220.
- 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.
- 肖娥, 邱检生, 徐夕生, 等, 2007. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义. 岩石学报, 23(6): 1431—1440.
- 谢桂青, 胡瑞忠, 贾大成, 2002. 赣西北基性岩脉的地质地球化学特征及其意义. 地球化学, 31(4): 329—337.
- 徐夕生, 周新民, O'Reilly, Y. S., 等, 1999. 中国东南部下地壳物质与花岗岩成因探索. 岩石学报, 15(2): 217—223.
- 叶振广, 2005. 广西博白县三叉冲钨矿床地质特征及控矿因素. 南方国土资源, 12: 31—34.
- 余明刚, 邢光福, 沈加林, 等, 2006. 雁荡山世界地质公园火山岩年代学研究. 地质学报, 80(11): 1683—1690.
- 张达, 吴淦国, 狄永军, 等, 2012. 福建漳平洛阳铁矿床成岩成矿年代学及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 37(6): 1217—1231.
- 钟卡彬, 黄芳燕, 2007. 广西陆川县米场钨钼矿床地质特征及找矿前景. 南方国土资源, 9: 27—31.