

广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义

谭俊¹, 魏俊浩¹, 李水如^{1,2}, 王忠铭³, 付乐兵¹, 张可清¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 广西地质勘查总院, 广西南宁 530023

3. 山东鑫泰黄金矿业有限责任公司, 山东烟台 265147

摘要: 昆仑关岩体位于广西南丹—昆仑关燕山期花岗岩带西南端, 岩石类型为黑云母花岗岩。岩相学及化学成分显示其属高钾钙碱性岩系, 具高硅、富碱和铝、低磷和钛的特点, SiO_2 含量为 68.13%~72.61%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于 1.28~1.69 之间, 铝指数 $\text{A}/\text{CNK}=0.72\sim 1.28$, 属准铝质—强过铝质岩石。富集 Ga、Rb、Th、U、Pb 等元素, 而强烈亏损 Ba、Nb、Sr、P 和 Ti。稀土元素具明显负 Eu 异常, 总体呈现轻稀土富集的右倾“V”形配分模式。昆仑关古民单元锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 93 ± 1 Ma, 形成于晚白垩世。矿物组成及地球化学特征确定了南丹—昆仑关花岗岩带是华南西南端一条重要的铝质 A 型花岗岩带, 控岩断裂构造为 NW 向南丹—昆仑关深大断裂。岩石学及主量和微量元素(含稀土)特征表明岩体位于后碰撞阶段的张性构造环境。结合研究范围在晚白垩世的构造背景及区域应力场匹配组合关系, 认为其与印度板块在该时期北移所引起的古太平洋板块高角度俯冲所导致的弧后拉张有关, 与浙闽沿海 A 型花岗岩或碱性岩分别代表了匹配构造体制下的两条 A 型花岗岩带。

关键词: A 型花岗岩; 锆石 LA-ICP-MS 定年; 后碰撞; 印度板块; 大明山; 华南。

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2008)06-0743-12

收稿日期: 2008-04-25

Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Kunlungran A-Type Granite, Guangxi

TAN Jun¹, WEI Jun-hao¹, LI Shui-ru^{1,2}, WANG Zhong-ming³, FU Le-bing¹, ZHANG Ke-qing¹

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

2. Guangxi Geological Survey Institute, Nanning 530023, China

3. Xintai Gold Mining Industry Co., Ltd., Yantai 265147, China

Abstract: Kunlungran pluton, located in the southwest part of the Nandan-Kunlungran granite belt, Guangxi, is mainly composed of biotite granite. Petrography and chemical compositions show that it belongs to high-K calc-alkaline series characterized by high silicon, is enriched in alkali and aluminum but depleted in phosphorus and titanium. Its SiO_2 contents range from 68.13% to 72.61%, while $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios and A/CNK values vary from 1.28 to 1.69 and 0.72 to 1.28 respectively, ascribed to a suite of metaluminous to intensively peraluminous rock. Ga, Rb, Th, U and Pb elements are enriched in the intrusion while Ba, Nb, Sr, P and Ti depleted. REE is characterized by obvious negative anomalies with $\text{Eu}/\text{Eu}^* 0.53\sim 0.73$ and exhibits right-dipping “V” patterns with LREE enrichment. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 93 ± 1 Ma ($\text{MSDW}=1.7$) for the Gumin unit of the pluton, implying its Late Cretaceous intrusion time. Mineralogy and geochemistry confirm that the Nandan-Kunlungran granite belt is an important aluminous A-type granite belt in the South China, controlled by northwestward Nandan-Kunlungran deep fault. Petrology, major and trace element features display that the pluton intruded in a post-collisional extensive tectonic setting. These results, combined with Late Cretaceous tectonic environment and regional stress field matching relationship in the studied area, indicate the A-type granite action is due to back-arc extension related to high angle subduction of the ancient Pacific plate which is caused by In-

dian plate northward movement. This granite belt and those granite or alkaline rocks in the coastal areas of Zhejiang-Fujian provinces represent the two A-type granite belts under a matching tectonic system.

Key words: A-type granite; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; post-collision; Indian plate; Damingshan; South China.

A 型花岗岩是华南中生代岩浆活动的重要组成部分,从侏罗纪至白垩纪均有广泛分布,其特殊的地球动力学指示意义一直是地质学界关注的焦点(Martin *et al.*, 1994; 王德滋等, 1995; 吴才来等, 1998; 邱检生等, 1999, 2000; Chen *et al.*, 2002; 王强等, 2005). 已报道的该地区晚白垩世 A 型花岗岩主要集中在浙闽沿海政和—大埔断裂以东范围, 形成时间为 86~101 Ma(吴才来等, 1998; 邱检生等, 1999, 2000; 王强等, 2005). 在华南腹地虽有零星分布, 如安徽茅坦(吴才来等, 1998)、浙江大和山、福建大沅村(王强等, 2005)等, 但也主要出现在华南东北地区, 西南端未见独立论文发表. 这从某种程度上也导致了华南晚中生代(特别是晚白垩世)构造演化的认识分歧(Beck *et al.*, 1995; 王德滋等, 1995; Gilder *et al.*, 1996; Lapierre *et al.*, 1997; 舒良树和周新民, 2002). 此外, 研究范围南丹—昆仑关也是南岭西南端重要的锡—钨—铜—铅—锌多金属成矿带和

花岗岩带, 长 300 多公里, 除南丹地区大厂和芒场矿田花岗岩有较高研究程度外(蔡明海等, 2004, 2006), 大明山昆仑关地区以往研究侧重于矿床学方面(陈志中等, 1986; 李水如等, 2007), 迄今没有对岩浆岩做过系统的研究. 为此, 本文首次开展了对昆仑关岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩石地球化学分析, 结合南丹地区花岗岩已发表数据, 探讨了该条花岗岩带的岩石成因类型及侵位背景, 以期对华南晚中生代构造演化提供制约.

1 地质背景和岩相学特征

研究区(大明山矿集区)位于广西南宁北东约 80 km, 为南岭多金属成矿省西南端的重要组成部分, 地处古特提斯构造域和太平洋构造域的复合部位, 构造位置特殊(陈洪德等, 1989; 崔彬等, 2000)(图 1). 地层除志留和侏罗系缺失外, 从寒武系至第

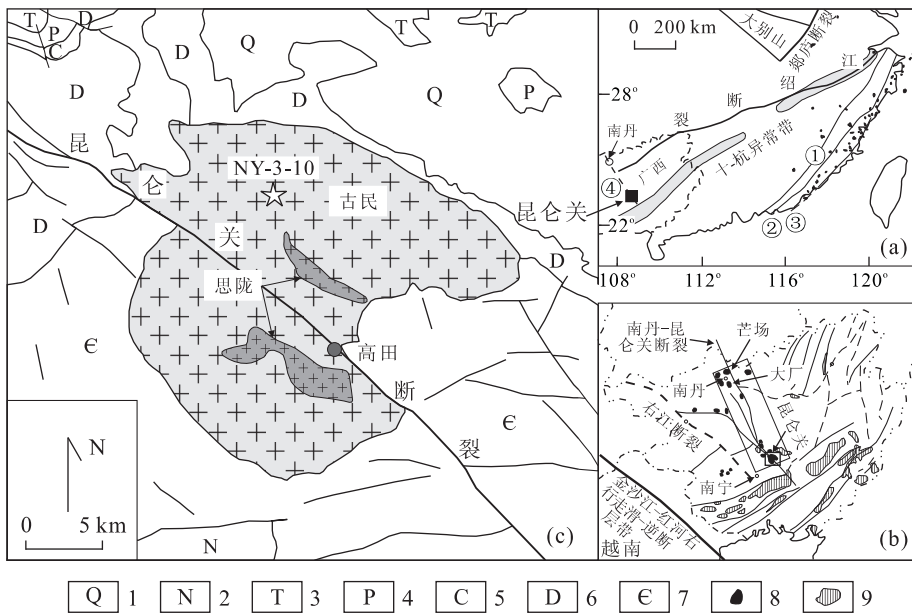


图 1 广西南丹—昆仑关地区大地构造位置图(a)、广西构造略图(b)及昆仑关岩体地质图(c)

Fig. 1 Sketch maps showing tectonic location of Nandan-Kunlun belt, Guangxi (a), simplified tectonic of Guangxi (b), and geological character of Kunlun intrusion (c)

底图分别据王强等(2005)、广西壮族自治区区域地质测量队(1972)以及广西有色金属地质研究所(1993)改编. a. 图中断裂编号依次为: ①政和—大埔断裂; ②福安—南靖断裂; ③长乐—南澳断裂; ④南丹—昆仑关断裂. b. 图中斜矩形示南丹—昆仑关铝质 A 型花岗岩带. c. 奥陶系及白垩系地层位于图幅外. 1. 第四系; 2. 第三系; 3. 三叠系; 4. 二叠系; 5. 石炭系; 6. 泥盆系; 7. 寒武系; 8. 晚白垩世 A 型花岗岩或碱性岩; 9. 晚白垩世断陷盆地

四系均有出露. 构造以 NW 向为主, 典型的有大明山背斜及南丹—昆仑关区域性深大断裂, 次为北东向及近南北向. 断裂性质复杂, 多期活动, 以逆断层为主, 正断层次之, 倾向多为 SW, 兼有张扭及压扭性特点. 区内岩浆活动以燕山期中酸性侵入岩为主, 沿大明山背斜核部及两翼呈北西向带状分布, 与成矿关系密切, 位于南丹—昆仑关花岗岩带东南端(图 1b). 大厂矿田花岗岩已有高精度锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 形成于 91~93 Ma(蔡明海等, 2006), 与成矿年龄(94~95 Ma)一致(王登红等, 2004; 蔡明海等, 2005). 大明山地区花岗岩侵位时代目前还没有可靠同位素年龄的报道.

昆仑关岩体分布于大明山背斜南东端, 由古民(主体)和思陇(补体)两个单元组成, 呈等轴状北西向展布, 为小型岩基, 出露面积约 82 km²(图 1c). 古民单元岩性以中—粗粒斑状黑云母花岗岩为主, 兼有中—细粒斑状黑云母花岗岩, 局部地段为中粒、中—粗粒黑云母花岗岩, 不同岩石类型间呈渐变关系. 主要造岩矿物特征: 石英以他形为主, 粒径 0.4~2.5 mm, 有些颗粒见波状消光, 含量约 25%~35%; 斜长石多为半自形—自形板状, 粒径 0.6~3.0 mm, 普遍发育聚片双晶和环带结构, 偶见卡氏双晶, 约 20%~30%; 碱性长石以正长石为主, 粒径为 1.0~3.2 mm, 也出现正长条纹长石, 主晶为正长石, 偶见卡氏双晶, 条纹为钠长石且见细小聚片双晶, 含量 35%~45%; 黑云母多呈自形状, 约 2%~5%. 副矿物有磷灰石、磁铁矿、锆石、榍石及褐帘石; 出现少量白云母, 发育有蠕虫结构, 矿物组成与浙闽

沿海晚白垩世铝质 A 型花岗岩相似(邱检生等, 2000). 思陇单元为细粒斑状黑云母花岗岩及细粒黑云母花岗岩, 矿物组成与古民单元类似, 粒径集中在 0.4~2.5 mm. 岩相学特征与南丹地区大厂和芒场矿田黑云母花岗岩类似(蔡明海等, 2004).

2 岩石地球化学特征

昆仑关黑云母花岗岩主量和微量元素(含稀土)分析结果表明, 古民和思陇单元主量元素组成一致, 总体高硅、富碱和铝、低磷和钛, SiO₂ 变化范围为 68.13%~72.61%, (Na₂O+K₂O) 为 5.98%~7.99% (除轻微云英岩化的 GT-1 样品), K₂O/Na₂O=1.28~1.69, 在 Middlemost (1994) 全碱—SiO₂ 图解上落在花岗岩—花岗闪长岩区域交界处, 属亚碱性系列(图 2a, 表 1). SiO₂-K₂O 图解显示, 投影点位于高钾钙碱性岩系范围(图 2b). 岩体普遍高 Al₂O₃ (12.73%~15.19%), 铝指数 A/CNK=0.72~1.28, 属准铝质—强过铝质, 与部分样品中出现白云母吻合. P₂O₅ 含量为 0.12%~0.20%, 随 SiO₂ 增加而降低, 与磷灰石在准铝质/弱过铝质岩浆中溶解度低有关(Li *et al.*, 2007). TiO₂ 为 0.29%~0.59%, 略低. FeO^T (FeO+0.9×Fe₂O₃) 含量为 2.41%~6.18%, MgO 为 0.50%~1.60%, FeO^T/MgO 比值集中在 2.54~7.43, 氧化指数(W 值)变化于 0.18~0.62. CIPW 标准矿物计算显示部分样品出现了刚玉分子, 碱性长石含量要明显高于钙长石. 同期南丹地区花岗岩也表现出与

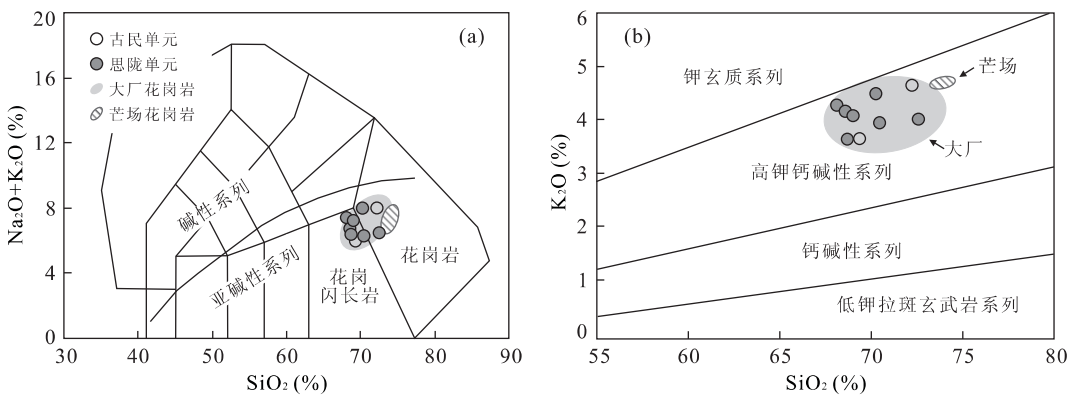


图 2 昆仑关岩体的全碱—SiO₂ (即 TAS) 岩石分类图解(a)和 K₂O—SiO₂ 图解(b)

Fig. 2 TAS classification (a) and K₂O—SiO₂ diagram (b) of Kunlun intrusion

碱性与亚碱性系列划分曲线据 Irvine and Baragar(1971); 岩系划分据 Peccerillo and Taylor(1976); 南丹地区大厂(6 个样品)和芒场(2 个样品)矿田同时代黑云母花岗岩阴影投影范围据蔡明海等(2004)确定

表 1 昆仑关岩体主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果
Table 1 Major and trace element compositions of Kunlunquan intrusion

单元	古民						思陇			
样品号	NY-3-11	NY-3-13	GT-1	六(3)GS2*	六(5)GS1*	六(3)GS1*	D7077GS*	D7058GS*	GT-4	六(4)GS*
SiO ₂	70.23	68.13	61.42	70.48	68.68	72.61	69.05	68.54	72.23	69.37
TiO ₂	0.50	0.39	0.32	0.44	0.47	0.29	0.40	0.45	0.38	0.59
Al ₂ O ₃	13.75	12.73	17.56	14.80	14.87	14.55	15.09	15.19	13.35	15.02
Fe ₂ O ₃	0.90	2.01	2.94	2.38	2.43	1.66	3.24	3.67	0.45	3.43
FeO	2.03	2.26	3.52	2.14	2.19	1.49	2.06	2.22	2.00	3.09
MnO	0.05	0.09	0.07	0.11	0.10	0.10	0.08	0.06	0.05	0.18
MgO	1.12	1.17	0.83	1.44	1.60	0.63	1.37	0.50	0.84	1.35
CaO	2.21	3.81	0.48	2.00	2.67	1.60	1.97	1.01	1.72	2.47
Na ₂ O	3.50	3.17	0.69	2.33	2.76	2.51	3.13	2.63	3.33	2.36
K ₂ O	4.49	4.26	5.27	3.94	3.62	4.00	4.07	4.16	4.63	3.62
P ₂ O ₅	0.18	0.17	0.14	0.18	0.20	0.12	0.20	0.20	0.13	0.18
烧失量	0.51	1.20	5.62	0.48	0.34	0.48	—	—	0.30	0.34
总量	99.47	99.38	98.86	100.72	100.03	100.04	100.66	99.64	99.41	101.99
A/CNK	0.94	0.98	2.27	1.26	1.12	1.28	1.15	1.42	0.76	1.22
Ga	34.50	27.80	51.90						28.80	
Rb	235.00	199.00	690.00						232.00	
Sr	370.50	266.10	41.60						231.70	
Y	27.95	21.05	25.16		28.12	28.90			23.17	33.02
Zr	168.10	69.60	117.20						86.50	
Nb	20.90	16.20	9.40						16.90	
Ba	414.00	406.00	402.00						383.00	
La	57.01	52.19	43.53		59.80	56.10			46.39	66.39
Ce	110.00	100.20	88.28		110.00	106.00			88.35	129.00
Pr	12.93	11.03	10.43		12.92	12.51			10.04	15.50
Nd	48.17	39.91	38.94		45.74	47.95			36.92	52.81
Sm	8.28	6.66	6.93		7.01	7.23			6.57	8.33
Eu	1.52	1.20	1.26		1.65	1.28			1.11	1.81
Gd	7.23	5.82	6.20		6.68	6.91			5.88	8.09
Tb	1.02	0.79	0.90		0.74	0.88			0.83	1.07
Dy	5.56	4.11	4.87		4.92	47.60			4.42	6.04
Ho	1.03	0.75	0.88		0.95	0.87			0.81	1.17
Er	2.93	2.07	2.42		2.62	2.19			2.34	3.24
Tm	0.44	0.29	0.34		0.31	0.07			0.34	0.40
Yb	2.83	1.91	2.07		2.60	2.13			2.23	2.85
Lu	0.42	0.30	0.31		0.41	0.34			0.33	0.44
Hf	5.40	2.83	4.01						3.30	
Ta	2.49	1.86	1.20						2.22	
Pb	46.60	88.60	13.00						34.20	
Th	28.58	27.90	23.03						26.33	
U	7.38	6.63	11.44						8.05	
ΣREE	259.37	227.23	207.36		256.35	249.15			206.56	297.14
Eu/Eu*	0.59	0.58	0.58		0.73	0.55			0.53	0.67

主量和微量元素均在桂林矿产地质研究院分析测试中心分别采用湿化学法和 ICP-MS 测试;标注* 样品数据引自广西壮族自治区地质矿产局 1992 年区域地质调查(1:5 万)报告;A/CNK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O+CaO)分子比。

昆仑关岩体极为相似的化学成分组成(图 2)(蔡明海等,2004)。

古民和思陇单元微量元素分布模式一致,在相对原始地幔标准化蛛网图上,均表现出明显的 Rb、Th、U、Pb 正异常和 Ba、Nb、Sr、P 和 Ti 负异常(图

3a)。其 10^4 Ga/Al 比值为 4.08~5.58,比 A 型花岗岩平均值 3.75 高(Whalen *et al.*, 1987),与大厂和芒场黑云母花岗岩同属于 A 型花岗岩(图 4),微量元素显示铝质 A 型花岗岩的特征(图 3a)(邱检生等,2000)。稀土元素总量(ΣREE)为(206.56~

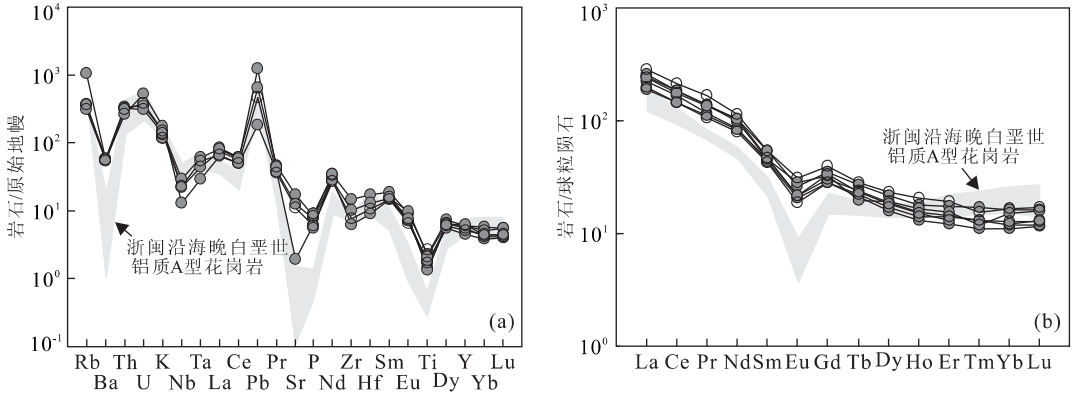


图 3 昆仑关岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土配分曲线(b)

Fig. 3 Primitive mantle normalized trace element distributions (a) and chondrite normalized REE patterns (b) 原始地幔和球粒陨石标准据 Sun and McDonough(1989);浙闽沿海晚白垩世铝质 A 型花岗岩据邱检生等(1999, 2000),共 11 个样品点;图例同图 2,下同

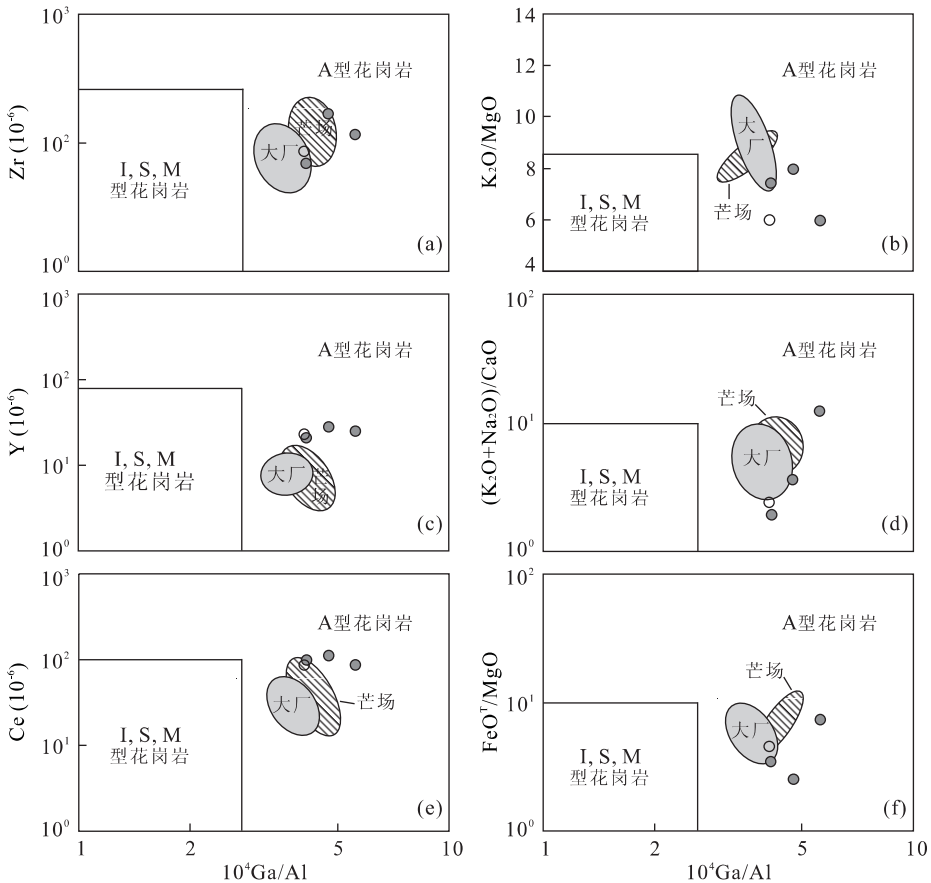


图 4 昆仑关岩体 A 型花岗岩判别图解

Fig. 4 A-type granite discrimination diagram of Kunlun granite

S,I,M 与 A 型花岗岩划分据 Whalen *et al.* (1987);南丹地区大厂(4 个样品)和芒场(4 个样品)矿田花岗岩数据据蔡明海等(2004)

$297.14) \times 10^{-6}$, 轻重稀土分异较明显, $LREE/HREE = 10.53 \sim 13.17$, $(La/Yb)_N = 14.45 \sim 19.60$. Eu/Eu^* 为 $0.53 \sim 0.73$ (表 1), 具明显负铕异常, 呈现轻稀土富集的右倾“V”形配分模式(图 3b).

$(Gd/Yb)_N = 2.11 \sim 2.68$, 表明重稀土分馏程度较高. 除 LREE 略富集和 HREE 略低外, 与浙闽沿海晚白垩世铝质 A 型花岗岩分布曲线类似(图 3b), 差

异可能主要与岩浆演化过程不同有关(邱检生等, 2000).

3 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学

3.1 分析方法

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年样品采自古民单元(NY-3-10; 108° 40' 16" E, 23° 10' 32" N, 海拔 275 m). 锆石样品破碎和挑选由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成. 将锆石样品置于环氧树脂中, 然后磨蚀和抛光至锆石核心出露. 阴极发光(CL)显微照像在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针室 JXA8100 电子探针仪上完成. 实验条件: 加速电压 15 kV, 电流 20 nA. 锆石原位微区测试在 GPMR 激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪器上完成, 激光束斑直径为 32 μm , 实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气. U-Th-Pb 同位素组成分析以锆石 91500 作为外标, NIST610 作为内标, 稀土元素以锆石 91500 作为外标, ^{29}Si 作为内标, 详细分析流程和原理参见文献(Yuan *et al.*, 2004). 实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正, 以扣除普通 Pb 的影响. 采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 其加权平均值的误差为 2σ .

3.2 分析结果

古民黑云母花岗岩中锆石多为浅黄色, 次为无色, 颗粒以长柱状为主, 也见棱角状及不规则状, 粒长通常在 80~220 μm , 个别可达 400 μm (如 NY-3-10-1). CL 图像显示其发育典型岩浆成因的生长振荡环带, 基本无增生边(图 5). 部分锆石环带宽或不明显(如 NY-3-10-3), 可能与结晶时岩浆的温度较高有关(Wu and Zheng, 2004).

所测锆石 U 和 Th 含量分别为 $(263.74 \sim 5338.51) \times 10^{-6}$ 和 $(127.46 \sim 1176.98) \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.15~1.47(表 2), 明显大于变质锆石 Th/U 比值(<0.1) (Hoskin and Black, 2000; Griffin *et al.*, 2004), 表明其岩浆成因. 此外, 锆石稀土元素球粒陨石标准化模式图总体显示 HREE 富集、LREE 亏损和 Ce 正异常的特点(表 3). 5、7、9、14 和 16 号测点 LREE 相对富集, 而 HREE 与其余锆石测点一致(NY-3-10-X), 估计与后期地质事件扰动时 LREE 优先进入锆石晶格有关(Wu and Zheng, 2004), CL 图像也显示有后期的干扰. 但总

体岩浆锆石 HREE 并未出现亏损的现象, 不同于源区存在榴辉岩相锆石的稀土元素组成(Wu and Zheng, 2004; Chen *et al.*, 2007).

样品中锆石有 12 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(91 \pm 1) \sim (95 \pm 1)$ Ma(表 2), 除 3 和 5 号测点 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 偏高外, 其余分析点成群分布在一致曲线上及附近, 构成非常集中的锆石群(图 6). 去掉 7、9、14 和 16 号点外的 12 粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值为 93 ± 1 Ma (MSDW=1.7), 代表了古民花岗岩的侵位年龄.

4 讨论

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析表明, 昆仑关 A 型花岗岩主体形成于 93 ± 1 Ma, 与同构造带上大厂矿田含斑黑云母花岗岩形成时间(93 ± 1 Ma)完全一致(蔡明海等, 2006), 均属于晚白垩世岩浆活动产物. 根据前人对华南中生代花岗岩的研究, 该时期 A 型花岗岩主要分布在浙闽沿海地区, 形成时代集中在 86~101 Ma(吴才来等, 1998; 邱检生等, 1999, 2000; 王强等, 2005), 为一套铝质 A 型花岗岩或碱性岩(邱检生等, 2000; 王强等, 2005). 南丹—昆仑关花岗岩带在岩相特征、化学成分(图 2)及微量元素组成(含稀土)(图 3, 4)上均表现为铝质 A 型花岗岩的特点, 其产出表明晚白垩世 A 型花岗岩在华南西南端也有较强分布. 但断裂构造对岩体侵位的控制上有所区别, 浙闽沿海岩体定位多沿 NE 向与其他方向(NW 为主)断裂的交汇部位, 而南丹—昆仑关花岗岩控岩构造主体为 NW 向, 表明桂中南—西北段可能存在另外一条重要的 A 型花岗岩带(图 1b). 二者岩浆的源岩物质成分是否也存在明显差别, 有待进一步研究.

近年研究表明, 华南中生代经历过多阶段伸展活动, 岩石圈引张裂解可能始于早侏罗世(约 190 Ma)(吴淦国等, 2000; Ding *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2007). 区内 A 型花岗岩的产出是岩石圈阶段性张性活动的重要指示, 具有特殊的地球动力学意义(王强等, 2005). 晚白垩世浙闽沿海受古太平洋板块高角度俯冲的影响(100 Ma 左右), 处于一种弧后拉张的构造环境(Maruyama and Seno, 1986; Geng *et al.*, 2006), 形成了福建新村(92 Ma)、金刚山(92 Ma)、乌山(95 Ma)(邱检生等, 2000)、魁歧(95 Ma)及浙江青田(101 Ma)(邱检生等, 1999)、普陀山(

表 3 昆仑关岩体古民单元(NY-3-10)锆石稀土元素分析结果

Table 3 Zircon trace element compositions for Gumin unit (NY-3-10), Kunlun intrusion

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Eu/Eu*	Ce/Ce*
NY-3-10-1	0.03	43.65	0.18	2.97	7.49	1.45	40.84	13.93	154.72	57.70	247.47	51.31	485.08	84.24	0.20	69.41
NY-3-10-2	—	51.75	0.06	1.53	3.96	0.84	22.87	9.05	109.06	45.16	216.39	51.29	541.27	103.31	0.21	
NY-3-10-3	0.52	29.79	0.28	2.22	2.30	0.50	13.04	4.99	64.69	28.00	138.63	34.65	391.24	75.95	0.22	19.15
NY-3-10-4	—	42.26	0.20	3.26	6.18	1.73	28.91	10.32	119.62	46.66	214.36	49.43	508.01	94.57	0.33	
NY-3-10-5	13.28	87.98	7.70	41.97	13.54	3.08	48.38	22.57	319.87	134.20	678.88	166.12	1737.15	15313.99	0.33	2.10
NY-3-10-6	0.14	22.51	0.15	1.10	2.03	0.58	12.28	5.29	74.44	34.51	188.21	49.66	574.29	120.59	0.27	33.01
NY-3-10-7	26.30	120.51	10.74	56.20	22.75	6.14	45.99	13.35	140.51	51.77	232.48	52.01	529.86	96.87	0.57	1.76
NY-3-10-8	—	29.34	0.09	1.08	3.05	1.13	17.65	6.80	84.82	35.42	177.82	42.33	450.68	88.45	0.37	
NY-3-10-9	16.39	32.90	2.41	9.98	3.71	1.02	10.14	3.37	40.22	15.51	74.77	17.81	185.88	36.09	0.48	1.14
NY-3-10-10	—	43.90	0.12	2.20	4.37	1.35	22.55	7.95	97.89	38.45	181.58	41.45	427.61	79.90	0.34	
NY-3-10-11	—	77.18	0.09	1.80	4.36	1.17	21.32	7.44	88.24	34.83	166.46	38.45	389.11	74.27	0.31	
NY-3-10-12	0.09	37.06	0.05	0.98	2.11	0.52	12.88	5.07	64.16	26.60	133.74	33.14	362.23	72.27	0.23	132.58
NY-3-10-13	—	36.95	0.05	1.49	4.54	0.93	22.33	8.20	98.67	38.51	177.61	40.60	415.63	75.78	0.23	
NY-3-10-14	4.35	50.84	1.33	7.75	5.83	1.00	23.10	8.71	104.11	40.51	194.32	44.52	467.27	87.63	0.23	5.14
NY-3-10-15	0.02	45.69	0.03	0.85	3.34	0.64	16.86	6.66	88.22	35.29	175.89	42.42	458.79	87.42	0.21	388.42
NY-3-10-16	1.82	40.24	1.12	6.21	3.72	1.29	11.84	4.22	51.87	21.11	102.14	25.70	287.44	51.77	0.54	69.41

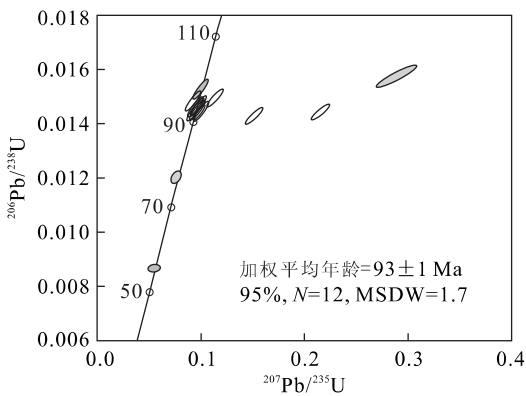


图 6 古民黑云母花岗岩(NY-3-10)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Concordia plots for zircons from Gumin biotite granite 加权平均年龄为去掉 7、9、14 和 16 号测点(图中阴影分析点)外 12 粒岩浆锆石的加权结果

94 Ma)、桃花岛(93 Ma)(邱检生等, 1999)等一系列铝质 A 型花岗岩或碱性岩。广西南丹—昆仑关 A 型花岗岩带地处华南腹地, 远离古太平洋板块俯冲带, 构造线走向为 NW 向, 那么其侵位的构造环境如何? 与沿海地区同时代 A 型花岗岩或碱性岩在形成背景上又有何区别和联系?

南丹—昆仑关花岗岩带与浙闽沿海铝质 A 型花岗岩具有一致的侵位时间, 岩相特征及地球化学组成类似, 表明它们可能形成于相似的构造环境。在 Rb/30-Hf-3Ta 图解(图 7)(Harris *et al.*, 1986)上, 昆仑关岩体均投影在碰撞晚期—碰撞后花岗岩区

域, 南丹地区大厂和芒场矿田花岗岩位于同碰撞花岗岩与碰撞晚期—碰撞后花岗岩交界处。R₁-10⁴Ga/Al 和 Nb-Y-Ce 图解(图 8)的进一步判别表明其属于 PA(洪大卫等, 1995)或 A2 型(Eby, 1992)花岗岩, 即侵位于板块碰撞后或造山后的张性构造环境, 而非板内裂谷构造背景的产物。广西晚白垩世大量断陷盆地的出现及与下覆地层的角度不整合关系, 也是该时期张性环境的反映(图 1b)。因此, 昆仑关及南丹地区花岗岩应形成于古太平洋板块与欧亚板块陆—弧后碰撞阶段的伸展过程, 与浙闽沿海铝质 A 型花岗岩相仿; 也显示该时期受古太平洋构造域影响而形成的伸展构造背景波及到了华南腹地, 构

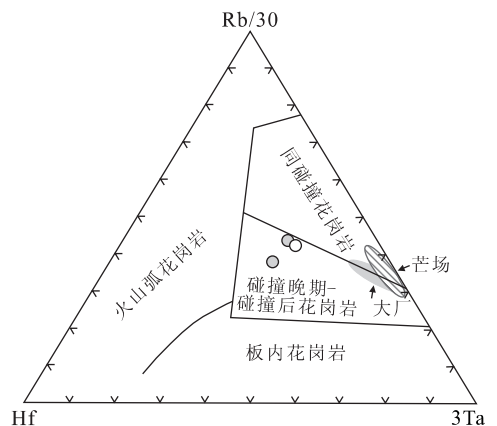


图 7 昆仑关岩体的 Rb/30-Hf-3Ta 判别图解

Fig. 7 Rb/30-Hf-3Ta discrimination plot of Kunlun intrusion

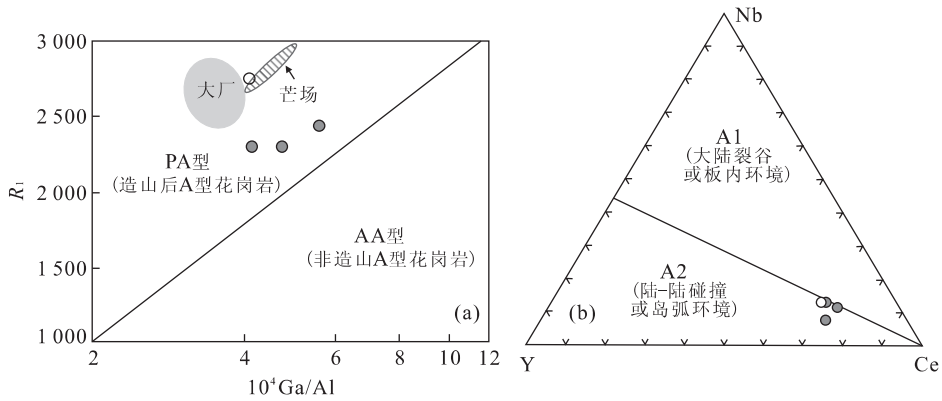


图 8 昆仑关岩体的 $R_1-10^4\text{Ga}/\text{Al}$ (a) 和 $\text{Nb}-\text{Y}-\text{Ce}$ (b) 图解

Fig. 8 $R_1-10^4\text{Ga}/\text{Al}$ (a) and $\text{Nb}-\text{Y}-\text{Ce}$ (b) diagrams of Kunlun intrusion

造体制以伸展为主。此外,东南沿海晚中生代“火山岩线”(Zhou and Li, 2000)西南延伸的确定(至粤西)(100 Ma)(Geng *et al.*, 2006)、晚白垩世浙闽沿海 A 型花岗岩常与钙碱性 I 型花岗岩构成复式岩体(邱检生等, 1999)、陆缘弧特点玄武岩与流纹岩的双峰式组合(胡建等, 2005), 以及同时代红盆的发育(舒良树和周新民, 2002), 均显示华南地区在该时期处于一种弧后张性环境。

但晚白垩世古太平洋板块的高角度俯冲作用可能受到了印度板块北向漂移(Jaeger *et al.*, 1989; Beck *et al.*, 1995; Gilder *et al.*, 1996, 1999)或洋壳上古陆块拼贴增生的影响(王德滋等, 1995; Lapiere *et al.*, 1997; 舒良树和周新民, 2002)。南丹—昆仑关 A 型花岗岩带总体呈现 NW 走向, 受控于南丹—昆仑关深大断裂, 且远离海岸线(芒场大于 500 km), 用古陆块拼贴后伸展机制难以解释。据详细的应力值数据分析, 从 135 Ma 开始(原文中定为四川期 135~52 Ma), 中国大陆构造应力场是以 NNE-SSW 向近水平挤压为主要特征, 动力源来自于西南方向, 与印度板块快速北移及特提斯洋的缩小有关(万天丰, 2004)。受其影响, 晚白垩世古太平洋板块的俯冲作用可能被逐渐减弱(王强等, 2005)并出现反转(Tatsumi *et al.*, 1990; Flower *et al.*, 1998; Ren *et al.*, 2002), 导致俯冲角度变大, 岛弧岩浆变弱, 形成一种弧后引张环境。这种应力场也符合该时期沿海 NE 向断裂(如长乐—南澳带)左旋走滑(图 1a)(舒良树和周新民, 2002)与华南西南—越南—南海 NW 向金沙江—红河断裂右行走滑(图 1b)(万天丰, 2004)的匹配组合关系。需要说明的是, 红河断裂带在始新世—晚中新世又表现为左旋特点, 上新

世早期—现在再次转变为右旋走滑(万天丰, 2004; Liu *et al.*, 2006; Xiang *et al.*, 2007; 孙珍等, 2007)。晚白垩世的右行活动是印度板块北向漂移而又未与欧亚板块碰撞背景下的应力场体现(万天丰, 2004)。从图 1b 中也可以看出, 南丹—昆仑关地区位于古特提斯与太平洋构造域的复合部位, 岩浆岩侵位受控于金沙江—红河右行走滑体系次级断裂。因此, 该地区与浙闽沿海晚白垩世 A 型花岗岩的同时侵位, 最有可能与印度板块北向漂移所导致的古太平洋板块碰撞弧后引张构造有关, 分别代表了两种匹配构造体制下(左行与右行)的两条 A 型花岗岩带。

5 结论

(1) 昆仑关黑云母花岗岩矿物组成及地球化学特征与浙闽沿海晚白垩世铝质 A 型花岗岩类似, 高硅、富碱和铝、低磷和钛, 富集 Ga、Rb、Th、U 等元素, 亏损 Ba、Nb、Sr、P 和 Ti, REE 呈现右倾“V”型配分模式;(2) 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示昆仑关岩体主体侵位时间为 93 ± 1 Ma, 与南丹及浙闽沿海 A 型花岗岩形成时间一致, 表明晚白垩世除东南沿海有 A 型花岗岩岩浆活动外, 广西南丹—昆仑关也是该时期华南另外一条重要的 A 型花岗岩带;(3) 南丹—昆仑关及浙闽沿海地区晚白垩世 A 型花岗岩形成于碰撞后引张环境, 与印度板块北移所引起的古太平洋板块高角度俯冲及俯冲强度减弱有关, 分别代表了两种匹配构造体制下的两条 A 型花岗岩带。

致谢: 成文过程中与香港大学赵新福博士进行

了有益探讨,再次深表感谢。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析得到了中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室陈海红的大力支持,野外工作中广西地质勘查总院给予了极大的帮助,特此一并致谢。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem. Geol.*, 192: 59—79.
- Beck, R. A., Burbank, D. W., Sercombe, W. J., et al., 1995. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia. *Nature*, 373: 55—58.
- 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).
- Cai, M. H., Liang, T., Wu, D. C., 2005. Geological characteristics and ore-forming time of the Kangma deposit in the Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 262—268 (in Chinese with English abstract).
- Cai, M. H., Liang, T., Wu, D. C., et al., 2004. Geochemical characteristics of granites and its structural genetic environment in the Nandan-Hechi metallogenic belt, northwest Guangxi. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 306—313 (in Chinese with English abstract).
- Chen, D. L., Sun, Y., Liu, L., et al., 2007. In situ LA-ICP-MS zircon U-Pb age of ultrahigh-pressure eclogites in the Yukahe area, northern Qaidam basin. *Science in China (Ser. D)*, 50(Suppl.): 322—330.
- Chen, H. D., Zeng, Y. F., Li, X. Q., 1989. Evolution of the sedimentation and tectonics of Late Paleozoic Danchi basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(4): 85—96 (in Chinese with English abstract).
- Chen, P. R., Hua, R. M., Zhang, B. T., et al., 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region—Petrological constraints and geodynamic settings. *Science in China (Ser. D)*, 32(8): 755—768.
- Chen, Z. Z., Peng, G. Y., Qiu, S. P., et al., 1986. Genetic study of the Damingshan tungsten deposit, Guangxi. *Geology and Prospecting*, 5: 13—19 (in Chinese).
- Cui, B., Zhai, Y. S., Meng, Y. F., et al., 2000. Au-Ag ore-forming system in Dayaoshan-Xidamingshan, Guangxi, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 352—355 (in Chinese with English abstract).
- Ding, X., Chen, P. R., Chen, W. F., et al., 2006. Single zircon LA-ICPMS U-Pb dating of Weishan granite (Hunan, South China) and its petrogenetic significance. *Science in China (Ser. D)*, 49(8): 816—827.
- Eby, G. N., 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641—644.
- Flower, M. F. J., Tamaki, K., Hoang, N., 1998. Mantle extrusion: A model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. Geodynamics*, 27: 67—88.
- 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 (Ser. D)*, 49(7): 696—713.
- 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*, 101: 16137—16154.
- Gilder, S. A., Leloup, P. H., Courtillot, V., et al., 1999. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data. *Journal of Geophysical Research*, 104(B7): 15365—15390.
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S., 2004. Crustal evolution in the northern Yilarn craton: U-Pb and Hf isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131(3—4): 231—282.
- Harris, H. B. W., Pearce, J. A., Tindle, A. G., 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M. P., Reis, A. G., eds., *Collision tectonics. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 19: 67—81.
- Hong, D. W., Wang, S. G., Han, B. F., et al., 1995. Tectonic classification and discrimination criteria for alkaline granites. *Science in China (Ser. B)*, 25(4): 418—426 (in Chinese).
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. Metamorph. Geol.*, 8: 423—439.
- 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).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemi-

- cal classification of common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8(4): 523—548.
- Jaeger, J. J., Courtillot, V., Tapponnier, P., 1989. Paleontological view of the ages of the Deccan traps, the Cretaceous/Tertiary boundary, and the India-Asia collision. *Geology*, 17: 316—319.
- Lapierre, H., Jahn, B. M., Charvet, J., et al., 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274(4): 321—338.
- Li, S. R., Wei, J. H., Deng, J., et al., 2007. Ore types of tungsten poly-metallic deposits and prospecting indications. *China Tungsten Industry*, 22(6): 19—24 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873—1885.
- Liu, B. M., Xia, B., Li, X. X., et al., 2006. Southeastern extension of the Red River fault zone (RRFZ) and its tectonic evolution significance in western South China Sea. *Science in China (Ser. D)*, 49(8): 839—850.
- Martin, H., Bonin, B., Capdevila, R., et al., 1994. The Kuiu peralkaline granitic complex (SE China): Petrology and geochemistry. *J. Petrol.*, 35: 983—1015.
- Maruyama, S., Seno, T., 1986. Orogeny and relative plate motions: Example of the Japanese islands. *Tectonophysics*, 127: 305—329.
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sci. Rev.*, 37: 215—224.
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks of the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63—81.
- 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 Provinces. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 237—246 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Wang, D. Z., Satoshi, K., et al., 2000. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province. *Geochimica*, 29(4): 313—321 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344: 175—205.
- Shu, L. S., Zhou, X. M., 2002. Late Mesozoic tectonism of Southeast China. *Geological Review*, 48(3): 249—260 (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. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 42: 313—345.
- Sun, Z., Zhong, Z. H., Zhou, D., 2007. The analysis and analogue modeling of the tectonic evolution and strong subsidence in the Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 347—356 (in Chinese with English abstract).
- Tatsumi, Y., Maruyama, S., Nodha, S., 1990. Mechanism of backarc opening in the Japan Sea: Role of asthenospheric injection. *Tectonophysics*, 181: 299—306.
- Wan, T. F., 2004. *Tectonics of China*. Geological Publishing House, Beijing, 152—162 (in Chinese).
- 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, D. H., Chen, Y. C., Chen, W., et al., 2004. Dating the Dachang giant tin-polymetallic deposit in Nandan, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 132—138 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. Z., Zhao, G. T., Qiu, J. S., 1995. The tectonic constraint on the Late Mesozoic A-type granitoids in eastern China. *Geological Journal of China Universities*, 1(2): 13—21 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407—419.
- Wu, C. L., Zhou, X. R., Huang, X. C., et al., 1998. A-type granites in Maotan, Anhui. *Acta Geologica Sinica*, 72(3): 237—248 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Wu, G. G., Zhang, D., Chen, B. L., et al., 2000. Transformation of Mesozoic tectonic domain and its relation to mineralization in southwestern China: An evidence of south-

western Fujian Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4):390—396 (in Chinese with English abstract).

Xiang, H. F., Wang, J. L., Han, Z. J., et al., 2007. Geological analysis and FT dating of the large-scale right-lateral strike-slip movement of the Red River fault zone. *Science in China (Ser. D)*, 50(3):331—342.

Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geosand. Newsl.*, 28:353—370.

Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks of southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magma. *Tectonophysics*, 326:269—287.

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.

蔡明海, 梁婷, 吴德成, 2005. 广西大厂锡多金属矿田亢马矿床地质特征及成矿时代. *地质学报*, 79(2):262—268.

蔡明海, 梁婷, 吴德成, 等, 2004. 桂西北丹池成矿带花岗岩地球化学特征及其构造环境. *大地构造与成矿学*, 28(3):306—313.

陈洪德, 曾允孚, 李孝全, 1989. 丹池晚古生代盆地的沉积和构造演化. *沉积学报*, 7(4):85—96.

陈志中, 彭根永, 邱少平, 等, 1986. 广西大明山钨矿床的成因研究. *地质与勘探*, 5:13—19.

崔彬, 翟裕生, 蒙义峰, 等, 2000. 广西大瑶山—西大明山金银成矿系统研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(4):352—355.

洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等, 1995. 碱性花岗岩的构造环境分

类及其鉴别标志. *中国科学(B辑)*, 25(4):418—426.

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.

李水如, 魏俊浩, 邓军, 等, 2007. 广西大明山矿集区钨多金属矿床类型及控矿因素与找矿标志. *中国钨业*, 22(6):19—24.

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, 王德滋, 蟹泽聪史, 等, 2000. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因. *地球化学*, 29(4):313—321.

舒良树, 周新民, 2002. 中国东南部晚中生代构造作用. *地质论评*, 48(3):249—260.

孙珍, 钟志洪, 周蒂, 2007. 莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(3):347—356.

万天丰, 2004. *中国大地构造学纲要*. 北京:地质出版社, 152—162.

王德滋, 赵广涛, 邱检生, 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约. *高校地质学报*, 1(2):13—21.

王登红, 陈毓川, 陈文, 等, 2004. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代. *地质学报*, 78(1):132—138.

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.

吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等, 1998. 安徽茅坦 A 型花岗岩研究. *地质学报*, 72(3):237—248.

吴淦国, 张达, 陈柏林, 等, 2000. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(4):390—396.