

# 福建太姥山地区花岗岩岩石地球化学特征 及其地质意义

李良林<sup>1</sup>, 周汉文<sup>1,2</sup>, 陈植华<sup>3</sup>, 王锦荣<sup>4</sup>, 肖 依<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学 环境学院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国冶金地质勘查总局第二地质勘查院, 福建 莆田 351111)

**摘要:** 福建太姥山位于中国东南沿海地带, 是晚中生代太平洋板块与欧亚板块相互作用的重要地区。野外和岩相学分析表明该地区花岗岩岩类分布广泛, 岩性以钾长花岗岩为主。岩石中发育典型的显微文象结构, 缺少暗色矿物。岩石具高硅、富碱、贫钙镁和高分异指数等特点, 属高钾钙碱性系列和准铝质-弱过铝质花岗岩类。岩石稀土元素含量较高, 配分模式呈轻稀土富集并缓向右倾斜, 重稀土较为平坦, 呈明显铈负异常的海鸥型展布, 多数花岗岩具有 Rb、U、Th、La 等元素强烈富集而 Ba、Sr、P、Ti 等元素相对亏损的特点。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年结果表明, 太姥山地区花岗岩的成岩年龄为  $96.6 \pm 1.6$  Ma (MSWD=0.65), 属燕山晚期岩浆活动的产物。岩石学、岩相学和地球化学特征均表明太姥山地区花岗岩属于 A 型花岗岩范畴。其岩浆来源为地壳物质的部分熔融, 并可能有少量地幔物质的加入。结合多组地球化学图解、野外地质和区域背景及年代学判定该地区花岗岩形成于后碰撞的伸展构造环境。在早、晚白垩世之交, 中国东南大陆边缘处于不断伸展之中, 导致大量的构造-岩浆活动, 太姥山地区 A 型花岗岩正是在这样的背景下形成的。

**关键词:** A 型花岗岩 晚中生代 构造环境 太姥山地区 福建东南沿海

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)04-0593-17

## Geochemical characteristics of granites in Taimushan area, Fujian Province, and their geological significance

LI Liang-lin<sup>1</sup>, ZHOU Han-wen<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-hua<sup>3</sup>, WANG Jin-rong<sup>4</sup> and XIAO Yi<sup>1</sup>

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. School of Environment Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. No. 2 Institute of Geologic Exploration, China Exploration & Engineering Bureau, Putian 351111, China)

**Abstract:** Located on the southeast coast of Fujian Province, Taimushan granite was formed as a result of the interaction between the Pacific plate and the Eurasian plate during the late Mesozoic. Field work and petrographic analysis show that granite rocks are extensively distributed in this area, and most of them are K-feldspar granite. Rocks mostly show subhedral granular texture and typical micrographic texture, and the main minerals include alkali feldspar (mainly perthite and subordinately a small amount of microcline) and quartz, with very rare dark minerals. The SiO<sub>2</sub> content of rocks is in the range of 76.93%~79.47%, the total alkalis content (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)

收稿日期: 2010-12-20; 修订日期: 2011-05-25

基金项目: 福建花岗岩地质地貌综合景观对比研究资助项目(2009046095)

作者简介: 李良林(1986-), 硕士研究生, 岩石学矿物学矿床学专业, E-mail: lilianglin1124@163.com; 通讯作者: 周汉文, 男, 教授, 岩石学与地球化学专业, E-mail: hwzhou@cug.edu.cn.

is in the range of 7.47%~8.88%, and the  $K_2O$  content of most rocks is higher than  $Na_2O$  content. A/CNK ratios are in the range of 0.95~1.01, TFeO/MgO ratios are in the range of 8.11~17.83, and the differentiation index is in the range of 96.79~98.11. On the whole, the rocks are characterized by high silicon, enrichment of alkali, low calcium and magnesium, and high differentiation index, thus belonging to high-K calc-alkaline and metaluminous to weakly peraluminous granitoids. The rocks have high and remarkably varying REE, ranging from  $94.98 \times 10^{-6}$  to  $446.85 \times 10^{-6}$ ; LREE/HREE ratios range from 3.71 to 17.47, and  $(La/Yb)_N$  range from 3.8 to 10.53.  $\delta Eu$  values range from 0.08 to 0.80, and their distribution patterns show LREE enrichment with gentle right oblique deviation, relative flat HREE and a seagull model characterized by significant negative Eu anomaly, suggesting characteristics of A-type granitic rocks. Most of the granites are strongly enriched in Rb, U, Th and La and considerably depleted in Ba, Sr, P and Ti.  $10^4 Ga/Al$  ratios are distributed between 2.74 and 3.46 (3.14 on average), which are higher than the  $10^4 Ga/Al$  low limit ratio of A-type granites in the world. The trace element spider diagrams of the granites generally show four V-shaped valleys for Ba, Sr, P, Ti depletion, similar to trace element spider diagrams of the Nanling granites. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating result indicates that Taimushan granite, whose diagenetic age is  $96.6 \pm 1.6$  Ma (MSWD=0.65), is the product of magmatic activity in late Yanshanian period. Its petrogenetic age is similar to rock-forming ages of the adjacent Sanshao ( $91.5 \pm 1.5$  Ma), Dacengshan ( $93.1 \pm 2.4$  Ma) and Nanzhen intrusive bodies ( $96.1 \pm 2.7$  Ma), suggesting that they may be products of the same magmatism. Petrography, geochemistry and discrimination diagrams show that the Taimushan granitoids belong to A-type granite with metaluminous to weakly peraluminous characteristics. Magma originated from partial melting of crustal materials, probably with the participation of a small portion of mantle materials. Integrated with multiple geochemical diagrams, field geology, regional background and geochronology, it is inferred that the granitic rocks of this area were formed in a post-collision and tensile tectonic environment. Between early and late Cretaceous, the continental margin of southeast China was constantly stretching, resulting in a large number of magmatic activities, and hence A-type granites were formed in Taimushan area under this background.

**Key words:** A-type granites; Late Mesozoic; tectonic setting; Taimushan area; southeast coast of Fujian Province

太姥山地区位于福建省东南沿海,该区域地处东亚大陆边缘濒临太平洋构造带之中,属于中国东南部区域构造单元中的一部分,是中生代太平洋板块与欧亚板块相互作用的重要地区,也是全球构造-岩浆活动最活跃的地区之一。中国东南沿海重要的地理位置以及复杂的构造演化使之成为众多国内外地质学家研究的重点。特别是花岗岩类作为特定地质背景下的产物,它的岩石学、矿物学和地球化学特点记录下了其形成时的构造背景,同时也是反映深部地壳物质组成的一个重要“窗口”,所以近年来中国东南沿海地区花岗质岩体成为了研究的热点 (Martin *et al.*, 1994; Tong and Tobisch, 1996; 邱检生等, 2000, 2008; 张晓琳等, 2005; 卢成忠等, 2006; 肖娥等, 2007; 胡建等, 2009; 邢光福等, 2009)。多数学者认为中国东南沿海晚中生代花岗质岩石的成因机制基本上可用古太平洋岩石圈消减

作用、玄武岩浆底侵作用和地壳深熔作用相结合的动力学模式来解释。并认为这个时期花岗质岩体在动力学背景上形成于拉伸构造环境之中(王德滋等, 1995, 2003; 吴福元等, 1999; 徐鸣洁等, 2001; 李武显等, 2001; 孙涛等, 2002; 谢昕等, 2005; 徐夕生等, 2005; 董传万等, 2007)。但在大地构造环境上也存在诸如类裂谷(杨文金等, 1986)、安第斯型活动大陆边缘(Martin *et al.*, 1994; Lapierre *et al.*, 1997)、弧后或岩石圈伸展环境(盆岭省)(Li Xianhua, 2000)等观点,张旗等(2001)则认为中国东部燕山期岩浆活动与太平洋板块俯冲没有直接的关系。而对于太姥山地区花岗岩,早在 20 世纪 80 年代吴克隆等(1982)就认为包括太姥山花岗岩在内的福建省晶洞钾长花岗岩为典型的深源浅成侵入体,在许多特点上类似于环太平洋 I 型花岗岩;邱检生等(2008)则认为太姥山岩体周围的南镇、大层山、大

京、三沙4个岩体为强分异的I型花岗岩。因此对于整个太姥山地区在花岗岩类型界定及其所在构造环境上仍存在分歧,这在一定程度上制约着对该地区岩体成因以及区域构造演化的深入认识。本文拟对太姥山地区花岗岩的岩石学、地球化学特征以及岩体年代学进行系统研究,目的在于揭示该地区花岗岩的成因类型及构造背景,进一步为中国东南沿海中、新生代的构造演化以及中国花岗岩地质地貌景观综合对比研究提供新的科学证据。

## 1 区域地质概况

太姥山地区地质构造较为复杂,主要受北北东向和东西向构造控制,多属于中生代晚期以来所形成的构造形迹。一组裂隙走向约 $65^{\circ}$ ,倾角 $80^{\circ}$ ,为压扭性;另一组走向约 $345^{\circ}$ ,倾角 $90^{\circ}$ ,为张扭性,形成棋盘格式构造。区内构造侵蚀强烈,主要表现在西北和西南部群山连绵,峰尖坡陡,沟多谷深,地势比降很大,并受到长乐-南澳断裂带控制。地层分布主要为下侏罗统梨山组 and 上侏罗统长林组、南园组;下白垩统石帽山群(福建省地质矿产局,1985)。区内侵入岩分布广泛,以酸性岩为主,其次为中性岩,并有少量基性岩类;侵入岩可划分为雪峰期、燕山早期、燕山晚期及喜马拉雅期等4期共9次侵入活动,但以燕山晚期岩浆活动最为强烈,出露大量花岗岩体,太姥山花岗岩岩体主体正是形成于燕山运动晚期。区内火山岩也极为发育,出露广泛,为一套陆相的中-酸性火山喷发-火山沉积碎屑岩系,多属晚侏罗世-早白垩世火山作用的产物。

## 2 花岗岩岩体及岩相学特征

本次采集的岩石样品来源于燕山晚期II-III期侵入,采样范围西至杨家溪龙亭瀑布,东至牛郎岗海岸,北至太姥山金峰寺,南至渔井码头(图1)。花岗岩岩体为几平方公里至几十平方公里的小岩株,多呈NNE向展布,侵入上侏罗统南园群和下白垩统石帽山群之中,岩石类型主要为钾长花岗岩。野外岩石学特征上,钾长花岗岩呈肉红色,块状构造,中-细粒结构,节理发育,部分花岗岩发育文象结构和晶洞构造,晶洞空隙内有白色充填物;主要矿物为钾长石、石英、斜长石,含少量黑云母、角闪石。

根据岩相学特征把该区花岗岩进一步分为钾长

花岗岩和斑状花岗岩两种类型(图2)。钾长花岗岩多呈半自形粒状结构(图2a),主要矿物为碱性长石(多为条纹长石,少量微斜长石)和石英,不含斜长石或斜长石含量远小于碱性长石;条纹长石发育条纹结构,多为正条纹长石(图2b);微斜长石发育格子双晶,部分钾长石高岭土化;石英呈无色透明,表面光滑,无解理,粒度大小不均,发育不规则裂纹,样品中可见大的石英晶体边部和内部被溶蚀,围绕大的石英晶体边缘向四周发散可见小的不规则条状石英与钾长石共结成交显微文象结构;暗色矿物含量较低,多为黑云母和角闪石;副矿物常见磁铁矿、磷灰石、锆石和榍石(图2c);蚀变矿物多为绿帘石和绿泥石。斑状花岗岩(TM12)发育似斑状结构,斑晶为碱性长石和石英,基质为细晶质的石英和长石,斑晶基质比例约为3:7;岩石中花斑结构广泛发育(图2d),是一类特殊的钾长花岗岩。

## 3 地球化学特征

主量元素分析在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质教育部重点实验室完成,采用熔片法制备成玻璃片(待测样品),用XRF-1800波长扫描X射线荧光光谱仪测定;微量、稀土元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行,待测样品采用溶液法,用ICP-MS等离子体质谱仪测定,经国际标准RGM-1流纹岩标样和GSR-1花岗岩标样监控,相对误差小于5%~10%。有关详细的分析方法和国际标准样品的分析结果详见Liu等(2008)。

### 3.1 主量元素

从表1中可以看出,7件太姥山地区花岗岩样品主量元素变化不大,主要具有以下几个特征:①花岗岩 $\text{SiO}_2$ 含量在76.93%~79.47%之间(平均为77.89%),岩石呈现出明显富硅的特点;与中国东南沿海晚中生代典型A型花岗岩如福建新村、金刚山花岗岩(邱检生等,2000)和江西三清山A型花岗岩(张招崇等,2007)的硅含量相当,略高于世界A型花岗岩的73.01%(表2)。②全碱含量在7.47%~8.88%之间(平均为8.46%),且多数 $\text{K}_2\text{O}$ 含量大于 $\text{Na}_2\text{O}$ ,总体上说明岩石富碱;与新村、金刚山和三清山花岗岩岩体全碱含量相当。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 岩浆岩系列判别图解中,样品均落于高钾钙碱性系列(图3)。③Al含量中等,含量在10.51%~12.44%之间

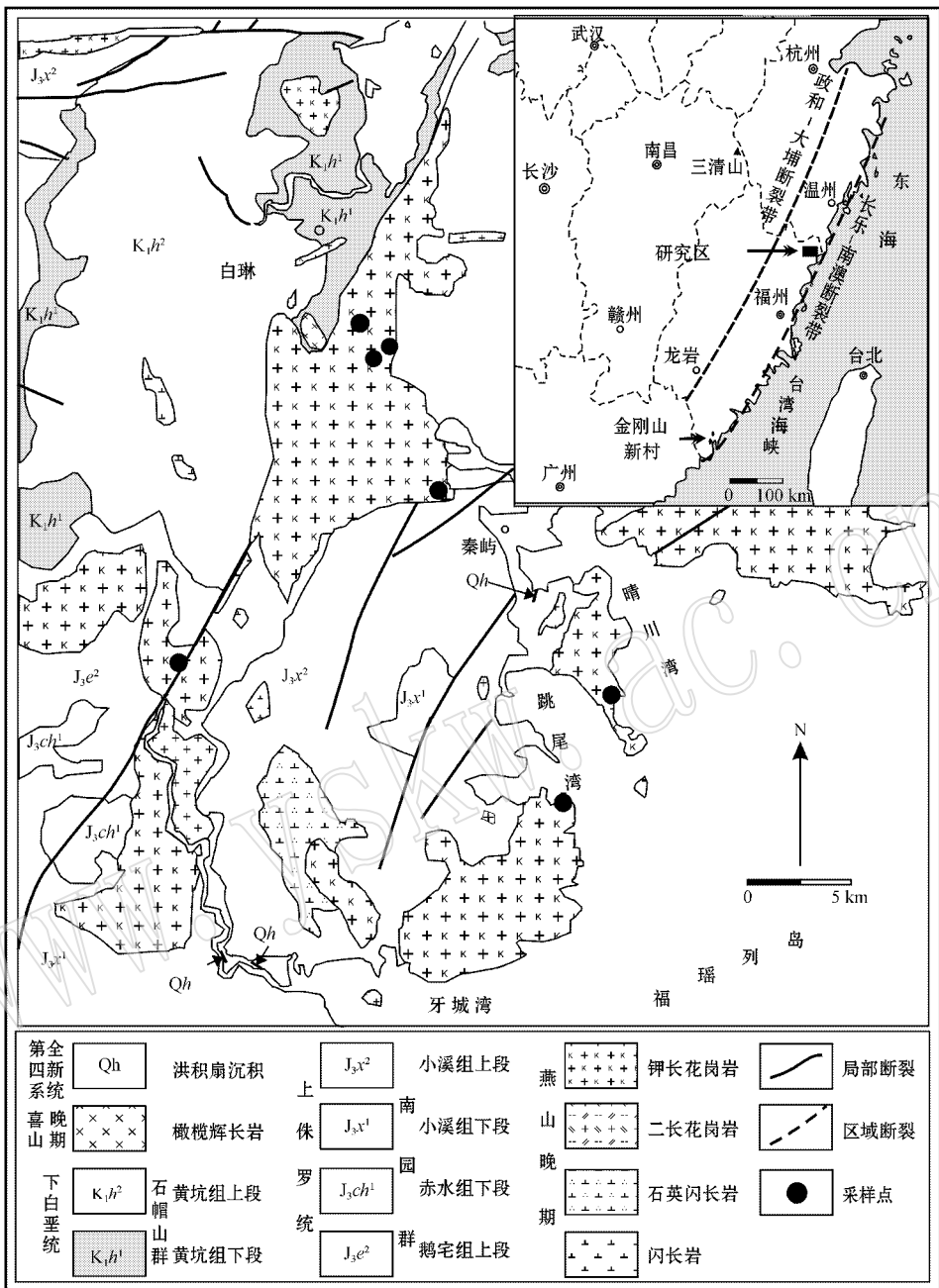


图 1 太姥山地区地质略图及采样点分布(原图据福建省地质局区域地质测量队<sup>①</sup>)

Fig. 1 Geological sketch map of Taimushan area and distribution of sampling points (schema after Regional Geological Survey Party of Fujian Bureau of Geology<sup>①</sup>)

(平均为 11.67%),略低于其他三个地区的花岗岩体;A/CNK 比值在 0.96~1.01 之间(平均为 0.98),与新村、金刚山花岗岩相近,显示出准铝质或弱过铝质花岗岩特点,但低于具有明显过铝质特点的三清

山花岗岩,在 A/NK - A/CNK 图解中也落入准铝质到弱过铝质之间(图 4)。④Fe、Mg 含量较低,可能与岩石中缺乏暗色铁镁质矿物有关;TFeO/MgO 比值在 8.11~17.83 之间(平均为 13.11),远高于一般

① 福建省地质局区域地质测量队. 1977. 福建省 1:20 万福安幅 G-50-12 区域地质调查报告.

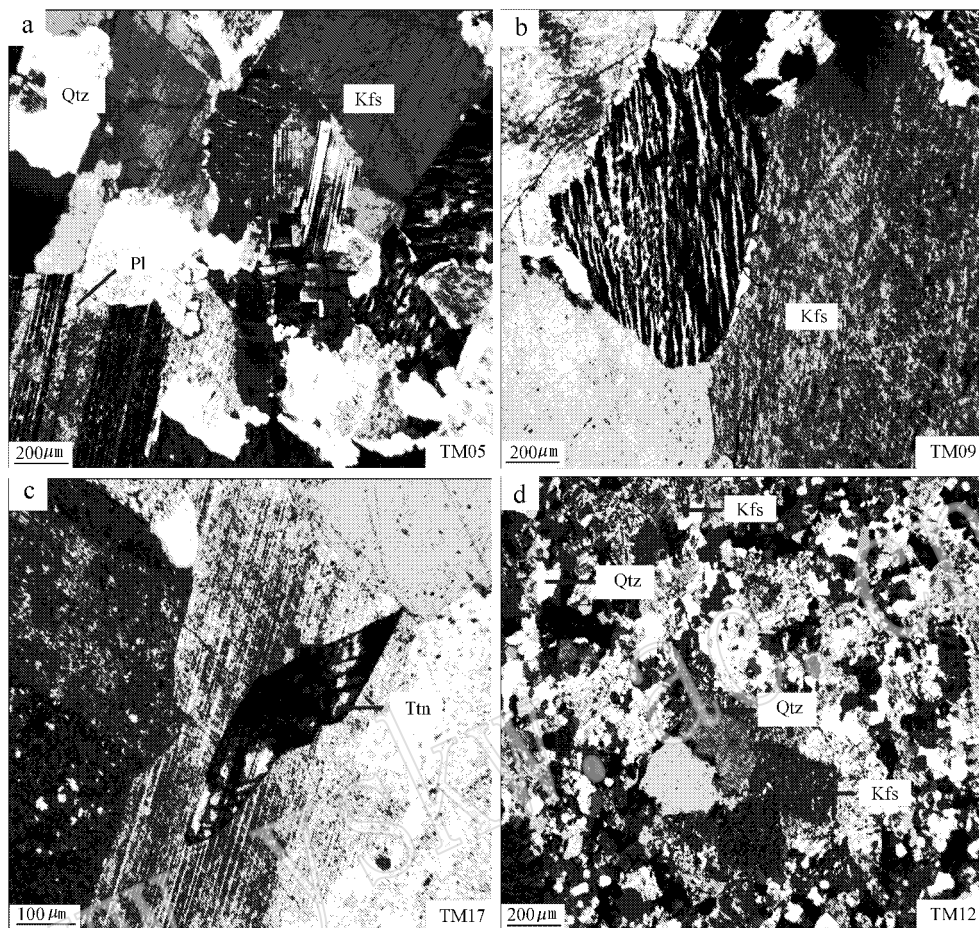


图 2 花岗岩显微结构图(正交偏光)

Fig. 2 Microstructures of granites (crossed polars)

a—半自形粒状结构; b—条纹结构; c—副矿物榍石; d—花斑结构; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Pl—斜长石; Ttn—榍石  
a—subhedral granular texture; b—perthitic texture; c—accessory mineral titanite; d—granophyric texture; Kfs—K-feldspar;  
Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Ttn—titanite

I型(2.27) \ S型(2.38) \ M型(2.37)花岗岩, 而与世界 A 型花岗岩平均值(13.4)值相近(Whalen, 1987)。全岩的 CaO 含量也较低, 可能与岩石中斜长石为含富钠长石有一定关系。高的分异指数(DI)与低的固结指数(SI)说明了该地区岩体的分异程度较高。

### 3.2 微量及稀土元素

在大离子亲石元素(LILE)中, 花岗岩 K、Rb、Th、U、La 明显富集, 而 Ba、Sr, 除个别样品(TM04 和 TM15)外, 均强烈亏损。Ba、Sr 这种强烈亏损的特征与斜长石不同程度的分离结晶有关。花岗岩高场强元素(HFSE)中 Ti、P 明显缺失, Nb、Ta 的富集程度也明显低于上述大离子亲石元素, 因而在微量元素蛛网图上呈现相对亏损的特征, 表现出类似于岛弧岩浆岩的特征。其中,  $10^4 Ga/Al$  分布在 2.74~

3.46 之间(平均为 3.14), 均大于 A 型花岗岩的  $10^4 Ga/Al$  下限值 2.6, 与同为 A 型花岗岩的新村、金刚山和三清山岩体接近。总体反映在微量元素蛛网图上呈现出具有 Ba、Sr、P、Ti 强烈亏损的 4 个 V 型谷(图 5b), 反映出同源岩浆的特点, 类似张旗等(2008)提出的南岭花岗岩微量元素蛛网图。

花岗岩稀土元素主要特征为: 轻重稀土元素均相对于球粒陨石 10 倍以上富集, 稀土总量变化范围较大, 变化范围为  $94.98 \times 10^{-6} \sim 446.85 \times 10^{-6}$  (平均为  $202.23 \times 10^{-6}$ )。轻稀土含量在  $74.81 \times 10^{-6} \sim 402.78 \times 10^{-6}$  之间(平均为  $180.67 \times 10^{-6}$ )。重稀土含量在  $15.53 \times 10^{-6} \sim 44.07 \times 10^{-6}$  之间(平均为  $21.56 \times 10^{-6}$ )。部分岩石稀土含量较高, 可能与其组成矿物中富集磷灰石、榍石、锆石等副矿物有关; LREE/HREE 比值为 3.71~17.47(平均为 8.61),

表 1 太姥山地区花岗岩主量元素( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )含量及相关参数Table 1 Major elements( $w_B/\%$ ), trace elements( $w_B/10^{-6}$ ) content and related parameters of granites in Taimushan area

岩性 采样点 样号	钾长花岗岩						斑状花岗岩
	龙亭	渔井	牛郎岗	太姥山			
	TM04	TM05	TM09	TM11	TM15	TM17	TM12
SiO <sub>2</sub>	77.24	76.93	77.59	78.63	79.47	77.71	77.68
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.14	0.12	0.12	0.12	0.1	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.75	12.44	12.2	11.13	10.51	11.84	11.82
TFeO	1.1	0.72	0.73	0.88	1.07	0.95	1.17
MnO	0.06	0.11	0.05	0.09	0.02	0.06	0.06
MgO	0.07	0.07	0.09	0.08	0.06	0.06	0.09
CaO	0.2	0.22	0.25	0.23	0.35	0.2	0.29
Na <sub>2</sub> O	4.12	4.34	4.14	3.97	3.4	4.28	4.5
K <sub>2</sub> O	4.56	4.54	4.43	4.35	4.07	4.42	4.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0.01	0.01	0	0	0	0
LOI	0.24	0.14	0.3	0.47	0.62	0.3	0.51
总量	99.51	99.66	99.91	99.95	99.69	99.92	100.34
TFeO/MgO	15.71	10.29	8.11	11	17.83	15.83	13
ALK	8.68	8.88	8.57	8.32	7.47	8.70	8.6
A/CNK	0.97	1	1.01	0.96	0.99	0.97	0.96
AKI 值	1	0.97	0.95	1.01	0.95	1	1
SI	0.72	0.73	0.96	0.87	0.7	0.62	0.92
DI	97.73	97.64	97.37	97.64	96.79	98.11	97.51
La	39.4	23.8	25.7	41.4	57.3	40.9	93.5
Ce	72.7	52.3	25.2	75.9	108	75	191
Pr	8.12	5.78	5.03	7.69	11.9	7.49	24.4
Nd	27.8	18.3	15.6	23.3	40.3	22.5	78.6
Sm	4.8	4.49	3.13	3.97	6.63	3.86	14.6
Eu	1.2	0.12	0.2	0.28	1.29	0.28	0.43
Gd	4.24	4.83	3.54	3.6	5.39	3.57	12.8
Tb	0.64	0.91	0.64	0.57	0.74	0.58	1.97
Dy	3.94	6.25	4.74	3.66	4.09	3.69	11.6
Ho	0.76	1.3	1.08	0.77	0.74	0.81	2.22
Er	2.49	4.26	4	2.77	2.38	2.81	6.85
Tm	0.37	0.67	0.66	0.45	0.36	0.46	1
Yb	2.69	4.45	4.75	3.35	2.35	3.35	6.65
Lu	0.4	0.65	0.76	0.52	0.33	0.53	0.95
10 <sup>4</sup> Ga/Al	2.74	2.95	3.31	3.17	3.36	3	3.46
LREE	154.01	104.8	74.81	152.46	225.73	150.08	402.78
HREE	15.53	23.32	20.17	15.68	16.39	15.8	44.07
ΣREE	169.54	128.12	94.98	168.14	242.12	165.88	446.85
L/H	9.92	4.49	3.71	9.72	17.47	9.5	9.14
(La/Yb) <sub>N</sub>	10.53	3.83	3.88	8.86	10.37	8.77	10.09
δEu	0.8	0.08	0.18	0.22	0.64	0.22	0.09
Sc	7.69	2.45	3.72	3.34	5.13	3.24	4.20
V	54.4	1.81	1.89	1.41	33.2	1.61	2.19
Cr	2.06	1.32	0.51	0.2	1.43	0.2	0.33
Co	5.08	0.15	0.06	0.06	3.65	0.06	0.24
Ni	0.82	0.19	<0.00	<0.00	0.45	<0.00	<0.00
Cu	1.51	0.74	1.75	0.26	2.54	0.23	0.73
Zn	49.7	50.9	165	22.6	25.8	23.2	86.2
Ga	17.1	19.4	21.4	18.7	18.7	18.8	21.7
Ba	1071	12.7	8.81	101	1290	100	65.6
Rb	119	224	161	296	210	296	210
Sr	389	8.03	5.38	11.8	231	11.9	10.6
Y	23.4	41.9	42.8	27.2	24.1	28.1	65.4
Zr	184	138	249	170	214	163	385
Nb	11.1	30	24.5	27	16.4	27.2	40.4
Cs	1.82	1.47	1.04	1.67	14.9	1.66	2.49
Hf	5.24	5.89	7.82	6.48	6.01	6.23	11.8
Ta	0.97	2.11	1.43	1.75	1.33	1.78	2.59
Pb	24.7	32.1	14.7	38.1	29.7	38.2	36.7
Th	16.1	20.3	16.4	40.5	21.1	36.8	29.3
U	3.6	3.42	3	8.25	4.32	7.89	5.81

注: A/CNK =  $n(\text{Al}_2\text{O}_3) / n(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ; ALK 为全碱值; SI 为固结指数; DI 是分异指数; AKI 为碱铝指数。

表 2 太姥山地区花岗岩与邻区及世界花岗岩主、微量元素对比

Table 2 Comparison of major and trace element content of the granites in Taimushan area with that of the neighboring granites and the mean value of the granites in the world

样号 样品数	太姥山地区	新村	金刚山	三清山	世界平均值			
	7	3	4	9	A(148)	M(17)	K(991)	S(578)
SiO <sub>2</sub>	77.89	77.13	77.29	76.84	73.01	67.24	69.17	70.27
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.12	0.13	0.11	0.26	0.49	0.43	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.67	12.49	12.26	12.04	18.4	15.18	14.33	14.1
TFeO	0.95	0.72	4.53	1.35	3.59	5.33	3.91	0.56
MnO	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.11	0.07	0.06
MgO	0.07	0.07	0.06	0.09	0.2	1.73	1.42	1.42
CaO	0.25	0.79	0.66	0.39	0.75	4.27	3.2	2.07
Na <sub>2</sub> O	4.11	4.08	4.34	3.36	4.07	3.97	3.12	2.41
K <sub>2</sub> O	4.35	4.49	4.24	4.71	4.65	1.26	3.4	3.98
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	<0.01	<0.01	0.04	0.04	0.09	0.71	0.15
ALK	8.46	8.58	8.57	8.19				
A/CNK	0.98	0.96	0.95	1.1				
AKI	0.98	0.93	0.96	0.88				
Ga	19.38	17	19.75	23.62	24.6	15	16	17
Ba	378	35	7	80.66	352	263	538	468
Rb	216.6	242.67	246.5	502.67	169	18	151	217
Sr	95.4	1.67	4.25	18.64	48	282	247	120
Y	36.12	22.59	27.05	75.74	75	22	28	32
Zr	214.73	69.33	87	163.89	528	108	151	165
Nb	25.21	20.67	27.25	55.3	37	1.3	11	12
Th	25.81	35.83	36.1	59.15	23	1	18	18
U	5.18	11.03	10.11	24.13	5	0.4	4	4
Pb	30.58	42.67	39		24	5	19	27
V	13.78	4	3.75	6.61	6	72	60	56
Zn	60.52	34.33	42		120	56	49	62
ΣREE	202	150	130	259				
10 <sup>4</sup> Ga/Al	3.14	2.54	2.98	3.7	3.75	1.87	2.28	2.25
LREE/HREE	7.38	8.25	6.92	6.36				
δEu	0.32	0.33	0.26	0.08				
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.06	8.53	5.97					
Zr+Nb+Ce+Y	362	175	196	408	350			
Rb/Sr	18.41	188	73.5		3.52	0.97	0.28	0.46
Rb/Ba	3.57	<7.37	<24.49		0.48	0.07	0.28	0.46

注:新村、金刚山数据由邱检生等(2000)整理而得;三清山数据由张招崇等(2007)整理而得;世界花岗岩平均值引自 Whalen(1987)。

反应出岩体轻稀土明显富集,重稀土相对亏损的特点( $(La/Yb)_N$ 变化范围在 3.83~10.53 之间(平均为 9.06),表现出轻重稀土存在一定程度的分馏;  $\delta Eu$  范围为 0.08~0.80(平均为 0.32),出现这种明显的钕负异常,表明岩体在成岩过程中发生过明显的斜长石和富轻稀土矿物(磷灰石、独居石)的分离结晶。太姥山地区花岗岩稀土总量、轻重稀土分馏程度和钕负异常均与同为福建东南沿海的新村、金

刚山岩体相近,而稀土总量略低于偏内陆的三清山岩体,轻重稀土分馏程度略高于三清山岩体,钕负异常程度低于三清山岩体。花岗岩具有相似的稀土配分模式曲线(图 5a),表现为轻稀土相对富集、明显向右倾斜而重稀土较平坦、具明显钕负异常的海鸥型展布。这种“海鸥式”稀土配分模式通常被认为是岩浆强烈结晶分异的结果(王德滋等,2002),与主量分析结论相似,同时也反映出 A 型花岗质岩石的特征。

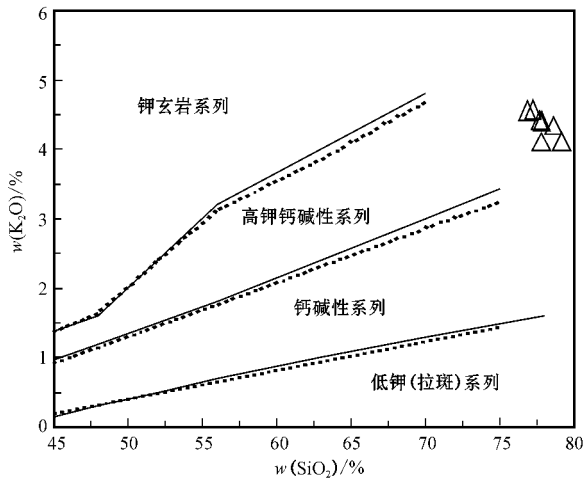


图 3  $K_2O - SiO_2$  岩浆岩系列判别图解  
(据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)

Fig. 3 Discrimination diagram of  $K_2O - SiO_2$   
(after Peccerillo and Taylor, 1976)

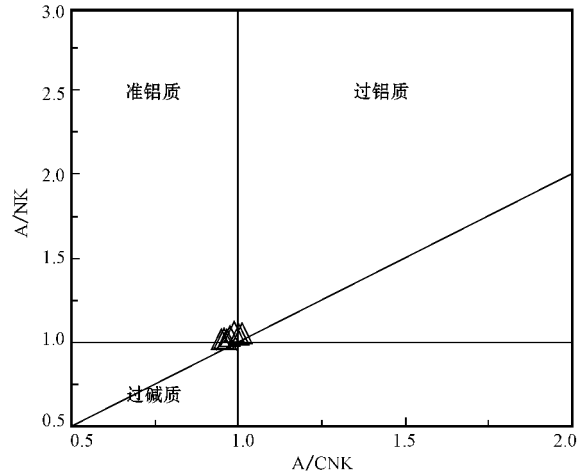


图 4  $A/NK - A/CNK$  岩石系列分类图解  
(据 Maniar 和 Piccoli, 1989)

Fig. 4 Discrimination diagram of  $A/NK - A/CNK$   
(after Maniar and Piccoli, 1989)

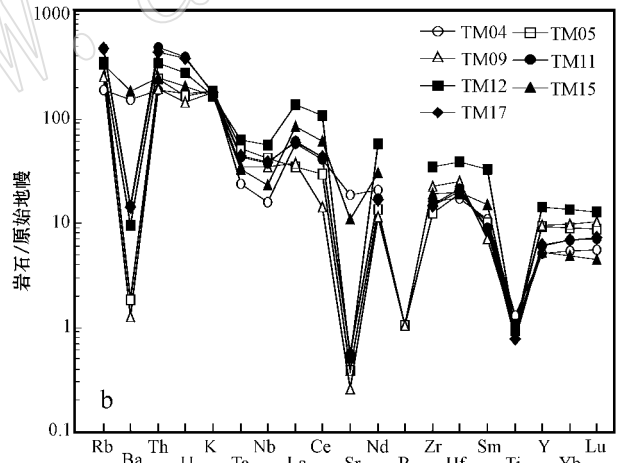
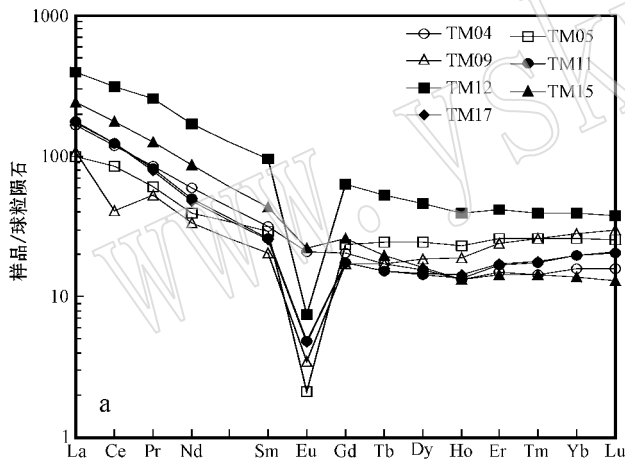


图 5 太姥山地区花岗岩稀土元素标准化图解 (a) 和微量元素标准化图解 (b) [球粒陨石标准值引自 Taylor 和 McLennan (1985); 原始地幔标准值引自 Sun 和 Mcdonough (1989)]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a, chondrite values after Taylor and McLennan, 1985) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams of granites in Taimushan area (b, primitive-mantle values after Sun and Mcdonough, 1989)

### 4 岩体年代学

太姥山地区用于花岗岩年龄测定的样品 (TM09) 采至福鼎太姥山牛郎岗景区, GPS 点位坐标为  $120^{\circ}16'46''E$ 、 $27^{\circ}03'32''N$ , 岩性为钾长花岗岩, 岩石呈肉红色, 中-粗粒结构, 块状构造, 与相邻的火山岩接触处存在冷凝边, 关系截然。

样品的破碎和锆石的挑选工作由河北省廊坊市

诚信地质服务有限公司完成。锆石阴极发光 (CL) 照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 测试仪器为装在热场发射环境扫描电子显微镜 (Quanta 400FEG) 上的 Gatan 阴极发光仪 (Mono CL<sup>3+</sup>), 分析电压为 10 kV 电流为 240  $\mu A$ 。锆石 U-Pb 年龄和微量元素分析在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 采用激光剥蚀等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 进行测量, 激光束斑直径为 32  $\mu m$ , 同时测定 U-Th-Pb 同位素及微量元素。有关详



细的仪器操作条件和实验操作步骤见 Liu 等 (2010)。锆石测定点的同位素比值、U-Pb 表面年龄和 U-Th-Pb 含量计算采用 GLITTER 4.0 程序, 运用 Anderser(2002)方法对普通 Pb 进行校正, 并采用 ISOPLOT 3.0 程序(Ludwig, 2003)进行锆石加权平均年龄的计算及谐和图的绘制。

选取的锆石为无色、黄色透明短柱状、等粒状晶体, 自形程度较好, 粒度多介于 50~130 μm 之间。阴极发光图像(CL)表现为大多数锆石具有典型的岩浆韵律环带和条带结构(图 6a)。锆石 U-Pb 分析测试数据见表 3, 共计 13 个分析点。所测锆石的 Th

和 U 含量分别介于  $248 \times 10^{-6} \sim 2\,472 \times 10^{-6}$  之间(多数在  $436 \times 10^{-6} \sim 2\,099 \times 10^{-6}$ )和  $136 \times 10^{-6} \sim 2\,302 \times 10^{-6}$  之间(多数在  $368 \times 10^{-6} \sim 936 \times 10^{-6}$ ), 具有很好的正相关性, 锆石颗粒的 Th/U 比值具有稳定的范围, Th/U 比值均大于 0.87, 介于 0.87~3.30 之间, 显示出所有测年锆石颗粒应为岩浆结晶的产物。锆石稀土元素(REE)含量适中, LREE 含量较低, 具明显的 Ce 正异常, ΣREE 含量为  $958 \times 10^{-6} \sim 4\,796 \times 10^{-6}$  之间, 主要集中在  $1\,707 \times 10^{-6} \sim 3\,598 \times 10^{-6}$  之间, 稀土元素特征与配分模式曲线均与典型的岩浆锆石相符。

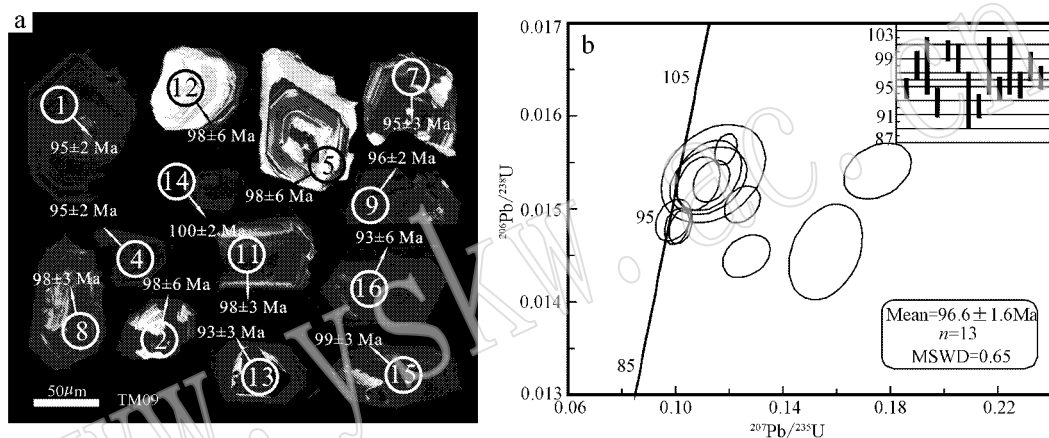


图 6 花岗岩锆石阴极发光 (CL) 图 (a) 和 U-Pb 谐和图 (b)

Fig. 6 CL images (a) and U-Pb concordia diagram (b) of zircon grains from granites

表 3 太姥山地区钾长花岗岩 (TM09) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope analytical results of K-feldspar granite (TM09) in Taimushan area

样号	$\omega_{\text{Pb}}/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		年龄 ( $\pm 1\sigma$ )/Ma		
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$		比值	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
TM09-1	1 518.24	1 400.68	1.08	0.049 99	(139)	0.102 04	(291)	0.014 81	(12)	194(52)	99(3)	95(2.1)
TM09-2	435.81	237.81	1.83	0.053 14	(405)	0.112 50	(809)	0.015 36	(25)	335(134)	108(7)	98(3.0)
TM09-4	1 300.34	935.97	1.39	0.049 38	(158)	0.100 80	(320)	0.014 81	(13)	166(58)	98(3)	95(6.0)
TM09-5	248.46	136.2	1.82	0.053 90	(569)	0.114 33	(1 287)	0.015 38	(35)	367(213)	110(12)	98(3.0)
TM09-7	637.22	368.24	1.73	0.048 40	(222)	0.099 27	(437)	0.014 88	(15)	119(82)	96(4)	95(2.1)
TM09-8	948.55	579.16	1.64	0.053 88	(221)	0.113 64	(446)	0.015 30	(15)	366(70)	109(4)	98(3.0)
TM09-9	644.43	737.54	0.87	0.060 32	(223)	0.125 16	(444)	0.015 05	(13)	615(62)	120(4)	96(6.0)
TM09-11	2 472.38	749.34	3.3	0.051 68	(241)	0.108 79	(525)	0.015 27	(19)	271(88)	105(5)	98(6.0)
TM09-12	260.55	238.2	1.09	0.053 30	(460)	0.112 42	(955)	0.015 30	(24)	341(198)	108(9)	98(2.4)
TM09-13	2 634.17	956.96	2.75	0.063 40	(6 340)	0.126 66	(591)	0.014 49	(15)	722(82)	121(5)	93(6.0)
TM09-14	2 098.92	2 302.29	0.91	0.055 18	(135)	0.119 05	(276)	0.015 64	(11)	420(39)	114(3)	100(2.7)
TM09-15	667.23	448.38	1.49	0.085 03	(421)	0.182 27	(829)	0.015 54	(20)	1 316(68)	170(7)	99(3.0)
TM09-16	519.8	448.78	1.16	0.077 84	(514)	0.156 09	(902)	0.014 54	(34)	1 143(78)	147(8)	93(2.4)

注 括号内的数字代表  $1\sigma$  误差, 如 0.049 99(139) 代表  $0.049 99 \pm 0.001 39$ 。

在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄图上(图6b),大多数测点分布在谐和线附近,部分样品点出现不同程度沿水平方向偏离谐和线的情况,这一分布特点在相对年轻的锆石中较为常见,主要原因可能是由于年轻锆石的 $^{207}\text{Pb}$ 丰度较低而难以测准,另一方面也可能与锆石中存在微量普通铅有关(Yuan *et al.*, 2004)。由于年轻锆石定年主要采用精度较高的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,因此这一沿水平方向的漂移不会对定年结果产生显著影响。本次所测定的13个锆石点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 $93 \pm 3 \sim 100 \pm 2 \text{ Ma}$ 之间,变化幅度较小,加权平均年龄为 $96.6 \pm 1.6 \text{ Ma}$ (MSWD=0.65)结果精确度较高,可以准确地反映岩体的形成年龄,形成时代为晚白垩世。其成岩年龄同相邻的三沙岩体( $91.5 \pm 1.5 \text{ Ma}$ )、大层山岩体( $93.1 \pm 2.4 \text{ Ma}$ )、南镇岩体( $96.1 \pm 2.7 \text{ Ma}$ )成岩年龄相近(邱检生等, 2008),表明它们可能属于同期岩浆活动的产物。

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

对于花岗岩的分类,不同学者从不同的角度出发提出了多种分类方案(Chappell and White, 1974; Loiselle and Wones, 1979; Maniar and Piccoli, 1989; Barbarin, 1999)。随着研究的不断深入,以岩浆源区性质划分的I型和S型花岗岩一直受到学者的推崇,加上目前研究较多的A型花岗岩以及以地幔为物源的M型花岗岩,共同构成著名的ISAM花岗岩分类方案。

从岩性上看太姥山地区花岗岩样品,无论是钾长花岗岩,还是斑状花岗岩,均属于A型花岗岩岩石范畴(许保良等, 1998)。岩相学特征上,花岗岩含大量碱性长石(主要为条纹长石,其次为微斜长石),含少量且牌号较低的斜长石(多为富钠端员斜长石),岩石中广泛发育显微文象结构,部分岩石发育晶洞构造,且岩石中暗色矿物较少,多为片状黑云母充填于长石与石英粒间,这些典型的矿物特征显示了太姥山地区花岗岩可能为A型花岗岩岩石范畴。此外,在岩石中普遍出现楣石、萤石、磷灰石等副矿物组合而未见白云母、堇青石、石榴子石等富铝矿物,明显不同于强烈富铝的S型花岗岩;也未出现具有碱性花岗岩特征的霓石、钠闪石等矿物,区别于传统定义下的碱性A型花岗岩。

主量元素化学特征上,花岗岩 $\text{SiO}_2$ 含量在76.93%~79.47%之间,说明了岩石高硅的特点;全碱含量在7.47%~8.88%之间,总体上说明岩石富碱;花岗岩Mg、Ca含量均较低,平均值分别为0.07%和0.25%,而花岗岩NK/A值和Fe/Mg比值较高(表1)。以上主量元素特征均显示出与A型花岗岩相似的特征。此外,在Eby(1990)提出的能有效区分大多数高硅( $\text{SiO}_2 > 74\%$ )A型花岗岩与I型、S型花岗岩的 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO} - \text{SiO}_2$ 判别图解中,太姥山地区花岗岩在该图解中均落入A型花岗岩区域(图7)。

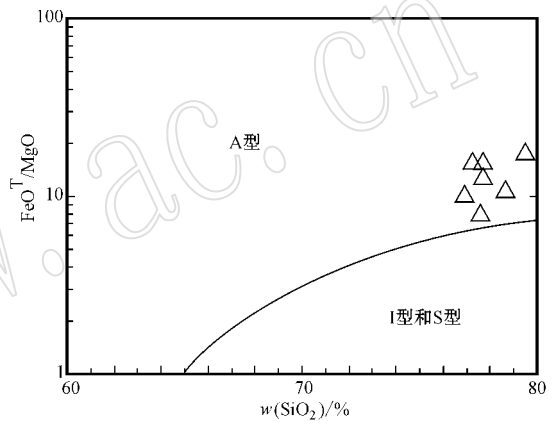


图7  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO} - \text{SiO}_2$  岩石系列判别图(据Eby, 1990)

Fig. 7 Discrimination diagram of  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO} - \text{SiO}_2$   
(after Eby, 1990)

微量元素化学特征上,花岗岩 $10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 分布在2.74~3.46之间,均大于A型花岗岩 $10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 下限值2.6,显示出A型花岗岩的化学特征;花岗岩的Nb、Zr、Y、Ga含量均大于世界I、S、M型花岗岩含量,而与A型花岗岩含量最接近(详见表2);大多数花岗岩的Rb/Sr和Rb/Ba比值大于A型花岗岩的下限值,大离子亲石元素K、Rb、Th、U明显富集, Ba、Sr相对亏损,过渡元素Cr、Ni、Co、V含量极低,均与A型花岗岩的微量元素十分接近。此外,花岗岩稀土配分模式和微量元素蛛网图也与典型的A型花岗岩相似,在 $10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 为基础的多组判别图解上(图8),样品点均落入A型花岗岩区域;且在区分A型花岗岩与分异的I型、S型花岗岩判别图解上(图9),大多数点也落入A型花岗岩区域或其界线附近,而明显不同于S型和I型花岗岩。

因此,结合以上岩相学和主微量元素特征及其

判别图解,太姥山地区花岗岩应属于准铝质-弱过铝质特征的 A 型花岗岩。

由于 A 型花岗岩岩石类型的差异性,导致了它们物质来源和成因解释的多样性,目前代表性的成因学说主要概括为:壳源物质的部分熔融(Collins *et al.*, 1982)壳幔物质的混合熔融(Holland *et al.*, 2006)以及幔源的碱性基性岩-中性岩的分异演化(Bonin, 2007)等。从野外地质来看,由于太姥山地区缺少与其同时代的大规模基性岩发育,因此,基本排除了幔源岩浆分异或部分熔融的成因机制。

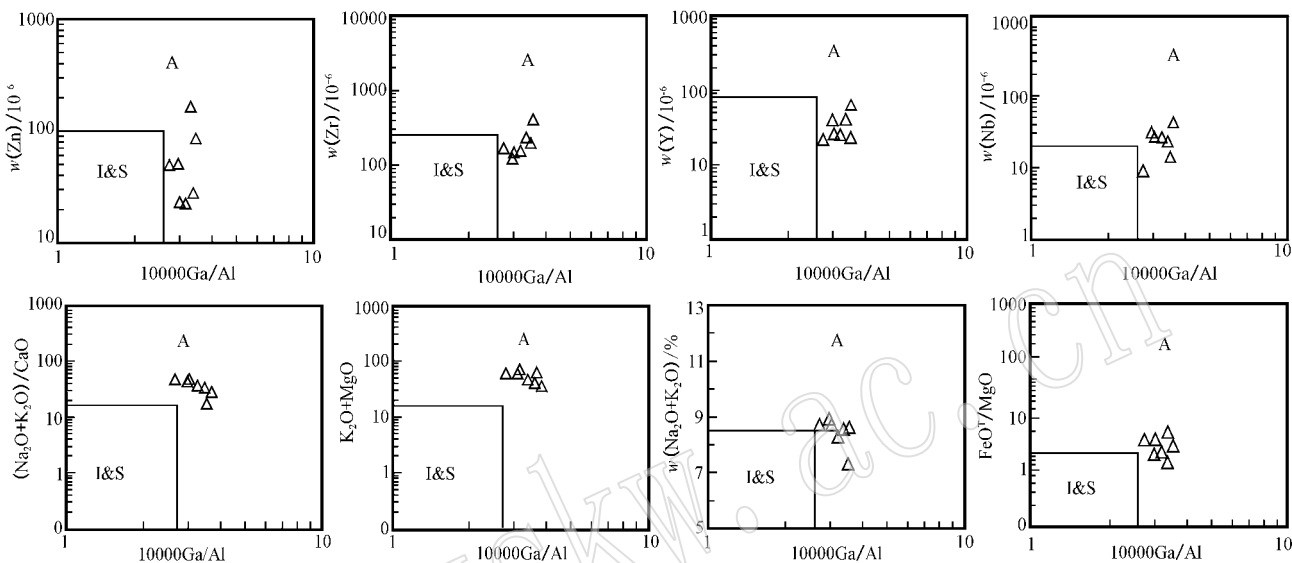


图 8 花岗岩 Zn、Zr、Y、Nb、(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO、K<sub>2</sub>O+MgO、Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O、FeO<sup>T</sup>/MgO 对 10 000 Ga/Al 判别图 (底图据 Whalen, 1987)

Fig. 8 Zn, Zr, Y, Nb, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO, K<sub>2</sub>O+MgO, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O, FeO<sup>T</sup>/MgO versus 10 000 Ga/Al discrimination diagrams for granites (after Whalen, 1987)

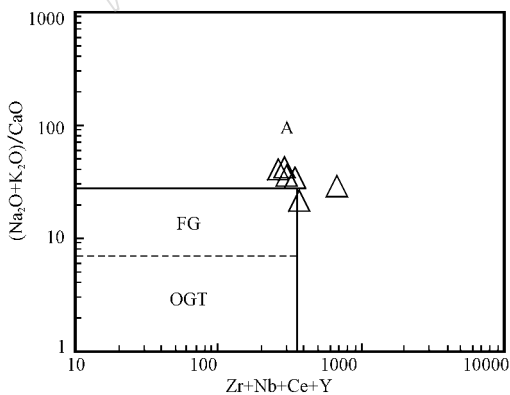


图 9 花岗岩 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO 与 Zr+Nb+Ce+Y 判别图 (底图据 Whalen, 1987)

Fig. 9 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO-Zr+Nb+Ce+Y discrimination diagrams for granites (after Whalen, 1987)

那么,太姥山地区花岗岩成因是壳幔物质的混熔还是壳源物质的部分熔融?可以从岩石的主微量元素特征得到一些启示:①主量元素特征上,岩石

均属于高钾钙碱性岩石系列,这类岩石系列源岩通常是在俯冲和碰撞期间产生,通常这种源岩含有大量的新生地壳成分,具地幔和新生地壳双重特征(肖庆辉等 2002);②岩石高硅,贫钙,贫 Sr、Eu,高 Ga、Pb 含量等特点暗示了岩石在相对贫水、高温低压条件下壳源长英质岩石的部分熔融形成(汪洋, 2009);③花岗岩低 Sr 高 Yb 的特征,以及中等以上的钕负异常,暗示了源区可能为斜长石稳定存在(无石榴子石)残留相为角闪岩相(斜长石+角闪石+辉石)(张旗等 2008);④在 Eby(1992)提出的 Y/Nb-Rb/Nb 和 Y/Nb-Ce/Nb 图解中,太姥山地区花岗岩多数落入 A2 型花岗岩区域(图 10),反映出花岗岩的源区物质以壳源物质为主,但可能混有少量地幔成分。因此,认为太姥山地区 A 型花岗岩的物质来源是以下地壳的部分熔融为主,但熔融过程中是否有地幔物质的加入,本文还缺少同位素地球化学证据,但根据王德滋等(2003)对浙闽沿海晚中生代 A 型花岗岩 Nd 同位素的研究得知,这些花岗岩岩浆应起源

于古老基底地壳物质的熔融,但有不同程度的地幔物质的加入,同时,与太姥山地区同时代的福建金刚山和新村铝质 A 型花岗岩的 Nd 同位素组成也支持这一观点(邱检生等 2000)。显然,这种以地壳物质的熔融为主,同时有地幔物质加入的成因模式能更全面

地解释太姥山地区 A 型花岗岩的岩石成因。强烈的软流圈地幔物质上涌和新生幔源岩浆的底侵作用为花岗岩源区提供了一定的物质来源和大量源区熔融所需要的热量,而导致这一深部地质过程的动力学机制与该地区晚中生代特殊的大地构造活动密切相关。

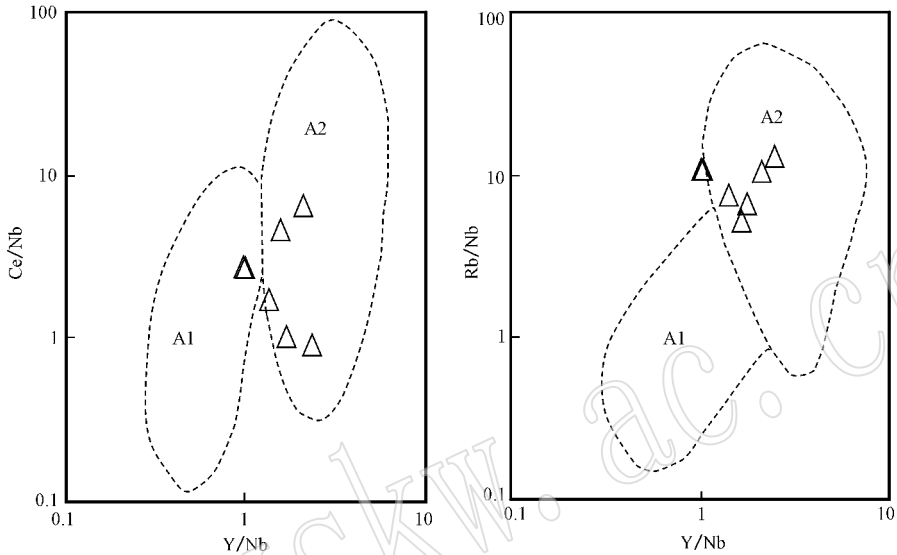


图 10 花岗岩 Ce/Nb - Y/Nb 和 Rb/Nb - Y/Nb 图解(底图据 Eby, 1992)

Fig. 10 Ce/Nb - Y/Nb and Rb/Nb - Y/Nb discrimination diagrams for granites (after Eby, 1992)

## 5.2 大地构造背景

花岗岩作为特定地质背景下的产物,它的岩石学、矿物学和地球化学特点应该记录下它形成时的构造背景情况,特别是 A 型花岗岩由于其特殊的构造环境而被称为地球动力学研究的重要“岩石探针”。大量地球化学研究表明,各种岩石中元素组合、比值的变化是该岩石形成时所处大地构造环境的反映,或者说,同一类岩石产出的构造环境不同,相关成岩过程的物理、化学条件也有明显的差异,造成了岩石中元素,特别是微量元素组合及比值等不同,这是构建常量和微量元素构造环境判别图解的基础。

目前在地球化学判别方法中不同学者提出了不同的判别图谱。在被广泛采用的各组判别图解中得到以下结论:①在 Maniar 和 Picool(1989)提出的主量元素判别图解上,除一个样品点外,其余点均落入后碰撞构造环境之中,反映出后碰撞花岗岩的特点(图 11a);②在 Batchelor 和 Bowder(1985)提出的 R2 - R1 因子判别图解上,样品点也均落入后造山 A 型

花岗岩之中(图 11b);③在 Eby 等(1992)提出的关于 A 型花岗岩构造环境分类判别图谱上,多数点落入 A2 型花岗岩区域(图 12),显示出该地区花岗岩岩体多属于大陆边缘的后碰撞 A 型花岗岩,而非板内或裂谷成因的 A 型花岗岩。

此外,在地球化学特征上,高钾钙碱性系列的花岗岩指示了一种构造体制的变化而不是一个特定的地球动力学背景(Barbarin, 1999);而花岗岩明显的 Sr、Eu 和 Ti 的负异常,较低的 Sr/Y 比值也暗示了岩石处于一个伸展构造的环境(马昌前等, 2003)。总之,不同的构造判别图解以及地球化学特征均显示太姥山地区岩石处于一个后碰撞的构造环境中,属于一个拉伸的构造体制。但是,应该注意到的是花岗质熔体的形成及其地球化学特征主要取决于它们的源区性质而非取决于它们的大地构造环境(Morris and Hopper, 2000)。虽然后者可能在诱发源区部分熔融方面提供必要的动力机制或热源,而出现构造事件与花岗质岩浆作用之间的时空耦合,但将二者简单的定位为必然的因果联系往往会导致

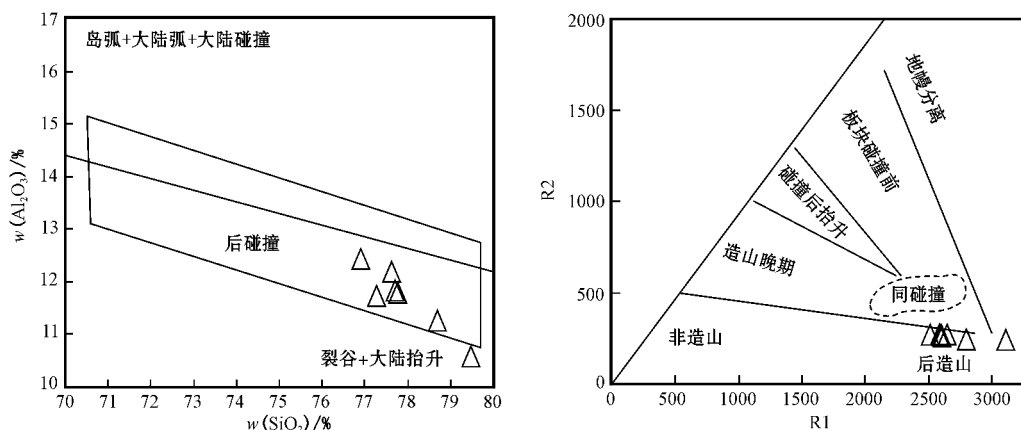


图 11 花岗岩  $Al_2O_3 - SiO_2$  判别图解 (a, 底图据 Maniarr 和 Picool, 1989) 和  $R_2 - R_1$  判别图解 (b, 底图据 Batchelor 和 Bowden, 1985)

Fig. 11  $Al_2O_3 - SiO_2$  discrimination diagrams (a, after Maniarr and Picoli, 1989) and  $R_2 - R_1$  discrimination diagrams (b, after Batchelor and Bowden, 1985) for granites  
 $R_1 = 4Si - 1(K + Na) - 2(Fe + Ti)$ ;  $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$

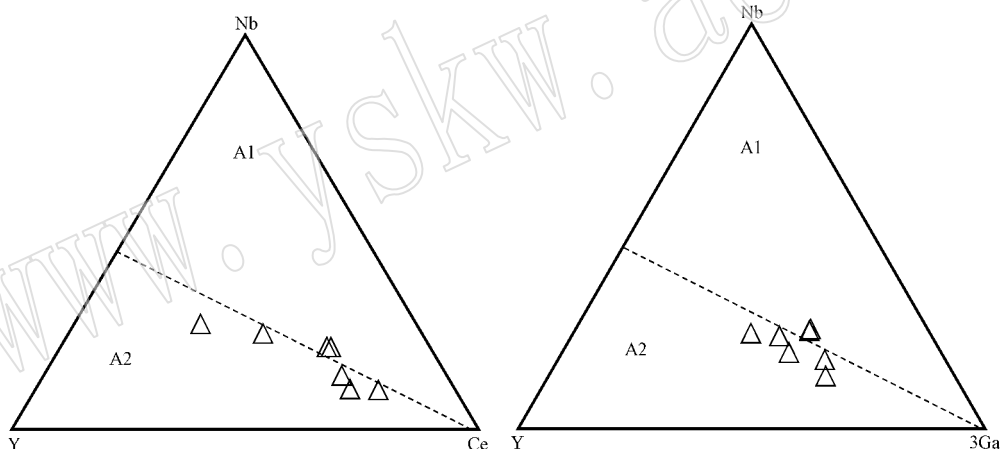


图 12 太姥山地区 A1 型与 A2 型花岗岩类判别图解 (据 Eby, 1992)

Fig. 12 Discrimination diagrams for A1- and A2-type granitoids in Taimushan area (after Eby, 1992)  
 A1—非造山花岗岩; A2—后造山花岗岩  
 A1—anorogenic granite; A2—post-orogenic granite

对古构造环境的误判(邓晋福等, 1999; 张旗等, 2007; 韩宝福, 2007)。因此, 花岗岩类的构造环境判别不仅需要依靠地球化学特征, 更大程度上还须根据其野外证据、区域地质背景以及年代学的指示加以确认。

太姥山地区地处东亚大陆边缘濒临太平洋构造带之中, 属于中国东南部区域构造单元中的一部分, 既是中生代太平洋板块与欧亚板块相互作用的重要地区, 也是全球构造-岩浆活动最活跃的地区之一。在野外空间产状上, 由于后碰撞阶段大型剪切带的形成, 大规模后碰撞花岗岩往往会沿着这些剪切带

分布, 而福建东南沿海呈 NNE 向的长乐-南澳断裂正是这一性质的剪切带, 太姥山地区花岗岩岩体均受到这一左旋走滑韧性剪切带的控制( Charvet *et al.*, 1990; 舒良树等, 2000)。大量花岗质岩浆沿着活动的巨大剪切带侵入定位形成大规模花岗岩岩体, 岩体多呈  $NE40^{\circ} \sim 50^{\circ}$  方面展布, 且同围岩呈明显的不规则多边形接触(图 1), 岩体内部及边缘均缺乏定向组构, 围岩中也缺乏围绕岩体呈环状分布的定向构造形迹现象, 呈现出典型被动侵位的特点, 这很好地说明太姥山地区岩体的形成与拉张的构造环境密切相关。而一般这些体积巨大, 规模可观的花岗

质岩体被认为是整个造山过程中岩浆活动的高潮阶段(Liegeois, 1998),也是后碰撞造山带最显著的野外标志之一。同时,在政和-大埔断裂与长乐-南澳断裂之间还发育晚中生代双峰式火山岩(马金清等, 1998; Xing *et al.*, 2004),后者在时间、空间上与A型花岗岩正巧复合,且均与伸展构造有关,属于典型的陆缘伸展减薄构造岩浆组合。

结合太姥山地区花岗岩锆石年代学数据,花岗岩的成岩年龄在96 Ma左右,形成时代为晚白垩世,属于燕山晚期岩浆活动的产物。与此同时,东南沿海已有大量同时期基性岩体(脉岩)的成岩年龄报道(李惠民等, 1995; Wang, 2002; 赵军红, 2004; 杨永峰, 2008),其形成时代在 $57.8 \pm 1.31 \sim 136.6 \pm 27$  Ma之间,主要集中在70~120 Ma,为白垩纪—古新世岩浆活动的产物。由于基性侵入岩体的形成与岩石圈伸展和地壳拉张密切相关,所以结合这些基性岩体(岩脉)的年代学数据可以确信福建地区白垩纪以来存在多阶段岩石圈伸展和地壳拉张事件。如张贵山(2006)根据相关年代学资料把福建省中生代地壳拉张期次总结为75 Ma $\pm$ 、85 Ma $\pm$ 、90~100 Ma、110~120 Ma、125 Ma $\pm$ 和180~165 Ma 6个阶段。虽然就本次研究对象来看难以确定具体的拉张期次开始和结束的时间,但可以肯定的是本次研究区的花岗岩成岩年龄(96 Ma)正好处在90~100 Ma之间,表明前人关于基性岩体成岩年龄的研究,进一步肯定了这一时期福建太姥山地区花岗岩所在的中国东南沿海处于伸展的构造环境之中。

区域资料表明,中国东南沿海晚中生代期间构造体制发生重大转折:由于古太平洋板块在晚中生代期间的低角度和快速俯冲,引发太姥山地区所在的中国东南沿海(弧后盆地)区域构造应力场由燕山早期的挤压转变为燕山晚期的拉张体制(Lapierre *et al.*, 1997; Zhou and Li, 2000)地壳变薄,地幔上隆,地幔来源的玄武质岩浆底侵使下部地壳部分熔融形成花岗质岩浆,导致大规模的火山-侵入活动,形成了中国东南部地质历史上规模最大的花岗质火山-侵入杂岩(Li Xianhua, 2000; 王德滋等, 2002)。以太姥山地区花岗岩岩体为代表的福建东南沿海A型花岗岩正是在这样的背景之下形成的。在此之后,虽然还存在局部的地壳拉张期次,但总体上大量红色断陷盆地的发育及玄武岩、流纹岩的喷发等,反映出福建东南沿海地区开始逐步进入陆内裂谷的构造环境,中国东南地区燕山期构造岩浆活动已接近

尾声,花岗质岩浆活动被随之而来的大规模新生代玄武质岩浆活动所取代。

## 6 结论

通过对福建太姥山地区花岗岩岩石学、岩相学和主微量元素特征的研究得出,福建太姥山地区花岗岩为一套准铝质到弱过铝质的A型花岗岩类,其成因以地壳物质的熔融为主,同时可能有一定地幔物质参与。LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果显示,其成岩年龄为 $96.6 \pm 1.6$  Ma,属于晚白垩世;多组地球化学图解并结合野外地质和年代学数据证明,其区域构造背景上属于大陆边缘的后碰撞构造环境,进一步肯定了太姥山地区花岗岩岩体所在的中国东南沿海在中生代晚期处于一个拉张的构造体制之中。

致谢 论文得到了匿名审稿专家建设性的修改意见,锆石阴极发光得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室弓虎军和刘永强老师的热情帮助;LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分析得到了中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室陈海红和刘硕老师的大力支持;在此一并表示由衷的感谢。

## References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithos*, 46(3): 605-626.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43-55.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 97: 1-29.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 8: 173-174.
- Charvet J, Faure M, Xu Jiawei, *et al.* 1990. La zone tectonique de Changle-Nanao, Chine du sud-est [J]. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t310, Serie 2: 1 271-1 278.
- Collins W J, Beams S D, White A J K, *et al.* 1982. Nature and origin of A type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80: 189-200.
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 1999. Igneous petroectonic

- assemblage and crust-mantle metallogenic system [ J ]. *Earth Science Frontiers*, ( 2 ): 259~270 ( in Chinese with English abstract ).
- Dong Chuanwan, Xu Xisheng, Yan Qiang, *et al.* 2007. A new case of late Mesozoic crust-mantle interaction in eastern Zhejiang: Geochronology and geochemistry of the Ru 'ao disabase-granite composite intrusions [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23( 6 ): 1 303 ~ 1 312 ( in Chinese with English abstract ).
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [ J ]. *Lithos*, 26 : 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications [ J ]. *Geology*, 20( 7 ): 641~644.
- Fujian Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1985. Regional Geology of Fujian Province [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 1~615 ( in Chinese ).
- Han Baofu. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 14( 3 ): 64~72 ( in Chinese with English abstract ).
- Hollanda N H B M, Pimentel M M, Oliverirac D C, *et al.* 2006. Lithosphere-asthenosphere interaction and the origin of Cretaceous tholeiitic magmatism in Notheastern Brazil: Sr-Nd-Pb isotopic evidence [ J ]. *Lithos*, 86 : 34~49.
- Hu Jian, Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, *et al.* 2009. I- and A-type composite gneissic metagranites in langshan area, Shandong province: geochronology, geochemistry and tectonic implications [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 25( 2 ): 283~296 ( in Chinese with English abstract ).
- Lapierre H, Jahn B M, Charver 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 [ J ]. *Tectonophysics*, 274 : 321~338.
- Li Huimin, Dong Chuanwan, Xu Xisheng, *et al.* 1995. Single zircon U-Pb dating of Quanzhou gabbro-origin of magma in the southeast of Fujian Province [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 40( 2 ): 158~160 ( in Chinese ).
- Li Wuxian and Zhou Xinming. 2001. Subduction of the paleo-pacific plate and origin of late mesozoic igneous rocks in southeastern China——some supplement evidences for the model of lithosphere subduction and underplating of the model of lithosphere subduction and underplating of mafic magma [ J ]. *Geotectonica et Metallogenia*, 25( 1 ): 55~63 ( in Chinese with English abstract ).
- Li Xianhua. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China [ J ]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18( 3 ): 293~305.
- Liegeois J P. 1998. Preface-some words on the post-collisional granitoid [ J ]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101 : 635~643.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z, *et al.* 2010. 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 of mantle xenoliths [ J ]. *Journal of Petrology*, 51 : 537~571.
- Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, *et al.* 2008. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates [ J ]. *Chemical Geology*, 247 : 133~153.
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites [ J ]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 11 : 468.
- Lu Chengzhong, Wang Qinghua, Dong Chuanwan, *et al.* 2006. Geochemical characteristics of the Honggong aluminous A-type granites pluton in Zhejiang province and its tectonic setting [ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 12( 4 ): 500~506 ( in Chinese with English abstract ).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3. 00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [ A ]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication [ C ]. 4 : 25~32.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Ming Houli, *et al.* 2003. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: evidence from Mesozoic granites [ J ]. *Science in China ( Series D )*, 33( 9 ): 817~827 ( in Chinese ).
- Ma Jingqing, He Wenxing and Feng Zongzhi. 1998. Features and origin of mesozoic bimodal volcanic rocks in Fujian province [ J ]. *Regional Geology China*, 17( 3 ): 241~246 ( in Chinese with English abstract ).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [ J ]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101 : 635~643.
- Martin H, Bonin B, Capdevila R, *et al.* 1994. The Kuyi Peralkaline Granitic Complex ( SE China ): petrology and geochemistry [ J ]. *Journal of Petrology*, 35( 4 ): 983~1 015.
- Morris G A and Hooper P R. 2000. The petrogenesis of the Colville Igneous Complex, northeast WED Washington: implications for Eocene tectonics in the northern U. S. Cordillera [ J ]. *Geology*, 25 : 831~834.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [ J ]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58 : 63~81.
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Satoshi K, *et al.* 2000. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province [ J ]. *Geochimica*, 29( 4 ): 313~321 ( in Chinese with English abstract ).
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, *et al.* 2008. Petrogenesis of highly fractionated I type granites in the coastal area of north eastern Fujian Province: constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 24( 11 ): 2 468~2 484 ( in Chinese with English abstract ).
- Shu Liangshu, Yu Jinhai and Wang Dezi. 2000. Late Mesozoic granitic magmatism and its relation metamorphism-ductile deformation in the Changle-Fault zone, Fujian province [ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 6( 3 ): 368~378 ( in Chinese with English abstract ).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process

- [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins[C]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Sun Tao and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic extension in southeast China: petrologic symbols[J]. Journal of Nanjing University(natural sciences), 38(6): 175~204(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust Its Composition And Evolution[M]. Oxford, UK, Blackwell, 1~312.
- Tong W X and Tobisch O T. 1996. Deformation of granitoid plutons in the Dongshan area, southeast China: constraints on the physical conditions and timing of movement along the Changle-Nanao shear zone[J]. Tectonophysics, 267: 303~316.
- Wang Dezi and Shen Weizhou. 2003. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 209~220(in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Zhao Guangtao and Qiu Jiansheng. 1995. The tectonic constraint on the late mesozoic A-type granites in eastern China[J]. Geological Journal of China Universities, 1(2): 13~21(in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Zhou Xinmin, et al. 2002. Origin of Late Mesozoic Granitic Volcanic-Intrusive Complex and Crustal Evolution in SE China[M]. Beijing: Science Press, 1~295(in Chinese).
- Wang Yang. 2009. Geochemistry of the Baicha A-type granite in Beijing Municipality: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(1): 13~24(in Chinese with English abstract).
- Wang Z H. 2002. The origin of the Cretaceous gabbros in the Fujian coastal region of SE China: implications for deformation-accompanied magmatism[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144(2): 230~240.
- Whalen J B. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407~419.
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999. The mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 29(4): 313~318(in Chinese with English abstract).
- Wu Kelong, Yan Binquan, Lu Zhengqiu, et al. 1982. the general characteristics and genesis of Fujian vuggy (K-feldspar) granite study preliminarily[J]. Geology of Fujian, 1(21): 1~28(in Chinese with English abstract).
- Xiao E, Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, et al. 2007. Geochronology geochemistry of the Yaokeng alkaline granitic pluton in Zhejiang province: petrogenetic and tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1431~1440(in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. 2002. The Ways of Investigation on Granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~294(in Chinese).
- Xie Xin, Xu Xisheng, Zhou Haibo, et al. 2005. Prelude of the late Mesozoic large scale magmatism of southeastern China: early middle Jurassic basal[J]. Science in China(Ser. D)35(7): 587~605(in Chinese).
- Xing G F, Yang Z L, Chen R, et al. 2004. Three stage Mesozoic bimodal igneous rocks and their tectonic implications in the continental margin of Southeast China[J]. Acta Geologica Sinica, 78(1): 27~39.
- Xing Guangfu, Chen Rong, Yang Zhuliang, et al. 2009. Characteristics and tectonic setting of Late Cretaceous volcanic magmatism in the coastal southeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(1): 77~91(in Chinese with English abstract).
- Xu Baoliang, Yan Guohan, Zhang Chen, et al. 1998. Petrological subdivision and source material of A-type granites[J]. Earth Science Frontiers, 5(3): 113~124(in Chinese with English abstract).
- Xu Mingjie and Shu Liangshu. 2001. Deep geological conditions constraining the late Mesozoic magmatism in SE China[J]. Geological Journal of China Universities, 7(1): 21~330(in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Xie Xin. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust mantle interaction, SE China[J]. Geological Journal of China Universities, 11(3): 318~334(in Chinese with English abstract).
- Yang Wenjing, Wang Liankui, Zhang Shaoli, et al. 1986. Geochemical characteristics and formation environment of the coast-type granites in the Fujian-zhejiang coastal area[J]. Geochimica, 11(4): 307~318(in Chinese with English abstract).
- Yang Yongfeng. 2008. Chronology and geochemistry of late Mesozoic basic-intermediate intermediate dike swarms[D]. Zhejiang: Zhejiang University(in Chinese).
- 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[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 28(3): 353~370.
- Zhang Guishan. 2006. Chronology, geochemistry and geodynamic significance of the mafic-ultramafic rocks in Fujian province since Late Mesozoic[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science(in Chinese).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, et al. 2007. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granites study(3)[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(11): 2683~2698(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, et al. 2008. Criteria for the recognition of pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks[J]. Geological Bulletin of China, 27(1): 1~18(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Zhao Taiping, Wang Yan, et al. 2001. A discussion on the Yanshanian magmatism in eastern China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(3): 273~292(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaolin, Qiu Jiansheng, Wang Dezi, et al. 2005. Geochemistry and magmatic mixing of the Putuoshan biotite mylonites and their enclaves, Zhejiang province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 24



(2): 81~92( in Chinese with English abstract ).

Zhang Zhaochong, Jian Ping and Wei Hanrong. 2007. SHRIMP ages, geology, geochemistry and petrogenetic type of granites from Sanqingshan geopark, Jianxi province [ J ]. *Geological Review*, 53( Supplement ): 28~40( in Chinese with English abstract ).

Zhao Junhong. 2004. Chronology and geochemistry of mafic rocks from Fujian province: implications for the mantle evolution of SE China since Late Mesozoic [ D ]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences( in Chinese ).

Zhou Xinming and Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implication for lithosphere subduction and underplating of mafic magma [ J ]. *Tectonophysics*, 326: 269~287.

## 附中文参考文献

邓晋福, 莫宣学, 罗照华. 1999. 火成岩构造组合与壳-幔成矿系统 [ J ]. *地学前缘*, 6( 2 ): 259~270.

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 [ J ]. *岩石学报*, 23( 6 ): 1303~1312.

福建省地质矿产局. 1985. 福建省区域地质志 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1~615.

韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性 [ J ]. *地学前缘*, 14( 3 ): 64~72.

胡建, 邱检生, 徐夕生, 等. 2009. 山东崮山 I 型与 A 型复合片麻状变质花岗岩: 年代学、地球化学及其构造指示意义 [ J ]. *岩石学报*, 25( 2 ): 283~296.

李惠民, 董传万, 徐夕生, 等. 1995. 泉州辉长岩中单颗粒锆石 U-Pb 法定年-闽东南基性岩浆的起源 [ J ]. *科学通报*, 40( 2 ): 158~160.

李武显, 周新民. 2001. 古太平洋岩石圈消减与中国东南部晚中生代火成岩成因——岩石圈消减与玄武岩底侵相结合模式的补充证据 [ J ]. *大地构造与成矿学*, 25( 1 ): 55~63.

卢成忠, 汪庆华, 董传万, 等. 2006. 浙江洪公铝质 A 型花岗岩类的岩石地球化学及其构造环境 [ J ]. *高校地质学报*, 12( 4 ): 500~506.

马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据 [ J ]. *中国科学(D 辑)*, 33( 9 ): 817~827.

马金清, 何文兴, 冯宗帜. 1998. 福建省中生代双峰式火山岩的特征及成因 [ J ]. *中国区域地质*, 17( 3 ): 241~246.

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 [ J ]. *地球化学*, 29( 4 ): 313~321.

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 [ J ]. *岩石学报*, 24( 11 ): 2468~2484.

舒良树, 于津海, 王德滋. 2000. 长乐-南澳断裂带晚中生代岩浆活动与变质-变形关系 [ J ]. *高校地质学报*, 6( 3 ): 368~378.

孙涛, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代伸展应力体制的岩石学标志 [ J ]. *南京大学学报(自然科学版)*, 38( 6 ): 175~204.

汪洋. 2009. 北京白查 A 型花岗岩的地球化学特征及其成因与构造指示意义 [ J ]. *岩石学报*, 25( 1 ): 13~24.

王德兹, 周新民, 等. 2002. 中国东南部晚中生代花岗岩质火山-侵入杂岩成因与地壳演化 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1~295.

王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化 [ J ]. *地学前缘*, 10( 3 ): 209~220.

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 [ J ]. *高效地质学报*, 1( 2 ): 13~21.

吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄 [ J ]. *长春科技大学学报*, 29( 4 ): 313~318.

吴克隆, 严炳铨, 卢振球, 等. 1982. 福建晶洞(钾长花岗岩)一般特征及成因初步探讨 [ J ]. *福建地质*, 1( 21 ): 1~28.

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 [ J ]. *岩石学报*, 23( 6 ): 1431~1440.

肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 2002. 花岗岩研究思维与方法 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1~294.

谢昕, 徐夕生. 2005. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J2 早期玄武岩 [ J ]. *中国科学(D 辑)*, 35( 7 ): 587~605.

邢光福, 陈荣, 杨祝良, 等. 2009. 东南沿海晚白垩世火山岩岩浆活动特征及其构造背景 [ J ]. *岩石学报*, 25( 1 ): 77~91.

徐鸣洁, 舒良树. 2001. 中国东南部晚中生代岩浆作用的深部条件制约 [ J ]. *高校地质学报*, 7( 1 ): 21~33.

徐夕生, 谢昕. 2005. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用 [ J ]. *高校地质学报*, 11( 3 ): 318~334.

许保良, 阎国翰, 张臣, 等. 1998. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源 [ J ]. *地学前缘*, 5( 3 ): 113~124.

杨文金, 王联魁, 张绍立, 等. 1986. 闽浙沿海型花岗岩地球化学特征及其形成环境初探 [ J ]. *地球化学*, 11( 4 ): 307~318.

杨永峰. 2008. 福建沿海地区晚中生代中-基性岩墙群的年代学和岩石地球化学 [ D ]. 浙江: 浙江大学.

张旗, 潘国强, 李承东, 等. 2007. 花岗岩构造环境问题-关于花岗岩研究的思考之三 [ J ]. *岩石学报*, 23( 11 ): 2683~2698.

张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的区别 [ J ]. *地质通报*, 18( 1 ): 3~18.

张旗, 赵太平, 王焰, 等. 2001. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 20( 3 ): 273~292.

张贵山. 2006. 福建晚中生代以来基性-超基性岩的年代学、地球化学及其地球动力学意义 [ D ]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.

张晓琳, 邱检生, 王德滋, 等. 2005. 浙江普陀山黑云母钾长花岗岩及其岩石包体的地球化学与岩浆混合作用 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 24( 2 ): 81~92.

张招崇, 简平, 魏罕蓉. 2007. 江西三清山国家地质公园花岗岩 SHRIMP 年龄、地质-地球化学特征和岩石成因类型 [ J ]. *地质论评*, 53( 增刊 ): 28~40.

赵军红. 2004. 福建省基性岩的年代学和地球化学: 晚中生代以来中国东南部地幔演化 [ D ]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.