

# 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景

柏道远, 周亮, 马铁球, 王先辉

(湖南省地质调查研究院, 湖南湘潭 411100)

**摘要:** 湘东南地区以印支期主俯冲断裂——茶陵-郴州大断裂为界, 分为东部炎陵-汝城隆起区和西部衡阳-桂阳坳陷区。区内印支期花岗岩总体属高钾钙碱性过铝质花岗岩, 并可根据岩石特征分为2组。第1组产于衡阳-桂阳坳陷区NW向深断裂中, 由角闪石黑云母花岗闪长岩、角闪石黑云母二长花岗岩和黑(二)云母二长花岗岩等组成,  $\text{SiO}_2$  平均含量总体较低, 为69.68%, 大多为弱过铝, ASI值0.96~1.29, 平均为1.08; 具有相对较低的  $I_{\text{Sr}}$  值(0.7080~0.7168)和  $t_{2\text{DM}}$  值(1.48~1.72 Ga)以及相对较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-8.90~-5.83)。第2组位于炎陵-汝城隆起区及衡阳-桂阳坳陷区将军庙次级隆起带中, 由黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩组成,  $\text{SiO}_2$  平均含量相对较高, 为72.23%, 总体为ASI值大于1.1的强过铝花岗岩, ASI值1.01~2.60, 平均达1.30; 具有相对较高的  $I_{\text{Sr}}$  值(0.7159~0.7345)和  $t_{2\text{DM}}$  值(1.81~1.97 Ga)以及相对较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-12.0~-9.85)。根据上述特征, 结合岩石圈结构和A/MF-C/MF图解分析, 第2组花岗岩源岩主要为中地壳结晶片岩、片麻岩等, 第1组花岗岩源岩除中地壳岩石外, 可能还有少量下地壳基性麻粒岩成分以及幔源组分的加入, 说明存在幔源岩浆的底侵作用。根据多种氧化物与微量元素构造环境判别图解, 结合地质特征、构造演化背景等, 认为印支期花岗岩形成于同造山阶段的后碰撞构造环境, 地壳加厚及其后的减压导致中地壳重熔是岩浆形成的主导因素, 幔源岩浆底侵使坳陷区与深大断裂带内的岩体中混入下地壳成分及少量地幔物质。已有研究表明湘东南燕山早期花岗岩形成于后造山构造环境, 因此印支期与燕山早期两阶段花岗岩的构造环境彼此之间提供了制约。

**关键词:** 印支期; 花岗岩; 地壳加厚与重熔; 岩浆底侵; 后碰撞环境; 湘东南

中图分类号: P588.12<sup>1</sup>; P581; P542 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2007)03-0197-16

## Genesis and tectonic setting of Indosinian granites in southeast Hunan

BAI Dao-yuan, ZHOU Liang, MA Tie-qiu and WANG Xian-hui

(Hunan Institute of Geological Survey, Xiangtan 411100, China)

**Abstract:** Southeast Hunan is divided into two tectonic units by the Indosinian primary subduction fault (Chaling-Chin Zhou fault), i. e., Yanling-Rucheng upwarping region to the east of this fault, and Hengyang-Guiyang downwarping region to the west. The Indosinian granitoids are high-K calc-alkaline peraluminous on the whole, and can be divided into two groups. The first group occurs in the NW-trending faults of Hengyang-Guiyang downwarping region, and is composed of hornblende biotite granodiorite, hornblende biotite monzogranite, biotite monzogranite and two-mica monzogranite; the rocks have relatively low contents of  $\text{SiO}_2$  with an average of 69.68%, and are mostly weak peraluminous with an average ASI value of 1.08 (0.96~1.29); they have comparatively low  $I_{\text{Sr}}$  values (0.7080~0.7168) and  $t_{2\text{DM}}$  ages (1.48~1.72 Ga), high  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of -8.90~-5.83. The second group lies in the Yanling-Rucheng upwarping region and Jiangjunmiao sub-upwarping region of Hengyang-Guiyang downwarping region, and is composed of fairly acidic biotite monzogranite and two-

收稿日期: 2006-09-14; 修订日期: 2006-11-06

基金项目: 国土资源部地质大调查资助项目(200213000035)

作者简介: 柏道远(1967-), 男, 汉族, 高级工程师, 研究方向: 构造学、岩石大地构造学, E-mail: Daoyuanbai@sina.com。

mica monzogranite, with an average  $\text{SiO}_2$  content of 72.23%; the rocks are strong peraluminous with ASI values of 1.01~2.60 (averaging 1.30), and have rather high  $I_{\text{Sr}}$  values (0.7159~0.7345) and  $t_{2\text{DM}}$  ages (1.81~1.97 Ga) and low  $\epsilon\text{Nd}(t)$  values (-12.0~-9.85). According to these characteristics as well as lithospheric structure and A/MF-C/MF diagram, it is thought that the second group granites were derived from schist and gneiss of the middle crust, whereas the first group granites came mainly from rocks of the middle crust, with the probable participation of minor basic granulite from the lower crust and mantle, suggesting the underplating of mantle magma. Based on multiple oxide and trace element-diagrams for discrimination of structural environments, geological characteristics and tectonic evolutionary settings, the authors consider that the Indosinian granites were formed in a post-collisional tectonic setting of the syn-orogenic stage, and the thickening of the crust and the subsequent weakening of the stress caused the melting of the middle crust, with magma formed sequentially. The underplating of mantle magma caused lower crust and mantle materials to enter the granitic plutons in the downwarping region and deep faults. Researches indicate that the Early Yanshanian granitoids were formed in a post-orogenic tectonic setting, and the Indosinian and Early Yanshanian tectonic settings restricted each other.

**Key words:** Indosinian; granites; thickening and melting of the crust; underplating of magma; post-collisional tectonic setting; southeast Hunan

长期以来,华南中生代大地构造演化备受地质学家关注,对其认识也一直存在较大争议。其中主要分布于湘桂地区的印支期花岗岩的形成机制和构造背景,是问题争论的焦点之一。早中生代碰撞造山作用模式(Hsü *et al.*, 1990; 陈海泓等, 1998)视印支期花岗岩为岛弧环境的产物。印支期陆内俯冲造山模式则认为印支期花岗岩分布的赣湘桂一带为一长期发育的裂陷槽(金文山等, 1997),带内逆冲断裂与褶皱发育,印支期花岗岩可能是陆壳叠置加厚作用的结果。近年来对华南基性岩的研究认为,在早中生代华南内部存在岩石圈伸展减薄和基性岩浆底侵作用(郭锋等, 1997; 赵振华等, 1998; 王岳军等, 2001a, 2001b),该作用为同期花岗岩的形成提供了热源。但这一观点并未提出花岗岩中底侵作用存在的证据。最近还有研究认为华南印支期为后造山构造环境(付建明等, 2005)。

笔者近年来在1:25万区域地质调查时对湘东南地区印支期花岗岩的地质地球化学特征及其形成的构造背景进行研究后认为,花岗岩形成于造山期的后碰撞环境,并在印支运动陆内汇聚高峰期之后的挤压松弛和减压条件下就位,岩浆主要源于中地壳结晶片岩、片麻岩的重熔;在拗陷区内岩体受深断裂控制,可能有下地壳基性岩熔融和地幔物质的加入,从而指示存在小规模基性岩浆底侵作用。这些认识对华南中生代构造演化的研究(包括当前最受关注的华南燕山早期构造环境问题的解决)具有一定的启示意义。

## 1 区域构造背景

湘东南地区位于华夏地块与扬子地块的结合地带(王新光, 1991; 王光杰等, 2000),在华南大地构造位置上地位独特。长期的多旋回构造发展历史造就了该区地层、构造、岩浆岩诸方面的复杂面貌(图1)。

蓟县纪、青白口纪-奥陶纪期间该区为华南地块与扬子地块间的裂陷海槽,沉积物以砂岩、板岩组成的复理石、类复理石为主,夹少量硅质岩与碳酸盐沉积(湖南省地质矿产局, 1997)。志留纪扬子板块与华夏板块拼贴(殷鸿福等, 1999),造成区内前泥盆纪地层强烈褶皱,形成构造线近东西向的褶皱基底(傅昭仁等, 1999),并造成区内东部志留纪花岗质岩浆的侵位(柏道远等, 2006a)。

中泥盆世开始,本区再次发生区域伸展作用形成陆内海盆,稳定环境下形成一套以碳酸盐岩为主、陆源碎屑岩为次并有少量硅质岩的中泥盆世—中三叠世早期陆表海沉积。

中三叠世晚期,研究区进入中生代强烈的构造-岩浆活动阶段,形成印支期、燕山早期、燕山晚期3个阶段花岗岩(柏道远等, 2005a),晚三叠世—中侏罗世、白垩纪—古近纪时期的陆相盆地及其沉积,以NNE向和NE向为主、其他方向为辅的断裂与褶皱等。其中,中三叠世后期为印支运动陆内俯冲造山作用的主要时期,造成区内泥盆纪—中三叠世早期

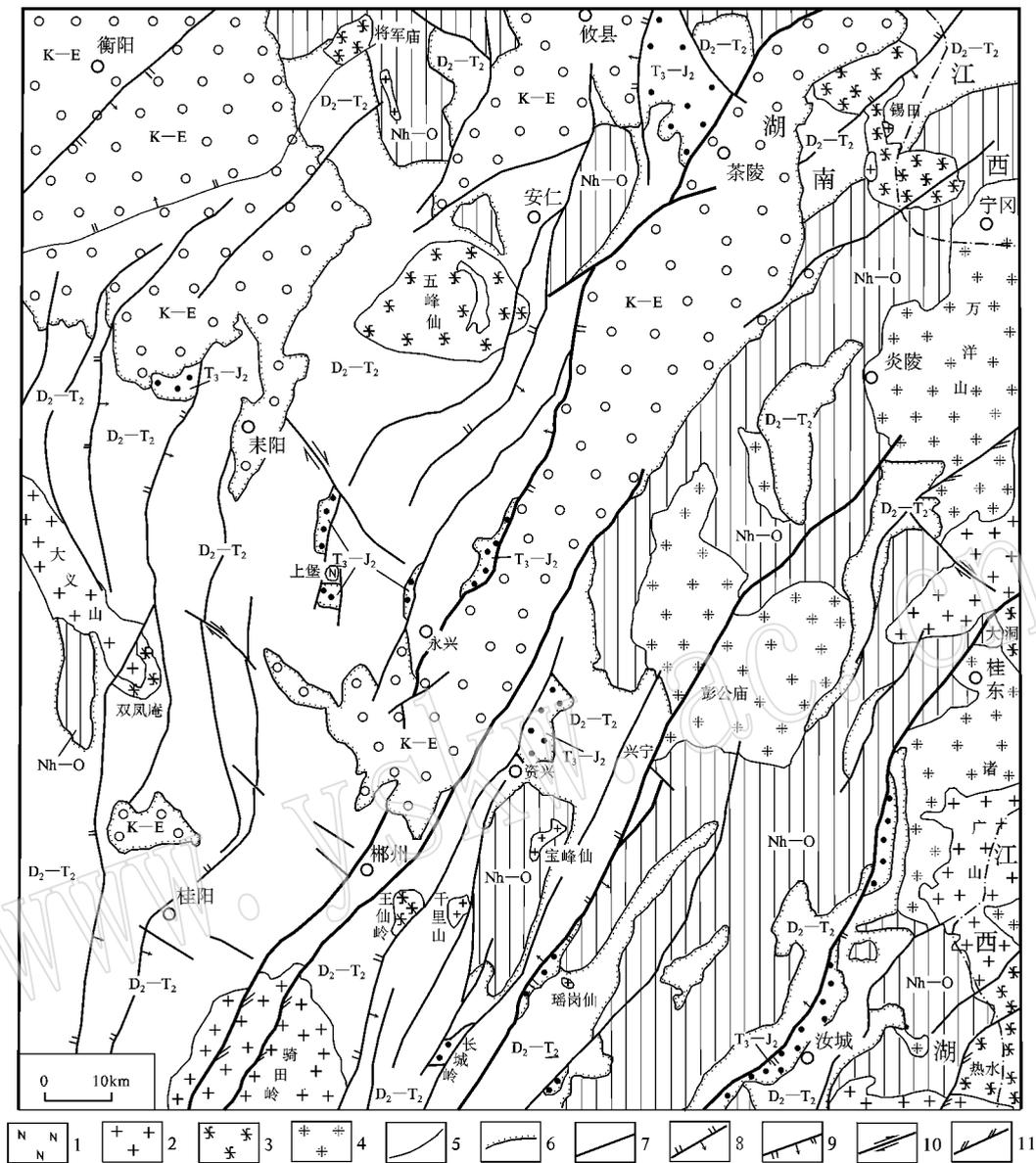


图 1 湘东南及湘粤赣边区地质略图

Fig.1 Geological sketch map of southeast Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area

K - E—白垩纪-古近纪地层； $T_3 - J_2$ —晚三叠世-中侏罗世地层； $D_2 - T_2$ —中泥盆世-中三叠世地层；Nh - O—南华纪-奥陶纪地层；1—白垩纪花岗岩；2—侏罗纪花岗岩；3—印支期花岗岩；4—加里东期花岗岩；5—地质界线；6—角度不整合地质界线；7—断裂；8—逆断裂；9—正断裂；10—平移断裂；11—压扭性断裂

K - E—Cretaceous-Paleogene； $T_3 - J_2$ —Late Triassic-Middle Jurassic； $D_2 - T_2$ —Middle Devonian-Middle Triassic；Nh - O—Nanhuanian-Ordovician；1—Cretaceous granite；2—Jurassic granite；3—Indosinian granite；4—Caledonian granite；5—geological boundary；6—unconformity；7—fault；8—thrust fault；9—normal fault；10—strike-slip fault；11—compressive-shear fault

地层褶皱回返，海洋盆地封闭，从此进入陆地发展阶段。在区域 NWW-SEE 向挤压构造体制下发生强烈的陆内俯冲汇聚(傅昭仁等,1999；柏道远等,2005a)，形成大量构成测区主体构造格架的 NNE 向为主的逆冲断裂与褶皱(柏道远等,2006b)，以及以茶陵-郴州大断裂(主俯冲断裂)为界的东部隆起、西部拗陷的一级构造面貌。在东部炎陵-汝城隆起区出

露大量前泥盆纪褶皱基底；西部衡阳-桂阳拗陷区主要出露泥盆纪—中三叠世沉积盖层，前泥盆纪基底仅于局部次级隆起带小块出露，如将军庙次级隆起等。

## 2 印支期花岗岩分布概况

湘东南印支期花岗岩主要分布于大义山岩体南

东端双凤庵、五峰仙、将军庙、锡田、大洞、王仙岭、热水等地(图 1),其岩石组成如表 1。位于衡阳-桂阳拗陷区内的双凤庵序列和五峰仙序列岩石总体基性程度较高,由角闪石黑云母花岗闪长岩、角闪石黑云母二长花岗岩和黑(二)云母二长花岗岩等组成(本文称之为第 1 组),而位于炎陵-汝城隆起区内的大洞、王仙岭、热水、锡田等序列,以及位于衡阳-桂阳拗陷区将军庙次级隆起带内的将军庙序列,岩石总体酸性程度较高,均由黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩组成(本文称之为第 2 组)。

表 1 中五峰仙、将军庙、王仙岭、热水等岩体年龄系上世纪 70~90 年代用 K-Ar 法测试获得,其可靠性需要评估。笔者近年所做钾长石 K-Ar 法测年(低温冷却年龄)结果表明(柏道远等,2006f),五峰仙岩体为 154 Ma,明显高于已确认为燕山早期的大

义山、骑田岭、大东山等岩体(分别为 121、94 和 128 Ma),从侧面佐证了五峰仙岩体不是形成于燕山早期而是印支期。王仙岭岩体 226 Ma 的 K-Ar 法年龄系 1:5 万郴县幅区域地质调查获得,同时还获得 1 个 222.5 Ma 的白云母 K-Ar 法年龄,2 个年龄值吻合良好,该项目还于燕山早期千里山岩体中获得 155 Ma 的白云母 K-Ar 法年龄(与王仙岭岩体为同批测试样品),与毛景文等(1995)获得的 152 Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄一致。可见,王仙岭岩体印支期 K-Ar 法年龄可信。热水岩体年龄系 1:5 万汝城幅和大坪幅区调获得,该项目同时获得多个相邻燕山早期花岗岩 150 Ma 左右的年龄,同时野外调查表明燕山早期花岗岩与热水岩体间为超动接触关系,因此热水岩体年龄值基本可信。总之,表 1 中所引用印支期 K-Ar 法年龄数据总体可靠。

表 1 湘东南印支期各序列花岗岩主要岩石类型

Table 1 Rock types of Indosinian granitic sequences in southeastern Hunan

序列	年龄/Ma	主要岩石类型	构造部位
双凤庵	22X 锆石 U-Pb 法 <sup>①</sup>	角闪石黑云母花岗闪长岩,角闪石黑云母二长花岗岩	衡阳-桂阳拗陷区
五峰仙	22X 黑云母 K-Ar 法 <sup>②</sup>	角闪石黑云母花岗闪长岩,黑(二)云母二长花岗岩	衡阳-桂阳拗陷区
大洞	22X 锆石 U-Pb 法 <sup>③</sup>	黑云母二长花岗岩,二(白)云母二长花岗岩	炎陵-汝城隆起区
将军庙	237.6 黑云母 K-Ar 法 <sup>④</sup>	黑云母二长花岗岩,二云母二长花岗岩	将军庙次级隆起
王仙岭	226 白云母 K-Ar 法 <sup>⑤</sup>	黑云母二长花岗岩,二云母二长花岗岩	炎陵-汝城隆起区
热水	210 角闪石 K-Ar 法 <sup>⑥</sup>	黑云母二长花岗岩,二云母二长花岗岩	炎陵-汝城隆起区
锡田	228.5 锆石 SHRIMP <sup>⑦</sup>	黑云母二长花岗岩,二云母二长花岗岩	炎陵-汝城隆起区

资料来源:①湖南省地质矿产局区调队,1982.1:5 万白沙镇幅区调报告;②同位素地质年龄资料集(一)(1974);③湖南省地质矿产局区调所,1989.1:5 万桂东县幅和沙田圩幅区调报告;④童潜明(1997);⑤湖南省地质矿产局湘南地质队,1983.1:5 万郴县幅区调报告;⑥湖南省地质矿产局区调队,1985.1:5 万汝城幅和大坪幅区调报告;⑦马铁球等(2005a)。

### 3 印支期花岗岩地球化学特征

#### 3.1 岩石地球化学特征

湘东南印支期花岗岩各主要序列的主元素及部分微量元素分析结果如表 2 所示。由于锡田岩体内印支期花岗岩与燕山早期花岗岩交错共生(马铁球等,2005a)时代成分比较复杂,为避免偏差,以下分析数据中未包括锡田岩体。由表 2 可见,湘东南印支期花岗岩  $\text{SiO}_2$  含量变化较大,在 61.37%~77.76% 之间,平均为 71.12%。其中第 1 组花岗岩  $\text{SiO}_2$  平均含量总体较低,为 69.68%;而第 2 组花岗岩  $\text{SiO}_2$  平均含量相对较高,为 72.23%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高,在 11.58%~16.00% 之间,平均为 13.81%; $\text{K}_2\text{O}$  含量较高,在 2.72%~6.27% 之间,平均为

4.59%;全碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )含量为 5.10%~8.63%,平均为 7.29%。 $\text{K}_2\text{O}$  普遍大于  $\text{Na}_2\text{O}$ ,除含量异常样品 C15( $\text{Na}_2\text{O}$  过低)外, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值变化在 1.12~2.65 之间,平均为 1.65; $\text{FeO}^T$  为 1.17%~6.23%,平均 3.35%; $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  含量较高,平均分别为 0.35%、0.72%、1.54%、0.20%。

Frost 等(2001)提出了花岗质岩石的新的分类方案,其依据是 3 个地球化学变量,即 Fe 数[ $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ ,这里 FeO 为全 Fe],修改的碱钙指数( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ )以及铝饱和指数[ $\text{ASI}, \text{Al}/(\text{Ca} - 1.67\text{P} + \text{Na} + \text{K})$ 分子比],根据这些参数以及 ANK[ $\text{Al}/(\text{Na} + \text{K})$ 分子比],印支期花岗岩总体属铁质、钙碱性-碱钙性及过铝质花岗岩(图 2a~c),其中第 1 组花岗岩主要为弱过铝(个别为准铝),少部分为强过铝,ASI 值 0.96~1.29,平均为 1.08;第 2 组

表 2 湘东南印支期花岗岩主要元素成分 ( $w_B/\%$ ) 和部分微量元素丰度 ( $w_B/10^{-6}$ )Table 2 Petrochemical components ( $w_B/\%$ ) and contents of some trace elements ( $w_B/10^{-6}$ ) in Indosinian granites, southeast Hunan

样品号	C14	C15	C96	C83	C82	C86	C114	C113	F56	H55	Y5004	Y5100	Y5411	H51	H14	YX7199	YX7300	H13
序列	王仙岭	王仙岭	热水	热水	热水	热水	大洞	大洞	将军庙	将军庙	双凤庵	双凤庵	双凤庵	双凤庵	五峰仙	五峰仙	五峰仙	五峰仙
SiO <sub>2</sub>	72.16	73.17	72.16	74.85	73.18	70.60	74.95	61.37	77.76	72.68	70.66	67.54	69.41	68.24	72.64	70.65	69.28	68.85
TiO <sub>2</sub>	0.21	0.12	0.46	0.11	0.21	0.36	0.10	0.83	0.04	0.26	0.43	0.55	0.54	0.37	0.25	0.46	0.36	0.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.57	16.00	13.05	13.34	13.37	14.38	13.89	15.62	11.58	12.69	12.65	13.35	13.68	13.30	14.09	14.31	15.21	14.53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.34	0.53	0.28	0.13	0.60	0.22	0.53	0.16	0.12	3.39	1.38	0.16	0.49	0.36	0.64	0.64	0.97
FeO	2.57	1.52	3.45	1.97	2.22	2.67	0.97	5.75	1.93	3.15	1.07	4.88	4.65	4.27	1.75	2.24	2.62	2.78
MnO	0.07	0.11	0.07	0.05	0.04	0.05	0.09	0.13	0.04	0.07	0.07	0.10	0.03	0.07	0.05	0.08	0.06	0.08
MgO	0.58	0.35	0.82	0.28	0.41	0.60	0.16	3.00	0.25	0.84	0.45	0.45	0.77	0.40	0.53	0.97	0.83	1.24
CaO	1.12	0.37	1.51	0.39	0.93	0.62	0.35	4.80	0.37	1.10	1.70	1.91	1.63	1.95	1.15	2.49	2.81	2.52
Na <sub>2</sub> O	3.08	0.60	2.81	3.19	3.07	2.36	3.63	2.42	2.99	2.78	2.76	2.36	2.24	2.87	2.74	2.84	2.91	3.03
K <sub>2</sub> O	4.44	4.50	3.95	4.64	5.01	6.27	4.34	2.72	4.19	4.73	5.22	5.36	4.42	4.61	5.32	3.85	4.41	4.55
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.32	0.19	0.17	0.22	0.14	0.16	0.21	0.02	0.06	0.16	0.22	0.70	0.13	0.13	—	—	0.14
灼失	1.40	2.10	0.40	0.35	0.78	0.78	0.85	1.70	0.29	0.95	1.01	1.23	0.95	2.58	0.59	1.00	1.00	0.18
总失	99.51	99.50	99.40	99.62	99.57	99.43	99.71	99.08	99.62	99.43	99.57	99.33	99.18	99.28	99.60	99.53	100.13	99.42
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	7.52	5.10	6.76	7.83	8.08	8.63	7.97	5.14	7.18	7.51	7.98	7.72	6.66	7.48	8.06	6.69	7.32	7.58
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.44	7.50	1.41	1.45	1.63	2.65	1.19	1.12	1.40	1.70	1.89	2.27	1.97	1.61	1.94	1.35	1.51	1.50
ASI	1.16	2.60	1.14	1.24	1.12	1.23	1.25	1.01	1.14	1.09	0.96	1.03	1.29	1.01	1.15	—	—	1.01
ANK	1.37	2.73	1.46	1.30	1.27	1.34	1.30	2.25	1.22	1.31	1.24	1.37	1.61	1.34	1.37	1.61	1.59	1.46
A/MF	2.57	4.61	1.71	3.46	3.07	2.37	6.74	0.95	3.24	1.88	1.81	1.36	1.57	1.73	3.29	2.22	2.29	1.75
C/MF	0.39	0.19	0.36	0.18	0.39	0.19	0.31	0.53	0.19	0.30	0.44	0.35	0.34	0.46	0.49	0.70	0.77	0.55
Rb	339.4	848.6	301.0	399.1	386.7	404.5	446.6	122.9	494.8	298.7	—	—	—	313.0	288.9	—	—	214.4
Nb	22.4	45.0	22.2	22.7	22.4	23.3	24.7	19.6	19.4	15.9	—	—	—	27.4	17.3	—	—	13.3
Ta	4.1	14.7	3.3	4.7	3.0	2.3	7.2	1.5	5.1	2.8	—	—	—	2.4	2.9	—	—	1.1
Yb	1.32	1.14	3.52	2.05	1.40	2.21	1.82	2.89	4.30	3.56	—	—	—	4.13	2.07	—	—	2.22
Y	17.02	10.65	39.76	117.46	17.83	23.55	14.4	27.17	36.50	32.66	—	—	—	42.20	23.05	—	—	21.3

样品“Y××”来源于1:5万阳嘉洲幅区调查报告,样品“YX××”来源于1:20万永兴幅区调查报告,其他样品均来源于本项目;本项目样品分析由湖北武汉综合岩矿测试中心完成,岩石化学成分采用ICP-AES分析,除SiO<sub>2</sub>采用碱溶法测定外,其他氧化物均采用酸溶法测定,分析精度优于2%;微量元素采用PE Elan6000型等离子体质谱测定(ICP-MS),除稀土元素与Nb、Ta采用碱溶法测定外,其他微量元素均采用酸溶法测定,分析精度优于1%~3%;ASI=Al/(Na+K)(分子比);ANK=Al/(Ca-1.67P+Na+K)(分子比);A/MF=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(MgO+FeO)(分子比);C/MF=CaO/(MgO+FeO)(分子比),FeO为全铁,“-”表示未分析或未计算。

花岗岩总体为大于 1.1 的强过铝花岗岩,ASI 值 1.01~2.60,平均达 1.30。在硅-钾图(图 2d)中,绝大部分属高钾钙碱性系列,少量属钾玄岩系列。

### 3.2 Sr-Nd 同位素特征

对印支期花岗岩进行了 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素

测定,实验由宜昌地质矿产研究所同位素室完成。分析方法与流程见笔者已发表文献(柏道远等 2005b)。

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测试数据及有关参数值列于表 3。分析结果表明,湘东南印支期花岗岩根据 Sr、Nd 同位素特征可分成 2 组,与前述岩石学特征

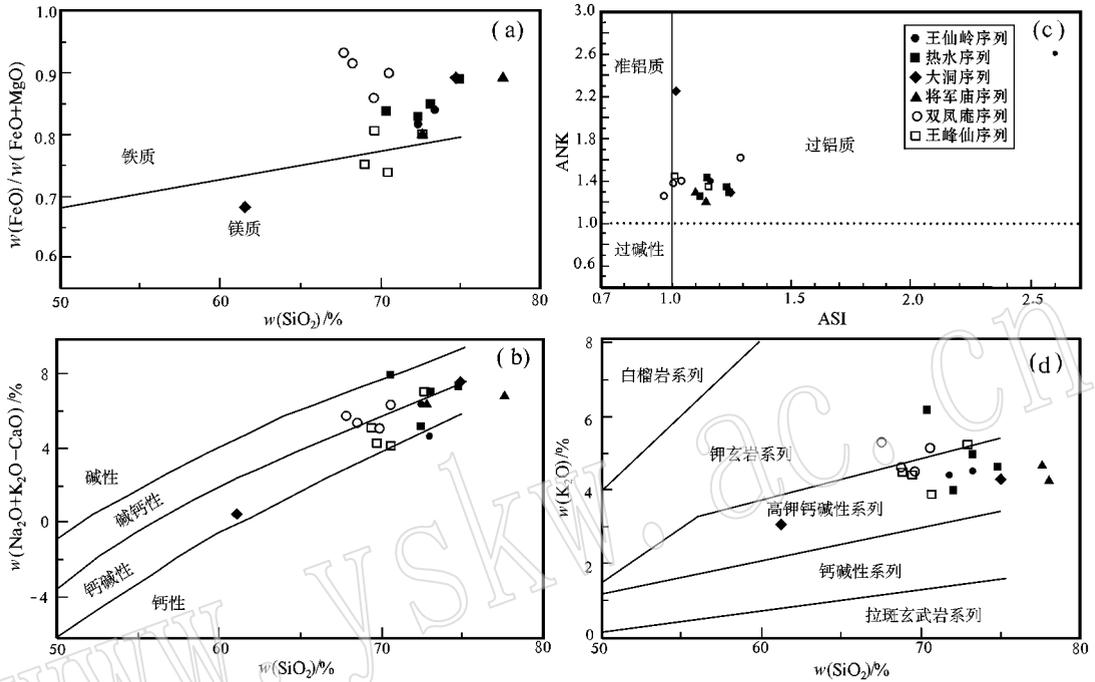


图 2  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$  (a),  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$  (b), ANK - ASI (c) 和  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  (d) 图解

Fig. 2  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$  (a),  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$  (b), ANK - ASI (c) and  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  (d) diagrams

a~c 据 Frost 等(2001), d 据 Peccerillo 等(1976)和 Wheller 等(1987)

a~c after Frost *et al.* (2001), d after Peccerillo *et al.* (1976) and Wheller *et al.* (1987)

分组相对应,第 1 组是位于拗陷区内的双凤庵序列和五峰仙序列,具有相对较低的  $I_{\text{Sr}}$  值(0.708 0~0.716 8)和  $t_{2\text{DM}}$  值(1.48~1.72 Ga)以及相对较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-8.90~-5.83);第 2 组是位于隆起区内的大洞、将军庙、王仙岭、热水等序列,具有相对较高的  $I_{\text{Sr}}$  值(0.715 9~0.734 5)和  $t_{2\text{DM}}$  值(1.81~1.97 Ga)以及相对较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-12.0~-9.85)。

## 4 印支期花岗岩成因与物质来源分析

在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - \epsilon_{\text{Sr}}(t)$  图解(图 3)中,前述 2 组具不同 Sr、Nd 同位素特征的样品点均落在华南 S 型花岗岩区域内(其中双凤庵序列落在 S 型与 I 型分界处),说明成岩物质主要来自地壳的重熔,但具体情

况可能存在一定差异。

有研究表明,湘桂内陆带花岗岩的  $t_{\text{DM}}$  背景值为 1.8~2.4 Ga (Pei *et al.*, 1995; Hong *et al.*, 1998)。华夏地块大部分地区基底岩石的  $t_{\text{DM}}$  在 1.8~2.4 Ga 之间(陈江峰等,1999a),目前在湘桂内陆带内获得广西大容山花岗岩中沉积变质岩捕虏体锆石 U-Pb 年龄为 1.74 Ga (广西地质矿产局,1985),湖南道县中生代玄武岩所含片麻岩包体中磨圆锆石 Pb-Pb 年龄在 1 829~1 397 Ma 之间(王方正等,1997),湖南新化震旦系江口群玄武质火山角砾岩中捕获锆石年龄为 2.43 Ga,湘西白马山花岗岩捕获锆石年龄为 2.71 Ga (甘晓春等,1996),湘南九嶷山岩体中继承性锆石年龄为 2.11 Ma 和 2.70 Ma (付建明等 2004)。上述年龄资料说明区域基底时代主要在 1.7~2.7 Ga 之间。湘东南印支期第 2 组花岗岩的

表 3 湘东南印支期花岗岩 Sr-Nd 同位素组成

$\tau\omega_B/10^{-6}$

Table 3 Sr and Nd isotope compositions of Indosinian granites in southeast Hunan

序列	样品号	年龄/Ma	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\epsilon\text{Sr}(t)$	$I_{\text{Sr}}$
双凤庵	H51	233	314.3	108.50	8.34	0.735 79	50.26	0.708 0
五峰仙	H13	223	238.7	219.90	3.14	0.726 80	175.35	0.716 8
大洞	C114	220	495.7	17.53	83.88	0.996 90	425.11	0.734 5
将军庙	H55	238	322.5	83.31	11.22	0.757 44	213.21	0.715 9
王仙岭	C14	226	363.1	99.79	10.54	0.754 62	230.53	0.720 7
热水	C96	210	312.9	101.30	8.94	0.747 36	229.27	0.720 7
序列	样品号	年龄/Ma	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	$t_{2\text{DM}}/\text{Ga}$
双凤庵	H51	233	8.593	40.27	0.129 1	0.512 236	-5.83	1.48
五峰仙	H13	223	6.700	38.81	0.104 4	0.512 047	-8.90	1.72
大洞	C114	220	1.796	8.01	0.135 6	0.511 996	-10.80	1.87
将军庙	H55	238	5.395	24.95	0.130 8	0.512 031	-9.85	1.81
王仙岭	C14	226	4.359	21.33	0.123 7	0.511 917	-12.00	1.97
热水	C96	210	9.657	50.84	0.114 9	0.512 027	-9.70	1.78

由宜昌地质矿产研究所同位素室测试;  $\epsilon\text{Nd}(t)$ 、 $\epsilon\text{Sr}(t)$ 、 $I_{\text{Sr}}$  和  $t_{2\text{DM}}$  的计算据陈江峰等(1999b); 计算参数为:  $t = 420\text{Ma}$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512 638$ ,  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196 7$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}} = 0.704 5$ ,  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}} = 0.118$ ,  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.213 7$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513 151$ ,  $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}\text{a}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ ; UR 意为铈同位素均一储库, CHUR 意为球粒陨石均一储库, DM 为亏损地幔, CC 为大陆地壳。

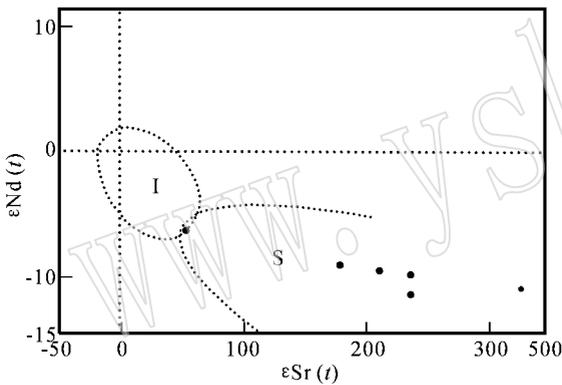


图 3 印支期花岗岩  $\epsilon\text{Nd}(t) - \epsilon\text{Sr}(t)$  图解

Fig. 3  $\epsilon\text{Nd}(t) - \epsilon\text{Sr}(t)$  diagram for Indosinian granites  
I—华南 I 型花岗岩, S—华南 S 型花岗岩(据刘昌实等, 1990)

I—I-type granite in South China, S—S-type granite in South China(after Liu Changshi *et al.*, 1990)

$t_{2\text{DM}}$  值为 1.81~1.97 Ga, 与湘桂内陆带花岗岩背景值、区域基底的时代和  $t_{2\text{DM}}$  值相吻合, 指示源岩应为区域结晶基底。而第 1 组花岗岩(双凤庵序列和五峰仙序列)的  $t_{2\text{DM}}$  值(1.48~1.72 Ga)明显小于区域花岗岩背景值和基底时代或  $t_{2\text{DM}}$  值。由于本区基底岩石的  $t_{2\text{DM}}$  年龄不倾向于有年轻基底地壳的存在(陈江峰等, 1999a), 因此第 1 组花岗岩的低  $t_{2\text{DM}}$  值暗示其在形成过程中很可能有地幔物质的加入。第 1 组岩体的  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值相对较高, 与相对较低的  $t_{2\text{DM}}$  值反映的信息一致。就双凤庵序列和五峰仙序列比较而言, 前者地幔成分的比例可能更高, 具有更低的

$t_{2\text{DM}}$  值和更高的  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值。

前人研究表明, SP 花岗岩(即强过铝花岗岩, 后同)是地壳物质熔融的产物, 属于 S 型花岗岩(Zen, 1986; Sylvester, 1998)。湘东南印支期第 2 组花岗岩为 SP 花岗岩, 应为典型 S 型壳源花岗岩。第 1 组花岗岩铝饱和程度明显偏低, 大多为弱过铝质, 暗示有更深部的物质加入。这一推断得到了 A/MF - C/MF 图解(图 4)的支持。图 4 中第 1 组花岗岩成分点明显偏向基性岩区, 总体位于碎屑岩区与基性岩区的过渡区域; 而第 2 组花岗岩投点总体落在变质泥质岩与变质杂砂岩区。王方正等(1997)研究认为湘南地区地壳结构自上而下依次为: 由新

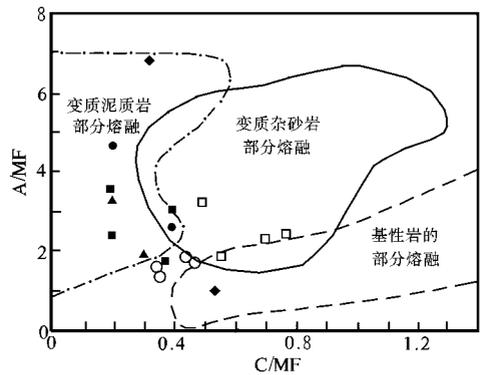


图 4 印支期花岗岩 A/MF - C/MF 图解

Fig. 4 A/MF - C/MF diagram for Indosinian granites  
底图据 Alther 等(2000), 图例同图 2

After Alther *et al.* (2000), symbols as for Fig. 2

元古界以上的浅变质沉积岩、沉积岩及花岗岩类侵入体等组成的上地壳(厚 7.25 km),由结晶片岩、片麻岩等组成的酸性中地壳(厚 13.85 km),由(角闪)辉长岩-斜长岩等组成的基性下地壳(厚 11.83 km)。据此,可进一步推断位于隆起区(带)内的花岗岩源岩主要为中地壳结晶片岩、片麻岩等碎屑岩,而位于拗陷区内的花岗岩源岩除中地壳岩石外,可能还有少量下地壳基性麻粒岩成分的加入。鉴于单纯的地壳加厚作用难以使下地壳基性麻粒岩熔融并形成岩浆房(王岳军等,2002),因此下地壳基性岩的熔融很可能与幔源岩浆的底侵加热有关。底侵作用还为地幔物质的加入提供了条件。

综上所述,Sr、Nd 同位素特征及岩石地球化学特征等一致指示湘东南印支期花岗岩主要为地壳结晶基底(结晶片岩、片麻岩等)重熔产物,但位于拗陷区内的五峰仙序列与双凤庵序列中有下地壳基性岩和地幔物质的加入。

## 5 印支期花岗岩形成的构造环境

### 5.1 花岗岩形成构造环境的地球化学判别

花岗岩构造环境研究在上世纪 90 年代后期随

着后碰撞构造环境和相关术语的提出取得了重要进展。1997 年在法国召开的“后碰撞岩浆作用”国际花岗岩会议将“后碰撞作用”单独划分出来,指时间比碰撞作用晚,但仍与碰撞作用有关系的构造作用。根据会议对碰撞作用、后碰撞作用、晚造山作用、板内环境的涵义所做的新规定,理想的造山演化过程为同造山→后造山→非造山(板内裂谷),其中同造山阶段经历了活动边缘(大洋板块的俯冲)→同碰撞(陆块初始主碰撞)→后碰撞(常为陆内环境,但有地块的大规模相对运动)演化过程(肖庆辉等,2002)。以下讨论花岗岩构造环境即使用上述概念。

在 Maniar 和 Piccol(1989)提出的多组主元素构造环境判别图解中,除双凤庵序列外,其他印支期花岗岩总体均落入 IAG+CAG+CCG 区(图 5),结合其 ASI 平均值达 1.30(大于 1.15),可进一步判断为 CCG(大陆碰撞花岗岩类)而不是 IAG+CAG(肖庆辉等,2002)。双凤庵序列落入 RRG+CEUG 区,暗示与深断裂和深部物质加入有关,这与前述物源分析及后面的构造机制分析相吻合。

利用 Pearce 等(1984)多组微量元素构造环境判别图解进行判别,印支期花岗岩在图 6a 和图 6b 中总体显示为同碰撞花岗岩类,在图 6c 和图 6d 中则

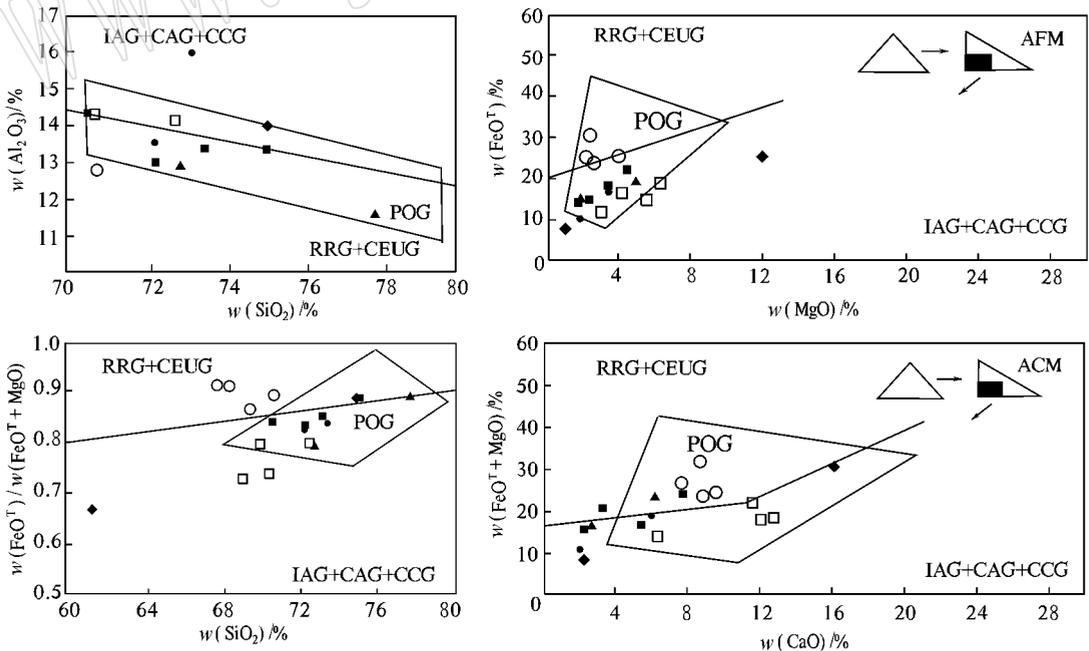


图 5 印支期花岗岩形成的构造环境判别图(据 Maniar 和 Piccoli,1989)

Fig. 5 Diagrams for discrimination of structural environments of granites(after Maniar and Piccoli,1989)

IAG—岛弧花岗岩;RRG—与裂谷有关的花岗岩;CAG—大陆弧花岗岩;CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩类;CCG—大陆碰撞花岗岩类;POG—后造山花岗岩类,图例同图 2

IAG— island-arc granite; RRG—granite related to rift; CAG—continent-arc granite; CEUG—continent emergence-uplift granite; CCG—continent-collision granite; POG—post-orogenic granite; symbols as for Fig. 2

有少量落入板内区,暗示花岗岩形成于碰撞后期。事实上现在的研究表明,大量在 Pearce等(1984)图解中的同碰撞花岗岩其实是后碰撞的产物(肖庆辉等 2002)。

总之,构造环境地球化学判别图解表明,湘东南印支期花岗岩形成于同造山阶段的后碰撞构造环境。这与孙涛等(2003)对南岭东段印支期 SP 花岗岩的研究结论相一致。

### 5.2 花岗岩形成的构造背景

20世纪80年代,Pitcher(1983)和 Pearce等(1984)和 Harris等(1986)都指出,与碰撞有关的 SP 花岗岩是在同碰撞早期的地壳收缩与堆叠的阶段中形成的。然而,近年来的研究却发现大量原先认为与同碰撞有关的 SP 花岗岩其实是后碰撞的,它们是在地壳加厚达到最高值以后才定位的。例如,现有

研究表明欧洲大量、广泛分布的 340~300 Ma 海西期造山作用的 SP 花岗岩几乎全是在与碰撞有关的中压变质事件之后侵位的,而且确实是与晚期的高温/低压区域变质作用有关。

本文研究认为,湘东南印支期花岗岩也是在挤压峰期之后才形成和侵位。首先,中三叠世后期为印支运动陆内俯冲造山作用的主要时期,其造成区内泥盆纪—中三叠世早期地层褶皱回返,海洋盆地封闭,以及晚三叠世—侏罗纪陆相盆地沉积与中三叠世早期地层的角度不整合;而印支期花岗岩的具体时限为中三叠世末—晚三叠世后期(233~210 Ma),时代明显较挤压峰期时间晚(柏道远等, 2005a)。其次,湘东南地区印支期花岗岩均未显示出明显的主动强力就位形迹,而是以受断裂控制的被动侵位机制为主,结合先期为印支运动陆内俯冲

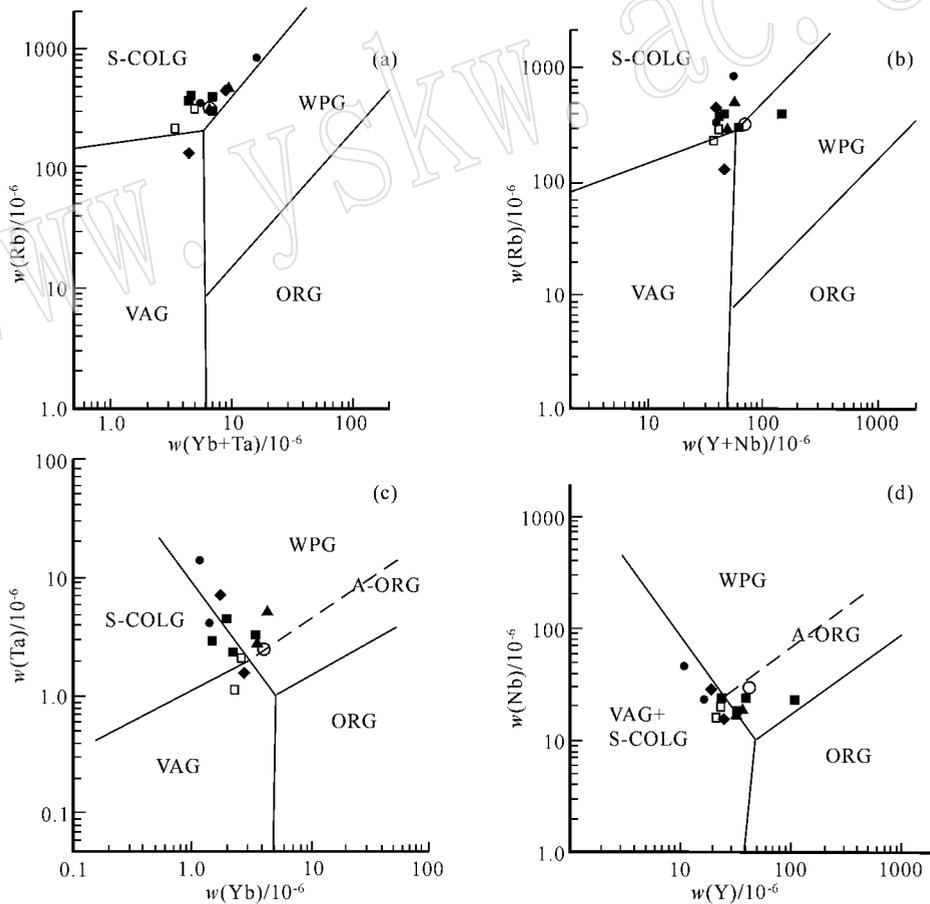


图6 花岗岩微量元素构造环境判别图解(据 Pearce等,1984)

Fig.6 Trace element diagrams for discrimination of structural environments of granite(after Pearce *et al.*, 1984)

VAG—火山弧花岗岩;WPG—板内花岗岩;S-COLG—同碰撞花岗岩;ORG—洋中脊花岗岩;图例同图2

VAG—volcanic-arc granite;WPG—intraplate granite;S-COLG—syncollision granite;ORG—ocean-ridge granite;symbols as for Fig.2

汇聚的高峰期来看,岩体应在挤压应力减弱或挤压松弛的环境下侵位。以王仙岭岩体(柏道远等, 2006c)与五峰仙岩体为例,王仙岭岩体岩石主要具块状构造,岩体长轴方向呈 NNE 向,与区域 NNE 向主干断裂方向一致,岩体边界线与围岩地层走向斜交或直交(图 7),反映出被动侵位机制;五峰仙岩体边界线与围岩地层产状总体呈斜交或直交(图 8),岩体南面局部岩层产状呈与岩体边界强迫一致的趋势,同样反映出被动侵位机制为主和弱挤压或挤压应力松弛环境下侵位。

显然,挤压峰期之后形成和侵位的结论与前述通过地球化学特征所确定的后碰撞构造环境相吻合。

## 6 印支期花岗岩形成机制分析

### 6.1 地壳加厚及其后的减压导致中地壳重熔是岩浆形成的主导因素

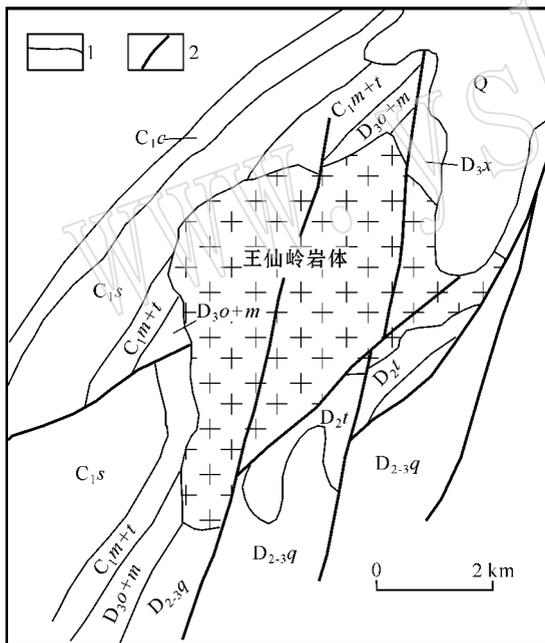


图 7 王仙岭岩体地质略图

Fig. 7 Geological sketch map of Wangxianling pluton  
 Q—第四系;  $C_{1c}$ —早石炭世测水组;  $C_{1s}$ —早石炭世石登子组;  $C_{1m+t}$ —早石炭世马栏边组与天鹅坪组;  $D_{3o+m}$ —晚泥盆世欧家冲组与孟公坳组;  $D_{3x}$ —晚泥盆世锡矿山组;  $D_{2.3q}$ —中-晚泥盆世棋梓桥组;  $D_{2t}$ —中泥盆世跳马涧组; 1—地质界线 2—断裂  
 Q—Quaternary;  $C_{1c}$ —Early Carboniferous Ceshui Formation;  $C_{1s}$ —Early Carboniferous Shidengzi Formation;  $C_{1m+t}$ —Early Carboniferous Malanbian and Tian'eping Formation;  $D_{3o+m}$ —Late Devonian Oujiaochong and Menggongao Formation;  $D_{3x}$ —Late Devonian Xikuangshan Formation;  $D_{2.3q}$ —Middle-Late Devonian Qiziqiao Formation;  $D_{2t}$ —Middle Devonian Tiaomajian Formation; 1—geological boundary 2—fault

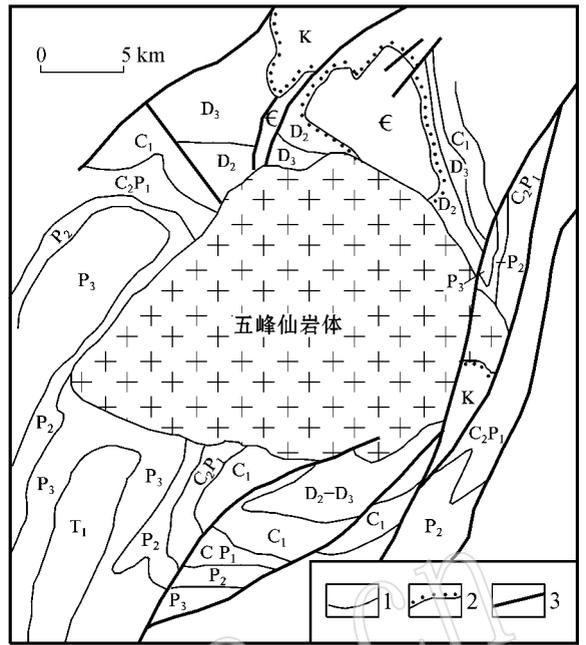


图 8 五峰仙岩体地质略图

Fig. 8 Geological sketch map of Wufengxian pluton  
 K—白垩系;  $P_3$ —上二叠统;  $P_2$ —中二叠统;  $C_2P_1$ —上石炭统—下二叠统;  $C_1$ —下石炭统;  $D_3$ —上泥盆统;  $D_2$ —中泥盆统; €—寒武系; 1—地质界线 2—角度不整合界线 3—断裂  
 K—Cretaceous;  $P_3$ —Upper Permian;  $P_2$ —Middle Permian;  $C_2P_1$ —Upper Carboniferous-Lower Permian;  $C_1$ —Lower Carboniferous;  $D_3$ —Upper Devonian;  $D_2$ —Middle Devonian; €—Cambrian; 1—geological boundary 2—unconformity 3—fault

王岳军等(2002)对湖南印支期过铝质花岗岩的形成进行了数值模拟和综合分析,认为地壳的叠置加厚可导致中下地壳界面温度升高到 700℃ 以上,引起中地壳片麻质岩石熔融而形成花岗岩浆房。构造研究表明,湘赣桂地区在中三叠世中晚期印支运动中遭受了强烈的陆内挤压造山或陆内碰撞汇聚造山作用,强烈的褶皱及逆冲推覆造成了陆壳的增厚(庄锦良等,1988)。笔者对湘东南地区进行的热年代学研究表明,五峰仙、大义山、骑田岭等地区在本次构造事件中地壳可能叠置增厚了 4 100~7 700 m 以上(柏道远等,2006f),可见,地壳增厚应是湘东南印支期花岗岩形成的重要条件和主要原因之一。而从前述构造背景分析来看,笔者以为除地壳增厚外,湘东南印支期花岗岩形成还应具有区域挤压应力松弛的构造环境,在变形和加厚作用的峰期,尽管深部地壳温度升高,但因区域挤压应力的叠加而具有过高的围压,提高了矿物的熔点而使得岩石难以熔融,或即使存在部分熔融,但由于挤压体制下上部壳层的封闭作用,岩浆也难以向上运移侵位。而在峰期变形

之后的后碰撞阶段,区域挤压作用减弱,应力相对松弛,深部压力降低,被充分加温的中地壳岩石因熔点降低而得以熔融,并在相对开放的环境下向上侵位成岩。以上应该就是变形开始—变形峰期阶段内无花岗岩体发育的主要原因。

## 6.2 地幔岩浆底侵使下地壳成分及少量地幔物质加入到坳陷区与深大断裂带内岩体中

实验岩石学的研究表明,壳内物质的深熔作用主要受地壳岩石所经历的最高温度及黑云母、白云母和角闪石含水矿物相的脱水熔融所控制(Clemens *et al.*, 1987; Gardien *et al.*, 1995)。在  $10 \times 10^5$  Pa 时,角闪石的熔点温度约  $920^\circ\text{C}$ ,黑云母和白云母的熔点温度分别约为  $860^\circ\text{C}$  和  $710^\circ\text{C}$ (Patino *et al.*, 1990),可见角闪石的熔融温度较黑云母高出较多,更远远高于白云母。因此,在地壳加厚增温—减压条件下,当位于中、下地壳界面之上的片岩、片麻岩等熔融时,界面之下的基性麻粒岩类不可能熔融(王岳军等, 2002)。由此可以推断,双凤庵序列、五峰仙序列中基性岩成分的加入很可能是由玄武岩浆底侵加热使下地壳熔融所致。双凤庵序列与五峰仙序列花岗岩存在地幔物质加入的印记(如前述),已有研究表明湘南早中生代早期( $\pm 224$  Ma)即已存在基性岩浆的底侵作用(郭锋等, 1997; 赵振华等, 1998),数值模拟表明基性岩浆底侵能导致湘东南印支期地壳的深熔(王岳军等, 2002)等,亦均为存在底侵加热作用的推断提供了支持。不过鉴于同期基性火山岩极少出露的事实,岩浆底侵作用不应是印支期花岗岩形成的主导因素。

由于地壳厚度及构造背景的差异,基性岩浆底侵作用在不同构造部位(隆起区或坳陷区)对印支期花岗岩物质成分的影响并不一致。

印支运动中,茶陵—郴州大断裂西盘向东俯冲消减,使断裂东盘因板片叠置而具有更大的厚度并相对隆起(傅昭仁等, 1999);相对五峰仙—双凤庵一带坳陷区而言,将军庙次级隆起带因印支运动中受到更强烈的挤压(柏道远等, 2005c)也具有相对更大的地壳厚度。可能由于地壳厚度较大,或是没有深部断裂提供运移通道等缘故,与基性岩浆底侵相关的地幔物质及下地壳基性麻粒岩熔融物未能向上加入中地壳岩浆房,使得茶陵—郴州断裂以东隆起区及断裂以西的将军庙次级隆起带内的第二组花岗岩表现为典型的陆壳重熔型 SP 花岗岩。当然,也不完全排除其下部不存在基性岩浆底侵作用的可能。

在印支运动 NWW-SEE 向强烈挤压下,沿大义山—郴州一线及衡阳盆地东面—五峰仙岩体一线分别形成了 NW 向隐伏基底左旋走滑断裂,即区域郴州—邵阳断裂(柏道远等, 2006d)、常德—安仁断裂(柏道远等, 2005c)。位于坳陷区内的五峰仙序列和双凤庵序列(第 1 组花岗岩),即分别发育于 NW 向的安仁—常德和郴州—邵阳基底隐伏大断裂(带)中。由于有断裂与深部沟通,且相对较薄的陆壳使深部物质更易于向上运移到中地壳岩浆房中,基性岩浆底侵作用产生的下地壳熔融物,以及少量地幔物质得以向上加入到中地壳片岩、片麻岩熔融岩浆房中,从而形成基性程度相对较高的花岗闪长岩,并具低  $t_{\text{DM}}$  年龄等 Sr-Nd 同位素特征。需要指出的是,双凤庵序列  $t_{\text{DM}}$  年龄显著低于五峰仙序列,可能与岩体规模有关,后者规模远大于前者,源于中地壳的岩浆量更大,深部物质混入的相对比例相应更小,因此  $t_{\text{DM}}$  年龄相对较高。

## 7 讨论

本文厘定的湘东南印支期花岗岩后碰撞构造环境,与笔者已厘定的湘东南燕山早期花岗岩后造山构造环境之间彼此提供了很好的约束,对华南中生代构造演化研究具有较重要的启示意义。

如前所述,华南印支期花岗岩的形成机制存在碰撞造山作用模式、陆内俯冲造山模式、岩石圈伸展减薄和基性岩浆底侵作用模式以及与之类似的后造山构造环境观点等(付建明等, 2005)。由于越来越多的资料不支持华南内部存在早中生代洋盆或洋陆俯冲作用(Rowley *et al.*, 1989; 陈旭等, 1995; Gilder *et al.*, 1996; Li, 1998),因此碰撞造山模式难以成立。鉴于印支期花岗岩侵位时间与陆内汇聚峰期相差太小,且燕山期花岗岩才是真正的后造山环境的产物(见后述),因此印支期花岗岩形成于后造山环境的观点显然也不能成立。由于湘东南及华南内陆地区印支运动中形成大量的推覆构造和挤压褶皱,叠置与缩短作用无疑会造成地壳显著加厚,因此陆内俯冲造山模式比较可信。而据本文研究结果,汇聚峰期之后的松弛减压环境,即后碰撞构造环境可能是这一模式的关键。基性岩浆底侵可能在一定程度和一定范围内对花岗质岩浆的形成起到作用,不过其影响显然极为有限。

燕山早期构造环境是近年来华南地区中生代地

质研究的重中之重。以往多数人认为晚中生代时华南地区在晚白垩世之前的地球动力学背景是与 Kula 或 Izanagi 板块的俯冲作用有关的安第斯型大陆边缘 (Hide, 1977; 郭令智等, 1983; 王鸿祯等, 1983; Jahn *et al.*, 1990; Lapierré *et al.*, 1997; 殷鸿福等, 1999)。但江西赣江一线的“火山岩线”代表了华南地区受太平洋板块影响的西界 (王德滋等, 2003), 且已有研究表明 180Ma 以来湘东南或华南地区已属陆内造山阶段无疑, 因此燕山早期显然不宜作为与太平洋板块向欧亚板块俯冲有关的岛弧或弧后背景 (王岳军等, 2001b)。近些年来的大量研究 (赵振华等, 1998; 陈培荣等, 1998, 1999a, 1999b, 2002, 2004; 王岳军等, 2001a, 2001b; 范春方等, 2001; 陈志刚等, 2003; 朱金初等, 2003; 蔡明海等, 2004; 付建明等, 2005) 已表明华南地区在燕山早期岩石圈便发生了伸展作用, 且一般认为其深层机制与地幔上涌、壳幔作用等有关, 即直接受制于陆内造山期之后的地球动力学过程。湘东南燕山早期花岗岩的特征也清楚反映出较强烈的岩石圈伸展与壳幔作用, 如千里山岩体、骑田岭等岩体中一般均发育大量的暗色铁镁质微粒包体 (马铁球等, 2005b), 花岗岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值较高 ( $-6.14 \sim -9.8$ ),  $t_{2\text{DM}}$  年龄值较低 (1.22~1.76 Ga) 等 (柏道远等, 2005a)。但这种伸展环境究竟属“后造山”伸展 (陈培荣等, 1998, 2002; 范春方等, 2001; 蔡明海等, 2004) 还是“大陆裂谷”伸展 (陈志刚等, 2003; 陈培荣等, 2004), 尚存在疑问。研究后认为后造山环境更为切合实际, 理由为: ①对湘东南及湘粤赣边区燕山早期近 20 个花岗岩体分别进行了构造环境判别, 发现在 Maniar 等 (1989) 提出的多组主元素构造环境判别图解中, 以及 Pearce 等 (1984) 的微量元素构造环境判别图解中, 大多显示为“后造山”环境而不是“大陆裂谷”环境, 如骑田岭岩体 (柏道远等, 2005b)、宝峰仙岩体 (江西根等, 2006)、诸广山南体 (马铁球等, 2006a)、大东山岩体 (马铁球等, 2006b) 等。②华南南岭地区分布面积极大、发育极为广泛的燕山早期花岗岩类主要为高钾钙碱性岩类 (张敏等, 2003), 这种花岗岩常作为同碰撞岩石圈加厚之后伸展垮塌、向非造山板内环境过渡时期的岩浆作用产物 (Liegeois *et al.*, 1998), 而板内裂谷环境中则以发育数量很少的正长岩、二长岩等为主。尽管赣南全南、塔背等地的正长岩 (陈志刚等, 2003; 陈培荣等, 2004) 及局部的双峰式火山岩 (陈培荣等, 1999a, 1999b) 在一程度

上显示出裂谷环境特征, 但这毕竟不代表华南地区燕山早期岩浆作用的主流, 将其作为局部强拉张作用的产物也许更为合适。如湘东南地区燕山早期玄武岩曾被认为是裂谷环境的产物 (赵振华等, 1998), 但笔者研究表明, 玄武岩喷发早于大规模花岗岩浆侵位, 并形成于同造山上隆伸展环境 (柏道远等, 2006e)。③华南地区印支晚期为陆内俯冲汇聚与后继造山, 而燕山晚期 (白垩纪) 则具强拉张陆内裂谷环境特征。按造山带构造演化的一般规律, 位于中间时期的燕山早期 (晚阶段) 具后造山环境的可能性应大大高于裂谷环境。笔者通过多种地质要素对中生代构造发展背景进行的详细研究表明 (柏道远等, 2005a) 湘东南经历了由中三叠世后期陆内俯冲汇聚高峰 → 中三叠世末—晚三叠世后期挤压相对松弛、花岗岩浆形成侵位 → 晚三叠世末—早侏罗世同造山上隆伸展 → 中侏罗世初期山前冲断收缩盆地发育 → 中侏罗世早期—晚侏罗世后造山花岗岩形成侵位 → 白垩纪板内裂谷拉张的一个完整的演化过程。这一过程符合造山带一般演化规律, 因此对燕山早期花岗岩的后造山构造环境亦给予了颇为可信的约束。

因此, 大量证据表明华南印支期与燕山早期花岗岩分别形成于同造山阶段的后碰撞构造环境和后造山构造环境, 而且两阶段花岗岩的构造环境彼此之间提供了制约。

## 8 结论

(1) 湘东南印支期花岗岩总体属高钾钙碱性过铝质花岗岩, 地球化学特征表明主要来源于中地壳结晶片岩、片麻岩的重熔, 但位于拗陷区深断裂中的花岗岩可能还有少量下地壳基性麻粒岩成分以及幔源组分的加入。

(2) 多种氧化物与微量元素构造环境判别图解, 以及地质特征、构造演化背景等, 表明湘东南印支期花岗岩形成于同造山阶段的后碰撞构造环境。

(3) 地壳加厚及其后的减压导致中地壳重熔是岩浆形成的主导因素, 小规模地幔岩浆底侵使拗陷区深大断裂带内的岩体中混入下地壳成分及少量地幔物质。

(4) 湘东南印支期与燕山早期花岗岩分别形成于同造山阶段的后碰撞构造环境和后造山构造环境, 两阶段花岗岩构造环境彼此之间提供了制约。

## References

- Alther R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 50: 51~73.
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Liu Yaorong, *et al.* 2005a. Framework of Mesozoic tectonic evolution in southeastern Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area [J]. *Geology in China*, 32(4): 557~570 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Chen Jianchao, Ma Tieqiu, *et al.* 2005b. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton, Southeast Hunan [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 255~272 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Xiong Yanwang, Wang Xianhui, *et al.* 2005c. "y" type structure in Anren county, Hunan, and the sinistral strike-slip of Changde-Anren NW-trending fault [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(4): 435~442 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Ma Tieqiu, *et al.* 2006a. Geology and geochemistry of the Silurian Penggongmiao granitic pluton in the Southeastern Hunan Province and its implication for tectonic setting [J]. *Geoscience*, 20(1): 130~140 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Chen Jianchen, Meng Debao, *et al.* 2006b. Forming mechanism of the Indosinian trough-like folds in Yanling region, Hunan province [J]. *Journal of Earth Science and Environmental*, (3): 10~14 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Chen Jiancheng, Ma Tieqiu, *et al.* 2006c. Geochemical characteristics of Wangxianling granitic pluton and its constraints on Late Indosinian tectonic setting of Southeast Hunan [J]. *Geochimica*, 35(2): 113~125 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Wang Xianhui, *et al.* 2006d. Sinistral strike-slip motion of the NW-trending Shaoyang-Chenzhou fault and genesis of the N-S-trending Shuikoushan-Xianghualing tectonic zone in Hunan [J]. *Geology in China*, 33(1): 56~63 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Wang Yongqing, Wang Xianhui, *et al.* 2006e. The nature of the Rucheng Basin in southeastern Hunan and its significance to the tectonic setting of South China during the early Yanshanian [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(1): 47~54 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Meng Debao, *et al.* 2006f. Mes-Cenozoic thermochronological analysis on the uplift process of mounts in southeast Hunan [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(6): 525~536 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan Province. 1997. Stratigraphy (lithostratic) of Hunan Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese with English abstract).
- Cai Minghai, Liang Ting, Wu Decheng, *et al.* 2004. Geochemical characteristics of granites and its structural genetic environment in the Nandan-Hechi metallogenetic belt, northwest Guangxi [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 306~313 (in Chinese with English abstract).
- Chen Haihong and Xiao Wenjiao. 1998. Archipelago orogenesis—Examples from Indosinian orogenic belts in south China [J]. *Earth Science Frontiers*, 5(sup.): 95~100 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jiangfeng, Guo Xinsheng, Tang Jiafu, *et al.* 1999a. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35(6): 649~658 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jiangfeng and Jiang Boming. 1999b. Nd Sr Pb isotope traces and evolution of continental crust of SE China [A]. Zheng Yongfei. *Chemical Geodynamics* [C]. Beijing: Science Press, 262~287 (in Chinese with English abstract).
- Chen Peirong, Zhang Bangtong, Kong Xinggong, *et al.* 1998. Geochemical characteristics and tectonic implication of Zhaibei A-type Granitic intrusives in south Jiangxi province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 289~298 (in Chinese with English abstract).
- Chen Peirong, Kong Xinggong, Ni Qisheng, *et al.* 1999a. Ascertainment and implication of the early Yanshanian bimodal volcanic associations from south Jiangxi Province [J]. *Geological Review*, 45(sup): 734~741 (in Chinese with English abstract).
- Chen Peirong, Kong Xinggong, Wang Yinxi, *et al.* 1999b. Rb-Sr isotopic dating and significance of early Yanshanian bimodal volcanic-intrusive complex from south Jiangxi Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 378~383 (in Chinese with English abstract).
- Chen Peirong, Hua Renmin, Zhang Bangtong, *et al.* 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: Petrological constraints on and geodynamic settings [J]. *Science China (D)*, 45(8): 755~768.
- Chen Peirong, Zhou Xinmin, Zhang Wenlan, *et al.* 2004. Origin of Early Yanshanian syenite-granitic complexes in eastern Nanling region and its implication [J]. *Science China (D)*, 34(6): 493~503 (in Chinese).
- Chen Xu, Xu Jiawei and Rowley D B. 1995. Is the early Paleozoic Banxiocean in South China necessary? [J]. *Geological Review*, 41(5): 389~398 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhigang, Li Xianhua, Li Wuxian, *et al.* 2003. SHRIMP U-Pb zircon age of the Quannan syenite, southern Jiangxi: Constraints on the early Yanshanian tectonic setting of SE China [J]. *Geochimica*, 32(3): 223~229 (in Chinese with English abstract).
- Clemens J D and Vielzeuf D. 1987. Constraints on melting and magma Production in the crust [J]. *Earth and planetary Science Letters*, 86: 287~306.
- Fan Chunfang and Chen Peirong. 2001. Geochemical characteristics and tectonic implication of Beitou A-type granitic intrusive in south Jiangxi Province [J]. *Geochimica*, 29(4): 358~366 (in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2 033~2 048.
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Jiuyishan composite granite in Hunan and its geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(4): 370~378 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, *et al.* 2005. Ascertainment of the Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tec-

- tonic settings [ J ]. *Geochimica*, 34( 3 ): 215 ~ 226 ( in Chinese with English abstract ).
- Fu Zhaoren, Li Zijin and Zheng Dayu. 1999. Structural pattern and tectonic evolution of NNE-trending strike-slip orogenic belt in the border region of Hunan and Jiangxi Provinces [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 6( 4 ): 263 ~ 272 ( in Chinese with English abstract ).
- Gan Xiaochun, Zhao Fengqing, Jin Wenshan, *et al.* 1996. The information of Paleoproterozoic-Archaean U-Pb zircon age of magmatic rocks in South China [ J ]. *Geochimica*, 25( 2 ): 112 ~ 120 ( in Chinese with English abstract ).
- Gardien V, Thompson A B, Grujic D, *et al.* 1995. Experimental melting of biotite + quartz  $\pm$  muscovite assemblages and implications for crustal melting [ J ]. *J. Geophys. Res.*, 100 : 15 581 ~ 15 591.
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, *et al.* 1996. Isotopic and Paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 101( B7 ): 16 137 ~ 16 154.
- Guangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1985. Regional Geology of Guangxi Province [ M ]. Beijing : Geological Publishing House ( in Chinese with English abstract ).
- Guo Feng, Fan Weiming, Lin Ge, *et al.* 1997. Chronology and petrogenesis of gabbro inclusion in Daoxian County, Hunan Province [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 42( 15 ): 1 661 ~ 1 663 ( in Chinese ).
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen and Ma Ruishi. 1983. The formation and evolution of the West-Pacific Mesozoic active continental margin and island arc [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 57( 1 ): 11 ~ 21 ( in Chinese with English abstract ).
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [ A ]. Coward M P and Ries A C, eds. *Collision Tectonics* [ C ]. Hyde D. 1977. The evolution of Western Pacific plate and its margin [ J ]. *Tectonophysics*, 38 : 115 ~ 165.
- Hong Dawei, Xie Xilin and Zhang Jisheng. 1998. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny [ J ]. *Res. Geol.*, 48 : 251 ~ 263.
- Hsü K J, Li J L, Chen H H, *et al.* 1990. Tectonic of South China : Key to understanding West Pacific geology [ J ]. *Tectonophysics*, 183 : 9 ~ 39.
- Jahn B M, Zhou X H and Li J L. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan : Isotopic and geochemical constraints [ J ]. *Tectonophysics*, 183 : 145 ~ 160.
- Jiang Xigen, Bai Daoyuan, Chen Jianchao, *et al.* 2006. Geochemical characteristics and tectonic setting of Baofengxian Early Yanshanian granites, southeast Hunan [ J ]. *Geotectonica et Metallogenia*, 30( 2 ): 206 ~ 219 ( in Chinese with English abstract ).
- Jin Wenshan and Sun Dazhong. 1997. Deep Crustal Structure and Its Evolution in South China [ M ]. Beijing : Geological Publishing House ( in Chinese with English abstract ).
- Lapierrere 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 [ J ]. *Tectonophysics*, 274 : 321 ~ 338.
- Li Z X. 1998. Tectonic history of the Major East Asian lithospheric Blocks since the Mid-proterozoic—A synthesis [ A ]. Flower M F J, Chong Sunlin, Lo Chinghua, *et al.* Dynamics and Plate Interactions in East Asia [ C ]. *Geodynamics* 27, American Geophysical Union, Washington, D. C., 221 ~ 243.
- Liegeois J-P, Navez J, Hertogen J, *et al.* 1998. Contrasting origin of post-collisional high-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization [ J ]. *Lithos*, 45 ( com ): 1 ~ 28.
- Liu Changshi, Zhu Jinchu, Shen Weizhou, *et al.* 1990. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in south China [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 64( 1 ): 43 ~ 52 ( in Chinese with English abstract ).
- Ma Tieqiu, Bai Daoyuan and Wang Xianhui. 2005a. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, southeastern Hunan, and its geological significance [ J ]. *Geological Bulletin of China*, 24( 5 ): 415 ~ 419 ( in Chinese with English abstract ).
- Ma Tieqiu, Wu Guangying, Jia Baohua, *et al.* 2005b. Middle-Late Jurassic granite magma-mixing in the middle segment of the Nanling Mountains, south China : evidence from mafic microgranular enclaves [ J ]. *Geological Bulletin of China*, 24( 6 ): 506 ~ 512 ( in Chinese with English abstract ).
- Ma Tieqiu, Kuang Jun, Bai Daoyuan, *et al.* 2006a. Geochemical characteristics and tectonic setting of the early Yanshanian South Zhuguangshan granite in the central segment of the Nanling Mountains [ J ]. *Geology in China*, 33( 1 ): 119 ~ 131 ( in Chinese with English abstract ).
- Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, Kuang Jun, *et al.* 2006b.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating and geochemical characteristics of the granites in north Dadongshan pluton, Nanling Mountains [ J ]. *Geochimica*, 35( 4 ): 346 ~ 358 ( 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.
- Mao Jingwen, Li Hongyan and Pei Rongfu. 1995. Nd-Sr isotopic and petrogenetic studies of the Qianlishan granite stock, Hunan Province [ J ]. *Mineral Deposits*, 14( 3 ): 235 ~ 242 ( in Chinese with English abstract ).
- Patino Dounce A E, Humphreys E D and Johnston A D. 1990. Anatexis and metamorphism in tectonically thickened continental crust exemplified by the Sevier hinterland, western North America [ J ]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 97 : 290 ~ 315.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [ J ]. *J. Petrol.*, 25( 4 ): 956 ~ 983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [ J ]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58( 1 ): 63 ~ 81.
- Pei R F and Hong D W. 1995. The granites of south China and their metallogeny [ J ]. *Episodes*, 18 : 77 ~ 82.
- Pitcher W S. 1983. Granite type and tectonic environment [ A ]. Hsu K. Mountain Building Processes [ C ]. London : Academic Press, 19 ~ 40.
- Rowley D B, Ziegler A M and Nie Gyong. 1989. Comment and reply on " Mesozoic overthrust tectonics in South China " [ J ]. *Geology*, 17 : 384 ~ 387.
- Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, *et al.* 2003. Petrogenesis of Mesozoic strongly peraluminous granites in the eastern Nanling and their geotectonic implications [ J ]. *Science China ( D )*, 23( 12 ): 1 209 ~ 1 218 ( in Chinese ).

- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45: 29~44.
- Tong Qianming. 1997. The main metallogenic series and metallogenic models of nonferrous and precious metallic mineral deposits in Hunan [J]. *Hunan Geology* (suppl. 9): 25 (in Chinese).
- 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 Fangzheng, Li Hongli, Zhu Qinwen, et al. 1997. Assemblages of anatexitic xenoliths from volcanic and the petrology model of lithosphere in south Hunan province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 16(3): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guangjie, Teng Jiwen and Zhang Zhongjie. 2000. The continental structure pattern of south China and its marginal regions[J]. *Progress in Geophysics*, 15(3): 25~43 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongzhen, Yang Sennan and Li Sitian. 1983. The basins and tectonic evolution of the cotinental magin in East China and its surrounding areas from Mesozoic to Cenozoic[J]. *Acta Geologica Sinica*, 57(3): 213~223 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinguang. 1991. Study on the Caledonian granites in South China and their tectonic environments[D]. Nanjing: Department of Earth Sciences, Nanjing University (in Chinese).
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, et al. 2001a. U-Pb dating of early Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province, South China and its petrogenetic implications[J]. *Science in China (Series D)*, 31(9): 745~751 (in Chinese).
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, et al. 2001b. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in southeast Hunan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 169~173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Xi Xianwu, Fan Weiming, et al. 2002. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan Province: Basaltic underplating versus tectonic thickening[J]. *Science in China (Series D)*, 45(11): 1042~1056.
- Wheller G E, Varne R, Foden J D, et al. 1987. Geochemistry of Quaternary volcanism in the Sunda-Banda arc, Indonesia, and three-component genesis of island-arc basaltic magmas[J]. *J. Volcan. Geotherm. Res.*, 32: 137~160.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. 2002. The Ways of Investigation on Granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 21~36 (in Chinese).
- Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. 1999. South China defined as part of Tethyan Archipelagic ocean system[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 24(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Zen E. 1986. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: some mineralogic and petrologic constraints[J]. *Journal of Petrology*, 27: 1095~1117.
- Zhang Min, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. 2003. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dadongshan granite pluton in mid Nanling range[J]. *Geochimica*, 32(6): 530~539 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei and Zhang Boyou. 1998. Geochemistry of the Mesozoic basaltic rocks in southern Hunan Province[J]. *Science China (D)*, 41(suppl. ): 7~14 (in Chinese).
- Zhu Jinchu, Huang Gefei, Zhang Peihua, et al. 2003. On the emplacement age and material sources for the granites of Cailing superunit, Qitianling Pluton, south Hunan Province[J]. *Geological Review*, 49(3): 245~252 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Jinliang, Liu Zhongwei, Tan Bixiang, et al. 1988. Relation of the small rock bodies in southern Hunan to the formation of ore deposits and prognosis of concealed deposit[J]. *Hunan Geology* (suppl. 4): 1~98 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 柏道远, 黄建中, 刘耀荣, 等. 2005a. 湘东南及湘粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定[J]. *中国地质*, 32(4): 557~570.
- 柏道远, 陈建超, 马铁球, 等. 2005b. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(4): 255~272.
- 柏道远, 熊延望, 王先辉, 等. 2005c. 湖南常德-安仁 NW 向断裂左旋走滑与安仁“y”字型构造[J]. *大地构造与成矿学*, 29(4): 435~442.
- 柏道远, 黄建中, 马铁球, 等. 2006a. 湘东南志留纪彭公庙花岗岩体的地质地球化学特征及其构造环境[J]. *现代地质*, 20(1): 130~140.
- 柏道远, 陈建成, 孟德保, 等. 2006b. 湖南炎陵印支期隔槽式褶皱形成机制探讨[J]. *地球科学与环境学报*, (3): 10~14.
- 柏道远, 陈建成, 马铁球, 等. 2006c. 王仙岭岩体地质地球化学特征及其对湘东南印支晚期构造环境的制约[J]. *地球化学*, 35(2): 113~125.
- 柏道远, 黄建中, 王先辉, 等. 2006d. 湖南邵阳-郴州北西向左旋走滑暨水口山-香花岭南北向构造成因[J]. *中国地质*, 33(1): 56~63.
- 柏道远, 汪永清, 王先辉, 等. 2006e. 湘东南汝城盆地性质及其对华南燕山早期构造环境的启示[J]. *沉积与特提斯地质*, 26(1): 47~54.
- 柏道远, 黄建中, 孟德保, 等. 2006f. 湘东南地区中、新生代山体隆升过程的热年代学研究[J]. *地球学报*, 27(6): 525~536.
- 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[J]. *大地构造与成矿学*, 28(3): 306~313.
- 陈海泓, 肖文交. 1998. 多岛海型造山作用——以华南印支期造山带为例[J]. *地学前缘*, 5(增刊): 95~100.
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 等. 1999a. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 35(6): 649~658.
- 陈江峰, 江博明. 1999b. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[A]. 郑永飞, 化学地球动力学[C]. 北京: 科学出版社, 262~287.
- 陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 等. 1998. 赣南寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义[J]. *岩石学报*, 14(3): 289~298.
- 陈培荣, 孔兴功, 倪琦生, 等. 1999a. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩厘定和意义[J]. *地质论评*, 45(增刊): 734~741.
- 陈培荣, 孔兴功, 王银喜, 等. 1999b. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的 Rb-Sr 同位素定年及意义[J]. *高校地质学报*, 5(4): 378~383.
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球化学动力学背景[J]. *中国科学(D 辑)*, 32

- (4):279~289.
- 陈培荣,周新民,张文兰,等. 2004. 南岭东段燕山早期正长岩-花岗岩杂岩的成因和意义[J]. 中国科学(D辑),34(6):493~503.
- 陈旭,徐嘉纬,Rowley D B. 1995. 华南存在古生代板溪洋吗?[J]. 地质论评,41(5):389~398.
- 陈志刚,李献华,李武显,等. 2003. 赣南全南正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对华南燕山早期构造背景的制约[J]. 地球化学,33(3):223~229.
- 付建明,马昌前,谢才富,等. 2004. 湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学,28(4):370~378.
- 付建明,马昌前,谢才富,等. 2005. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析[J]. 地球化学,34(3):215~226.
- 范春方,陈培荣. 2001. 赣南陂头 A 型花岗岩的地质地球化学特征及其形成的构造背景[J]. 地球化学,29(4):358~366.
- 傅昭仁,李紫金,郑大瑜. 1999. 湘赣边区 NNE 向走滑造山带构造发展样式[J]. 地学前缘,6(4):263~272.
- 甘晓春,赵凤清,金文山,等. 1996. 华南火成岩中捕获锆石的早元古代—太古宙 U-Pb 年龄信息[J]. 地球化学,25(2):112~120.
- 广西省地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 郭锋,范蔚茗,林舸,等. 1997. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨[J]. 科学通报,42(15):1661~1663.
- 郭令智,施央申,马瑞士. 1983. 西太平洋中生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化[J]. 地质学报,57(1):11~21.
- 湖南省地质矿产局. 1997. 湖南省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 江西根,柏道远,陈建超,等. 2006. 湘东南宝峰仙地区燕山早期花岗岩地球化学特征及其构造环境[J]. 大地构造与成矿学,30(2):206~219.
- 金文山,孙大中. 1997. 华南大陆深部地壳结构及其演化[M]. 北京:地质出版社.
- 刘昌实,朱金初,沈渭洲,等. 1990. 华南陆壳改造系列花岗岩类型划分和成岩物质来源[J]. 地质学报,64(1):43~52.
- 马铁球,柏道远,王先辉. 2005a. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 地质通报,24(5):415~419.
- 马铁球,伍光英,贾宝华,等. 2005b. 南岭中段郴州一带中、晚侏罗世花岗岩浆的混合作用——来自镁铁质微粒包体的证据[J]. 地质通报,24(6):506~512.
- 马铁球,邝军,柏道远,等. 2006a. 南岭中段诸广山南体燕山早期花岗岩地球化学特征及其形成的构造环境分析[J]. 中国地质,33(1):119~131.
- 马铁球,柏道远,邝军,等. 2006b. 南岭大东山岩体北部<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年及地球化学特征[J]. 地球化学,35(4):346~358.
- 毛景文,李红艳,裴荣富. 1995. 湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究[J]. 矿床地质,14(3):235~242.
- 孙涛,周新民,陈培荣,等. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑),23(12):1209~1218.
- 童潜明. 1997. 湖南主要有色金属贵金属矿床成矿系列与成矿模式[J]. 湖南地质(增刊第9号):25.
- 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.
- 王方正,李红丽,朱勤文,等. 1997. 湘南火山岩深源包体组合及岩石圈岩石学模型[J]. 地质科技情报,16(3):1~7.
- 王光杰,滕吉文,张中杰. 2000. 中国华南大陆及陆缘地带的大地构造基本格局[J]. 地球物理学进展,15(3):25~43.
- 王鸿祯,杨森楠,李思田. 1983. 中国东部及邻区中、新生代盆地发育及大陆边缘区的构造发展[J]. 地质学报,57(3):213~223.
- 王新光. 1991. 华南加里东期花岗岩研究及其形成的地质构造背景分析[D]. 南京:南京大学地球科学系.
- 王岳军,范蔚茗,郭锋,等. 2001a. 湘东南中生代花岗闪长岩锆石 U-Pb 法定年及其成因指示[J]. 中国科学(D辑),31(9):745~751.
- 王岳军,范蔚茗,郭锋,等. 2001b. 湘东南中生代花岗闪长质小岩体的岩石地球化学特征[J]. 岩石学报,17(1):169~175.
- 王岳军,席先武,范蔚茗,等. 2002. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成—岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟[J]. 中国科学(D辑),32(6):491~499.
- 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,21~36.
- 殷鸿福,吴顺宝,杜远生,等. 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学,24(1):1~12.
- 张敏,陈培荣,张文兰,等. 2003. 南岭中段大东山花岗岩体的地球化学特征和成因[J]. 地球化学,32(6):530~539.
- 赵振华,包志伟,张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学(D辑),28(增刊):7~14.
- 朱金初,黄革非,张佩华,等. 2003. 湖南骑田岭岩体菜岭超单元花岗岩侵位年龄和物质来源研究[J]. 地质论评,49(3):245~252.
- 庄锦良,刘钟伟,谭必祥,等. 1988. 湘南地区小岩体与成矿关系及隐伏矿床预测[J]. 湖南地质(增刊第4号):1~98.