

# 中国东南部晚中生代花岗岩成因与深部动力学机制 ——古太平洋板块反复俯冲-后退模式

姜耀辉, 王国昌

南京大学 地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023

**摘要:** 中国东南部晚中生代构造-岩浆活动强烈, 花岗岩广泛分布。笔者近几年在赣南和闽西北鉴别出一系列早侏罗世镁铁质岩石和 A 型花岗岩, 其中 A 型花岗岩呈北东向展布, 构成一条早侏罗世 A 型花岗岩带。结合前人研究成果发现, 中国东南部还存在另外 3 条 A 型花岗岩带, 分别为晚侏罗世、早白垩世和晚白垩世 A 型花岗岩带, 它们与早侏罗世 A 型花岗岩带一样均呈北东向展布, 平行于现今海岸线, 其中晚侏罗世 A 型花岗岩带更靠内陆一侧, 早白垩世 A 型花岗岩带几乎与早侏罗世 A 型花岗岩带重叠, 晚白垩世 A 型花岗岩带则分布于沿海地区。通过镁铁质和花岗质岩石成因综合研究, 认为中国东南部晚中生代构造-岩浆活动可用古太平洋板块反复俯冲-后退模式来解释。

**关键词:** 晚中生代; 花岗岩; 地球动力学机制; 板片反复俯冲-后退; 古太平洋板块; 中国东南部

中图分类号: P541 文章编号: 1007-2802(2016)06-1073-09 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.06.001

## Petrogenesis and Geodynamics of Late Mesozoic Granitoids in SE China: Tectonic Model Involving Repeated Slab-advance-retreat of the Paleo-Pacific Plate

JIANG Yao-hui, WANG Guo-chang

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering,  
Nanjing University, Nanjing 210023, China

**Abstract:** During late Mesozoic times, extensive magmatism took place in SE China, forming widespread granitoids. Recently, we identify a series of Early Jurassic mafic rocks and A-type granites in southern Jiangxi and western Fujian provinces. The Early Jurassic A-type granites occur as a NE-trending belt. By integrated previously published data, we find that there are other three A-type granite belts in SE China, i.e., the Late Jurassic, Early Cretaceous, and Late Cretaceous A-type granite belts, respectively, all of which are NE-trending, parallel to the present coastline. The Late Jurassic belt is located further inland, to the west of the Early Jurassic belt, whereas the Early Cretaceous belt almost overlaps the Early Jurassic belt and the Late Cretaceous belt is located at the coastal area of SE China. Integrated these observations, we propose a repeated slab-advance-retreat model for the late Mesozoic magmatic evolution of SE China.

**Key words:** late Mesozoic; granites; geodynamics; slab-advance-retreat; Palaeo-Pacific plate; SE China

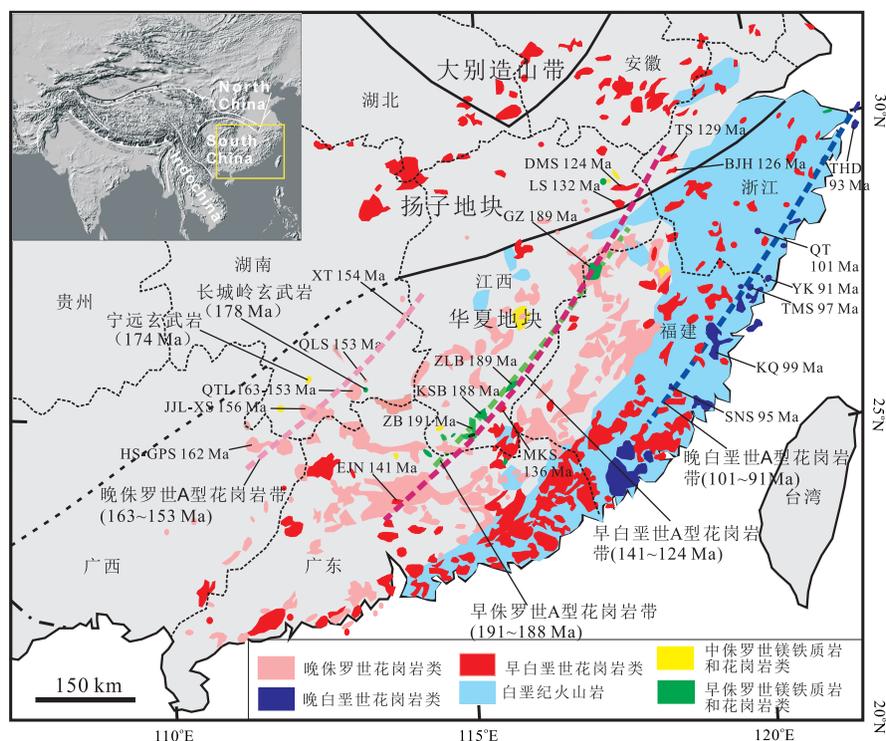
中国东南部在晚中生代时期发生了广泛而强烈的构造-岩浆活动, 形成了一条长约 600 km、平行于现今海岸线的火山-侵入岩杂岩带(图 1)。侵入岩以花岗质岩体为主体, 镁铁质岩石出露较少, 其中侏罗纪岩体主要分布于靠内陆一侧, 白垩纪岩体则主要分布在沿海地区; 火山岩主要形成于白垩纪, 广泛分布于沿海地区(图 1)。侏罗纪花岗岩以

晚侏罗世岩体为主体, 中侏罗世岩体相对较少(图 1)。此外, 前人通常认为早侏罗世是华南岩浆活动宁静期, 代表古特提斯构造域向太平洋构造域的转换时期(Zhou *et al.*, 2006)。尽管前人已对区内岩浆岩作了大量研究, 但关于岩浆作用的大地构造背景及深部动力学机制还存在很大的争论。虽然目前越来越多的学者认为中国东南部晚中生代大规模

收稿日期: 2016-08-01 收到, 2016-10-14 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272083); 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB416706)

第一作者简介: 姜耀辉(1964-), 男, 博士生导师, 研究方向: 岩浆岩岩石学和矿床地球化学. E-mail: yhj186@hotmail.com.



早侏罗 A 型花岗岩带: 本次研究, 包括光泽 (GZ)、珠兰埠 (ZLB)、柯树北 (KSB) 和寨背 (ZB); 晚侏罗世 A 型花岗岩带: 锡田 (XT, 姚远等, 2013); 千里山 (QLS, Jiang *et al.*, 2006); 骑田岭 (QTL, Zhu *et al.*, 2009); 金鸡岭 (JLL) 和西山 (XS, Jiang *et al.*, 2009); 花山 (HS, 朱金初等, 2006a); 姑婆山 (GPS, 朱金初等, 2006b); 早白垩世 A 型花岗岩带: 铜山 (TS) 和大茅山 (DMS, Jiang *et al.*, 2011); 白菊山尖 (BJH, Wong *et al.*, 2009); 灵山 (LS, Zhou *et al.*, 2013); 密坑山 (MKS, 邱检生等, 2006); 恶鸡脑 (EJN, 苏扣林等, 2015); 晚白垩世 A 型花岗岩带: 桃花岛 (THD) 和青田 (Qiu *et al.*, 2004); 瑶坑 (YK, Xiao *et al.*, 2007); 太姥山 (TMS, 李良林等, 2011); 魁岐 (KQ) 和石牛山 (SNS, 李良林等, 2013)

图 1 中国东南部晚中生代火山-侵入岩杂岩带 (据 Jiang *et al.*, 2015 修改)

Fig.1 Sketch map showing the late Mesozoic volcanic-intrusive complex belt in SE China (modified after Jiang *et al.*, 2015)

构造-岩浆活动及成矿作用与古太平洋板块俯冲作用相关, 但关于古太平洋板块的俯冲样式和起始俯冲时限以及俯冲距离仍未有定论。目前所提出的俯冲模式有正常俯冲 (Lapierre *et al.*, 1997)、低角度俯冲 (Zhou and Li, 2000)、平板俯冲 (Li and Li, 2007) 和平缓俯冲及板片后撤 (Jiang *et al.*, 2009) 等; 而俯冲起始时间则有二叠纪 (Li and Li, 2007)、中侏罗世 (Zhou and Li, 2000; Jiang *et al.*, 2009) 及早白垩世 (Chen *et al.*, 2008) 等不同观点。对于俯冲多远的问题, 有学者认为古太平洋板块只俯冲到赣江深断裂一带 (Zhou *et al.*, 2006), 也有学者认为可继续向北西俯冲到郴州-临武断裂一带 (大致与“十-杭带”重叠) (Jiang *et al.*, 2005, 2006, 2009), 还有学者提出可持续向北西俯冲到扬子板块之下 (Li and Li, 2007)。

最近几年, 笔者等在赣南和闽西北鉴别出了一系列早侏罗世镁铁质岩石和 A 型花岗岩, 其中 A 型花岗岩呈北东向展布, 构成一条早侏罗世 A 型花岗岩带。结合笔者前期研究成果, 发现中国东南部还

存在另外 3 条 A 型花岗岩带: 晚侏罗世 A 型花岗岩带、早白垩世 A 型花岗岩带和晚白垩世 A 型花岗岩带, 它们与早侏罗世 A 型花岗岩带一样均呈北东向展布, 平行于现今海岸线, 其中晚侏罗世 A 型花岗岩带分布于更靠内陆一侧, 早白垩世 A 型花岗岩带几乎与晚侏罗世 A 型花岗岩带重叠, 晚白垩世 A 型花岗岩带则分布于沿海地区。通过系统的镁铁质和花岗质岩石成因研究, 笔者认为中国东南部晚中生代构造-岩浆活动可用古太平洋板块的反复俯冲-后退模式来解释。

## 1 早侏罗世镁铁质岩石

早侏罗世镁铁质岩石包括出露于赣南地区 (图 2) 的程龙和车步辉长岩体。辉长岩由斜长石、斜方辉石、角闪石、单斜辉石和黑云母组成, 细-中粒半自形结构, 块状构造。本次 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 程龙和车步岩体分别侵位于 197 Ma 和 191 Ma。

程龙和车步辉长岩都是钠质的 ( $K_2O/Na_2O$

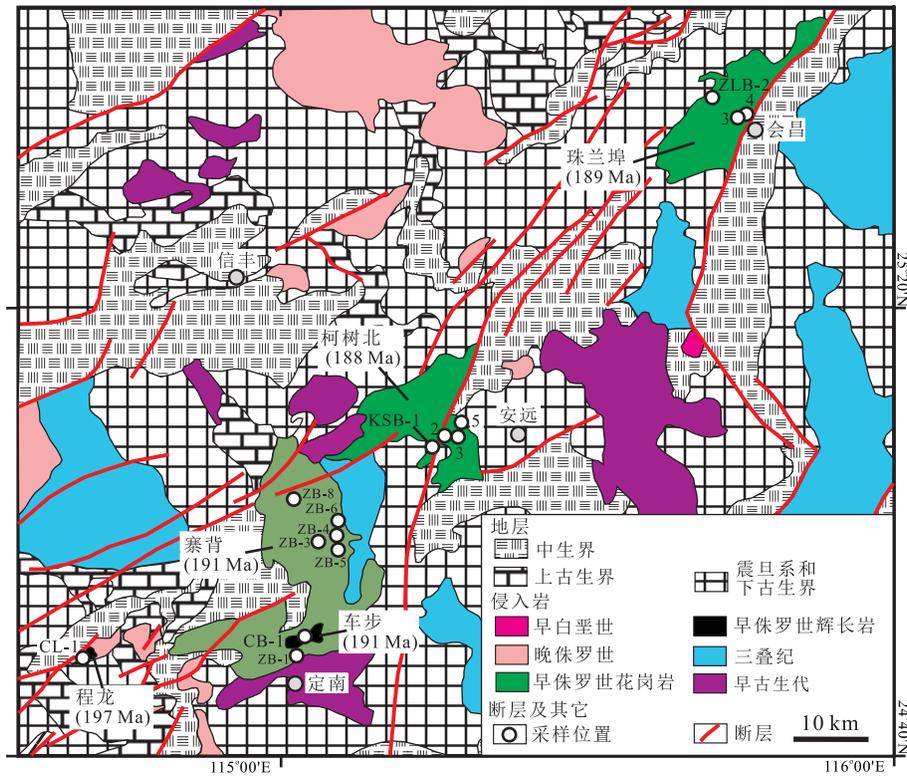


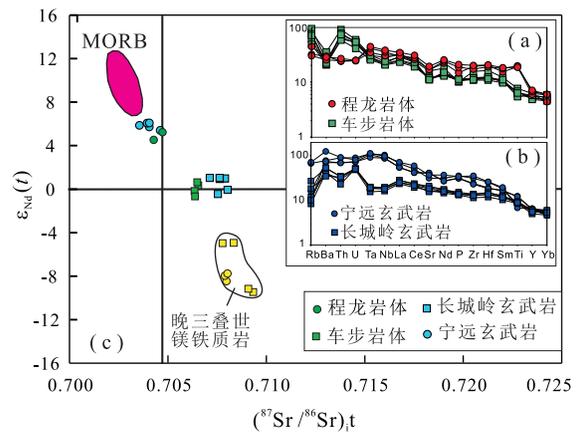
图2 赣南地区地质简图

Fig.2 Simplified geological map of southern Jiangxi province

<0.5)。然而,程龙辉长岩属于碱性系列,具有正的 Ta-Nb 异常(图 3a)和相对高的 Nb/U 值(34.5 ~ 42.2);车步辉长岩属于钙碱性系列,具有负的 Ta-Nb 异常(图 3a)和相对低的 Nb/U 值(9.9 ~ 13.9)。此外,程龙辉长岩具有比车步辉长岩低的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(图 3c)。

程龙和车步辉长岩的钠质岩石属性和正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值,表明其最有可能起源于软流圈地幔而非岩石圈地幔,这是因为岩石圈起源的岩石表现出钾质岩石特征,且具有更加“富集”的 Sr-Nd 同位素组成(如晚三叠世镁铁质岩,图 3c)。车步辉长岩表现出负的 Ta-Nb 异常,且具有低于 MORB 均值(~47)的 Nb/U 值,表明软流圈地幔遭受了俯冲作用的影响(Thirlwall *et al.*, 1994)。它们具有比 MORB 高的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值和低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值,同样也表明了俯冲作用的存在,即俯冲沉积物组分被添加到地幔楔(Leata *et al.*, 2004)。当然,地壳混染也能够导致与之类似的地球化学特征,但它们比 MORB 高的 Ti/Y 值不支持地壳混染模式,因为地壳混染将导致其 Ti/Y 值低于 MORB(图 4)。

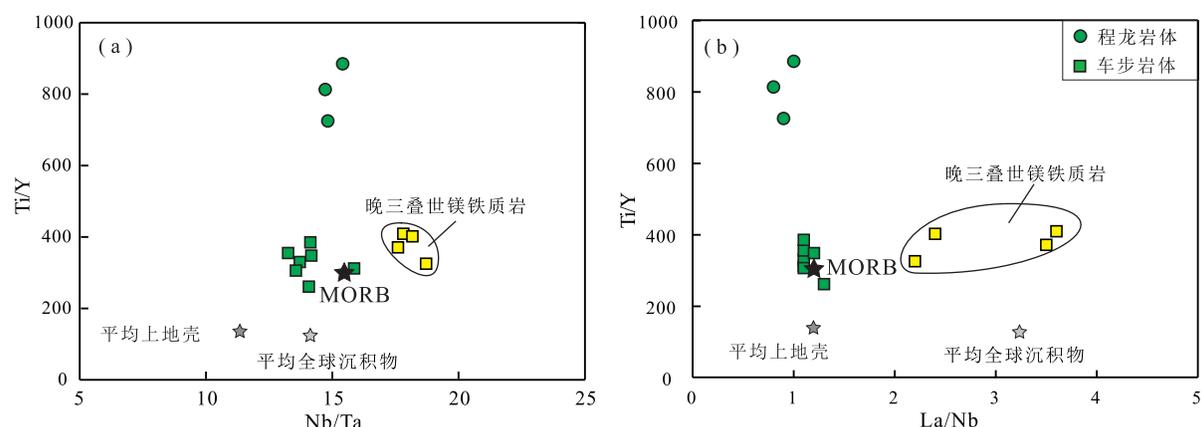
程龙辉长岩的 Sr-Nd 同位素组成接近 MORB,同时它们显示出正的 Ta-Nb 异常,并且具有比 MORB 稍低的 Nb/U 值。这些特征表明程龙辉长岩



图中显示闽西北晚三叠世镁铁质岩石(Jiang *et al.*, 2015)及湘南中侏罗世长城岭和宁远玄武岩(Jiang *et al.*, 2009)  
图3 早侏罗世辉长岩微量元素原始地幔标准化配分曲线(a,b)和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解(c)

Fig.3 Primitive mantle-normalized trace element patterns(a, b) and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  diagram(c) for early Jurassic gabbros

的源区受到俯冲板片组分的影响要小于车步辉长岩的源区。程龙辉长岩的 Ti/Y 值高于车步辉长岩(图 4),可能反映了其地幔源区部分熔融程度要低于车步辉长岩(Hergt *et al.*, 1991; Peate *et al.*, 1999)。这也与程龙辉长岩是碱性,而车步辉长岩



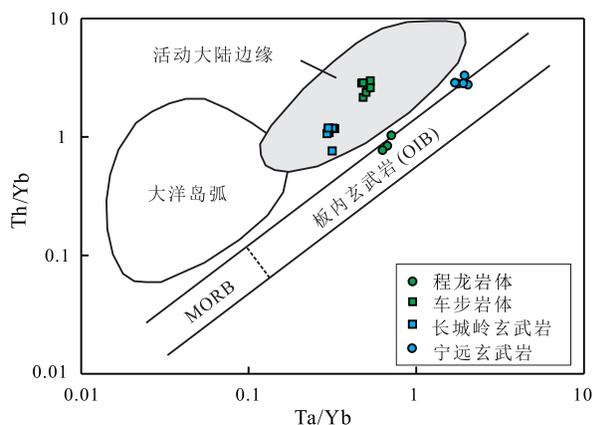
图中显示闽西北晚三叠世镁铁质岩石 (Jiang *et al.*, 2015)

图4 早侏罗世辉长岩 Ti/Y-Nb-Ta (a) 和 Ti/Y-La/Nb (b) 图解

Fig.4 Ti/Y-Nb-Ta (a) and Ti/Y-La/Nb (b) diagrams for the early Jurassic gabbros

是钙碱性的事实相符合。

综上所述,笔者认为早侏罗世镁铁质岩石形成于大洋板片俯冲环境,起源于一个类似于 N-MORB 的软流圈地幔,且有俯冲组分的加入。它们渐高的 Ta/Yb 和 Th/Yb 值也表明其形成于大陆弧环境 (图 5)。笔者新数据表明,古太平洋板片在大约 197 Ma 时已俯冲至赣南,板片释放的流体诱发软流圈地幔发生部分熔融,形成了程龙镁铁质岩体。位于程龙岩体以东的车步镁铁质岩石的形成略晚于程龙镁铁质岩体,并表现出其源区有较多的俯冲板片组分的参与。这暗示古太平洋板块并没有持续向西北方向俯冲,而是在大约 197 Ma 时开始折返。



图中显示湘南中侏罗世长城岭和宁远玄武岩 (Jiang *et al.*, 2009)

图5 早侏罗世辉长岩构造环境判别图解 (据 Pearce, 1984)

Fig.5 Tectonic discrimination diagram for the early Jurassic gabbros (modified after Pearce, 1984)

## 2 早侏罗世 A 型花岗岩带

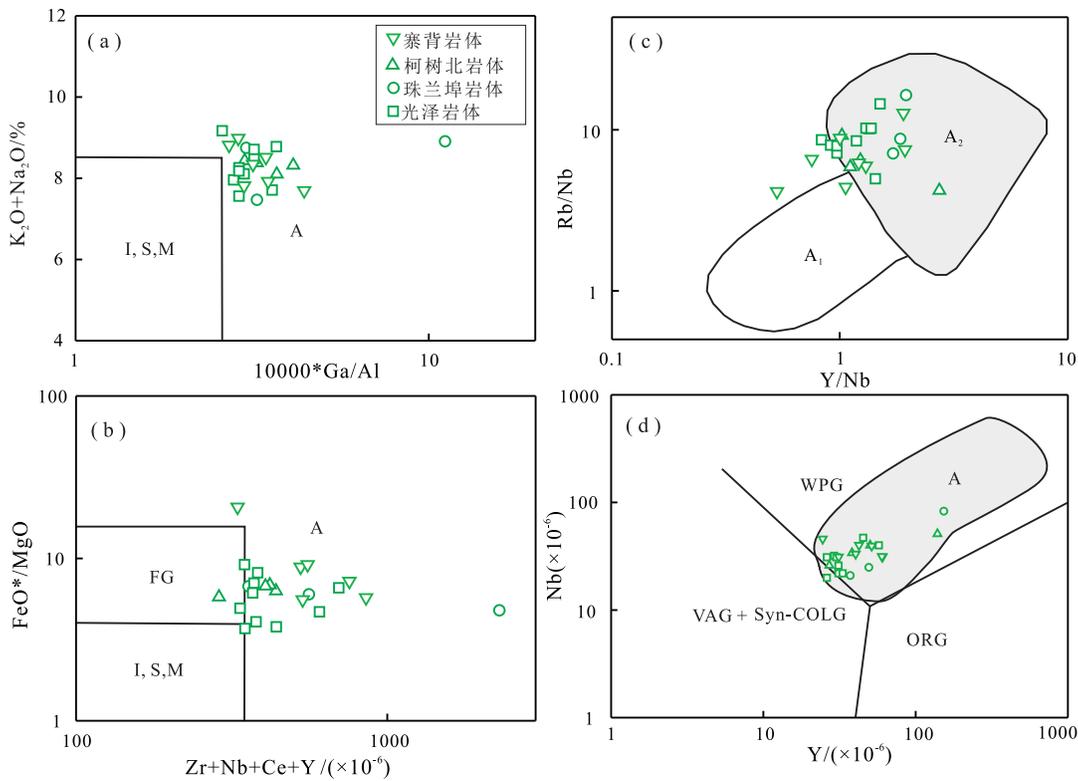
早侏罗世 A 型花岗岩包括寨背、柯树北、珠兰

埠和光泽等岩体,它们的长轴均呈北东向 (图 1,2)。岩石类型主要是呈肉红色的正长花岗岩和碱长花岗岩,造岩矿物有碱性长石、斜长石、石英和黑云母,在偏基性的岩石中还含有普通角闪石,具有中粒花岗结构,块状构造,暗色矿物普遍呈他形充填于长石和石英中。本次 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,这些岩体侵位于 191 ~ 188 Ma,在区域上呈北东向展布,构成中国东南部早侏罗世 A 型花岗岩带 (图 1)。

早侏罗世 A 型花岗岩具有较高的  $\text{SiO}_2$  含量 (67.5% ~ 76.5%),其  $\text{Mg}^\#$  近似于实验岩石学获得的地壳部分熔融体。岩石富碱、高钾及稀土 (除 Eu 外)、高场强元素,亏损 Ba 和 Sr 元素,具有高的 Ga/Al 值 (图 6)。这些 A 型花岗岩表现出多样的 Sr-Nd 同位素组成特征 (图 7)。其中,柯树北花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成类似于华夏地块前寒武纪变质火成岩基底,珠兰埠花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成则接近华夏地块前寒武纪变质沉积岩基底,寨背和光泽花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成介于两者之间 (图 7)。

早侏罗世 A 型花岗岩与同时代镁铁质岩石相异的 Sr-Nd 同位素组成表明它们不可能由同时代镁铁质岩浆发生强烈的分异结晶而形成。相反,它们类似于地壳部分熔融体的  $\text{Mg}^\#$  表明它们可能起源于地壳岩石的部分熔融。它们的 Sr-Nd 同位素组成特征进一步表明柯树北岩体可能是由前寒武纪变火成岩部分熔融而来,而寨背、光泽和珠兰埠岩体则可能是由前寒武纪变火成岩和变沉积岩按不同比例共同发生部分熔融形成的。

人们早就认识到 A 型花岗岩形成于伸展环境



I、S、M 和 A 分别为 I 型、S 型、M 型和 A 型花岗岩；FG 为高分异花岗岩；A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 为 A 型花岗岩 2 个亚型；WPG、ORG、VAG 和 Syn-COLG 分别为板内花岗岩、洋中脊花岗岩、火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩

图 6 早侏罗世 A 型花岗岩 10000× Ga/Al-K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O (a) 和 Zr+Nb+Ce+Y-FeO<sup>\*</sup>/MgO (b) (Whalen *et al.*, 1987) 以及 Y/Nb-Rb/Nb (c) (Eby, 1992) 和 Y-Nb (d) (Pearce *et al.*, 1984) 图解

Fig. 6 10000×Ga/Al-K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O (a) and Zr+Nb+Ce+Y-FeO<sup>\*</sup>/MgO (b) (Whalen *et al.*, 1987) as well as Y/Nb-Rb/Nb (c) (Eby, 1992) and Y-Nb (d) (Pearce *et al.*, 1984) diagrams for the early Jurassic A-type granites

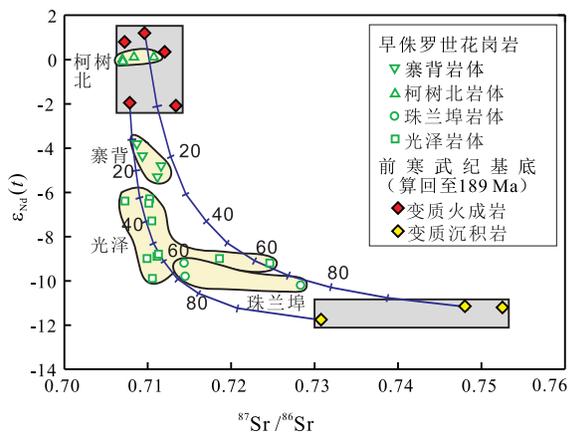


图 7 早侏罗世 A 型花岗岩 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(t)-ε<sub>Nd</sub>(t) 图解

Fig. 7 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(t)-ε<sub>Nd</sub>(t) diagram for the Early Jurassic A-type granites

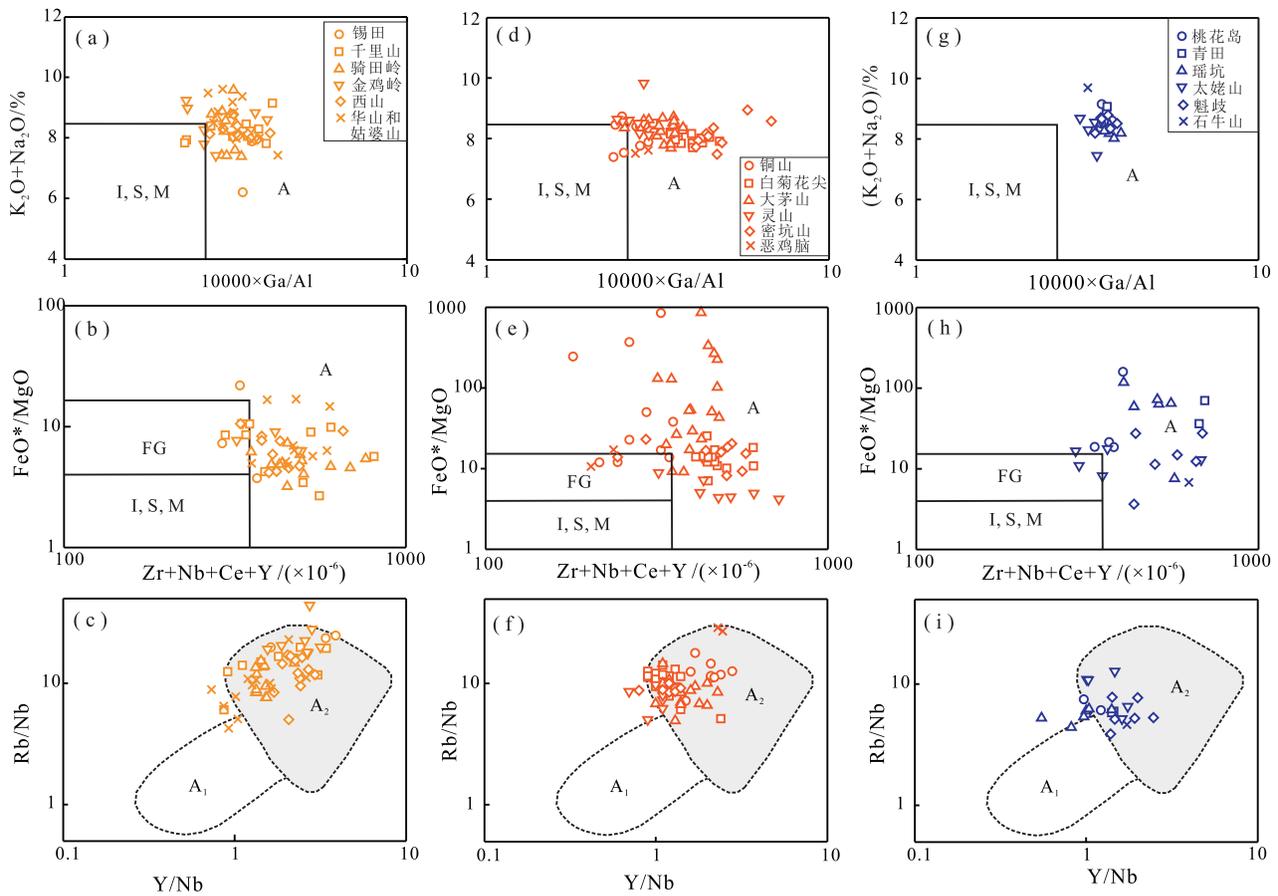
(Eby, 1992; Whalen *et al.*, 1996; Förster *et al.*, 1997)。Eby(1992)进一步将 A 型花岗岩划分为 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 两个亚型,并认为 A<sub>1</sub> 亚型花岗岩主要侵位于板内裂谷或者地幔柱和热点等非造山地区,而 A<sub>2</sub>

亚型花岗岩则可侵位于碰撞后和弧岩浆作用末期等伸展阶段。尽管中国东南部早侏罗世 A 型花岗岩表现出板内花岗岩的特征(图 6d),但它们较高的 Rb/Nb 和 Y/Nb 值表明它们属于 Eby(1992)提出的 A<sub>2</sub> 亚型花岗岩(图 6c),从而排除了它们形成于非造山环境。相反,它们的侵位比大陆弧环境下形成的早侏罗世镁铁质岩石稍晚,更有可能表明它们形成于大陆弧岩浆作用的末期,代表弧后伸展或者大陆弧内裂谷开始阶段。正如 Li 和 Li(2007)对柯树北 A 型花岗岩起源所作的解释,笔者将这种伸展环境归因于板片断离。板片前端的榴辉岩化可能是导致板片断离的原因(Haschke *et al.*, 2002)。

早侏罗世 A 型花岗岩带南东侧则为正常陆缘弧环境,形成了同期高钾钙碱性 I 型花岗岩,如福建锦城 I 型花岗岩(~187 Ma)(刘潜等,2011)。

### 3 晚侏罗世 A 型花岗岩带

晚侏罗世 A 型花岗岩包括锡田、千里山、骑田



(a)、(b)、(c)-晚侏罗世 A 型花岗岩；(d)、(e)、(f)-早白垩世 A 型花岗岩；(g)、(h)、(i)-晚白垩世 A 型花岗岩。数据来源同图 1。

图中 I、S、M 和 A 分别为 I 型、S 型、M 型和 A 型花岗岩；FG 为高分异花岗岩；A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 为 A 型花岗岩 2 个亚型

图 8  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}-\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  (a, d, g) 和  $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}-\text{FeO}^*/\text{MgO}$  (b, e, g) (Whalen *et al.*, 1987)

以及  $\text{Y}/\text{Nb}-\text{Rb}/\text{Nb}$  (c, f, i) (Eby, 1992) 图解

Fig. 8  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}-\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  (a, d, g) and  $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}-\text{FeO}^*/\text{MgO}$  (b, e, g) (Whalen *et al.*, 1987)

as well as  $\text{Y}/\text{Nb}-\text{Rb}/\text{Nb}$  (c, f, i) (Eby, 1992) diagrams

岭、金鸡岭、西山、花山以及姑婆山等岩体(图 1), 形成时代集中于 163~153 Ma, 区域上呈北东向展布, 构成中国东南部晚侏罗世 A 型花岗岩带, 并与早侏罗世 A 型花岗岩带平行, 但更靠内陆一侧(图 1)。地球化学特征表明这些花岗岩也属于 A<sub>2</sub> 型花岗岩(图 8a, 8b, 8c)。Jiang 等(2009)通过研究湘南中侏罗世镁铁质岩石(长城岭和宁远玄武岩, 图 1)的成因, 认为古太平洋板片在早侏罗世晚期-中侏罗世早期已俯冲至湘南地区。这些玄武质岩石的元素和同位素地球化学特征(图 3, 5)表明, 位于西侧的宁远玄武质岩石(174 Ma)的地幔源区受到俯冲组分的影响要小于靠东侧的长城岭玄武质岩石(178 Ma)的地幔源区。这就暗示古太平洋板片并未持续向西北方向俯冲, 而是在 174 Ma 之后发生了板片后退。晚侏罗世 A<sub>2</sub> 型花岗岩的形成进一步表明, 从晚侏罗世开始, 由板片后退导致的弧后伸展

或弧内裂谷带已经形成(Jiang *et al.*, 2006, 2009)。

晚侏罗世 A 型花岗岩带南东侧则为正常陆缘弧环境, 形成了同期(高钾)钙碱性 I 型和 S 型花岗岩, 如闽西北的外屯岩体(~161 Ma)和石陂岩体(~156 Ma)(Wang *et al.*, 2016), 闽中的汤泉岩体(~160 Ma)(Wang *et al.*, 2015), 赣中的打鼓寨岩体(~152 Ma)(Zhao *et al.*, 2015), 以及粤北的九峰岩体(~160-157 Ma)(Huang *et al.*, 2015)等。

#### 4 早白垩世和晚白垩世 A 型花岗岩带

早白垩世 A 型花岗岩包括铜山、白菊花尖、大茅山、灵山、密坑山和恶鸡脑等岩体, 形成时代为 141~124 Ma(图 1)。它们在区域上呈北东向展布, 构成中国东南部早白垩世 A 型花岗岩带, 该带几乎与早侏罗世 A 型花岗岩带重叠(图 1)。这些花岗岩的地球化学特征表明它们也属于 A<sub>2</sub> 型花岗岩

(图 8d,8e,8f)。

早白垩世 A 型花岗岩带南东侧则为正常陆缘弧环境,形成了同期(高钾)钙碱性 I 型或 S 型花岗岩,如闽西北的大源岩体 (~134 Ma) 和石陂岩体 (~109 Ma) (Wang *et al.*, 2016) 以及闽中的夏道岩体 (~142 Ma) (Wang *et al.*, 2015)。

晚白垩世 A 型花岗岩包括桃花岛、青田、瑶坑、太姥山、魁歧和石牛山等岩体,形成时代为 101 ~ 91 Ma (图 1)。它们在区域上呈北东向展布,构成中国东南部晚白垩世 A 型花岗岩带,该带分布于沿海地区(图 1)。这些花岗岩的地球化学特征表明它们也属于 A<sub>2</sub> 型花岗岩(图 8g,8 h,8i)。

早白垩世和晚白垩世 A 型花岗岩带与晚侏罗世 A 型花岗岩带一样,平行于现今海岸线,但随着时代渐新,逐渐从内陆向沿海地区迁移。这种时空分布格局揭示出弧后伸展作用逐步从内陆迁移到了沿海地区。古太平洋板块由内陆向沿海地区的逐步后退最有可能是导致这种时空分布格局的深部动力学机制(Jiang *et al.*, 2011)。

### 5 古太平洋板块反复俯冲-后退模式

通过上述综合研究,笔者提出了一个新的中国东南部晚中生代构造-岩浆演化模式,即古太平洋板块反复俯冲-后退模式(图 9)。

早侏罗世镁铁质岩石成因揭示出古太平洋板块在早侏罗世辛涅缪尔期(~197 Ma)已平板俯冲至赣南。板片前端释放的流体诱发软流圈地幔发生部分熔融,形成程龙辉长岩岩浆(图 9a)。随后(大约 197~191 Ma),板片发生后退,造成地幔楔中俯冲组分增加,形成车步辉长岩岩浆(图 9b)。在约 191~188 Ma,由于板片前端的榴辉岩化,导致俯冲板片前端发生断离,形成早侏罗世 A 型花岗岩带(图 9c)。

榴辉岩化的板片前端的断离将导致俯冲板片回弹,而重新发生前进式俯冲(Haschke *et al.*, 2002)。湘南长城岭和宁远玄武岩成因揭示出古太平洋板块在~178 Ma 已平缓俯冲至湘南(图 9d),并在~174 Ma 板片重新开始折返。晚侏罗世(163~153 Ma) A 型花岗岩带的形成表明,从晚侏罗世开始,由板片后退导致的弧后伸展或弧内裂谷带已经形成(图 9e)。在该弧后伸展带南东侧则为正常陆缘弧环境,形成了晚侏罗世 I 型和 S 型花岗岩。

板片的逐步后退导致了晚侏罗世以后的岩浆活动的向洋年轻化,并导致了区域性伸展作用由内

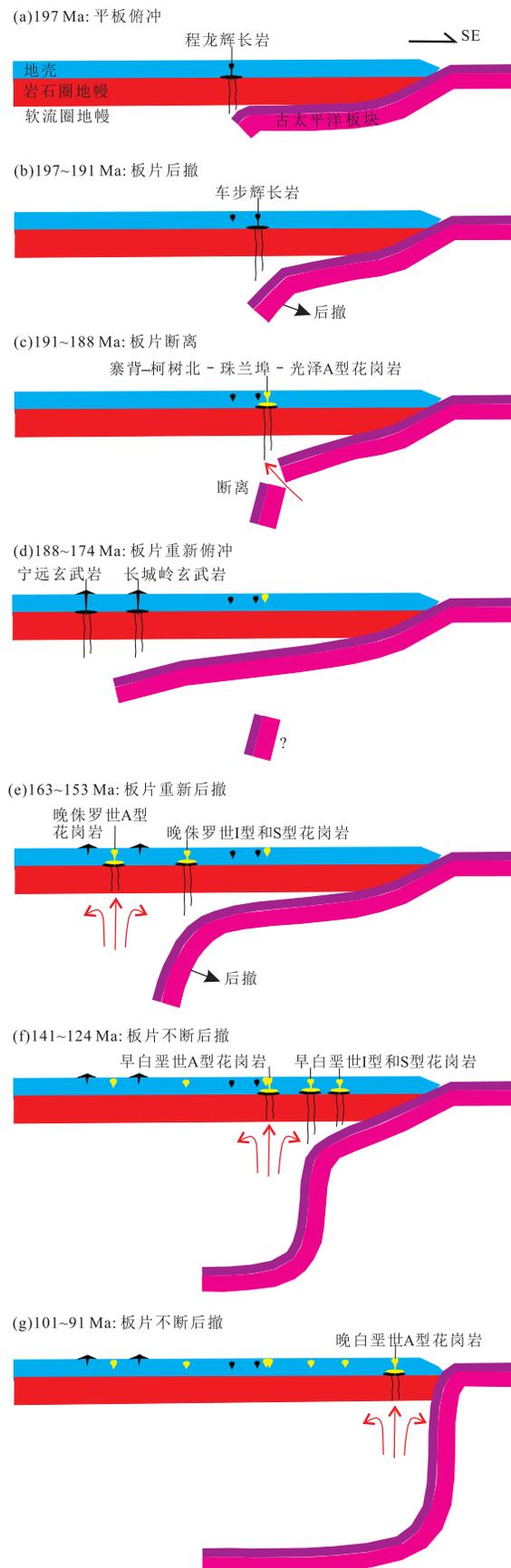


图 9 古太平洋板块反复俯冲-后退模式  
Fig.9 Cartoons showing a tectonic model involving repeated slab-advance-retreat of the Paleo-Pacific Plate

陆逐步向沿海迁移,分别形成了早白垩世和晚白垩世 A 型花岗岩带以及 A 型花岗岩带南东侧相应时代的 I 型和 S 型花岗岩(图 9f, 9g)。

#### 参考文献 (References):

- Chen C H, Lee C Y, Shinjo R. 2008. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China? Constraints from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts. *Lithos*, 106(1-2): 83-92
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641-644
- Förster H J, Tischendorf G, Trumbull R B. 1997. An evaluation of the Rb-(Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40(2-4): 261-293
- Haschke M R, Scheuber E, Günther A, Reutter K J. 2002. Evolutionary cycles during the Andean orogeny: Repeated slab breakoff and flat subduction? *Terra Nova*, 14(1): 49-55
- Hergt J M, Peate D W, Hawkesworth C J. 1991. The petrogenesis of Mesozoic Gondwana low-Ti flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 105(1-3): 134-148
- Huang H Q, Li X H, Li Z X, Li W X. 2015. Formation of the Jurassic South China Large Granitic Province: Insights from the genesis of the Jiufeng pluton. *Chemical Geology*, 401: 43-58
- Jiang Y H, Ling H F, Jiang S Y, Fan H H, Shen W Z, Ni P. 2005. Petrogenesis of a Late Jurassic peraluminous volcanic complex and its high-Mg, potassic, quenched enclaves at Xiangshan, Southeast China. *Journal of Petrology*, 46(6): 1121-1154
- Jiang Y H, Jiang S Y, Zhao K D, Ling H F. 2006. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dykes, Southeast China: Implications for a back-arc extension setting. *Geological Magazine*, 143(4): 457-474
- Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, Liao S Y, Zhao K D, Ling H F. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107(3-4): 185-204
- Jiang Y H, Zhao P, Zhou Q, Liao S Y, Jin G D. 2011. Petrogenesis and tectonic implications of early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China. *Lithos*, 121(1-4): 55-73
- Jiang Y H, Wang G C, Liu Z, Ni C Y, Qing L, Zhang Q. 2015. Repeated slab advance-retreat of the Palaeo-Pacific plate underneath SE China. *International Geology Review*, 57: 472-491
- Lapierre H, Jahn B M, Charvet J, Yu Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274(4): 321-338
- Leat P T, Pearce J A, Barker P F, Millar I L, Barry T L, Larter R D. 2004. Magma genesis and mantle flow at a subducting slab edge: The South Sandwich arc-basin system. *Earth and Planetary Science Letters*, 227(1-2): 17-35
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179-182
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983
- Peate D W, Hawkesworth C J, Mantovani M M S, Rogers N W, Turner S P. 1999. Petrogenesis and stratigraphy of the high-Ti/Y Urubici magma type in the Paraná flood Basalt province and implications for the nature of 'Dupal' -type mantle in the South Atlantic Region. *Journal of Petrology*, 40(3): 451-473
- Qiu J S, Wang D Z, McInnes B I A, Jiang S Y, Wang R C, Kanisawa S. 2004. Two subgroups of A-type granites in the coastal area of Zhejiang and Fujian provinces, SE China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences*, 95(1-2): 227-236
- Thirlwall M F, Smith T E, Graham A M, Theodorou N, Hollings P, Davidson J P, Arculus R J. 1994. High field strength element anomalies in arc lavas: Source or process? *Journal of Petrology*, 35(3): 819-838
- Wang G C, Jiang Y H, Liu Z, Ni C Y, Qing L, Zhang Q. 2015. Elemental and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Jurassic adakitic granodiorite in central Fujian province, southeast China. *Mineralogy and Petrology*, 109(4): 501-518
- Wang G C, Jiang Y H, Liu Z, Ni C Y, Qing L, Zhang Q, Zhu S Q. 2016. Multiple origins for the Middle Jurassic to Early Cretaceous high-K calc-alkaline I-type granites in northwestern Fujian province, SE China and tectonic implications. *Lithos*, 246-247: 197-211
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419
- Whalen J B, Jenner G A, Longstaffe F J, Robert F, Gariépy C. 1996. Geochemical and isotopic (O, Nd, Pb and Sr) constraints on A-type granite petrogenesis based on the Topsails igneous suite, Newfoundland Appalachians. *Journal of Petrology*, 37(6): 1463-1489
- Wong J, Sun M, Xing G F, Li X H, Zhao G C, Wong K, Yuan C, Xia X P, Li L M, Wu F Y. 2009. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijuhuajian metaluminous A-type granite: Extension at 125-100 Ma and its tectonic significance for South China. *Lithos*, 112(3-4): 289-305
- Xiao E, Qiu J S, Xu X S, Jiang S Y, Hu J, Li Z. 2007. Geochronology and geochemistry of the Yaokeng alkaline granitic pluton in Zhejiang province: Petrogenetic and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1431-1440
- Zhao Z F, Gao P, Zheng Y F. 2015. The source of Mesozoic granitoids in South China: Integrated geochemical constraints from the Taoshan batholith in the Nanling Range. *Chemical Geology*, 395: 11-26
- Zhou J, Jiang Y H, Xing G F, Zeng Y, Ge W Y. 2013. Geochronology and petrogenesis of Cretaceous A-type granites from the NE Jiangnan orogen, SE China. *International Geology Review*, 55(11): 1359-1383
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3-4): 269-287
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of

- Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26-33
- Zhu J C, Wang R C, Zhang P H, Xie C F, Zhang W L, Zhao K D, Xie L, Yang C, Che X D, Yu A P, Wang L B. 2009. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1279-1294
- 李良林, 周汉文, 陈植华, 王锦荣, 肖依. 2011. 福建太姥山地区花岗岩岩石地球化学特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 30(4): 593-609
- 李良林, 周汉文, 陈植华, 王锦荣, 陈正华, 陈威. 2013. 福建沿海晚中生代花岗质岩石成因及其地质意义. *地质通报*, 32(7): 1047-1062
- 刘潜, 于津海, 苏斌, 王勤, 唐红峰, 许海, 崔翔. 2011. 福建锦城 187 Ma 花岗岩的发现—对华南沿海早侏罗世构造演化的制约. *岩石学报*, 27(12): 3575-3589
- 邱检生, 蒋少涌, 胡建, McInnes B I A, 凌洪飞. 2006. 同位素年代学研究对江西会昌密坑山锡矿田成矿作用的启示. *岩石学报*, 22(10): 2444-2450
- 苏扣林, 丁兴, 黄永贵, 郑小战, 吴凯, 胡永斌. 2015. 粤中早白垩世亚髻山正长质杂岩体的成分分异及岩石成因. *岩石学报*, 31(3): 829-845
- 姚远, 陈骏, 陆建军, 章荣清. 2013. 湘东锡田 A 型花岗岩的年代学、Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义. *矿床地质*, 32(3): 467-488
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 2006a. 南岭西段花山-姑婆山侵入岩带锆石 U-Pb 年龄格架及其地质意义. *岩石学报*, 22(9): 2270-2278
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 2006b. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因. *地球化学*, 35(5): 506-516

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 高剑峰)

## · 招聘信息 ·

### 博士招聘信息:

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室博士后招聘启事, 详情请参阅: [Http://www.radi.cas.cn/gdxx/zszp/201610/t20161010\\_4673954.html](http://www.radi.cas.cn/gdxx/zszp/201610/t20161010_4673954.html)
2. 中国农业大学资源与环境学院土壤健康领域博士后招聘启事. 详见: [Http://zihuan1.cau.edu.cn/art/2016/11/23/art\\_1528\\_485175.html](http://zihuan1.cau.edu.cn/art/2016/11/23/art_1528_485175.html)

### 教学/科研岗位招聘信息:

1. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室人才 2016 年招聘信息, 详情请参阅: [Http://deepmining.neu.edu.cn/](http://deepmining.neu.edu.cn/)
2. 国家海洋局第一海洋研究所 2017 年公开招聘启事, 详情请参阅: [Http://www.fio.org.cn/article/2016/11/2016110816232250122.html](http://www.fio.org.cn/article/2016/11/2016110816232250122.html)
3. 海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室招聘启事, 详情请参阅: [Http://www.hainu.edu.cn/stm/rencai/20161117/10465947.shtml](http://www.hainu.edu.cn/stm/rencai/20161117/10465947.shtml)
4. 中国矿业大学(北京)2017 年度各类人才招聘信息, 详情请参阅: [Http://rs.cumtb.edu.cn/html/2781943013.html](http://rs.cumtb.edu.cn/html/2781943013.html)

### 教学/科研辅助岗位招聘信息:

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 2017 年度大型仪器装备技术研发人员招聘启事. 详见: [Http://www.igg.cas.cn/rejy/rczp/201611/t20161116\\_4696987.html](http://www.igg.cas.cn/rejy/rczp/201611/t20161116_4696987.html)
2. 中国科学院广州地球化学研究所实验技术岗位招聘启事. 详见: [http://www.gig.cas.cn/yjdw/rczp/201611/t20161111\\_4695435.html](http://www.gig.cas.cn/yjdw/rczp/201611/t20161111_4695435.html)