



评述

华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景

毛建仁^{①*}, 厉子龙^{②†}, 叶海敏^①

① 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016;

② 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

* 联系人, E-mail: jianrenm@hotmail.com

† 联系人, E-mail: zilongli@zju.edu.cn

收稿日期: 2014-02-24; 接受日期: 2014-09-02; 网络版发表日期: 2014-11-14

中国地质调查局科技外事基础地质研究项目(编号: 1212010611805, 1212010911012, 1212011121098)、国家国际科技合作专项(编号: 2011DFA22460)、中国地质调查局基础地质项目(编号: 1212011120120)和浙江省科技厅公益性技术应用研究计划项目(编号: 2014C33023)资助

摘要 华南陆块是由华夏地块和扬子克拉通在新元古代早期碰撞拼贴形成, 在古生代时期其北侧、西侧和南侧受到古特提斯洋消失的影响, 在晚古生代末期在南、北两侧分别与印支陆块和华北陆块发生碰撞形成现今中国大陆东部的基本格架, 自中生代起受到太平洋板块向西俯冲的影响. 因此, 华南陆块经历了三大构造体系的作用, 产生了叠加复合型构造样式. 华南与周边地区有关中生代地质的对比研究表明, 尽管华南陆块中生代紧邻西太平洋俯冲带, 但东缘尚未发现有新生的弧型地壳, 华南中生代地质特征主体表现为古大陆边缘再造至陆内构造, 缺乏洋岛玄武岩和大陆弧安山岩. 研究华南中生代构造-岩浆活动的重点, 是确定华南中生代岩浆岩的时空展布和构造演化. 本文通过总结华南具有挤压-伸展构造转换的三条结合带的岩浆岩记录, 结合构造变形和深部地球物理资料, 试图推动华南地质研究, 使其成为发展板块构造理论的典型靶区.

关键词地质构造
岩浆岩成因
岩浆活动
大陆动力学
华南陆块

中国东部(包括海南岛和台湾岛)、越南、韩国和日本都位于亚洲大陆东部、太平洋西岸. 华南地质构造的复杂性主要在于华南陆块周边有来自于印支陆块、华北陆块和太平洋板块以及消失的古特提斯洋的多方向的俯冲和碰撞(图 1). 华南陆块由华夏地块和扬子克拉通在新元古代早期沿江南造山带碰撞拼合形成(Zhang 和 Zheng, 2013), 华南陆块与华北陆块在三叠纪沿秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带碰撞拼贴形成统一的中国东部大陆(Wu 和 Zheng, 2013). 古生代末期古特提斯洋壳消失和中生代时期太平洋板

块俯冲都对华南地质产生了影响(Zheng 等, 2013). 控制亚洲显生宙构造演化的三大地球动力体系(古亚洲洋体系, 特提斯洋-古太平洋体系和印度洋-太平洋体系)在华南都有强烈表现(任纪舜, 1997), 造成华南地壳表现出复杂的构造样式(张岳桥等, 2009; 舒良树, 2012). 新生代构造叠加破坏使原有的地质产状和地貌景象被强烈改造, 由于缺少直接证据使得研究华南中生代地质构造演化变得更加复杂.

近 30 年来, 对华南中生代多阶段大规模构造-岩浆活动的动力学背景一直存在争议, 提出了许多构

中文引用格式: 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景. 中国科学: 地球科学, 44: 2593-2617

英文引用格式: Mao J R, Li Z L, Ye H M. 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect. Science China: Earth Sciences, 57: 2853-2877, doi: 10.1007/s11430-014-5006-1

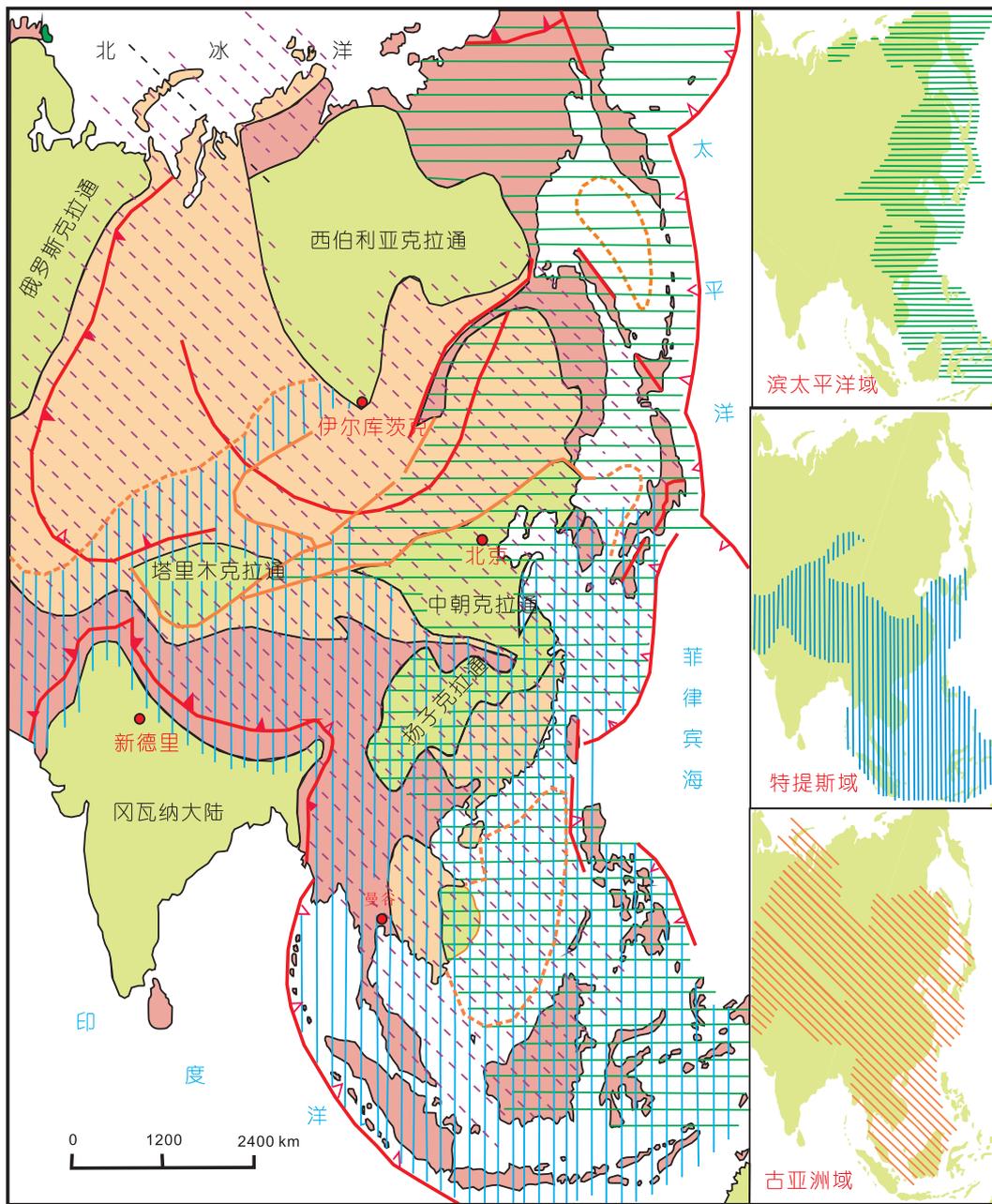


图1 亚洲地质构造体系简图

据任纪舜(1997)

造成因模式. 这些模式包括: (1) 与古太平洋板块俯冲无关, 有阿尔卑斯型的大陆碰撞假说(Hsü 等, 1998)、地幔柱假说(谢谏克等, 1996, 1997; 李子颖等, 1999; 毛建仁等, 1999; 谢桂青等, 2001)、大陆伸展和裂谷假说(Gilder 等, 1996; Li, 2000); (2) 与古太平洋板块俯冲有关, 有古太平洋板块俯冲效应(Jahn, 1974;

Jahn 等, 1990; Zhou 和 Li, 2000; Chen 等, 2014)、古太平洋板块平板俯冲假说(Li Z X 和 Li X H, 2007; Li Z X 等, 2012; Li X H 等, 2013)、多陆块(华北、印支等)相互作用(Wang 等, 2013)、洋脊俯冲假说(Ling 等, 2009; 孙卫东等, 2010)等. 由于华南濒临太平洋西岸, 太平洋板块西向俯冲的构造效应是不可避免的, 但

是, 中生代时这种效应尚未得到有效限制. 在解决这个问题之前, 需要明确确定中生代时期太平洋板块俯冲方向、角度和速率是如何随时间而变化的? 这些变化是如何影响华南构造的? 哪些地质地球化学记录可以用来恢复华南多块体形成和演化的构造历史?

1 华南中生代岩浆活动的地质特征

根据近年来有关印支期和燕山早、晚期岩浆岩高精度同位素年龄数据和地球化学资料的积累, 结合深部地球物理探测成果, 使我们对华南中生代岩浆岩的时空分布、成因类型和物质来源有了较深入的了解. 尤其是钦(州湾)杭(州湾)结合带(东段)有关地质找矿工作取得重大突破, 世界级规模的超大型矿床的相继发现(如朱溪铜钨矿床、大湖塘铜钨矿床等), 同时也积累了许多基础地质新资料. 如何将华夏地块和长江中下游地区与中国东部其他地区(大别-苏鲁造山带及其以北的华北陆块)大致同时代的岩浆-成矿活动处于同一个动力学体系内来解释, 确定华南岩浆岩时空展布和成分变化规律, 加强钦杭结合带(东段)岩浆与成矿活动的研究是解决该科学问题的关键. 我们依据华南中生代岩浆岩空间分布的特征, 中生代岩浆岩空间分布显示既有呈面型分布的花岗岩区, 又有呈带状分布的火山-侵入岩带. 将华南中生代岩浆岩划分为“两区四带”, 即三叠纪花岗岩分布区和中侏罗世花岗岩分布区, 钦杭结合带(中侏罗世-早白垩世火山-侵入岩带)、长江中下游结合带(晚侏罗世-早白垩世火山-侵入岩带)和东南沿海结合带(晚侏罗世-晚白垩世火山-侵入岩带)以及南岭山脉裂解带(早侏罗世火山-侵入岩带), 这种空间分布体现了中生代岩浆活动具有多期多阶段的特征.

中生代花岗岩和中酸性火山岩的岩石地球化学特征总体是高度化学分异, 相对富集大离子亲石元素(LILE)、Pb和轻稀土元素(LREE), 亏损高场强元素(HFSE), 而呈现为弧型地球化学特征, Nd同位素总体富集、局部亏损(Zheng等, 2013). 中国东南沿海发育晚中生代火山-侵入杂岩, 但是在成分上不同于位于东亚大陆边缘的日本岛弧型和东太平洋大陆边缘的南美安第斯型. 陶奎元等(1988)因其不同于岛弧型、安第斯型而具有独特性, 称其为浙闽沿海型; 毛建仁(1995)称其为大陆扩张裂解型. 华夏地块中生代紧邻西太平洋俯冲带, 但是沿海地区尚未发现有代

表新生大陆弧地壳的安山岩(薛怀民等, 1996; Zheng等, 2013). 构造背景上, 华南陆块在中生代时期主要表现为陆内再造而非安第斯型活动大陆边缘弧(Wang等, 2013; 张国伟等, 2013; Zheng等, 2013).

印支运动和燕山运动对华南地质构造格局产生了重要影响, 一般都认同印支期以来, 华南大陆经历了古亚洲洋-古特提斯洋向古太平洋构造域的转换, 大地构造格局由东西向为主转变为北东向为主的构造体系; 先后在三叠纪、早-中侏罗世和晚侏罗世-早白垩世发生过三次有规模的岩浆活动, 是地质构造格局及其转换过程中的物质记录(毛建仁等, 2013a; Wang等, 2013). 以下简要论述华南重要构造单元三个时期岩浆活动的地质特征及其新进展.

1.1 华南三叠纪花岗岩是从碰撞到伸展多板块汇聚的结果

Mao等(2011, 2013)提出, 华南基本上没有二叠纪花岗岩, 主要发育三叠纪花岗岩和中侏罗世(170~150 Ma)花岗岩, 而越南与海南岛相似, 发育有二叠纪和早-中三叠世花岗岩, 而侏罗纪花岗岩不发育(表1). 据此, 将华南印支期花岗岩分为越南-海南岛带、浙闽沿海-台湾带、华南内陆带、武夷-云开山脉带, 为便于考察华南陆块与华北陆块和印支陆块之间的俯冲-碰撞-伸展构造过程对华南印支期花岗岩形成的影响, 我们对比了苏鲁-韩国一带的印支期花岗岩, 讨论了各带内印支期花岗岩的时空分布、岩石类型和组合及其地球化学特征. Zhang等(2011)通过对海南岛和华南南部强应力剪切带的动力学和白云母等应力矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 地质年代学研究提出, 海南岛存在两期构造运动: 即中三叠世(250~240 Ma)间北东向的斜向逆冲和晚三叠世-早侏罗世(230~190 Ma)间南东向的斜向逆冲. 结合印支陆块构造-岩浆活动的资料以及华南南部云开山构造带的两期构造变形(D2和D3)和应力矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学(Wang等, 2007a), Zhang等(2011)综合推断认为海南岛南部和北部分别与印支陆块和华南陆块南部具有亲缘性, 大致以北西西向的昌江-琼海构造带为界连接松马-哀牢山带.

根据浙江金华地区大爽岩体主体为似斑状含钾长石二长岩((231.6±0.9) Ma)和补体为霓辉石正长岩((231.7±1.1) Ma)以及在韩国东部庆尚盆地出露有早于华北-华南陆块碰撞时间(236~226 Ma)的晚二叠世-

表 1 华南与海南岛和越南中生代岩浆活动特征对比表^{a)}

时代	越南	海南岛	华南
K ₁₋₂	越南南部大沥带: I 型闪长岩-花岗闪长岩-二长 花岗岩: 110 Ma, 96~88 Ma ^①	海南岛南部: I 型花岗闪长岩-二长花岗岩-碱长花岗岩: 111~87 Ma ^②	东南沿海: I 型辉长岩-花岗闪长岩-花岗岩和 A 型 花岗岩: 124~87 Ma ^{②③}
J ₃ -K ₁			I 型花岗岩: 147~124 Ma ^{②③}
J ₂			弱过铝质花岗岩: 168~150 Ma ^{②④}
J ₁			华夏地块内的南岭山脉, 裂解型岩石组 合: 187~170 Ma ^{②③}
T ₃		A 型花岗岩: (239±3) Ma, (221±4) Ma ^②	S 型过铝质花岗岩和准铝质花岗岩: 224~204 Ma ^{②③}
T ₁₋₂	越南北部莫边杂岩体: I 型闪长岩-花岗闪长岩-二长 花岗岩: (240.4±2.8) Ma ^④	I-型高钾钙碱性花岗岩: (249±5) Ma ^② ; 锥辉石正长岩: (244±7) Ma ^②	华南内陆带: S 型过铝质花岗岩和弱过铝质花岗岩: 243~233 Ma ^{②③}
P ₃	越南中部 Plei Manko 岩体: S 型石榴子石花岗岩和斜方 辉石花岗岩: 260~250 Ma ^② , 具弱片理化	海南岛中部: S 型石榴子石花岗岩、片麻状花岗岩: 278~270 Ma ②; 橄榄安粗质石英闪长岩-二长岩: (272±7) Ma ^② ; I 型花岗闪长岩-二长花岗岩: (267±3) Ma, (262±3) Ma ^② ; 具片麻状构造	
P ₁₋₂	越南北部莫边杂岩体: I 型花岗岩: 286~272 Ma ^①	海南岛西北部: I 型辉长岩-闪长岩-英云闪长岩-花岗闪长岩: 299~ 282 Ma ^⑤	

a) 越南资料据 Lan 等(2000, 2003), Owada 等(2007), Carter 等(2001), Nagy 等(2001), Nakano 等(2004), Nam 等(2001), Nguyen 等(2004). 海南岛资料据 Li 等(2006), 马大铨等(1991), 谢才富等(2005, 2006a, 2006b). 华南资料据毛建仁等(2009), Mao 等(2011), 孙涛(2006), Swell 等(2012), Ye 等(2013). 定年方法: ① TIMS 锆石 U-Pb, ② SHRIMP 锆石 U-Pb, ③ LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb, ④ Ar-Ar, ⑤ Rb-Sr 等时线

中三叠世岩体, 如 240~239 Ma 的 Sangju 岩体(Kim 等, 2011)和 253~247 Ma 的 Yeongdeok 岩体(Yi 等, 2012), Mao 等(2013)推测太平洋板块与东亚大陆之间存在从碰撞到伸展的构造事件, 认为碰撞开始时间大致为 253~239 Ma, 伸展垮塌时间大致为 232~215 Ma(Sun 等, 2011; 李万友等, 2012; Mao 等, 2013), 由此提出了华南印支期多板块汇聚的碰撞-伸展模式(图 2). 即 Sibumasu 地块与印支板块-华南陆块以碰撞增生为代表的印支构造运动发生在(258±6)~(243±5) Ma(Carter 等, 2001; Lepvrier 等, 2004), 在越南-海南岛形成了二叠纪-三叠纪片麻状石榴子石-电气石花岗岩、二云母花岗岩和高钾钙碱性花岗闪长岩-二长花岗岩-花岗岩(Nagy 等, 2001; Lan 等, 2003; Li 等, 2006; 谢才富等, 2006a; Nasdala 等, 2008), 在海南岛东南部形成三叠纪(239~221 Ma)铝质 A 型花岗岩-正长岩组合(谢才富等, 2005), 在华南内陆带和武夷-云开山脉带形成三叠纪两期花岗岩(243~233 和 224~204 Ma), 在晚期花岗岩中有少量新生地壳组分加入(Wang 等, 2007b; Mao 等, 2011). 同时, 我们推测华南大陆受到太平洋

板块俯冲的时间是在早三叠世. 但是, 在浙闽沿海尚未发现有代表三叠纪由俯冲产生的岩浆岩组合.

在韩国东部庆尚盆地出露有晚二叠世-早三叠世片麻状中钾-高钾钙碱性花岗岩(Kim 等, 2011; Yi 等, 2012), 在浙闽沿海出露有 232~215 Ma 年龄的 A 型花岗岩-霓辉正长岩组合(Sun 等, 2011; 李万友等, 2012; Mao 等, 2013), 但是这些长英质侵入岩依然不能与活动大陆边缘的安山岩进行对比. 华北与华南陆块之间的碰撞-变质峰期稍晚于扬子地块西南缘, 大约发生在 240~225 Ma(Rowley 等, 1997; Zheng 等, 2009); 在韩国京畿地块形成高钾钙碱性-橄榄安粗岩系列的花岗质、石英正长质和辉长质岩石(Kim 等, 2011), 伸展垮塌时间大致为 219~208 Ma; 在苏鲁-韩国带形成辉长岩-花岗岩-正长岩-碱性 A 型花岗岩组合(高天山等, 2004; Cho 等, 2008; Williams 等, 2009; Yang 等, 2005), 可能是深俯冲华南大陆地壳折返过程中部分熔融的产物(Zhao 等, 2012). 这些三叠纪碱性火成岩的产出指示, 在华北与华南陆块汇聚过程中出现过深俯冲地壳衍生熔体交代上覆地幔楔, 在大陆碰撞

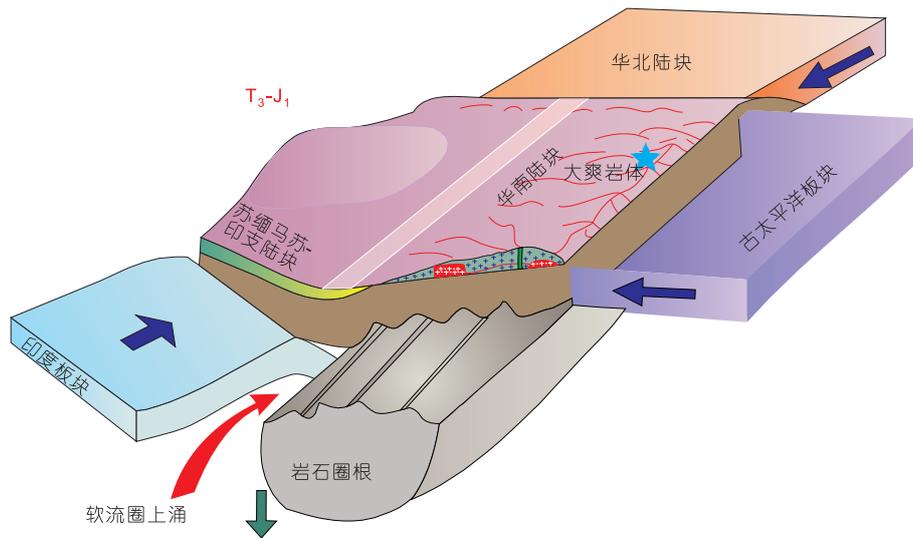


图2 华南印支期多板块汇聚和软流圈上涌示意图

据董树文等(2007)和Mao等(2013)

晚期发生同折返低程度部分熔融(Zheng, 2012). 而华夏地块的印支期花岗岩主要具有钙碱性成分和 S 型属性, 可能与华南与印支陆块碰撞过程中的构造作用有关. 总体来说, 华南印支期花岗岩是周边多块体从俯冲-碰撞-伸展作用的结果, 单一的太平洋板块俯冲模式无法合理解释华南印支期花岗岩的时代、岩性和空间分布规律.

Wang 等(2013)在综合了华南有关显生宙沉积作用、岩浆活动、构造变形和变质作用等大量地质观察的基础上, 提出华南中生代构造演化模式, 将印支运动分为早、晚两期(即早-中三叠世和晚三叠世), 并认为印支运动早期随着古特提斯洋的关闭, 造成三叠纪的陆内造山, 在华夏内陆带形成了一系列 NW-NWW 向的断裂带、剪切带、褶皱和变形叶理以及伴生的变质作用和岩浆活动, 在华南东部的浙闽沿海地区这种挤压变形的构造要素表现不强; 印支运动晚期, 由于 Sibumasu 地块不断地向北运移, 导致印支陆块和华南陆块碰撞拼合; 以及华南陆块向北运动, 华南与华北陆块之间发生聚敛拼合, 这个聚敛的时间要晚于南方的拼合, 最终在中国东部形成了统一大陆. 根据华南南部和北部边缘存在韧性剪切带等构造形迹, Wang 等(2013)指出地壳物质向东的挤出运移, 可以对应于华南东部大洋板块的西向运动. 韩国东部边缘有晚二叠世-早三叠世花岗岩, 早于苏鲁造山带记录的华北与华南陆块碰撞拼合时间; 如

果将这些花岗质岩浆活动看作是太平洋板块西向俯冲效应的产物, 那么华南东部大洋板块的西向运动要早于华北与华南陆块的碰撞时间, 地壳物质的东向挤出运移就会受阻. 另一方面, 浙东沿海存在 232~215 Ma 的 A 型花岗岩-霓辉正长岩组合(Sun 等, 2011; 李万友等, 2012; Mao 等, 2013). 如果将长英质岩浆活动看作是太平洋板块西向俯冲效应的产物, 那么华南东部太平洋板块的西向运动要晚于华北与华南陆块的聚敛拼合, 地壳物质向东的挤出运移就不会受阻. 从这个分析来看, 华南陆块东北部和东南部在古生代末期、中生代早期受到了不同构造体制的影响, 这个差别是否与太平洋板块俯冲有关有待于进一步研究.

1.2 早侏罗世伸展型岩浆岩是后印支运动的产物

该阶段岩浆活动分布范围有限, 规模小, 主要分布在湘南-赣南-闽西-粤北地区, 沿南岭山脉东西向构造带展布, 我们称之为南岭山脉裂解带. 在华夏内陆带产有早侏罗世(190~180 Ma)的玄武岩, 全岩地球化学组成上表现为富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)、亏损放射成因 Sr-Nd 同位素, 与洋岛玄武岩(OIB)相似(Chen 等, 2008; Ye 等, 2013). 一般将这种具 OIB 特征的玄武岩解释为软流圈地幔来源或者软流圈地幔受到岩石圈地幔的混染. 但是, 正常软流圈地幔部分熔融的典型产物是洋中脊玄武岩

(MORB), 虽然在放射成因 Sr-Nd 同位素组成上表现为亏损特点, 但是在微量元素组成上表现为亏损 LILE 和 LREE. 因此, 正常软流圈地幔部分熔融不可能产生具有 OIB 型微量元素分布的玄武岩(Zheng, 2012). 不过, 受到深俯冲大洋地壳衍生熔体交代的软流圈地幔可以富集 LILE 和 LREE 而保持 Sr-Nd 同位素组成相对亏损, 由此形成的新生岩石圈地幔部分熔融可以产生具有 OIB 型微量元素分布和放射成因同位素组成的玄武岩(Zhang 等, 2009; Wang Y 等, 2011; Xu 等, 2012). 如果这个解释合理的话, 这些华夏早侏罗世玄武岩就是中生代早期太平洋板块西向俯冲的间接记录.

华夏地块早侏罗世玄武岩向东延伸到武夷山脉褶皱带, 其中由初始 Nd 同位素组成所标识的新生地壳组分逐步减少而古老地壳组分逐渐增多, 指示太平洋板块西向俯冲对华夏地块东部岩石圈地幔的交代作用逐渐减弱. 在华夏内陆带和武夷山脉带之下的玄武岩在 Nd 同位素组成上表现为相对一致的富集特点, 指示其下伏的大陆岩石圈地幔相对古老和均一, 受太平洋板块俯冲的影响都不明显. 这期构造-岩浆活动是继华南印支陆内挤压变形之后, 岩石圈发生伸展和陆内裂谷作用的产物(Chen 等, 2008; Ye 等, 2013), 同时缺少挤压构造变形的记录(Wang 等, 2013). 南岭山脉在后印支运动的岩石圈伸展背景下有由于局部新生和古老岩石圈地幔部分熔融所形成的基性-超基性岩和碱性玄武岩、对称型高钛玄武质-流纹质双峰式火山岩以及 A 型花岗岩和橄榄安粗岩-正长岩组合(Li 等, 2003; Wang 等, 2005a, 2008, 2013; Ye 等, 2013), 玄武质岩浆活动引起的底侵作用, 有可能给中侏罗世大规模花岗质岩浆活动提供了热能(Ye 等, 2013). 但是, 只有软流圈地幔才能通过降压发生部分熔融并给上覆岩石圈提供热量, 而大陆岩石圈地幔需要吸收热才能发生部分熔融. 目前在华南尚未发现中生代年龄的 MORB 型镁铁质火成岩, 因此那些高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值玄武岩可能是新生岩石圈地幔而不是软流圈地幔部分熔融的产物(Zheng, 2012).

1.3 钦杭结合带(东段)燕山期挤压-伸展过程的岩石学记录

钦杭结合带南西自钦州湾, 经湘中、赣中至杭州湾一带, 总体呈北东向反 S 状弧形展布, 长约 2000 km(杨明桂和梅勇文, 1997). 钦杭带位于华夏地块与

扬子克拉通碰撞形成的江南造山带的东南侧, 大致以江西和湖南省界为界, 分为东、西两段, 东段简称赣-杭带, 进一步以赣东北深断裂为界分为赣东北地区和浙北地区. 而“十杭带”是一条花岗质岩带, 带内花岗质岩石具有相对较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和较年轻的 Nd 模式年龄 T_{DM} (Gilder 等, 1996; Zhou 等, 2006). 近年来, 钦杭结合带找矿工作取得很大突破, 同时也积累了许多新资料, 如何将江南造山带两侧华夏地块和长江中下游地区大致同时代的岩浆-成矿活动置于统一的地球动力学体系来合理解释, 正确认识钦杭结合带岩浆-成矿活动特征显得至关重要.

在赣-杭带分布着众多埃达克质岩体及其有成因联系的大型铜铁金矿床, 表明该地区存在同构造挤压的地壳增厚事件. 我们以赣东北铅山-上饶一带分布的船坑-铜山岩体为例, 研究了该岩体的地质学、年代学、地球化学以及与铜铁矿床的成矿关系(毛建仁等, 2013b). 船坑-铜山成矿岩体由石英闪长玢岩-花岗闪长斑岩组成, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 175~172 Ma. 地球化学特征显示岩石为高钾钙碱性系列, 在微量元素组成上同时具有埃达克质岩石和岛弧型岩石的特征. 埃达克质岩石特征表现为高 Sr 含量(最高达 997 ppm)、高 Sr/Y 比值(高达 92.9), 低 Y(7.85~13.83 ppm)和 Yb 含量(0.66~0.91 ppm)(图 3(a)). 这些岩石还缺乏 Eu 负异常, MgO 含量较低(0.84wt%~3.84wt%), 表明它们是由增厚下地壳部分熔融所形成的, 且源区中残留富 HREE 的石榴子石和角闪石, 缺少斜长石. 弧型岩石地球化学特征类似于研究区新元古代俯冲洋壳所形成的岛弧岩石, 如双桥山群、双溪坞群中新生的大陆地壳物质(Liu 等, 2012; Wang 等, 2012). Zhou 等(2012)地球物理研究表明, 华南东西两地区的大陆岩石圈厚度有明显差异, 地球物理资料显示西部地区地壳厚度大(~40 km)、岩石圈厚度 ≥ 150 km(如扬子克拉通), 而东部地区地壳厚度薄(~30 km)、岩石圈厚度约 70~80 km(如华夏地块和江南造山带). 鉴于华夏地块和江南造山带在新元古代弧陆碰撞造山作用过程所形成的增生型构造(Zhang 和 Zheng, 2013), 东部地区薄的大陆岩石圈厚度或许并非自新元古代时期就已存在, 中生代太平洋板块向西朝欧亚大陆东部的俯冲可能改变了中国东部大陆岩石圈的厚度(Zhang 等, 2013). 另一方面, 中生代岩浆岩的弧型地球化学特点是继承了新元古代时期形成的大洋弧和大陆弧岩石的地球化学特征

(Zheng 等, 2013).

在赣东北地区与成矿有关的具埃达克质特征的岩石有 173 Ma 的德兴石英闪长玢岩及其斑岩型铜矿床(Liu 等, 2012)和 176~166 Ma 形成的银山火山-次火山岩及铜金矿床(Wang 等, 2012); 浙北地区有开化县桐村花岗闪长斑岩-花岗岩体及其斑岩型钼(铜)矿床(锆石 U-Pb 年龄为(167.7±2.5)和(164.8±1.6) Ma; 邱骏挺等, 2011); 浙北绍兴地区栅溪花岗闪长斑岩体及铁钼矿床(锆石 U-Pb 年龄为(150.1±2.6) Ma; 顾明光等, 2011) (图 3(a))及浙西北淳安西北部侵入于晋宁期片麻状花岗岩体中的木瓜花岗斑岩(锆石 U-Pb 年龄为(142.2±1.2) Ma; 厉子龙等, 2013)等. 它们在同位素年龄上大致显示出由南西往北东迁移变新的趋势. 对于余杭闲林埠石英闪长玢岩及其铁(钼)矿床, 目前尚缺少精确的同位素年龄数据, 根据岩体出露的地理位置推断形成时代应与绍兴栅溪岩体相近.

通常认为 A 型花岗岩、双峰式火山岩和双峰式岩脉是在岩石圈伸展构造背景下形成. 在赣东北地区犁子坑铅锌矿集区铁山乡辉绿岩-蔡家坪花岗斑岩, 其锆石 U-Pb 年龄分别为(133±3)和(131±1) Ma, 是在伸展条件下形成的双峰式岩脉(Deng 等, 2014). 在浙西北地区淳安一带 A2 型儒洪、黄石潭和九里岗花岗岩类的年龄分别为(129.0±0.6), (126.1±1.4)和(124.7±1.2) Ma(Li Z L 等, 2013), 河桥岩体为(126.8±1.4) Ma(Wu 等, 2012). 这些岩体在矿物组成和化学成分特点上, 均由黑云母、条纹长石、钠长石($An < 8\%$)和石英组成, 有特征的晶洞构造, 具有高 $SiO_2 (> 73\%)$ 、

高碱($K_2O+Na_2O=7.35\% \sim 8.80\%$)、低钙($CaO < 1\%$)、高 FeO(全铁)/MgO(11~54)的特点. 在微量元素特征上, 明显富集稀土元素(Eu 除外)以及 Zr, Nb 和 Ta 等高场强元素, 而 Ti, Ba, Sr, P 和 Eu 等含量较低, 具有高的 Ga/Al 和 Y/Nb 比值. 所有这些特征均说明其与 I 型和 S 型有明显区别, 而具有 A2 型花岗岩的特点(图 3(b)), 为造山后伸展构造背景下大陆地壳部分熔融的产物.

1.4 华夏地块大面积分布的中侏罗世 S 型花岗岩

该阶段花岗岩广泛分布在华夏地块的内陆, 浙闽沿海地区分布较少, 出露规模巨大, 约占华南所有花岗岩面积的 50%以上, 构成华南燕山期花岗岩的主体, 我们称之为中侏罗世花岗岩分布区. 高精度锆石 U-Pb 年龄数据主要集中在 170~155 Ma(赵希林等, 2012; 毛建仁等, 2013a). 花岗岩体具有两种不同的分布形态, 一种在南岭山脉呈近东西向分布为主, 另一种是在武夷山褶皱带两侧呈北东向展布. 在分布面积上, 后者分布更为广泛. 它们既不同于印支期的面式分布, 也不同于燕山晚期单一的 NE 向分布, 这种分布特点是否与华南构造体制从特提斯构造域转换为太平洋构造域有关, 尚有待研究.

中侏罗世花岗质岩石类型以二长花岗岩和黑云母花岗岩为主, 伴有少量钾长花岗岩、二云母花岗岩和少量花岗闪长岩. 岩石地球化学以富硅和铝, 贫镁和钙为特征, 具有较高的($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i值和较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 为典型的 S 型过铝质花岗岩, 晚期高分异的岩株

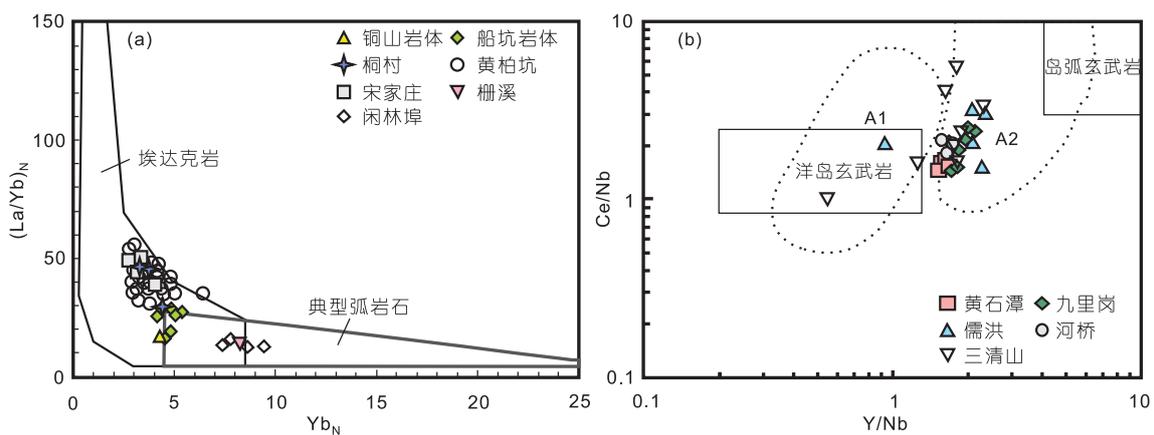


图 3 钦杭结合带(东段)埃达克质岩石和 A2 型花岗岩的 $(La/Yb)_N$ - Yb_N (a) 和 Ce/Nb - Y/Nb (b) 图

船坑、铜山岩体和桐村、黄柏坑和宋家庄岩体的地球化学数据据毛建仁等(2013b); 儒洪、黄石潭和九里岗岩体数据据 Li Z L 等(2013)、三清山岩体数据据张招崇等(2007)和河桥岩体数据据 Wu 等(2012)

显示出铝质 A 型花岗岩的地球化学特征, 如赣南天门山岩体和张天堂岩体, 锆石 U-Pb 年龄分别为 (167±5) Ma(Zeng 等, 2008)和(159±7) Ma(Mao 等, 2010). 这些高分异的小岩株通常与钨锡钼等有色金属矿床关系十分密切, 其成矿时代主要集中在 153~139 Ma(华仁民等, 2005), 与花岗岩的成岩时代普遍存在约 10 Ma 的时间差(Zeng 等, 2008; Mao 等, 2010).

目前值得关注的是, 华夏地块内部仅出露汤泉富钠埃达克质花岗闪长岩体和铁矿床(毛建仁等, 2004), 其锆石 U-Pb 年龄为 164~162 Ma(毛建仁等, 2013a), 黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 158 Ma(Mao 等, 2003). 在香港发现众多年龄为 162.6~140.8 Ma 的花岗岩体(Swell 和 Davis, 2012), 按照太平洋板块俯冲的假说(Li 和 Li, 2007), 浙闽粤沿海花岗岩的年龄都应该是相对偏年轻的, 但是越来越多的锆石 U-Pb 定年结果显示并非完全如此(Wang 等, 2013).

1.5 晚侏罗世-早白垩世火山-侵入活动的构造体系归属

华南晚侏罗世-早白垩世经历了广泛而强烈的岩浆作用, 形成大面积火山-侵入岩类. 传统上认为, 火山-侵入岩带总体呈北东向展布于沿海诸省, 向东延伸入海域, 构成大陆边缘醒目的地质特征. 在浙、闽、粤、赣及苏、皖等地区分布的火山岩面积约 $14.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中浙闽两省约 $11.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ (陆志刚等, 1997). 区域性断裂明显控制了火山岩的分布, 如郟城-庐江-九江-吉安-韶关-四会断裂, 为火山岩分布的西界. 在绍兴-江山-抚州断裂和政和-大埔断裂以西, 火山岩呈盆地型式分布, 以东火山岩分布更为集中, 呈连续的“面型”分布(陆志刚等, 1997; 王中杰等, 1999; 王德滋等, 2002). 按照地理分布可以分为两个区: 即长江中下游地区和东南沿海地区.

1.5.1 东南沿海地区两套火山岩系

中国东南沿海火山-侵入岩带的同位素年龄集中在两个阶段: 即 145~124 和 120~85 Ma(毛建仁等, 2013a). 根据火山地层区域接触关系、岩石组合和变质变形等特征划分为上、下两套火山岩系(陆志刚等, 1997; 王中杰等, 1999). 其中下火山岩系分布更为广泛, 浙江境内称磨石山群(浙东), 福建境内称南园群, 广东境内称高基坪群, 是一套中酸性-酸性占优势的

高钾钙碱性火山喷发岩, 沉积夹层较少(王中杰等, 1999; 邢光福等, 2008), 下火山岩系火山岩通常会遭受韧性变形而具片理和片麻理构造(如闽东沿海的长乐-南澳一带). 上火山岩系呈角度不整合上覆于下火山岩系之上, 以玄武岩-流纹岩双峰式组合和红层沉积为特征, 常发育在早白垩世晚期断陷沉积盆地中, 统称为石帽山群. 下、上火山岩系都有相对应的侵入岩, 前者为高钾钙碱性花岗闪长岩-花岗岩(Mao 等, 1997), 后者又进一步细分为三组: 即同造山(120~115 Ma)片麻状过铝质英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩组合、后造山(110~99 Ma)中钾深成高铝辉长岩、高钾 I 型浅成花岗岩类以及非造山(94~85 Ma)A 型晶洞花岗岩、双峰式岩脉和基性岩脉群(Chen 等, 2004).

Guo 等(2012)通过对闽粤沿海火山岩区大量中酸性火山岩(其中 12 个英安岩, 22 个流纹岩)的锆石 U-Pb 定年获得三组年龄, 其中两套火山岩系的年龄分别为 143~130 Ma(峰值为 133 Ma, 高基坪群和南园群)和 104~95 Ma(峰值为 99 Ma, 石帽山群); 值得关注的是第三组年龄为 168~145 Ma(兜岭群), 主要分布在南部的粤东沿海地区.

1.5.2 长江中下游地区岩浆-成矿活动

长江中下游地区火山-侵入岩带位于华南陆块的北部、大别-苏鲁造山带的南侧. 周涛发等(2012)将火山-侵入岩(不包含宁镇山脉)划分为三个阶段: (1) 145~136 Ma: 高钾钙碱性英安质-流纹质火山-侵入杂岩及类埃达克岩石和铜铁矿床; (2) 135~127 Ma: 橄榄安粗岩系列粗安岩-粗面岩与铜金矿床; (3) 126~123 Ma: 碱性系列的响岩、正长岩和 A 型花岗岩及铁矿床. 长江中下游地区(不包含宁镇山脉)岩浆-成矿活动以碱性系列的响岩、正长岩和 A 型花岗岩(126~123 Ma)及其与铁矿床形成为结束标志(薛怀民等, 2010; 闫峻等, 2009). 而此时, 东南沿海地区上火山岩系 < 120 Ma 的双峰式岩浆-成矿活动(Chen 等, 2004)以及宁镇山脉地区的侵入岩浆活动才刚刚开始(周涛发等, 2012; 表 2), 表明两者属于不同的构造体系. 第一和第二阶段岩石与东南沿海在 145~125 Ma 间形成的下火山岩系高钾钙碱性英安质-流纹质火山-侵入杂岩(Mao 等, 1997)相似.

Chen 等(2014)通过全岩微量元素、Sr-Nd-Pb-Hf 同位素以及锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素的综合研

表2 长江中下游地区与东南沿海地区燕山晚期岩浆活动时代的对比

长江中下游地区	东南沿海地区
109~102 Ma: 辉长岩、石英闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩(宁镇山脉)	94~85 Ma: 非造山, 低钛双峰式玄武岩-英安岩, 流纹岩、A型晶洞花岗岩和基性岩脉群 115~99 Ma: 后造山, 中钾深成高铝辉长岩、高钾I型浅成花岗岩类 120 Ma: 同造山, 片麻状过铝质英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩组合(TTG)
板块构造体系: 开始时间约 120 Ma 太平洋板块俯冲碰撞, 以左旋走滑, 韧性变形和绿片岩-角闪岩相变质作用为特征的剪切带	
126~123 Ma: 非造山, 碱性系列的响岩、正长岩和 A 型花岗岩 135~127 Ma: 后造山, 橄榄安粗岩系列的粗安岩-粗面岩, 碱性辉长(闪长)岩-石英二长岩-花岗岩 145~136 Ma: 同造山, 高钾钙碱性英安质-流纹质火山-侵入杂岩, 类埃达克岩	145~124 Ma: 高钾钙碱性英安质-流纹质火山-侵入杂岩和“S”型花岗质火山-侵入杂岩
陆内构造体系: 大陆岩石圈减薄, 挤压向伸展转换, 陆内深断裂活化	

究方法, 深入探讨了下扬子地区晚中生代庐枞火山盆地安山质岩石的成因. 这些火山岩的锆石 U-Pb 的年龄集中在(137±1)~(127±2) Ma, 具有弧型微量元素分布(富集 LILE 和 LREE、亏损 HFSE), 高初始 Sr 比值和低的 Nd 同位素组成, 锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较高(5.3‰~7.6‰)和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大(-13.1~2.6). 这些地球化特征与大陆弧安山岩类似, 来源于富集的镁铁质-超镁铁质地幔源区(由富含角闪石和金云母、贫橄榄石的辉石岩组成). 鉴于长江中下游地区的构造背景是华夏地块与扬子克拉通碰撞所形成的江南造山带的西北侧(He 等, 2013; Yao 等, 2013, 2014), Chen 等(2014)推断这种地幔源区是在格林威尔(Grenvillian)期华夏洋壳俯冲到扬子克拉通之下, 地幔楔橄榄岩由海底沉积物部分熔融产生的含水长英质熔体交代所形成, 因此这种地幔楔橄榄岩比大洋岛弧玄武岩地幔源区含有更多的长英质熔体组分. 这种地幔交代岩长期储存在造山岩石圈的底部, 在早白垩世时期由于太平洋板块俯冲所引起的远弧后拉张作用发生部分熔融, 从而形成了长江中下游地区的玄武质-安山质火山岩. 这些看上去位于中生代陆内构造背景的火成岩, 实际上它们为来自新元古代活动大陆边缘之下交代地幔楔的岩浆源区(Zheng 等, 2013).

在赣-杭带北部的安徽南部地区, 花岗岩类大致可分为两个主要阶段: 150~136 和 136~120 Ma(Wu 等, 2012), 以黄山、九华山和苏州 A 型花岗岩的出现标志着第二阶段造山运动的结束, 因此, 145~125 和 <120 Ma 间的岩浆活动“间歇期”是个重要的构造转换期. 进一步的工作重点是建立判别同位素年龄数

据可靠性的标准, 合理划分构造单元, 编制华南中生代岩浆岩分布图, 确定岩浆活动间歇期与构造体系变动的对应关系. Wang 等(2013)的研究已表明, 在华夏地块岩浆活动大致可划分为三个主要阶段, 峰值分别为 158, 125 和 93 Ma, 燕山期岩浆活动的“间歇期”在空间上对应于构造体系变动有关的 NW-SE 向挤压变形(142~132 Ma)和左行走滑运动(112~95 Ma).

在讨论钦杭带(东段)和长江中下游地区(不包含宁镇山脉)175~123 Ma 岩浆活动的动力学时, 需要关注几个基本地质观察: (1) 为什么同处于东亚大陆边缘的日本、韩国几乎缺失 170~120 Ma 的岩浆活动(Hee 和 Kwon, 2005), 而中国东部该阶段被称为“燕山期岩浆-成矿活动大爆发”(陶奎元等, 1999)? (2) 为什么在钦杭结合带东北的江南造山带和长江中下游地区大规模岩浆-成矿活动的早期发现有众多的埃达克质岩及其斑岩型铜铁金矿床(周涛发等, 2012; 周翔等, 2012; Li X H 等, 2013), 而在华夏陆块内部目前仅出露有锆石 U-Pb 年龄为 164~162 Ma 的汤泉埃达克质花岗闪长岩体和铁矿床(毛建仁等, 2004; 毛建仁等, 2013a)? (3) 为什么在香港发现众多年龄为 163~141 Ma 的花岗岩体(Swell 和 Davis, 2012)以及在粤东沿海存在 168~145 Ma(兜岭群)的酸性火山岩?

我们认为, 在太平洋构造体系占主导时((175±5) Ma), 在太平洋板块斜向俯冲背景下(Wang F Y 等, 2011; Wang 等, 2013), 导致位于扬子克拉通和华夏地块结合部位的江南造山带根部受到热扰动. 这时, 如果新元古代年龄的岛弧岩石在下地壳深部发生部分熔融, 就会形成具埃达克质和岛弧型双重特征的石

英闪长玢岩-花岗闪长(斑)岩(Liu 等, 2012; Wang 等, 2012); 如果陆内造山后伸展构造背景下的下地壳物质发生低程度部分熔融, 就会形成 A2 型花岗岩和双峰式岩脉(Yang 等, 2012; Li Z L 等, 2013). 大约在 (145±5) Ma 之后, 在长江中下游地区形成目前已十分清晰的三期岩浆与成矿活动(周涛发等, 2012). 在钦杭结合带, 造山运动以 A2 型花岗岩为结束标志(Li Z L 等, 2013; Yang 等, 2012); 在长江中下游地区形成有新生地壳组分加入的 A1 型花岗岩(Li H 等, 2012). 显然, 这两条构造带在成岩时代、岩石类型组合与成矿有明显差异, 也指示了具有不同的岩浆源区性质, 这是需要进一步深入探讨的课题.

在该阶段华夏地块是否属于板内环境, 尚有待于进一步确定. 这个时期形成有微陆块群间的挤压后松弛以及玄武质岩浆活动引起的底侵作用, 导致形成了大规模面型分布的 S 型花岗岩以及与其有关的钨锡稀土矿床(毛建仁等, 2013b; Wang 等, 2013). 由于 S 型花岗岩的岩浆源区属于古风化沉积物质, 它们原来在活动大陆前缘海沟带发生堆积并被俯冲进入下地壳深度, 然后由于构造加热发生脱水熔融就会形成 S 型花岗岩. 与其有关的钨锡稀土矿床的物质源区是否就是 S 型花岗岩的母岩浆尚有待进一步研究. 含有元古代陆核的闽粤沿海块体和武夷块体之间(许效松等, 2012)的挤压可能形成了仅有的具埃达克质特征的汤泉花岗闪长岩-花岗闪长斑岩体(Mao 等, 2003). 不过, 在构造结合带的造山带岩石圈存在成分上的不均一性, 由此部分熔融形成的岩浆岩也会出现显著的差异性(Dai 等, 2014).

长江中下游地区在 175~123 Ma 期间陆内造山变形记录十分强烈, 地表发育有大量逆掩推覆构造(宋传中等, 2010; 王鹏程等, 2012), 一般认为是“没有大洋板块参与下的陆内造山运动”(张国伟等, 2013). 在中国大地构造图中, 一般将下扬子地区和南部的江南造山带分别命名为“下扬子台缘逆掩推覆构造带(J₂-K)”和“江南变质基底逆掩推覆带(J₂-K)”, 大别山南缘由北向南逆冲(约 151 Ma), 使得扬子北缘盖层缩短了三分之一(宋传中等, 2010). 国家地壳探测工程项目在长江中下游地区实施的地震反射剖面揭示了上地壳和中、下地壳间的冲断-褶皱带, 在张八岭隆起区有一系列逆掩推覆构造(Dong 等, 2013); 在庐江-枞阳火山盆地五条反射地震剖面反映了燕山期地壳挤压-伸展构造, 存在一系列 NW-SE 向冲断-褶皱

带和叠覆状的挤压构造变形, 以及正断层、拆离构造和盆地等伸展构造变形(Lü 等, 2013); 在远震断层扫描(2D 和 3D)显示明显的地震各向异性(Lü 等, 2013). 这些结果意味着长江中下游成矿带在晚中生代岩浆-成矿过程中, 深部存在加厚岩石圈拆沉和幔源岩浆底侵的多层岩浆(Jiang 等, 2013; Shi 等, 2013). 大约 120 Ma 后, 中国东部进入了太平洋板块正向俯冲构造体系(Sun 等, 2007, 2012; Wang Y J 等, 2011; 毛建仁等, 2013a).

2 周边地区对比研究的启示

2.1 日本和韩国岩浆活动沉寂期的启示

对日本和韩国岩浆活动沉寂期的对比研究, 可以用来探讨东亚构造域转换以及太平洋板块西向运移方向、速度和角度等, 有助于加深了解太平洋板块向东亚大陆运动的轨迹. 在韩国存在有约 48 Ma 的岩浆活动沉寂期(158~110 Ma), 日本约 45~50 Ma 的岩浆活动沉寂期(170~120 Ma)(图 4). 韩国、日本岩浆活动的间断被认为是太平洋板块向东亚大陆边缘缓角度斜向快速(20~30 cm/a)俯冲造成的(Hee 和 Kwon, 2005). 而此时, 华夏陆块正发生了大规模花岗岩质岩浆-成矿活动(170~150 Ma)和东南沿海下火山岩系酸性火山-侵入活动(145~125 Ma)以及长江中下游沿江地区中酸性火山-侵入与大规模成矿活动(145~123 Ma), 即所称的“燕山期岩浆-成矿活动大爆发”(陶奎元等, 1999), 它们是一种在没有大洋板块物质参与下的陆内造山运动(张国伟等, 2013), 还是在太平洋板块斜向运动构造背景下, 岩石圈减薄、玄武质岩浆底侵和深断裂再活化的产物? 这是一个值得探讨的课题.

2.2 大规模火山岩浆活动的开始与古太平洋板块俯冲的关系

在早白垩世中晚期(<120 Ma), 东亚陆缘从北端的锡霍特-阿林、库页岛、北海道, 到中段的西南日本、朝鲜岭南、琉球群岛, 再到中国东北松辽盆地两侧, 经燕山、鲁东、宁镇山脉、东南沿海、海南岛、越南乃至西菲律宾的南海, 形成一条彼此相连、宽度大于 500 km、延伸大于 5000 km 的晚中生代火山-侵入岩带(图 5). 如此巨大的岩浆岩带的形成, 一般认为与太平洋板块对东亚板块在白垩纪期间的俯冲-碰撞作用有关. 研究表明, 高角度的俯冲无法形成宽阔的火

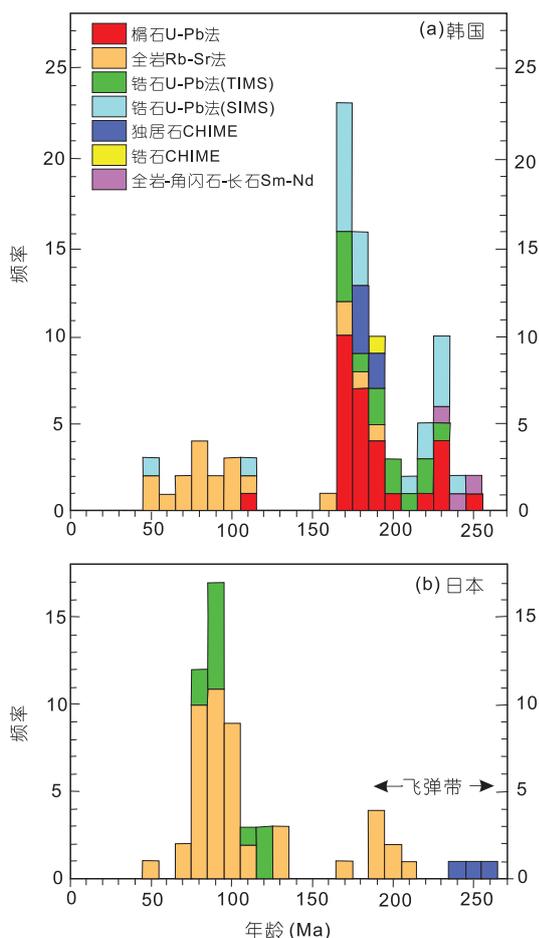


图4 韩国和日本中生代岩浆活动频率图
据 Hee 和 Kwon (2005)

山岩带,非常慢速的板块汇聚很难引起大规模的弧型岩浆上涌(舒良树, 2007). 中生代太平洋板块在俯冲方向、俯冲速率、俯冲角度等动力学要素是随时间不断变化的(Engelbreton 等, 1985; Ichikawa 等, 1990; Koppers 等, 2001; Maruyama 1997; Sun 等, 2007). 太平洋板块俯冲方向在~125 Ma 发生了反时针约 80° 的转变, 低角度(小于 30°)、较快速率(约 20.0 cm/a)的正向俯冲(图 6), 是东亚大陆边缘能形成晚中生代宽广火山-侵入岩带的重要动力学原因(Engelbreton 等, 1985; Nakajima, 1996; Maruyama 等, 1997; Koppers 等, 2001; Sun 等, 2007; 郑永飞, 2008). 从 140~125 Ma 至 <125 Ma 太平洋板块俯冲方向的大角度突然改变很可能与早白垩世南太平洋超级地幔柱的全球事件有关(郑永飞, 2008), 如翁通-爪哇(Ontong Java)超大规模的玄武质火山活动. 早白垩世超级地幔柱上涌促

使古太平洋板块向西俯冲的加速, 并引起欧亚大陆之下地幔对流异常, 碰撞造山带根部热异常使得加厚岩石圈根部熔融(郑永飞, 2008; 毛建仁等, 2013a).

2.3 中国东南沿海与日本白垩纪-古近纪火山-侵入岩带对比研究的启示

尽管东亚大陆边缘约在 120 Ma 后进入了太平洋板块的正向俯冲构造体系(Sun 等, 2007), 通过中国东南沿海与日本白垩纪-古近纪火山-侵入岩带的对比(毛建仁等, 2013a, 2014)可以给我们以下几点启示.

(1) 东亚大陆边缘在燕山早期(约(175±5) Ma)进入太平洋板块俯冲为主导的构造体系, 但不同地段的表现不同, 如那丹哈达、日本本岛等地区存在有代表典型洋壳俯冲的岩石组合(构造增生体、蛇绿混杂岩带、大洋深水沉积岩等). 东亚大陆边缘有洋壳参与的弧岩浆岩, 通常存在代表洋壳俯冲的岩石组合.

(2) 中国东南陆内大规模火山-侵入活动(145~125 Ma)是在太平洋板块斜向俯冲构造背景下华南陆内多块体之间从挤压到伸展一系列构造运动以及深断裂再活化的产物. 大约 120 Ma 后, 在中国东部(包括海南岛)、韩国、日本和越南等地发生的大规模白垩纪-古近纪火山-侵入活动与太平洋板块的正向俯冲构造体系有关.

(3) 日本晚白垩世大规模岩浆活动是以俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩和高镁安山岩开始, 在华南没有发现代表俯冲洋壳引发地幔熔融所形成的弧岩浆岩. 在我国东南沿海, 岩浆作用晚期出露非造山 A 型花岗岩和双峰式火山岩组合, 而西南日本则相反, 产出的是挤压性地壳重熔的细粒过铝质石榴子石白云母花岗岩. 西南日本过铝花岗质岩浆是年轻地壳部分熔融产生, 不存在类似于由古老地壳熔融的华南高 Sr 同位素初始比值的 S 型过铝质花岗岩及与其有成因联系的钨锡和稀土矿床.

3 华南中生代构造-岩浆活动规律

张旗等(2012)认为全球存在三大构造, 即板块构造主要研究海洋及其边缘, 大陆构造主要研究大陆的地质过程, 以及太古构造研究太古代的地质过程. Zheng 等(2013)指出, 板块构造模型是在大洋板块研究基础上建立起来的运动学, 未充分涵盖大陆内部造山带的形成和演化. 中国大陆具有漫长而复杂的

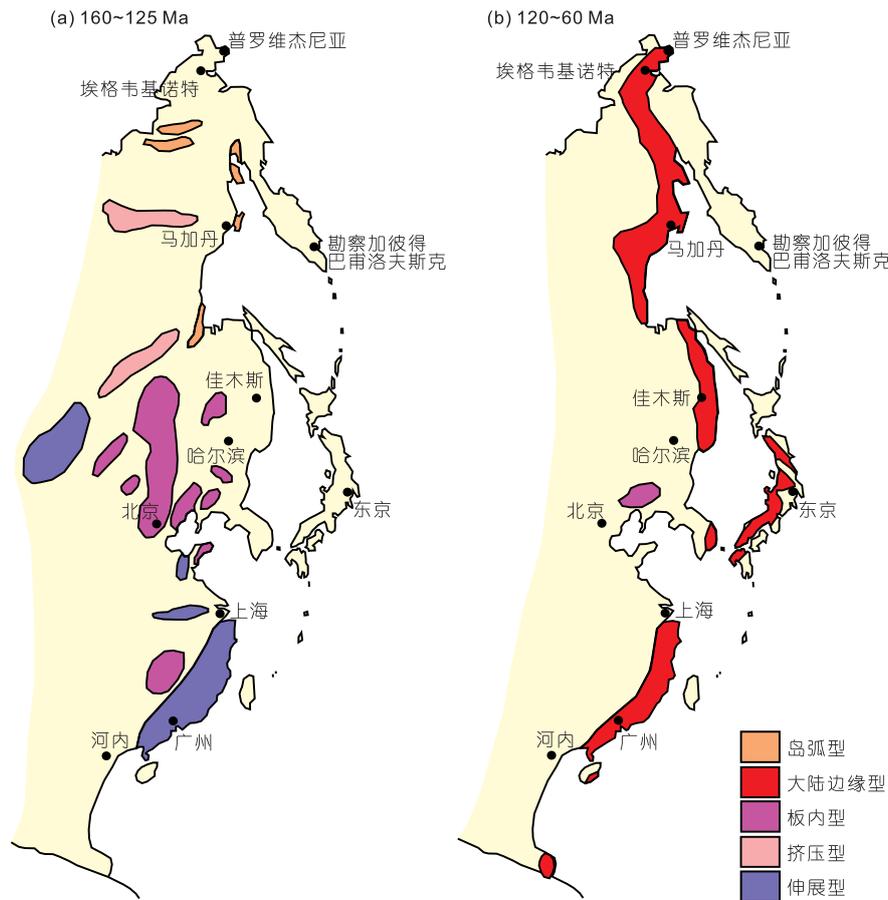


图5 东亚大陆边缘晚中生代流纹岩-花岗岩分布图

120 Ma 后, 从北端的锡霍特-阿林、北海道, 到中段的西南日本、朝鲜岭南、琉球群岛, 再到中国东北松辽盆地两侧, 经燕山、鲁东、宁镇山脉、东南沿海、海南岛、越南形成了巨型火山-侵入岩带. 据 Nakajima(1996)修改

地质历史记录, 包括不同时代板块聚敛过程的增生-碰撞造山作用, 以及不同时期大陆岩石圈形成演化过程中的俯冲带壳幔相互作用、新生地壳生长和再造等. 郑永飞等(2013)概括了板块构造理论的三个发展阶段: (1) 从大陆漂移、海底扩张到大洋俯冲; (2) 从大洋俯冲到大陆俯冲和碰撞造山; (3) 从大陆碰撞、陆缘造山到陆内再造. Zheng 等(2013)认为, 华南中生代岩浆活动不是中生代活动大陆边缘的地壳生长, 而是前寒武纪大陆边缘岩石的中生代再造, 提出华南是研究“板块登陆”的最佳实验室. 据此, 我们认为应该抓住契机, 创立具有华南地质特色的板块构造理论.

3.1 花岗岩源区研究的若干新进展

(1) 近年来在花岗岩地球化学研究中存在若干

问题已引起地质学家的的高度重视. 例如, “花岗岩源自地幔”, 这个“源”指地壳物质从源头上来说是壳幔化学分异的产物, 但是花岗岩本身则是地壳熔融的产物. 这是因为实验岩石学研究业已证明, 地幔超镁铁质岩石部分熔融只能产生镁铁质熔体, 而不可能产生长英质熔体岩石(Wyllie, 1984). 对于初始 Sr-Nd 同位素组成表现为亏损的花岗岩, 新生地壳(岩浆岩及其风化沉积产物)的部分熔融就是其源区(Wu 等, 2006; Zheng 等, 2008). 因此, 花岗岩不可能直接来自于地幔超基性岩的直接熔融(Wang 等, 2013; Ye 等, 2013); 正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 或 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值花岗岩并不意味着其岩浆就来源于亏损地幔, 新生地壳熔融的岩石会具有正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 或 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(Zheng, 2012), 如西南日本晚白垩世花岗岩等地区(毛建仁等, 2013a);

(2) 具有弧型微量元素分布(LILE 和 LREE 富集、

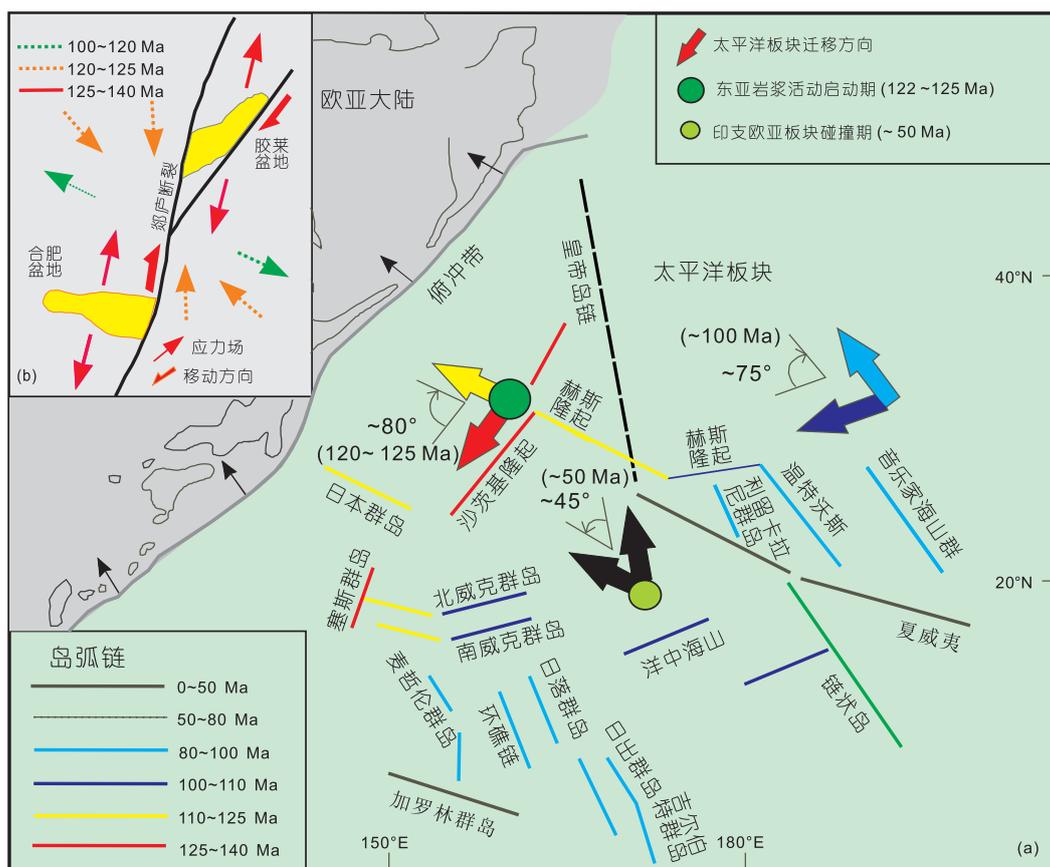


图6 古太平洋板块在~125 Ma时俯冲方向发生了约80°的转变

(a) 白垩纪以来古太平洋板块移动史. Koppers等(2001); (b) 沿徐庐断裂显示的中国东部应力场移动方向变化. Zhang等(2003), Huang等(2005), 宋传中等(2005). 据Sun等(2007)修改

HFSE 亏损)的岩石不一定是洋壳俯冲引起地幔熔融的大洋弧或者大陆弧岩石。取决于岩浆形成的时间,如果早期弧型岩石再次部分熔融,所形成的岩石也表现出弧型微量元素分布特征,这是火成岩石地球化学的“继承性”(薛怀民等, 1996; 赵子福和郑永飞, 2009; Wang等, 2013)。位于钦杭结合带赣东北地区的银山火山-侵入杂岩和德兴斑岩型铜矿的成矿岩体研究成果表明,两者都是具有类似弧型地球化学特征的英安质-流纹英安质岩石,可能是江南造山带新元古代洋壳俯冲形成的新生地壳部分熔融的产物(Liu等, 2012; Wang等, 2012; Chen等, 2014)。Zhao等(2013b)根据大别-苏鲁造山带和华北陆块东南缘早白垩世碰撞后镁铁质火成岩的全岩微量元素、Sr-Nb-Pb同位素和锆石 Hf-O 同位素特征,提出大陆俯冲带之上碰撞后镁铁质岩石的两阶段成因模式,即:(i)具有不同微量元素和同位素成分的俯冲陆壳基底花岗

质岩石和上覆沉积物衍生熔体进入地幔源区,在大陆俯冲隧道中发生壳幔相互作用,即熔体-橄榄岩反应;(ii)富化、富集的地幔源区在碰撞造山带和上覆陆块毗邻边缘部分熔融形成碰撞后镁铁质岩浆岩,继承了地壳衍生熔体的弧型地球化学特征。

(3) 具有类似于地幔氧同位素组成的岩石不一定直接源自地幔,地表水/岩反应是引起岩石氧同位素组成变化的关键,具体升高还是降低取决于温度;至少有三种地质过程可使岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值升高或降低,如果地壳源区未经历水/岩反应则可以具有类似地幔 $\delta^{18}\text{O}$ 值的花岗岩(Zheng, 2012)。Zhang等(2013)关注德兴斑岩型铜矿的高氧逸度成矿环境,提出成矿物质与晚中生代洋脊俯冲板块熔融有关。华南晚中生代时陆块已完全拼合,洋已消失,地层以大陆碎屑沉积为主。在华夏地块有大量新元古代的岩浆岩出露,锆石 U-Pb 年龄主要集中在 839~740 Ma, Hf 同位素成分

也揭示存在新生地壳和古老地壳的再造, 大部分新元古代地壳和地幔岩石圈似乎都是新生的, 表明它们是弧-陆碰撞造山的产物(Zhang 和 Zheng, 2013), 高氧逸度成矿环境可能与新元古代增生型弧-陆碰撞造山形成的新生地壳的部分熔融有关. 因此, 在利用花岗岩地球化学数据判别源区时, 一定要充分考虑岩浆源区性质和形成过程及地质演化史.

3.2 构造-岩浆成因模式合理性的检验要素

华南中生代岩浆活动不是简单的单一的太平洋板块俯冲构造及其后期效应. 我们认为, 华南中生代岩浆活动进一步研究的重点是: (1) 扬子克拉通与华夏地块在新元古代完成了拼合, 形成了江南造山带, 东南侧的钦杭结合带与西北侧的长江中下游地区在岩石圈结构和成分上会存在一定的差别, 预计靠近华夏地块的岩石相对年轻, 而靠近扬子克拉通东南缘的岩石相对古老. 因此, 要加强研究华南内部各块体岩浆活动的时空分布、迁移规律和地质地球化学特征以及特定的构造背景. (2) 钦杭结合带、长江中下游结合带、东南沿海结合带的岩浆-成矿活动各具特色, 要以此为基础来概括华南中生代岩浆活动的挤压-伸展类型及其动力学演化.

我们认为在建立华南中生代岩浆活动构造-成因模式时, 要着重考虑以下几个要素: (1) 能合理解释华南印支期、燕山期花岗岩的时代、岩性特征和空间展布规律; (2) 能够体现华南周边板块所代表的不同构造体系的影响程度及其范围; (3) 能够合理解释深入大陆板块内部宽达上千公里的大陆再造过程, 即所谓的“板块登陆”问题.

进一步研究要注重西太平洋大盆地中板块相互作用, 包括太平洋板块的俯冲方向、角度和速率等随时间的变化及其对华南大陆多块体运动的影响. 从华南多块体间的动力学不平衡来研究中生代岩浆活动的时空分布和迁移规律, 探讨亚洲三大全球性构造动力学体系从深部到地表的构造演化与动力学过程.

3.3 华南中生代动力学特征

华南中生代处于挤压和伸展交替的构造背景下, 以长期的伸展和短期的挤压为特色. 华南在中生代至少存在三期挤压构造运动, 印支期挤压构造变形表现为近东西向褶皱和北东向断裂发生右旋走滑运动(239~230 Ma)(Xu 等, 2011), 造成了早-中三叠世与

晚三叠世的不整合(李三忠等, 2011; Wang 等, 2007a; Mao 等, 2011). 这指示华南早中生代遭受南北向挤压作用, 其动力源是印支陆块与华南陆块南缘之间发生的碰撞以及华北陆块与华南陆块北缘之间的碰撞(Mao 等, 2013; Wang 等, 2013; Zheng 等, 2013). 中侏罗世挤压构造变形表现为北东向褶皱和北东向断裂朝南东方向的右旋走滑-逆冲推覆(169~161 Ma)(张岳桥等, 2009; Xu 等, 2011), 指示北东东-北东走向的太平洋构造体系已占主导地位. 早白垩世长乐-南澳断裂带左旋走滑和动力变质变形作用(121~117 Ma)造成先前岩石变形, 形成片理化火山岩和片麻状花岗岩(Tong 和 Tobisch, 1996; Wang 和 Lu 2000), 动力源可能来自太平洋板块的正向俯冲-碰撞, 但是尚不能排除漂浮在太平洋板块上的古陆块朝东亚大陆边缘的正向俯冲-增生(Charvet 等 1999; Yang, 2013)的影响.

3.4 华南中生代岩浆活动动力学演化的工作模式

大量地质事实证明, 华南中生代地质完全不同于环太平洋东岸的南美和北美以中-新生代为主的岩浆成矿活动, 同样也不同于西岸的日本岛弧和台湾岛弧的中-新生代地质. 后者大洋板块俯冲迹象无论从深部地球物理还是地表地质都已有共识. 华南晚中生代-早新生代构造叠加使得中生代太平洋板块俯冲的地质迹象受到破坏, 恢复起来有一定难度. 因此, 近 30 年来华南晚中生代构造演化研究的特点就是假说多、争议更多.

太平洋板块俯冲假说(Zhou 和 Li, 2000; Zhou 等, 2006; Li 和 Li 2007; Li Z X 等, 2012)影响最大, 侧重解释从华夏地块的东南沿海到雪峰山脉隆起近东西向展布的中生代岩浆活动, 并用俯冲板块角度变化、板块后撤来解释东南沿海早白垩世的伸展构造与岩浆活动. 洋脊俯冲假说(Ling 等, 2009; 孙卫东等, 2010)主要是针对长江中下游地区晚中生代大规模岩浆活动及其有关的斑岩型铜金矿床的成因. 两个模式的共同问题是, 尚未合理解释处于同一个动力学体系内的中国东部包括华北陆块东部、大别-苏鲁造山带、长江中下游地区、华夏地块内大致同时代的岩浆-成矿活动的空间展布和成因.

一般认为, 华夏地块燕山期构造-岩浆活动是中生代太平洋板块向欧亚大陆俯冲的结果, 但是尚未发现大洋地壳俯冲的典型产物安山质火山岩(Zheng 等, 2013). 此外, 对俯冲时间、俯冲角度和速率等方

面也有不同的看法(Jahn 等, 1990; Charvet 等, 1994; Zhou 和 Li, 2000; Li 等, 2006, 2007; Zhou 等, 2006; Li 和 Li, 2007; Jiang 等, 2009, 2011; Li Z X 等, 2012; Wang 等, 2013). 多数地质学家接受, 在(175±5) Ma 太平洋板块向欧亚大陆俯冲已占主导(孙涛等, 2003; Zhou 等, 2006; Li X H 等, 2013; Wang 等, 2013). 但是, 太平洋板块俯冲方向的变化(如法拉隆板块, 伊泽奈崎板块和库拉板块开始活动时间和运移方向)导致周边陆块(如华北和印支陆块北部等)对华南多块体(扬子和华夏地块, 以及华夏地块内的微陆块群)运动的影响还有待深入研究.

随着近年来有关华夏地块印支期、燕山早期岩浆岩和下扬子地区燕山晚期岩浆岩高精度同位素年龄数据和地球化学资料的积累, 结合深部地球物理探测成果, 使我们对华南中生代岩浆岩的时空分布、物质来源和成因有了更加深入的了解. Wang 等(2013)提出的华南中生代构造多阶段演化模式, 是目前最为完整而系统的模式. 该模式的核心是华南印支期陆内造山受华南周边多块体的影响, 华南燕山运动仍然受到其周边多块体相互作用的约束. 太平洋板块俯冲过程中的角度变化(Sun 等, 2007; 郑永飞, 2008)、太平洋板块俯冲后的后撤效应(Zhao 等, 2013b)等也被用来解释中国东部早白垩世岩浆活动. Zheng 等(2013)强调, 华南中生代岩浆活动在物质成分上继承自前寒武纪造山带地壳和地幔岩石圈, 在地球动力学启动机制上受太平洋板块俯冲/后撤影响, 在大块构造上是古大陆边缘物质在新的陆内构造背景下的再造(变形、变质和熔融). Chen 等(2014)对长江中下游地区玄武-安山质火山岩成因建立了俯冲-深溶-反应-储存-加热(SARSH)五步骤模型, 对传统的MASH模型(Hildreth 和 Moorbath, 1988)提出挑战, 认为其没有正确概括活动大陆边缘安山岩的成因.

本文提出华南中生代多板块汇聚与陆内挤压-伸展的工作模式, 是对毛建仁等(2013a)已提出的四阶段动力学模式的细化. 该模式试图揭示华南在周边块体的构造作用下岩浆活动的特点, 除受到俯冲碰撞作用及其远程构造效应外, 同时还复合有陆内不同块体相互作用的综合结果. 我们结合华南周边地区中生代岩浆活动时空分布和地质地球化学特征及其动力学的启示, 提出比较合理的华南中生代构造-岩浆活动的工作模式; 应用板块构造体系与陆内构造体系复合的动力学演化模式来探讨华南“板块登

陆”问题, 力图正确认识华南中生代岩浆活动的动力学演化机制.

我们工作模式的核心是: 华南在早中生代早期完成多板块汇聚后, 大约在 175 Ma 进入太平洋板块俯冲为主的构造体系, 强调在 180~120 Ma 期间太平洋板块是斜向俯冲, 120 Ma 后太平洋板块发生了约 80°的旋转而成为正向俯冲. 在 180~120 Ma 太平洋板块斜向俯冲期间, 由于在日本、韩国、越南以及中国海南岛等地区不存在类似与华南多块体的相互运动, 因此该阶段很少有岩浆与成矿活动的记录, 而中国东部则是“燕山期岩浆-成矿活动大爆发”. 华南内部及其周边在不同块体之间存在不同类型的碰撞造山带, 在太平洋板块西向俯冲的远程效应影响下, 华南与华北陆块之间、扬子克拉通与华夏地块之间, 华南与印支陆块之间以及华夏地块之内出现微陆块群之间的相互运动, 在钦杭结合带和长江中下游结合带(不包括宁镇山脉)都记录了从挤压到伸展构造事件的岩浆与成矿活动, 在华夏地块内部形成了大面积分布的花岗岩和东南沿海下火山岩系火山-侵入岩. 在晚侏罗世-早白垩世构造演化阶段, 特别是在早白垩世(<120 Ma)太平洋板块俯冲方向发生了大角度旋转, 进入太平洋板块正向俯冲构造体系, 在东南沿海结合带的上火山岩系和宁镇山脉记录了从挤压到伸展构造事件的岩浆与成矿活动, 同时在东亚大陆边缘形成了长大于 5000 km、宽约 500 km 的火山-侵入岩带. 这也证明, 太平洋板块从斜向俯冲到正向俯冲是个大规模构造转换期, 对应了一个较长的岩浆活动间歇期. 地质学家长期困惑的有关华南中生代岩浆岩的时空分布特征似乎也找到了比较合理的解释.

3.4.1 印支期多板块汇聚与伸展机制(258~230 Ma) (A)

该阶段以 Sibumasu 地块与印支-华南陆块的碰撞(258~243 Ma)、太平洋板块向西运动(253~239 Ma)、华北与华南陆块碰撞(236~230 Ma)(A1), 印支期花岗岩形成(图 7)为代表. 在越南-海南岛带由 Sibumasu 地块与印支陆块的碰撞形成二叠纪-三叠纪花岗岩(258~243 Ma)(Nagy 等, 2001; Lan 等, 2003; 谢才富等, 2005, 2006a; Li 等, 2006; Nasdala 等, 2008). 在华南内陆带的雪峰山构造带存在北西-北西西和南东-南东东走向的节理、断裂和剪切带, 指示存在倾向为南东东剪切的北西西向具韧性剪切走滑的逆冲构造, 以

及倾向为北西西向剪切的南东东向冲断带, 云母类变形矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄指示, 变形高峰期约为 (211 ± 5) Ma (Wang 等, 2005b), 与雪峰山脉 T_{1-2} 和 T_3 的地层不整合相对应 (李三忠等, 2011). 在武夷山脉带发生近东西向褶皱, 并且北东向断裂发生右旋走滑运动 (239~230 Ma, 徐先兵等, 2010). 在华南内陆带和武夷山脉带形成了早、晚两期花岗岩 (王岳军等, 2005; 孙涛等, 2003; 孙涛, 2006; Wang 等, 2007b; 于津海等, 2007; Chen 等, 2011; Mao 等, 2013; Wang 等, 2013), 早期为古老壳源型花岗岩 (243~233 Ma), 晚期形成有少量新生地壳组分加入的花岗岩 (224~204 Ma) (王岳军等, 2002; Wang 等, 2007b; Mao 等, 2011; 刘凯等, 2014). 在浙闽沿海-台湾带太平洋板块俯冲进入欧亚大陆之下的早期, 在韩国岭南地块形成中钾-高钾钙碱性花岗岩 (253~239 Ma) (Kim 等, 2011; Yi 等, 2012), 晚期在浙东沿海形成石英正长岩-碱性花岗岩 (235~215 Ma) (Sun 等, 2011; 李万友等, 2012; Mao 等, 2013). 太平洋板块朝东亚大陆的俯冲在日本飞弹带形成钙碱性花岗岩 (250~240 Ma), 其热纪录的年龄形态以及年轻地壳物质的部分熔融, 表明它们曾是中亚造山带的一部分 (Zhao 等, 2013a). 在苏鲁造山带及其东向延伸的韩国带, 华北与华南陆块之间的碰撞晚期形成了世界上典型的同折返花岗岩组合 (219~208 Ma) (高天山等, 2004; Yang 等, 2005; Cho 等, 2008; Williams 等, 2009; Zhao 等, 2012).

印支构造运动的延续 (190~180 Ma) (A2). 在南岭山脉由于大陆岩石圈发生部分熔融, 形成了基性-超基性岩、双峰式火山岩和 A 型花岗岩组成的板内裂谷型组合 (190~180 Ma, Li 等, 2003; Chen 等, 2008; Ye 等, 2013), 陆内伸展构造是印支构造运动的延续 (Chen 等, 2008; Ye 等, 2013) (图 7). 这些岩浆活动是否与软流圈地幔物质上涌有关, 尚须寻求具有 MORB 特征玄武岩的地球化学的证据.

3.4.2 古太平洋板块斜向俯冲构造占主导的陆内造山体系 (175~150 Ma) (B)

该阶段开始时间约为 (175 ± 5) Ma, 引发陆块间强烈挤压, 以钦杭结合带为代表. 燕山期陆内构造是长期的伸展与短期的挤压相伴随, 在华南、韩国发生了陆内右旋韧性剪切运动 (169~165 Ma) (Xu 等, 2011). 在钦杭结合带 (东段) 在地壳挤压增厚背景下形成了埃达克质岩石和铜铁多金属成矿作用, 如德兴、银

山、船坑-铜山和栅溪等斑岩型铜铁多金属矿 (175~150 Ma) (顾明光等, 2011; 邱俊挺等, 2011; Liu 等, 2012; Wang 等, 2012; 毛建仁等, 2013b) (图 8). 在江南古陆两侧及其长江中下游发生强烈的近东西及北东东向的推覆构造、韧性变形和深部叠瓦状构造 (宋传中等, 2010; 王鹏程等, 2012; Jiang 等, 2013; Shi 等, 2013). 目前, 在华夏地块内有唯一出露的汤泉富钠埃达克质花岗闪长岩体和铁矿床 (毛建仁等, 2004). 晚期地壳伸展, 在华夏地块产出具有华南特色的与钨锡稀土成矿作用有成因联系的高锶初始值 S 型花岗岩 (170~150 Ma), 局部可能有新生地壳组分的加入 (赵希林等, 2012).

3.4.3 古太平洋板块俯冲方向旋转条件下的陆内伸展 (150~123 Ma) (C)

该阶段以长江中下游结合带为代表. 太平洋斜向俯冲构造背景下 (Wang 等, 2011) (图 8), 华南各陆块间从深部到浅部的动力学不平衡, 地壳伸展导致陆内深断裂活化, 在长江中下游地区产生高钾富碱的中酸性火山-侵入杂岩与铜铁成矿作用 (143~123 Ma). 其中 135 Ma 是个重要的由挤压向伸展的转换时间 (薛怀民等, 2009; 周涛发等, 2012), 在钦杭结合带形成了 A2 型花岗岩 (132~126 Ma), 如儒洪、河桥、三清山和大桥坞等花岗岩体以及双峰式岩脉等 (张招崇等, 2007; Wu 等, 2012; Yang 等, 2012; Li Z L 等, 2013); 在江南古陆形成了 I 型-A 型岩体, 如太平-黄山岩体和青阳-九华山岩体等 (145~124 Ma), 其中晚期的黄山岩体和九华山岩体具有 A2 型花岗岩特征 (薛怀民等, 2009), 它们的同位素年龄为 128~126 Ma (Wu 等, 2012); 在长江中下游地区形成 A1 型碱性正长岩 (Li H 等, 2012) 以及碱性火山岩, 如娘娘山白榴石响岩 (124~123 Ma) (薛怀民等, 2010). 在华夏地块东南部形成较大规模的下火山岩系酸性火山-侵入杂岩 (145~125 Ma). 大别-苏鲁造山带早白垩世岩浆活动也发生在这个时期 (赵子福和郑永飞, 2009), 说明俯冲太平洋板块发生后撤是重要原因 (Zhao 等, 2013b).

3.4.4 太平洋板块正向俯冲构造体系的洋陆过程 (118~85 Ma) (D)

该阶段以东南沿海结合带的上火山岩系为代表. 根据中国东部的地质事件与太平洋板块和 Izanagi 板块的迁移史, 两个板块间的洋中脊在约 125 Ma 迁移

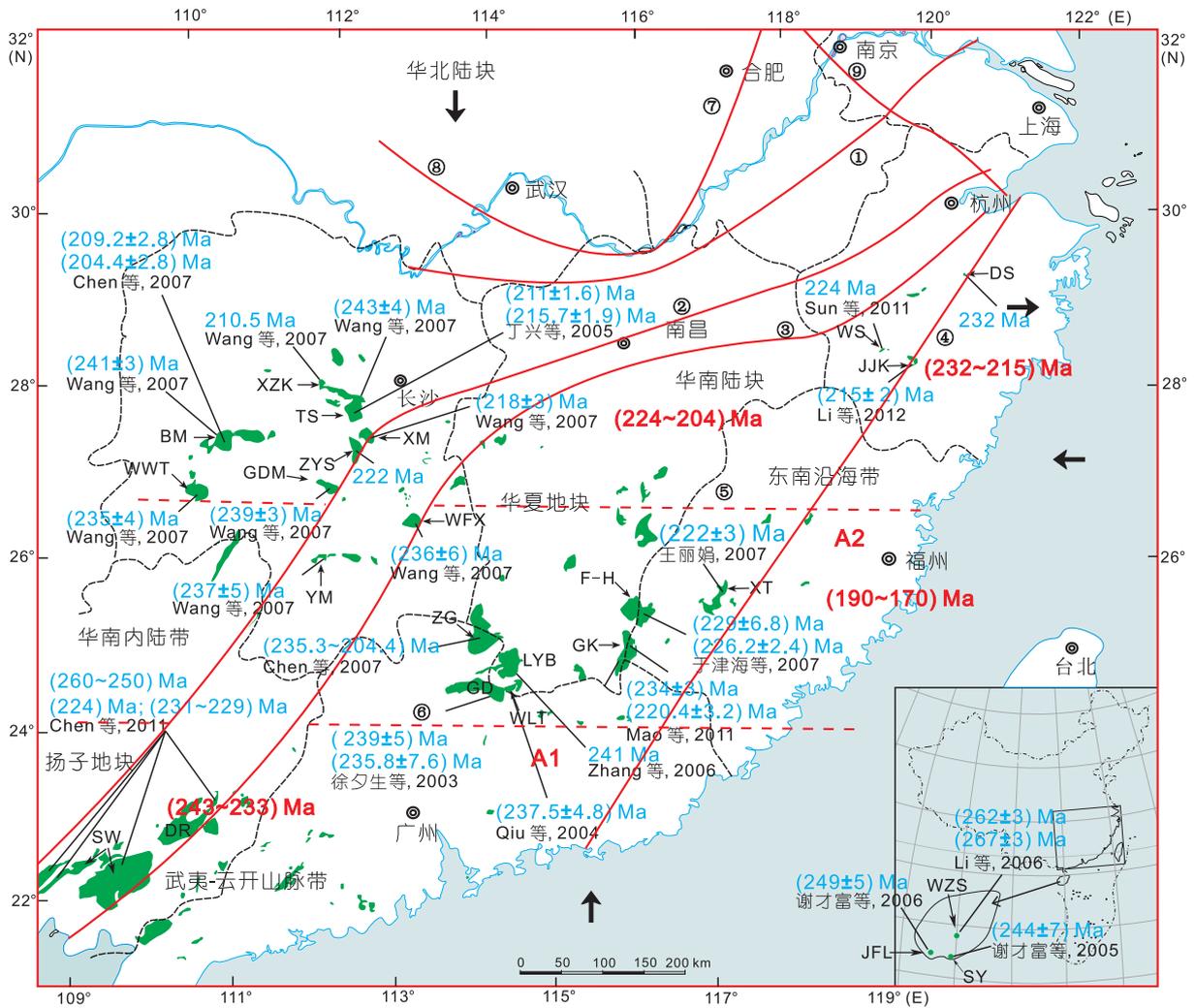


图7 华南印支期花岗岩分布图和燕山早期早阶段岩浆活动范围示意图

A1 和 A2 与四阶段工作模式对应。① 南通-溧阳南-庐山南-瑞昌-崇阳断裂, ② 杭州-湘潭-金秀-凭祥断裂(钦杭带西北缘), ③ 绍兴-江山-萍乡-梧州-合浦断裂(钦杭带东南缘), ④ 余姚-政和-大浦断裂, ⑤ 祁阳-宁冈-广昌-南平(南岭北部)断裂, ⑥ 金秀-新丰-兴宁-云霄(南岭南部)断裂, ⑦ 郟城-庐江断裂, ⑧ 大别山南部断裂, ⑨ 滁州-嘉兴断裂. 黑色字母和蓝色数字分别为印支期岩体的代号和年龄. 据文献 Lan 等(2003), 徐夕生等(2003), 邱检生等(2004), 孙涛等(2003), 丁兴等(2005), 王岳军等(2005), 谢才富等(2005, 2006a), Li 等(2006), 孙涛(2006), 张敏等(2006), Wang 等(2007b), 于津海等(2007), Chen 等(2011), Sun 等(2011), 李万友等(2012), Mao 等(2013), 刘凯等(2014). BM: 白马山; DR: 大容山; DS: 大爽; F-H: 富城-红山; GDM: 关帝庙; GK: 桂坑; GD: 贵东; JFL: 尖峰岭; JJK: 靖居口; LYB: 龙源坝; SW: 十万大山; TS: 唐市; WFX: 五峰仙; WLT: 五里亭; WS: 翁山; WWT: 瓦屋塘; WZS: 五指山; XM: 歇马; XT: 小陶; XZK: 巷子口; YM: 阳明山; ZG: 诸广山; ZYS: 紫云山

了约 1000 km(Sun 等, 2007)(图 8 和 9). 太平洋板块向欧亚大陆的正向俯冲挤压事件形成了大型左旋韧性走滑剪切带, 中国东南部挤压构造的表现是下白垩统地层翘倾和长乐-南澳大型左旋走滑韧性剪切带(舒良树, 2007), 形成时代为 121~117 Ma, 使得下火山岩系及其伴生的花岗岩类遭受强烈的韧性剪切而形成片理化火山岩和片麻状花岗岩. 锆石 U-Pb 年龄

确定动力变质作用的上限约为 120 Ma(Tong 和 Tobisch, 1996),从剪切带糜棱岩化岩石中获得五个矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 118~107 Ma(Wang 和 Lu, 2000). 该事件导致了高压变质带、蛇绿混杂岩带和韧性剪切带的形成. 台湾蓝闪石和绿辉石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果为 110~100 Ma (Jahn, 1986). 在日本以三波川蓝片岩带为标志, 蓝闪石和红帘石高压矿物的

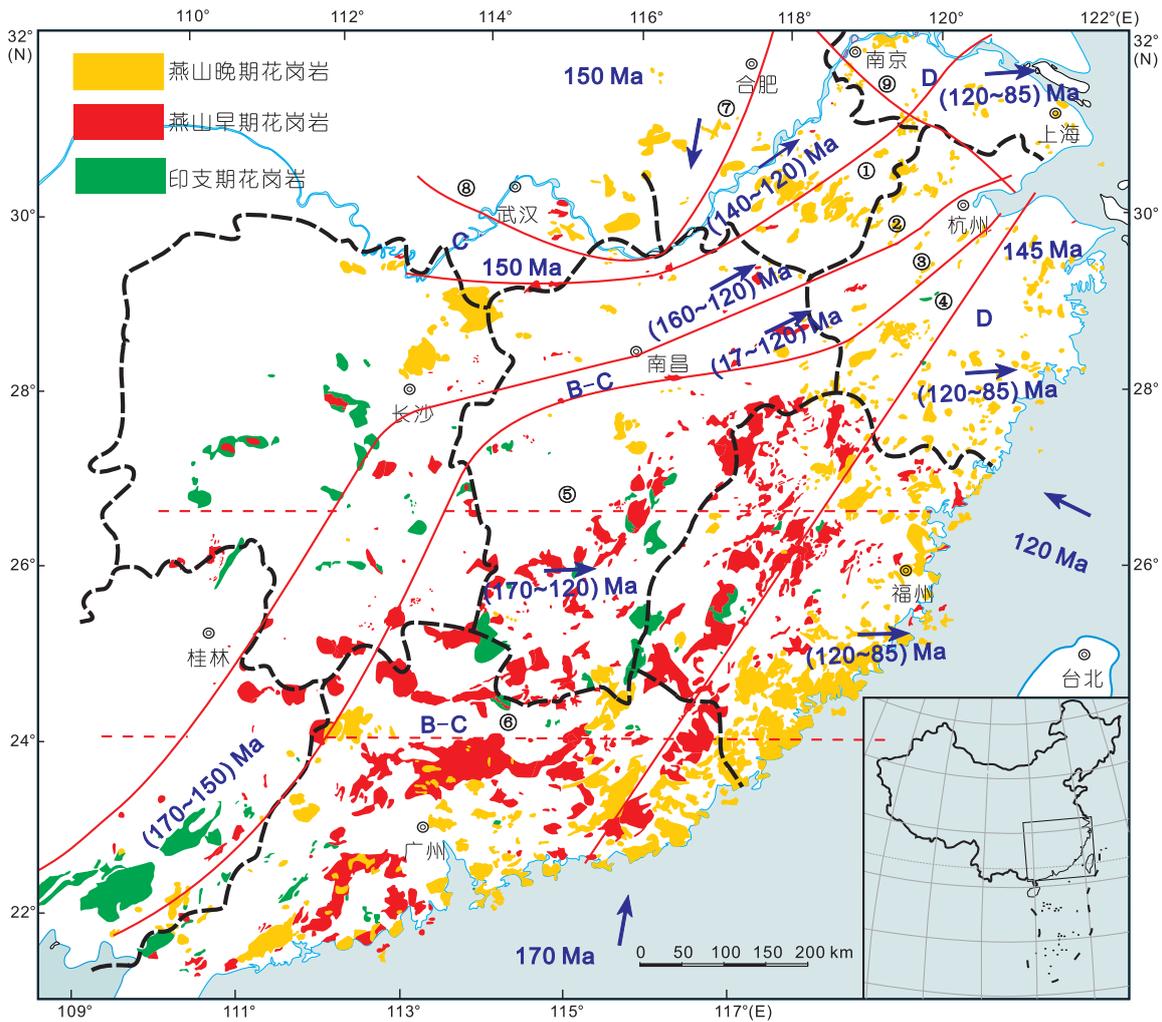


图 8 华南燕山期花岗岩年龄变化趋势示意图

B-D 与四阶段工作模式的阶段对应; 深蓝色数字为该阶段年龄变化范围, ①等数字为主要断裂编号, 同图 7. 底图岩体界限据文献孙涛 (2006)

$^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 102~82 Ma; 领家带红柱石砂线石片岩带年龄约为 90 Ma (Lo 和 Yui, 1996), 碰撞事件导致西南日本领家带较早期的花岗岩(100~87 Ma)变形, 形成了片麻状花岗岩, 并与角闪岩相变质岩及同时代的火山岩相伴生(Yuhara 等, 2000). 中国东南部晚白垩世的碰撞事件分别比台湾和日本早约 15~10 Ma 和约 30~25 Ma, 清晰可见太平洋板块由南往北、由西往东的迁移轨迹. 紧随其后, 在中国东部(包括海南岛)、日本、韩国和越南以及俄罗斯楚科奇-锡霍特-阿林地区形成了延长大于 5000 km 的大陆边缘型火山-侵入岩带. 挤压后的地壳伸展事件形成了日本海、台湾海峡和红色断陷盆地以及双峰式火山岩、基性岩墙群和 A

型花岗岩(舒良树, 2007, 2009; 毛建仁等, 2013a).

4 结论和展望

(1) 华南在印支期完成了多板块汇聚后, 大约在 (175±5) Ma 进入太平洋板块斜向俯冲为主的构造体系, 在钦杭结合带和长江中下游结合带都有从挤压到伸展构造事件的岩浆活动纪录, 在华夏地块内形成了大面积花岗岩类和东南沿海的下火山岩系; 120 Ma 后太平洋板块发生了约 80°的旋转而成为正向俯冲, 在东南沿海结合带的上火山岩系和宁镇山脉有从挤压到伸展构造的岩浆活动纪录, 同时也形成了

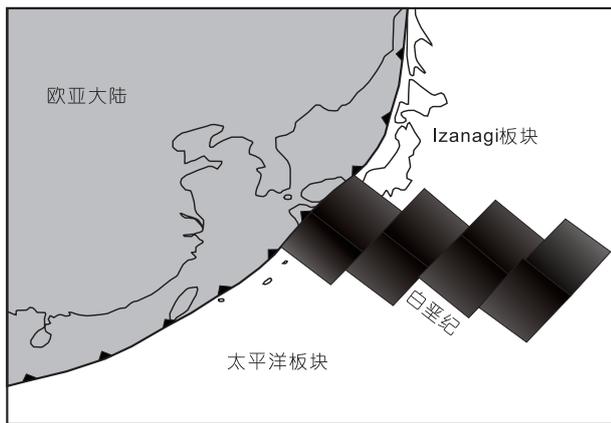


图9 太平洋板块和 Izanagi 板块与中国东部在~125 Ma 时的相对位置

根据中国东部的地质事件和太平洋板块和 Izanagi 板块的迁移史, 两个板块间的洋中脊在~125 Ma 时向北迁移了约 1000 km. 据文献 Sun 等(2007)

东亚大陆边缘巨型火山-侵入岩带.

(2) 日本、韩国等地区岩浆活动的间歇期(~170~120 Ma)正是华南岩浆-成矿活动的爆发期, 证明在太平洋板块大致由南而北的斜向俯冲驱动下, 导致华南周边陆块对华南多块体之间(华北与华南陆块、扬子克拉通与华夏地块, 华南与印支陆块)以及华夏地块的微陆块群从深部到浅部的动力学不平衡和相互作用, 这可能是岩浆-成矿活动的主要成因机制.

(3) 华南燕山期岩浆活动进一步研究的重点, 是系统总结三条构造结合带岩浆-成矿活动与构造变形, 尤其要将钦杭结合带(东段)的火山-侵入岩带从浙闽粤火山岩分布区划分出来, 加强岩浆-成矿活动与构造变形的研究; 通过编制华南岩性与高精度年龄分布图, 确定岩浆岩时空展布和成分变化规律, 以及构造变动-转换期与岩浆活动间歇期的对应关系, 力图恢复华南地质构造演化史.

致谢

本文写作过程中得到莫宣学院士、邓晋福教授、洪大卫研究员和潘桂堂研究员以及肖庆辉研究员的指教和鼓励, 得到了张国伟院士学术思想的启发和赐教. 郑永飞院士提出了许多建设性意见, 还多次审阅了全文, 并提供了有针对性的参考文献, 孙卫东研究员和王岳军教授等华南研究学者对论文提出许多中肯的意见和建议, 对于本文写作质量和学术水平的提高起到了关键性作用. 南京地质调查中心刘凯助理研究员和浙江大学周静博士对有关图件进行了修改. 在此一并表示衷心感谢.

参考文献

- 丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 等. 2005. 湖南沅山花岗岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年: 成岩启示及意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37: 606-616
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81: 1449-1461
- 高天山, 陈江峰, 谢智, 等. 2004. 苏鲁超高压变质带中三叠纪石岛杂岩体的地球化学研究. 岩石学报, 20: 1025-1038
- 顾明光, 冯立新, 胡艳华, 等. 2011. 浙江绍兴地区广山-栅溪岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年: 对漓渚铁矿成矿时代的限定. 地质通报, 30: 1212-1219
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. 矿床地质, 24: 99-107
- 李三忠, 王涛, 金宠, 等. 2011. 雪峰山基底隆起带及其邻区印支期陆内构造特征与成因. 吉林大学学报(地球科学版), 41: 93-105
- 李万友, 马昌前, 刘园园, 等. 2012. 浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义. 中国科学: 地球科学, 42: 164-177
- 李子颖, 李秀珍, 林锦荣. 1999. 试论华南中生代地幔柱构造、铀成矿作用及其找矿方向. 铀矿地质, 15: 9-34
- 厉子龙, 周静, 毛建仁, 等. 2013. 浙西北木瓜燕山期花岗岩斑岩的定年、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 29: 3607-3622
- 刘凯, 毛建仁, 赵希林, 等. 2014. 湖南紫云山岩体的地质地球化学特征及其成因意义. 地质学报, 88: 208-227
- 陆志刚, 陶奎元, 谢家莹, 等. 1997. 中国东南大陆火山地质及矿产. 北京: 地质出版社. 1-190
- 马大铨, 赵子杰, 康先继. 1991. 海南岛花岗岩类, 见: 汪啸风. 海南岛地质. 北京: 地质出版社. 1-67
- 毛建仁. 1995. 大陆扩张裂解型钙碱性系列火山带研究. 矿物岩石地球化学通报, 13: 106-109
- 毛建仁, 陶奎元, 邢光福, 等. 1999. 中国东南大陆边缘中生代地幔柱活动的岩石学记录. 地球学报, 20: 254-258
- 毛建仁, 许乃政, 胡青, 等. 2004. 闽西南地区中生代花岗闪长质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化. 吉林大学学报(地球科学版), 34: 12-20
- 毛建仁, 高桥浩, 厉子龙, 等. 2009. 中国东南部与日本中-新生代构造-岩浆作用对比研究. 地质通报, 28: 844-856

- 毛建仁, 邢光福, 叶海敏, 等. 2013a. 中国东南部及邻区中生代岩浆作用与成矿. 北京: 科学出版社
- 毛建仁, 叶海敏, 厉子龙, 等. 2013b. 钦杭结合带(东段)晚中生代挤压-伸展构造的岩浆活动与成矿记录. 矿物学报, 33: 30-32
- 毛建仁, 叶海敏, Takahashi Y, 等. 2014. 我国东南沿海与日本白垩纪-古近纪火山-侵入岩带的地球动力学特征. 资源调查和环境, 35: 157-168
- 邱松生, McInnes B I A, 徐夕生, 等. 2004. 赣南大吉山五里亭岩体的锆石 ELA-ICP-MS 定年及其与钨成矿关系的新认识. 地质论评, 50: 125-133
- 邱骏挺, 余心起, 张德会, 等. 2011. 浙西开化地区桐村花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 30: 1360-1368
- 任纪舜. 1997. 中国及邻区大地构造图. 北京: 地质出版社
- 舒良树. 2007. 南岭地区地质背景及华南中生代盆地分布章节. 见: 周新民, 主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社. 3-22
- 舒良树. 2012. 华南构造演化基本特征. 地质通报, 31: 1035-1053
- 宋传中, 牛漫兰, 刘国生. 2005. 基于变形分解与斜向汇聚理论的秦岭-大别造山带构造变形研究. 合肥工业大学学报(自然科学版), 28: 719-725
- 宋传中, Lin Y F, 周涛发, 等. 2010. 长江中下游及邻区中生代构造体制转换. 岩石学报, 26: 2835-2849
- 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 33: 1209-1218
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报, 25: 332-335
- 孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 等. 2010. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿. 中国科学 D 辑: 地球科学, 40: 127-137
- 陶奎元, 薛怀民. 1988. 中国东南沿海与西南日本内带中生代火山活动时代旋回与迁移问题的讨论. 资源调查和环境, 9: 1-13
- 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 等. 1999. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发. 矿床地质, 18: 316-322
- 王德滋, 周新民, 等著. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社. 1-289
- 王鹏程, 李三忠, 刘鑫, 等. 2012. 长江中下游燕山期逆冲推覆构造及成因机制. 岩石学报, 28: 3418-3430
- 王岳军, 范蔚茗, 席先武, 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 32: 491-499
- 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 2005. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示. 科学通报, 50: 1259-1266
- 王中杰, 谢家莹, 尹家衡, 等. 1999. 浙闽赣中生代火山岩区火山旋回, 火山构造, 岩石系列及演化. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 6: 1-220
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等. 2005. 海南岛石榴石-霓石正长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年: 海西-印支期构造演化的限制. 高校地质学报, 11: 47-57
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等. 2006a. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系. 岩石学报, 22: 2493-2508
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等. 2006b. 琼中海西期钾玄质侵入岩的厘定及其构造意义. 科学通报, 51: 1944-1954
- 谢谏克, 马荣生, 张禹慎, 等. 1996. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造. 北京: 地质出版社
- 谢谏克, 毛建仁, 彭维增. 1997. 华南岩石层与大陆动力学. 地球物理学报, 40: 153-163
- 谢桂青, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 2001. 中国东南部地幔柱及其与中生代大规模成矿关系初探. 大地构造与成矿学, 25: 179-186
- 邢光福, 卢清地, 陈荣, 等. 2008. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比. 地质学报, 82: 451-463
- 许效松, 刘伟, 门玉澎, 等. 2012. 对新元古代湘桂海盆及邻区构造属性的探讨. 地质学报, 86: 1890-1905
- 徐夕生, 邓平, Reily S Y O, 等. 2003. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义. 科学通报, 48: 1328-1334
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 2010. 锆石 La-ICP-MS U-Pb 与白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其对中国东南部早燕山事件的制约. 地质科技情报, 29: 87-94
- 薛怀民, 陶奎元, 沈家林. 1996. 中国东南沿海地区中生代火山岩 Sr-Nd 同位素特征和岩浆成因. 地质学报, 70: 35-47
- 薛怀民, 董树文, 马芳, 等. 2010. 长江中下游地区庐枞-宁芜盆地与成矿有关的潜火山岩的锆石 U-Pb SHRIMP 定年. 岩石学报, 26: 2653-2664
- 薛怀民, 汪应庚, 马芳, 等. 2009. 皖南太平-黄山复合岩体的 SHRIMP 年代学: 由钙碱性向碱性转变对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄时间的约束. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 979-993
- 闫峻, 刘海泉, 宋传中, 等. 2009. 长江中下游繁昌-宁芜火山盆地火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 科学通报, 54: 1716-1724
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产, 3: 52-59
- 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 等. 2007. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究. 岩石学报, 23: 1441-1456
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学: 地球科学, 43: 1553-1582
- 张敏, 陈培荣, 黄国龙, 等. 2006. 南岭东段龙源坝复式岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质学报, 80: 984-994
- 张旗, 李承东. 2012. 花岗岩: 地球动力学意义. 北京: 海洋出版社

- 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. 地质论评, 53: 28–40
- 张岳桥, 徐先兵, 舒良树, 等. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造系转换的形变记录. 地学前缘, 16: 234–247
- 赵希林, 刘凯, 毛建仁, 等. 2012. 华南燕山早期晚阶段两类花岗岩质岩体与成矿作用: 以赣南-闽西南地区为例. 中国地质, 39: 871–886
- 赵子福, 郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 888–909
- 郑永飞. 2008. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 53: 2129–2152
- 郑永飞, 赵子福, 陈伊翔. 2013. 大陆俯冲隧道过程: 大陆碰撞过程中的板块界面相互作用. 科学通报, 58: 2233–2239
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 2012. 长江中下游成矿带地质与矿产研究进展. 岩石学报, 28: 3051–3066
- 周翔, 余心起, 杨赫鸣, 等. 2012. 皖南绩溪县靠背尖高 Ba-Sr 花岗闪长斑岩年代学及其成因. 岩石学报, 28: 3403–3417
- Carter A, Roques D, Bristow C, et al. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29: 211–214
- Charvet J, Cluzel D, Faure M, et al. 1999. Some tectonic aspects of the pre-Jurassic accretionary evolution of East Asia. In: Metcalfe I, Ren J, Charvet J, et al., eds. *Gondwana Dispersion and Asian Accretion*. Rutterdam: A A Balkema/brookfie. 37–65
- Charvet J, Lapierre H, Yu Y W. 1994. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China. *J Asian Earth Sci*, 68: 387–396
- Chen C H, Lin W Y, Lan C Y, et al. 2004. Geochemical, Sr and Nd isotopic characteristics and tectonic implication for three stages of igneous rock in the Late Yanshanian (Crataceous) orogeny, SE China. *Trans R Soc Edinb-Earth Sci*, 95: 237–248
- Chen C H, Lee C Y, Shinjo R, et al. 2008. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China? Constraints of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts. *Lithos*, 106: 83–92
- Chen C H, Hsieh P S, Lee C H, et al. 2011. Two episodes of the Indosinian thermal event on the South China Block: Constraints from LA-ICPMS U-Pb zircon and electron microprobe monazite ages of the Darongshan S-type granitic suite. *Gondwana Res*, 19: 1008–1023
- Chen L, Zhao Z F, Zheng Y F. 2014. Origin of andesitic rocks: Geochemical constraints from Mesozoic volcanics in the Luzong basin, South China. *Lithos*, 190–191: 220–239
- Cho D L, Lee S R, Armstrong R. 2008. Termination of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian) orogeny in the Ogcheon Belt, South Korea: Occurrence of ca. 220 Ma post-orogenic alkali granites and their tectonic implications. *Lithos*, 105: 191–200
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F. 2014. Geochemical insights into the role of metasomatic hornblende in generating alkali basalts. *Geochim Geophys Geosy*, doi: 10.1002/2014GC005486
- Deng Z B, Liu S W, Zhang L F, et al. 2014. Geochemistry, zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes of an Early Cretaceous intrusive suite in northeastern Jiangxi Province, South China Block: Implications for petrogenesis, crust/mantle interactions and geodynamic processes. *Lithos*, 200–201: 334–354
- Dong S W, Li T D, Lü Q T, et al. 2013. Progress in deep lithospheric exploration of the continental China: A review of the SinoProbe. *Tectonophysics*, 606: 1–13
- Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. 1985. Relative motion between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. *Geol Soc Amer Spec Pap*, 206: 1–59
- Gilder S A, Gill J, Coe R S. 1996. Isotopic and palaeomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *J Geophys Res*, 101: 16137–16154
- Guo F, Fan W M, Li C W. 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces. *Lithos*, 150: 62–84
- He C S, Dong S W, Santosh M, et al. 2013. Seismic evidence for a geosuture between the Yangtze and Cathaysia Blocks, South China. *Scientific Reports*, 3: 1–7
- Hee S, Kwon S T. 2005. Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24: 1–18
- Hildreth W, Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile. *Contrib Mineral Petrol*, 98: 455–489
- Hsü K J, Li J L, Chen H H, et al. 1998. Mesozoic overthrust tectonics in South China. *Geology*, 16: 418–421
- Huang Z G, Gao C L, Ji R S. 2005. Analysis of evolution of Meso-Cenozoic basins in southern North China. *Oil Gas Geol*, 26: 252–256
- Ichikawa K, Mizutani S, Hada I, et al. 1990. Pre-Cretaceous Terranes of Japan. Osaka: Nippon Insatsu Shuppan Corporation Limited. 553: 413
- Jahn B M. 1974. Mesozoic thermal events in Southeast China. *Nature*, 248: 480–483
- Jahn B M. 1986. Mid-ocean ridge or marginal basin origin of the East Taiwan Ophiolite: Chemical and isotopic evidence. *Contrib Mineral Petrol*, 92: 194–206
- Jahn B M, Zhou X H, Li J L. 1990. Formation and tectonic evolution of Southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183: 145–160

- Jiang G M, Zhang G B, Lü Q T, et al. 2013. 3-D velocity model beneath the Middle-Lower Yangtze River and its implication to the deep geodynamics. *Tectonophysics*, 606: 36–47
- Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, et al. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107: 185–204
- Jiang Y H, Zhao P, Zhou Q, et al. 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: 55–73
- Kim S W, Kong S, Hee J K, et al. 2011. Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Res*, 20: 865–899
- Koppers A P, Morgan J P, Morgan J W, et al. 2001. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails. *Earth Planet Sci Lett*, 185: 237–252
- Lan C Y, Chung S L, Shen J S. 2000. Geochemical and Sr-Nd isotope characteristics of granitic rocks from northern Vietnam. *J Asian Earth Sci*, 18: 267–280
- Lan C Y, Chung S L, Long T V. 2003. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints from the Kontum Massif, central Vietnam on the crustal evolution of the Indochina block. *Precambrian Res*, 122: 7–27
- Lepvrier C, Maluski H, Vu Van Tich, et al. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393: 87–118
- Ling M X, Wang F Y, Ding X, et al. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, Eastern China. *Econ Geol*, 104: 303–321
- Li H, Ling M X, Li C Y, et al. 2012. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: Indication of ridge subduction. *Lithos*, 150: 26–36
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China. *J Asian Earth Sci*, 18: 293–305
- Li X H, Chen Z G, Liu D Y, et al. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from Southern Jiangxi province, SE China: Age, origin, and tectonic significance. *Int Geol Rev*, 45: 898–921
- Li X H, Li Z X, Li W X. 2006. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *J Geol*, 114: 341–353
- Li X H, Li Z X, Li W X, et al. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96: 186–204
- Li X H, Li Z X, Li W X, et al. 2013. Revisiting the “C-type adakites” of the Lower Yangtze River Belt, central eastern China: *In-situ* zircon Hf-O isotope and geochemical constraints. *Chem Geol*, 345: 1–15
- Li Z L, Zhou J, Mao J R, et al. 2013. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of two episodes of granitoids from the northwestern Zhejiang Province, SE China: Implication for magmatic evolution and tectonic transition. *Lithos*, 179: 334–352
- 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: 179–182
- Li Z X, Li X H, Chung S L, et al. 2012. Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary. *Tectonophysics*, 532–535: 271–290
- Liu X, Fan H R, Santoshi M, et al. 2012. Remelting of Neoproterozoic relict volcanic arcs in the Middle Jurassic: Implication for the formation of the Dexing porphyry copper deposit, Southeastern China. *Lithos*, 150: 85–100
- Lo C H, Yui T F. 1996. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of high-pressure rocks in Tananao basement complex, Taiwan. *J Geol Soc China*, 39: 13–30
- Lü Q T, Yan J Y, Shi D N, et al. 2013. Reflection seismic imaging of the Lujiang-Zongyang volcanic basin, Yangtze Metallogenic Belt: An insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district. *Tectonophysics*, 606: 60–77
- Mao J R, Tao K Y, Yang Z L, et al. 1997. Geodynamic background of the Mesozoic intracontinental magmatism in Southeast China. *Chin J Geochem*, 16: 230–239
- Mao J R, Hu Q, Xu N Z, et al. 2003. Geochronology and geochemical characteristics of the Early Mesozoic Tangquan Pluton, Southwestern Fujian and its Tectonic Implications. *Acta Geol Sin*, 77: 361–371
- Mao J R, Li Z L, Zhao X L, et al. 2010. Geochemical characteristics, cooling history and mineralization significance of Zhangqiantang pluton in South Jiangxi Province, China. *Chin J Geochem*, 29: 53–64
- Mao J R, Takahashi Y, Kee W S, et al. 2011. Characteristics and geodynamic evolution of Indosinian magmatism in South China: A case study of the Guikeng pluton. *Lithos*, 127: 535–557
- Mao J R, Ye H M, Liu K, et al. 2013. The collision-extension event between the South China Block and the Paleo-Pacific Plate: Evidence from

- Indosinian alkaline rocks in Dashuang, eastern Zhejiang. *Lithos*, 172: 81–97
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6: 121–142
- Nagy E A, Maluski H, Lepvrier C. 2001. Geodynamic significance of the Kontum Massif in central Vietnam: composite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Pb ages from Paleozoic to Triassic. *J Geol*, 109: 755–770
- Nguyen T T B, Satir M, Siebel W, et al. 2004. Granitoids in the Dalat zone, southern Vietnam: Age constraints on magmatism and regional geological implications. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 93: 329–340
- Nakajima T. 1996. Cretaceous granitoids in SW Japan and their bearing on the crust-forming process in the eastern Eurasian margin. *Trans R Soc Edinb-Earth Sci*, 315: 183–191
- Nakano N, Osanai Y, Owada M, et al. 2004. Decompression process of mafic granulite from eclogite to granulite facies under ultrahigh-temperature condition in the Kontum Massif central Vietnam. *J Mineral Petrol Sci*, 99: 242–256
- Nam T, Sano Y, Terada K, et al. 2001. First SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites from the Kontum Massif (Vietnam) and tectonothermal implications. *J Asian Earth Sci*, 19: 77–84
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N. 2008. Zircon 257 Ma homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandard Geoanal Res*, 32: 247–265
- Owada M, Osanai Y, Nakano N. 2007. Crustal anatexis and formation of two types of granitic magmas in the Kontum Massif central Vietnam: Implications for magma processes in collision zones. *Gondwana Res*, 12: 428–437
- Rowley D B, Xue F, Tucker R D. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabiehan: U-Pb zircon geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 151: 191–203
- Shi D N, Lü Q T, Xu W Y, et al. 2013. Crustal structure beneath the middle-lower Yangtze metallogenic belt in East China: Constraints from passive source seismic experiment on the Mesozoic intra-continental mineralization. *Tectonophysics*, 606: 48–59
- Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 262: 533–542
- Sun W D, Yang X Y, Fan W M, et al. 2012. Mesozoic large scale magmatism and mineralization in South China: Preface. *Lithos*, 150: 1–5
- Sun Y, Ma C Q, Liu Y Y, et al. 2011. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of late Triassic aluminous A-type granites in southeast China. *J Asian Earth Sci*, 42: 1117–1131
- Swell R J, Davis D W, Campbell S D G. 2012. High precision U-Pb zircon ages for Mesozoic igneous rocks from Hong Kong. *J Asian Earth Sci*, 43: 164–175
- Tong W X, 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. *Tectonophysics*, 267: 303–316
- Wang F Y, Ling M X, Ding X, et al. 2011. Mesozoic large magmatic events and mineralization in SE China: Oblique subduction of the Pacific plate. *Int Geol Rev*, 53: 704–726
- Wang G G, Ni P, Zhao K D, et al. 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 150: 135–154
- Wang Y, Zhao Z F, Zheng Y F, et al. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 125: 940–955
- Wang Y J, Zhang Y H, Fan W M, et al. 2005b. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan transpressive belt, South China Interior. *J Struct Geol*, 27: 985–998
- Wang Y J, Fan W M, Peng T P, et al. 2005a. Element and Sr-Nd systematics of early Mesozoic volcanic sequence in southern Jiangxi Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications. *Int J Earth Sci*, 53: 53–65
- Wang Y J, Fan W M, Sun M, et al. 2007b. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 96: 475–502
- Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, et al. 2007a. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, South China: Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints. *Tectonics*, 26, doi: 10.1029/2007TC00209
- Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, et al. 2008. Sr-Nd-Pb isotopic constraints on multiple mantle domains for Mesozoic mafic rocks beneath the South China Block hinterland. *Lithos*, 106: 297–308
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al. 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies. *Gondwana Res*, 23: 1273–1305
- Wang Z H, Lu H F. 2000. Ductile deformation and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Changle-Nanao ductile shear zone, southeastern China. *J Struct Geol*,

22: 561–570

- Williams I S, Cho D L, Kim S W. 2009. Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi Massif, South Korea: Constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos*, 107: 239–256
- Wu F Y, Ji W Q, Sun D H. 2012. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China. *Lithos*, 150: 6–25
- Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. 2006. Reworking of juvenile crust: element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Res*, 146: 179–212
- Wu Y B, Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China. *Gondwana Res*, 23: 1402–1428
- Wyllie P J. 1984. Constraints imposed by experimental petrology on possible and impossible magma sources and products. *Philos Trans R Soc*, A310: 439–456
- Xu X B, Zhang Y Q, Shu L S, et al. 2011. La-ICP-MS U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the sheared metamorphic rocks in the Wuyishan: Constraints on the timing of Early Paleozoic and Early Mesozoic tectono-thermal events in SE China. *Tectonophysics*, 501: 71–86
- Xu Z, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012. Slab-mantle interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: Geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong. *Lithos*, 146–147: 202–217
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, et al. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chem Geol*, 214: 99–125
- Yang S Y, Jiang S Y, Zhao K D, et al. 2012. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China. *Lithos*, 150: 155–170
- Yang Y T. 2013. An unrecognized major collision of the Okhotomorsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, constraints on the plate reorganization of the Northwest Pacific. *Earth-Sci Rev*, 126: 96–115
- Yao J L, Shu L S, Santosh M, et al. 2013. Geochronology and Hf isotope of detrital zircons from Precambrian sequences in the eastern Jiangnan Orogen: Constraining the assembly of Yangtze and Cathaysia Blocks in South China. *J Asian Earth Sci*, 74: 225–243
- Yao J L, Shu L S, Santosh M, et al. 2014. Neoproterozoic arc-related mafic-ultramafic rocks and syn-collision granite from the western segment of the Jiangnan Orogen, South China: Constraints on the Neoproterozoic assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Precambrian Res*, 243: 39–62
- Ye H M, Mao J R, Zhao X L, et al. 2013. Revisiting to the Early Yanshanian (190–170 Ma) igneous activity in Nanling Mountains, South China: Geochemistry and geodynamic implications. *J Asian Earth Sci*, 72: 108–117
- Yi K, Cheong C S, Kim J. 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic arc-related magmatism in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and geochemistry. *Lithos*, 153: 129–141
- Yuhara M, Kagami H, Nagao K. 2000. Geochronological characterization and petrogenesis of granitoids in the Ryoke belt, Southwest Japan Arc: Constraints from K-Ar, Rb-Sr and Sm-Nd systematic. *Island Arc*, 9: 64–80
- Zeng Q T, Mao J R, Chen R. 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating and cooling history of Tianmenshan pluton in South Jiangxi province and their significances in ore deposit geology. *Chin J Geochem*, 27: 276–284
- Zhang F F, Wang Y J, Chen X Y, et al. 2011. Triassic high-strain shear zones in Hainan Island (South China) and their implications on the amalgamation of the Indochina and South China Blocks: Kinematic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints. *Gondwana Res*, 19: 910–925
- Zhang H, Ling M X, Liu Y L, et al. 2013. High oxygen fugacity and slab melting linked to Cu mineralization: Evidence from Dexing porphyry copper deposits, Southeastern China. *J Geol*, 121: 289–305
- Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 2009, 110: 305–326
- Zhang S B, Zheng Y F. 2013. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China. *Gondwana Res*, 23: 1241–1260
- Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. 2003. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China. *Tectonophysics*, 363: 243–258
- Zhao X L, Mao J R, Ye H M, et al. 2013a. New SHRIMP U-Pb zircon ages of granitic rocks in the Hida Belt, Japan: Implications for tectonic correlation with Jiamushi massif. *Island Arc*, 22: 508–521
- Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J, et al. 2012. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Evidence from alkaline intrusives of Triassic age in the Sulu orogen. *Chem Geol*, 328: 70–88
- Zhao Z F, Dai L Q, Zheng Y F. 2013b. Postcollisional mafic igneous rocks record crust-mantle interaction during continental deep subduction. *Sci Rep*, 3:3413, doi: 10. 1038/srep 03413

- Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Res*, 163: 351–383
- Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. 2009. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. *Tectonophysics*, 475: 327–358
- Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 328: 5–48
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C, 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 23: 1189–1206
- Zhou L Q, Xie J Y, Shen W S, et al. 2012. The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography. *Geophys J Int*, 189: 1565–1583
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269–287
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29: 26–33