

华南中生代大地构造研究新进展

张岳桥¹⁾, 董树文²⁾, 李建华¹⁾, 崔建军¹⁾, 施 炜¹⁾, 苏金宝¹⁾, 李 勇¹⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2) 中国地质科学院, 北京 100037

摘 要: 华南地区中生代构造动力体制经历了从特提斯构造域向滨太平洋构造域的转换, 由此产生了强烈的陆内造山作用和岩浆活动, 形成了复杂构造组合的晚中生代陆内造山带和火成岩省。本项研究在下列几个方面取得了新的进展: (1) 通过对雪峰山地区沅麻盆地的野外调查和构造测量, 确定了该盆地晚中生代-早新生代 5 期构造应力场及其演替序列: 中晚侏罗世近 W—E 向挤压、早白垩世 NW—SE 向伸展、早白垩世中晚期 NW—SE 向挤压、晚白垩世近 N—S 向伸展、古近纪晚期 NE—SW 向挤压。构造应力场方向的变化记录了不同板缘的动力作用对该区的影响。(2) 识别了湖南地区晚古生代-早中生代海相地层中发育的横跨叠加褶皱构造, 并基于地层接触关系和已有火成岩同位素年代学数据分析, 认为该地区横跨叠加褶皱构造记录了中生代两期构造挤压和地壳增厚事件: 早期近东西向褶皱构造是对三叠纪华南地块南北边缘大陆碰撞和增生作用的远程响应, 晚期 NE—NNE 向褶皱构造则是对中晚侏罗世古太平洋板块向华南大陆之下低角度俯冲作用的变形响应。(3) 对湖南衡山西缘拆离断裂带的变形结构和运动学特征进行了详细的调查和构造测量, 确定了衡山变质核杂岩构造, 并对拆离带中韧性剪切变形的钠长岩脉的锆石进行了 SHRIMP U-Pb 测年, 从而确定了华南地区伸展构造的起始时代约 137 Ma, 即早白垩世早中期。(4) 通过锆石 U-Pb 年代学测试分析, 揭示了东南沿海长乐—南澳构造带早白垩世 2 期构造-岩浆事件: 早期(147~135 Ma)表现为强烈的混合岩化作用和深熔作用形成的片麻状花岗岩、花岗片麻岩等; 晚期(135~117 Ma)岩浆岩以含石榴子石花岗岩为主。这个结果表明东南沿海构造带是晚中生代陆缘造山带, 造山作用可能起始于晚侏罗世, 于早白垩世早中期(135 Ma)以来发生伸展垮塌。在上述研究结果的基础上, 探讨了华南地区三叠纪“印支运动”和中、晚侏罗世“燕山运动”的表现及其产生的板块构造动力体制及其转换时代、早白垩世从挤压构造应力体制向伸展构造应力体制转变的时间节点。

关键词: 陆内造山; 构造应力场; 横跨叠加褶皱; 中生代大地构造; 构造动力体制转换; 沅麻盆地; 长乐—南澳构造带; 华南大陆

中图分类号: P54; P55 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.03.01

The New Progress in the Study of Mesozoic Tectonics of South China

ZHANG Yue-qiao¹⁾, DONG Shu-wen²⁾, LI Jian-hua¹⁾, CUI Jian-jun¹⁾, SHI Wei¹⁾,
SU Jin-bao¹⁾, LI Yong¹⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Mesozoic tectonic regime underwent the transform from the Meso-Tethyan tectonic domain to the west Pacific tectonic domain, which caused intense intraplate orogenesis and magmatism in South China, forming a wide and complex intracontinental orogen and igneous province in this region of East Asia. Some progresses have been achieved recently in the study of this Mesozoic tectonics of South China, which are summarized as follows:

本文由国家专项“深部探测与实验研究”第八项目第一课题(编号: SinoProbe-08-01)资助。获中国地质科学院 2011 年度十大科技进展第二名。

收稿日期: 2012-03-21; 改回日期: 2012-04-08。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 张岳桥, 男, 1963 年生。研究员, 博士生导师。主要从事区域构造地质研究。E-mail: zhangyueqiao@yahoo.com。

(1) On the basis of field analysis of fault kinematics affecting different lithostratigraphic units of the Yuanma basin in central South China, a five-stage tectonic stress evolution history from Late Mesozoic to Early Cenozoic period was established, which included Middle-Late Jurassic E-W compression, Early Cretaceous NW-SE extension, Early Cretaceous NW-SE compression, Late Cretaceous N-S extension and Paleogene NE-SW compression. The change in tectonic stress directions was interpreted in terms of the change either in plate tectonic settings or in deep-seated crustal process. (2) Superposed folds involving Late Paleozoic to Mesozoic strata in Hunan Province were recognized; it is considered that these cross folds might record the effects of plate boundary tectonics, i.e., the earlier W-E to WNW-ESE trending folds were formed in response to the Triassic collision of the South China Block with the North China Block and the Indochina Block, and the late NE to NNE trending folds were generated as the far-field effect of a low angle subduction of the Paleo-Pacific oceanic plate beneath the South China Block, which occurred in Mid-Late Jurassic. (3) The Hengshan metamorphic core complex was determined on the basis of detailed field investigation of a normal detachment fault zone developed along the western margin. SHRIMP U-Pb dating of zircons from strongly sheared albite made sure that the normal faulting was initiated in Early Cretaceous, at about 137 Ma. (4) Field observations and U-Pb dating of zircons revealed that the Changle-Nan'ao tectonic zone along the coast of southeast China corresponds to a Late Mesozoic orogenic zone formed in Late Jurassic to Early Cretaceous; it was materialized by gneissic granites, migmatites and amphibolite facies metamorphic rocks, which were dated to be 147-135 Ma. This orogenic zone began to collapse in 135-117 Ma, characterized by fine-grained granites. Based on the above results, this paper discusses the manifestations and plate tectonic backgrounds of the Indosinian and Yanshannian movements, and the time of the change from the compressive tectonic regime to the extensional region in Early Cretaceous.

Key words: intra-continental orogenesis; tectonic stress field; cross folds; Mesozoic tectonics change in tectonic regime; Yuanma basin; Changle-Nan'ao tectonic zone; South China

中生代是华南乃至整个东亚大陆大地构造发生剧烈变动的时期,也是东亚大地构造发展的重要转折时期(任纪舜, 1990; 赵越等, 2004; Dong et al., 2008; 董树文等, 2010)。华南大陆是由多个块体或地体拼合而成,主要构造单元包括扬子地块、江南—雪峰山构造带、华夏地块、东南沿海岩浆-变质构造带等(图 1)。华南大陆北部边缘为秦岭—大别—苏鲁碰撞造山带,将华南地块与华北地块拼合在一起,其西南边缘通过红河断裂与印支地块相连。研究表明,扬子地块和华夏地块于中晚元古代碰撞拼合(Chen et al., 1991, 1998; Charvet et al., 1996),华夏地块经历了加里东褶皱造山作用(Li Z X et al., 2010; 舒良树, 2006),并受到印支运动和燕山运动的强烈改造,尤其燕山运动以压倒一切的优势对早期构造进行了改造和叠加,隐蔽了前期构造变形形迹(Huang, 1945; 任纪舜, 1984, 1990)。

华南地区中生代动力体制经历了从特提斯构造域向滨太平洋构造域的转换,但对这种动力体制转换发生的时间和转换产生的地质效应,是华南大地构造研究的关键科学问题之一。不同作者从地层接触关系、构造变形样式和岩浆记录等方面进行了论述。许多学者如 Huang(1945)、任纪舜(1984, 1990)基于三叠系内部地层角度不整合面和古地理环境的变化,强调了华南地区印支运动的重要性。野外调查发现华南地区印支运动不仅表现为地台盖层的褶

皱作用,而且地台基底也不同程度地被卷入褶皱。这个认识也为其他学者所认同,并提出了不同的动力学模型。Hsü 等(1988a, b, 1990)提出了扬子地块与华夏地块在中生代发生碰撞的华南阿尔卑斯造山带碰撞模型,来解释华南地区复杂的构造变形样式,但该模型受到许多地质学家的质疑(Rodger, 1989; Rowley et al., 1989; Yu et al., 2005),普遍认为华南不存在中生代碰撞造山带,而以陆内变形为主。一个共同的认识是,华南大陆广泛发育的褶皱构造和岩浆作用是古太平洋板块向华南大陆之下俯冲作用的结果,但不同学者提出了不同的板块俯冲模式。Zhou 等(2000, 2006)提出了古太平洋板块初始低角度俯冲和俯冲板块逐渐后退变陡的模式,来解释华南地区晚中生代岩浆活动和演化历史,这个模式很好地解释了华南地区中晚侏罗世以来岩浆活动由陆地向海沟方向迁移的规律。Wang 等(2005a)基于雪峰山地区构造变形的调查和 Ar-Ar 测年分析,提出一个陆内斜向俯冲模式来解释基底左旋走滑逆冲和盖层褶皱变形,认为这个过程主要形成于中晚三叠世的印支运动时期。Li Z X 等(2007)分析了华南地区花岗岩类型和年龄,提出了华南褶皱造山带形成的大洋板块俯冲模型,这个构造模型强调了古太平洋板块向华南大陆长距离的平俯冲作用起始于晚二叠世末期,导致了华南 1300 km 宽的褶皱造山带的形成,而随后的俯冲板片的破坏和熔融主导了晚中生

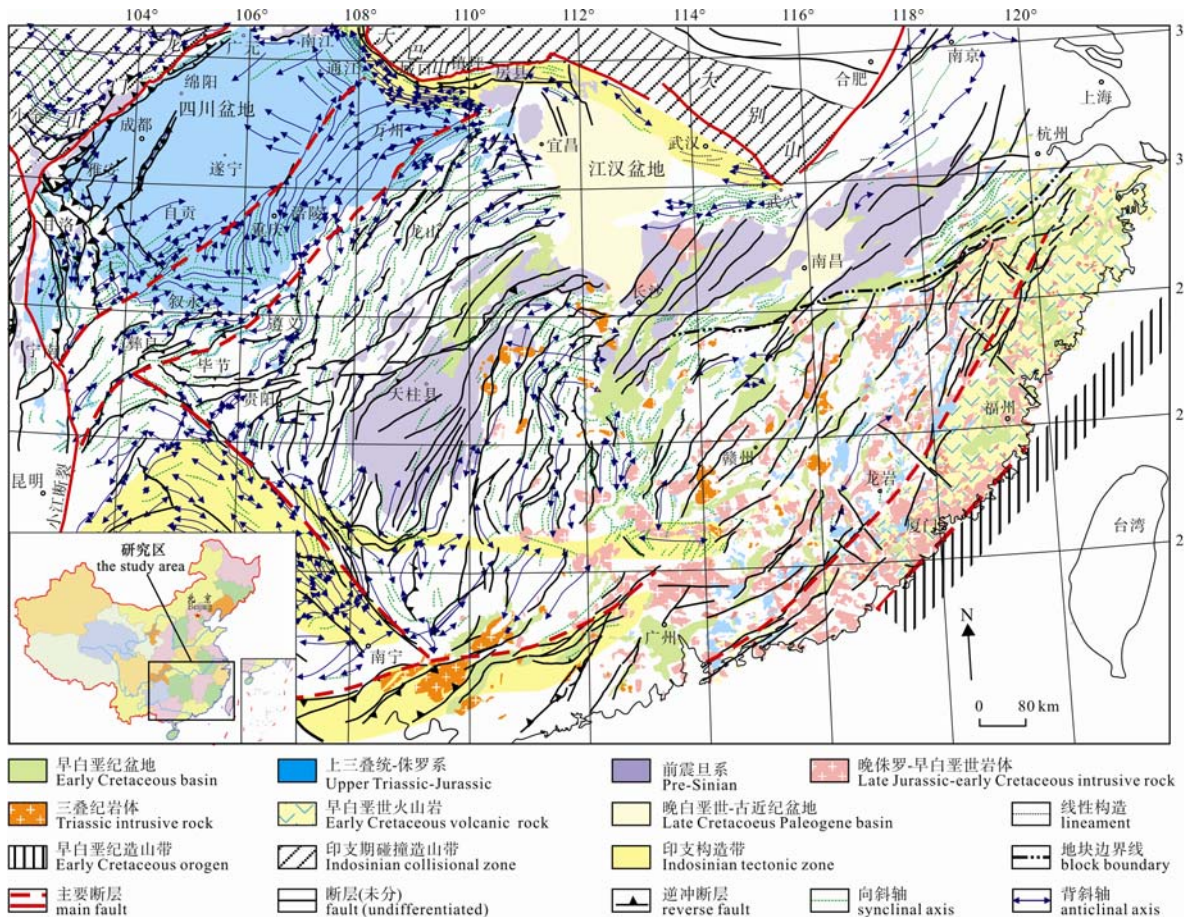


图 1 华南大陆中生代构造纲要图
Fig. 1 Mesozoic structural outline map of South China

代岩浆作用(Li X H et al., 2007)。

上述关于华南地区早中生代造山作用的构造模型也受到不同学者的挑战。郭福祥(1998)通过地层接触关系分析,认为华南地区印支运动褶皱变形轻微,主要表现为隆升、海退和原始沉积盆地的掀斜,强烈的褶皱变形主要发生在燕山运动和喜山运动时期。张岳桥等(2009)则通过系统编图和叠加褶皱构造分析,发现华南早中生代存在两个世代褶皱的横跨叠加,认为早期近东西向褶皱构造具有南北成带、晚期 NE—NNE 向褶皱构造具有东西分区的区域展布特征,并基于地层接触关系和早中生代岩浆岩和火山岩同位素年代学数据分析(徐先兵等, 2009),认为这两组叠加褶皱构造清楚地记录了华南早中生代两期挤压事件:近东西向褶皱是对印支早期华南地块南北边缘碰撞造山事件和俯冲增生事件的远程响应,NE—NNE 向褶皱则起源于燕山早期((170±5) Ma)古太平洋板块向华南大陆之下低角度俯冲作用,两者发生转换的时代在中晚侏罗世之交。这个认识与 Dong 等(2008)对东亚大地构造的解释是一致的。

因此,华南地区中生代构造研究涉及 2 个关键科学问题:(1)古太平洋板块何时开始向华南大陆之下俯冲?从晚二叠世开始还是从中、晚侏罗世开始?(2)华南地区晚中生代构造体制发生了重大转折,从早期以地壳挤压缩短作用为主到晚期以地壳伸展作用为主,其转换时代是什么?

为了回答上述问题,笔者在《深部探测技术与实验研究》(SinoProbe)专项资助下(董树文等, 2011),在前人工作的基础上,经过 3 年的野外调查研究工作,深入分析了华南典型的叠加褶皱样式、古构造应力场、伸展拆离构造、早白垩世岩浆作用,在下列 4 个方面取得了重要的进展。

1 华南中生代构造研究主要进展

1.1 华南地区晚中生代构造应力场演化历史

1.1.1 盆地基本特征

沅麻盆地是一个北东—南西走向的白垩纪断陷盆地,长 250 km,宽 30~65 km,发育于华南大陆中部扬子地块与华夏地块的结合部位。新元古代板溪

群出露在盆地的东侧, 主要为一套成层性好的硬砂岩-板岩-片岩系列, 年龄在 760~820 Ma(Wang et al., 2005a), 紧闭褶皱, 变质程度很浅。盆地的西缘出露扬子地块的下古生界沉积岩层, 包括震旦纪冰碛岩、灰岩与白云岩、寒武纪页岩和灰岩、奥陶纪碳酸盐岩和粉砂岩、志留纪砂岩和页岩等, 这个盖层沉积发生褶皱, 形成隔槽式褶皱构造(Yan et al., 2003)。晚古生代-早中生代地层包括泥盆纪砂岩、粉砂岩和灰岩、石炭-二叠纪碳酸盐岩和白云岩、中下三叠统灰岩, 出露在盆地的东部边缘, 并发生褶皱变形。

横穿盆地的构造剖面显示沅麻盆地构造变形具“西弱东强”特征, 几何形态表现为不对称分布的箕状盆地, 是一个不典型的大陆伸展盆地。这个断陷盆地受到两组断裂的控制: 一组走向 NE, 是盆地的主要构造, 控制了盆地早白垩世的伸展与沉积充填; 另一组走向东西, 它们控制了晚白垩世的沉降凹陷, 如盆地南部的芷江凹陷。从 1: 200 000 地质图上判读, 我们注意到东西向断裂受到 NE—SW 向断裂的限制, 这种切割关系指示东西向断裂形成晚于北东向断裂。

基于区域地层资料和前人的研究工作, 并考虑到江汉盆地的地层序列, 对沅麻盆地的地层序列进行了综合整理和编制, 将盆地的地层序列划分成 3 个岩性地层组合: 上三叠统至下、中侏罗统、下白垩统、上白垩统至古近系。这三个地层单元之间均为角度不整合接触(图 2)。

1.1.2 盆地构造应力场演化历史

基于盆地内不同地层单元断层几何学、运动学特征及其活动期次的野外观察和测量, 运用断层滑动矢量反演古构造应力场的方法(Angelier, 1984; Mercier et al., 1987a, b), 结合盆地的沉积记录和地层不整合关系, 我们建立了沅麻盆地晚中生代 4 期构造应力场及其演替历史(图 2, Li et al., 2011)。

(1)中晚侏罗世 WNW—ESE 挤压(图 3): 这期挤压作用主要记录在影响上三叠统和中下侏罗统的断层上, 在古生代碳酸盐和碎屑岩中也有良好记录。在沅麻盆地的东缘, 可见二叠纪灰岩向西逆冲推覆在上三叠统和中下侏罗统地层之上, 断层面上的擦痕构造指示了近东西向挤压。根据影响变形的地层时代推断, 这期挤压作用发生在中侏罗世之后、早白垩世盆地发育之前, 很可能发生在晚侏罗世。

(2)早白垩世早期 NW—SE 引张(图 4): 这期引张作用记录在早白垩世地层以及前白垩纪地层中,

变形表现为 NE—NNE 走向的高角度正断层或同沉积正断层。这些正断层切穿了盆地的南部和西部地区, 地形地貌上可见明显的垂向断距。平均伸展方向为 $N136^{\circ}E$, 最大主应力轴(σ_1)为垂直。在这期伸展作用下, 盆地沿 NW—SE 方向张开, 一系列 NE—SW 走向伸展构造形成, 初步奠定了盆地的雏形格局。

(3)早白垩世晚期 NW—SE 挤压(图 5): 这期挤压表现为一组共轭的走滑断层, 它们强烈影响了早白垩世地层。反演结果的统计分析显示, 最大主应力轴的平均方位约 $N309^{\circ}E$, 近水平, 中间主应力轴垂直, 最小主应力轴(σ_3)走向 NE—SW。这期挤压导致盆地构造反转, 并形成大量 NWN—NEN 走向左行走滑断层及弱褶皱构造。

(4)晚白垩世 S—N 引张(图 6): ENE—E 走向的同运动正断层记录了这期引张作用, 这些断层控制了沅麻盆地晚白垩世沉降凹陷。野外测量显示, 大部分断层是高角度的, 并保留了近直立的擦痕线理。这组断层线理大量发育在下白垩统, 在上白垩统中也观察到。反演结果的统计分析显示, 最小主应力轴(σ_3)近水平, 平均走向 180° , 最大主应力轴(σ_1)近直立。这次伸展作用导致 E—W 走向沉积凹陷, 如芷江半地堑、漆河半地堑, 其发生时代一直可以延续到古近纪。

(5)NE—SW 向挤压: 在古近纪晚期, N—S 向伸展结束, 代之而起的是 NE—SW 向挤压作用。这期挤压作用主要表现为 2 组共轭走滑断层。断层矢量反演结果显示, 最大主应力轴(σ_1)平均方位 $N37^{\circ}E$, 近水平(12°), 最小主应力轴(σ_3)走向 NW—SE。

1.1.3 大地构造意义

沅麻盆地白垩纪地层的古地磁研究表明, 自白垩纪以来, 该地区地壳没有发生旋转, 华南地块处于稳定状态(Zhu et al., 2006)。因此, 在盆地中记录的古构造应力场方向及其变化可以用区域动力学作用或深部构造作用的变化来解释。总体上, 在晚侏罗世至早白垩世时期, 挤压或伸展的方向为 NW—SE 至 W—E, 而自晚白垩世以来变为 N—S 至 NE—SW。这种主应力轴方向的变化可能记录了不同地球动力作用对本地区的影响, 要么来自西太平洋边缘俯冲作用, 要么来自特提斯-喜马拉雅构造域的影响。

正如在前文中提出, 华南中生代构造研究的一个关键科学问题是: 古太平洋板块何时开始向华南大陆之下俯冲? 人们普遍认为, 这个俯冲作用是华

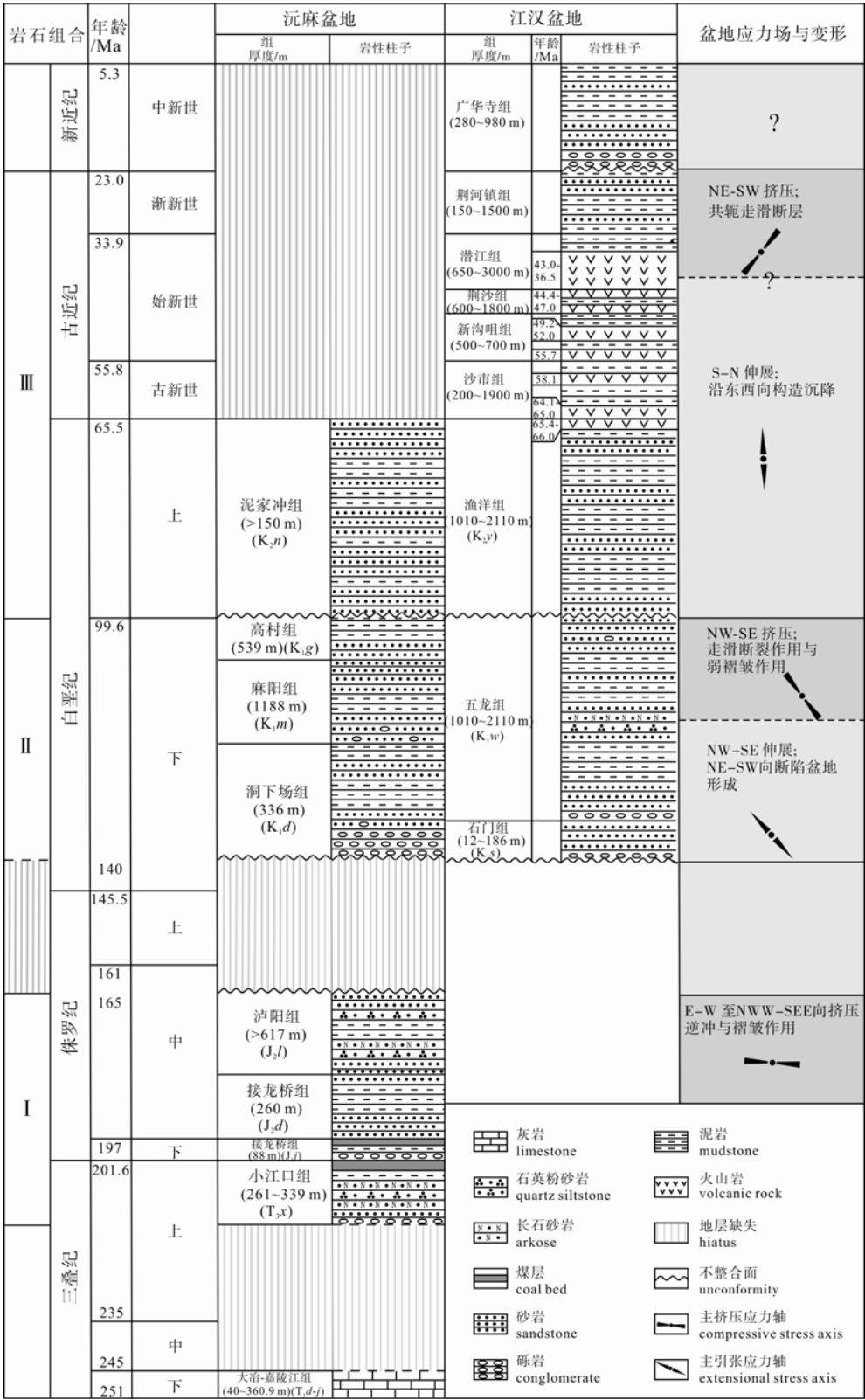


图 2 沅麻盆地与江汉盆地地区地层柱及古构造应力场演替历史

Fig. 2 Mesozoic-Cenozoic stratigraphic columnar section and deformation history of Yuanma and Jiangnan basins

南大陆约 1300 km 陆内造山带形成的主因(Xu et al., 1999; Wang et al., 2005a; Zhou et al., 2006; Li Z X et al., 2007), 但对这个陆内造山带形成的起始时间一

直有争论的: 有的强调了二叠纪就开始了(Li Z X et al., 2007), 有的认为是中侏罗世约 180 Ma (Zhou et al., 2000, 2006), 或者中晚侏罗世约 (165±5) Ma

(Dong et al., 2008)。在沅麻盆地记录的构造变形历史指示最早一期近 W—E 向挤压作用应该与古太平洋板块俯冲作用有关, 因而制约了华南大陆中生代陆内造山作用的时间应该在中侏罗世之后、早白垩世之前。在华南大陆东部地区的华夏地块, 广泛发育的、侵入于褶皱构造带的晚侏罗世花岗岩年龄 (150~160 Ma) 可以限定这期褶皱变形的年龄 (张岳桥等, 2009)。

早白垩世早期, 构造应力体制以伸展作用为主, 这期伸展作用与华南地区早白垩世断陷盆地的发育、侵入岩浆活动和火山作用是同时的 (Faure et al., 1992, 1996; Li, 2000; Zhou et al., 2000; Wu et al., 2005; Zhou et al., 2006; Shu et al., 2009)。高精度的测年数据显示, 早白垩世岩浆活动的峰期在 (135 ± 5) Ma (Li, 2000; Li X H et al., 2010)。这期伸展作用发生的动力学包括: 岩石圈伸展 (Li, 2000), 岩石圈俯冲+基性岩浆底侵 (Zhou et al., 2000, 2006), 或者俯冲回滚 (subduction roll-back) (Uyeda et al.,

1979), 弧后伸展 (Watson et al., 1987; Lapierre et al., 1997; Ren et al., 2002) 等。

早白垩世晚期的 NW—SE 向挤压作用可能影响到整个华南地区, 它导致了华南早白垩世断陷盆地的构造反转, 尽管这期反转持续时间较短。其发生的时间很可能与 120~110 Ma 的岩浆活动低谷期同时。这期挤压作用产生的动力可能与古太平洋俯冲板片的角度变化有关, 或者与菲律宾微陆块与东亚陆缘碰撞有关 (Faure et al., 1992; Charvet et al., 1994; Lapierre et al., 1997)。

晚白垩世以来, 古太平洋板块相对于亚洲大陆的俯冲方向变为 NNW, 俯冲速度减慢, 俯冲角度增大 (Engelbreton et al., 1985; Maruyama et al., 1997)。这个板块运动学持续了 30~40 Ma。大约在 50 Ma, 板块运动学发生了调整 (Sharp et al., 2006)。在沅麻盆地记录的晚白垩世近 N—S 向伸展和随之发生的 NE—SW 向挤压, 其动力来源显然与古太平洋板块俯冲没有直接关系, 而是更多来自特提斯构造域的

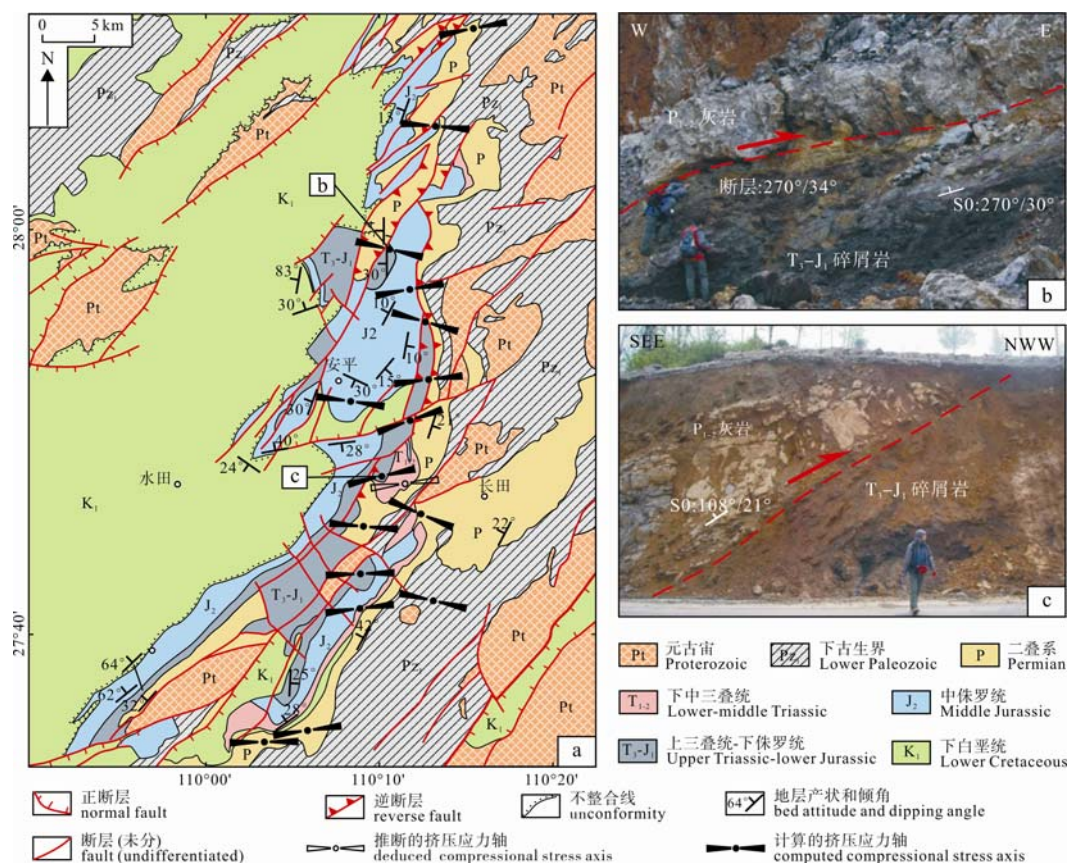


图 3 沅麻盆地东缘构造简图及晚侏罗世逆冲断层野外特征和古应力反演 (据 Li et al., 2011)

Fig. 3 Simplified structural map of the eastern margin of Yuanma basin and field views of Late Jurassic compressive deformation and paleostress inversions (after Li et al., 2011)

a-地质简图; b-野外照片展示了岑溪南部地区二叠系灰岩逆冲到 T₃-J₁ 碎屑岩之上;

c-野外照片展示安平南部地区二叠系灰岩逆冲到 T₃-J₁ 碎屑岩之上

a-simplified geological map; b-field view showing Permian limestone thrusts on the T₃-J₁ clastic rocks, south Chenxi;
c-field view of thrusting of Permian limestone upon the T₃-J₁ clastic rocks, southeast Anping

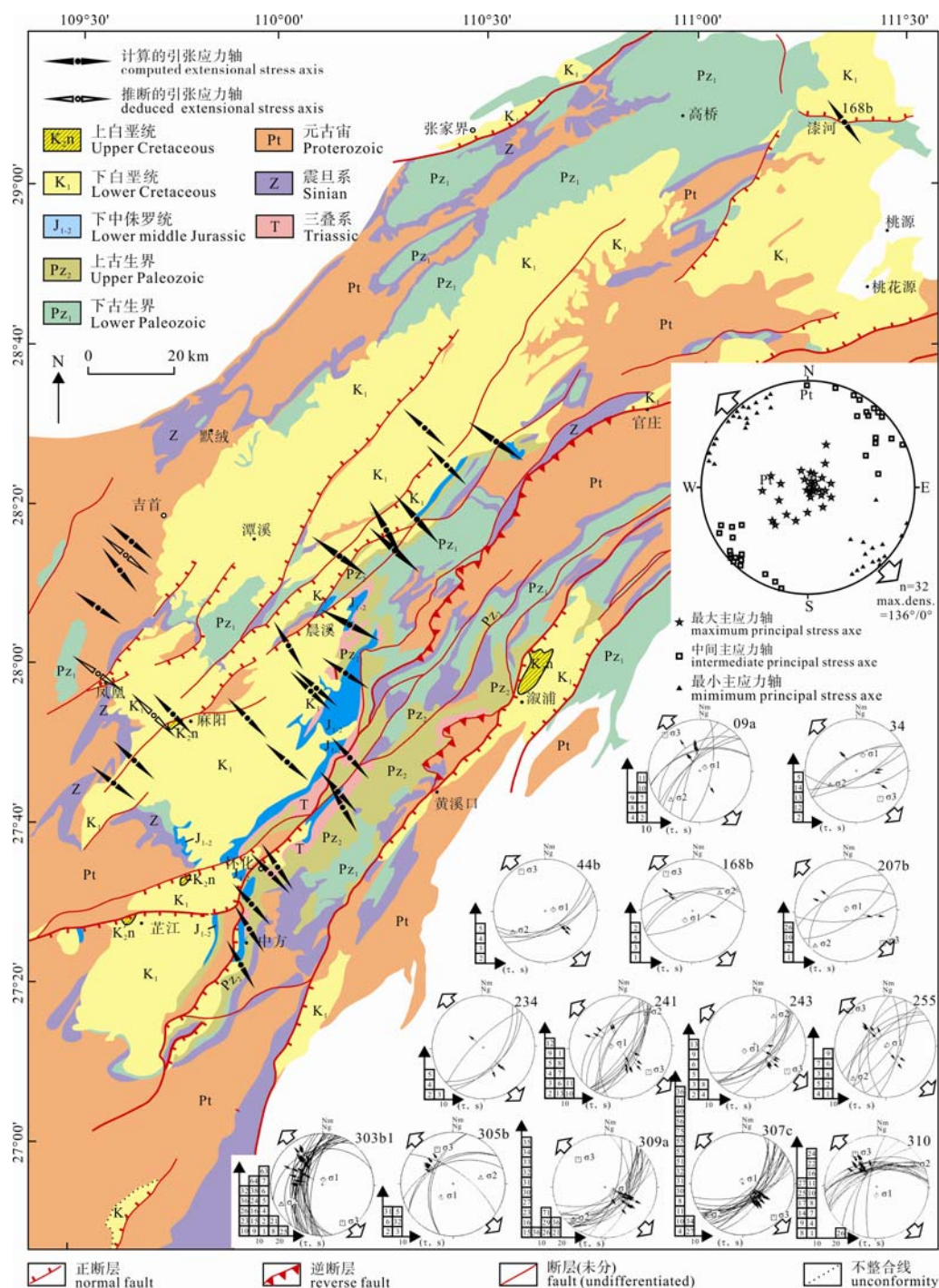


图 4 沅麻盆地早白垩世 NW—SE 向伸展构造应力场
Fig. 4 Early Cretaceous NW-SE extension in Yuanma Basin

动力作用，那儿印度-欧亚大陆发生俯冲和碰撞 (Yin et al., 2000)。值得提及的是，晚白垩世近 N—S 向伸展和随之发生的 NE—SW 向挤压在华北东部地区的胶莱盆地和郯庐断裂也有记录 (Zhang et al., 2003)。

1.2 叠加褶皱分析与早中生代大地构造过程

位于雪峰山隆起以东的华南东部地区对应华夏

地块，该地块在早古生代发生陆内造山作用，形成华南加里东造山带，最终使华南地块固结。其上发育中晚泥盆世至早中三叠世海相地层 ($D_{2-3}-T_2$)，其底部不整合超覆在下古生界加里东构造层之上，泥盆系底部为一套河流相砂砾岩沉积，向上主体为浅海相碳酸盐岩沉积，其中有海陆交互相沉积夹层，表明这个时期，华夏地块处在稳定的构造演化阶

段。而在这套海相地层之上发育的晚三叠世至早中侏罗世地层(T_3-J_{1-2}), 主体为陆相沉积, 仅在广东东南部沿海地带发育海相地层。这两套截然不同的地层单元或构造层均发生强烈褶皱和断裂作用, 形成了样式复杂、东西宽大于 1300 km 的褶皱构造带。对这个复杂褶皱构造带的形成时代, 存在不同的认识。本项研究通过典型地区褶皱构造的叠加型式分析, 识别了早中生代两期褶皱作用, 早期褶皱构造轴呈 NWW—SEE 至近东西向展布, 晚期呈

北东—北北东向展布, 局部地区为南北向, 两者之间的横跨叠加型式在不同地段可以观察到。

1.2.1 湘中涟源地区横跨叠加褶皱型式

位于雪峰山北部的涟源地区, 两组褶皱的横跨叠加现象非常典型(图 7)。早期褶皱轴向为 WNW—ESE 向, 由晚古生界-早中生界海相地层组成的复向斜和前寒武系基底卷入的复背斜组成, 被晚期的一组 NNE 向褶皱构造横跨叠加, 形成典型的盆地-穹隆状构造型式。早期 WNW—ESE 向褶皱较

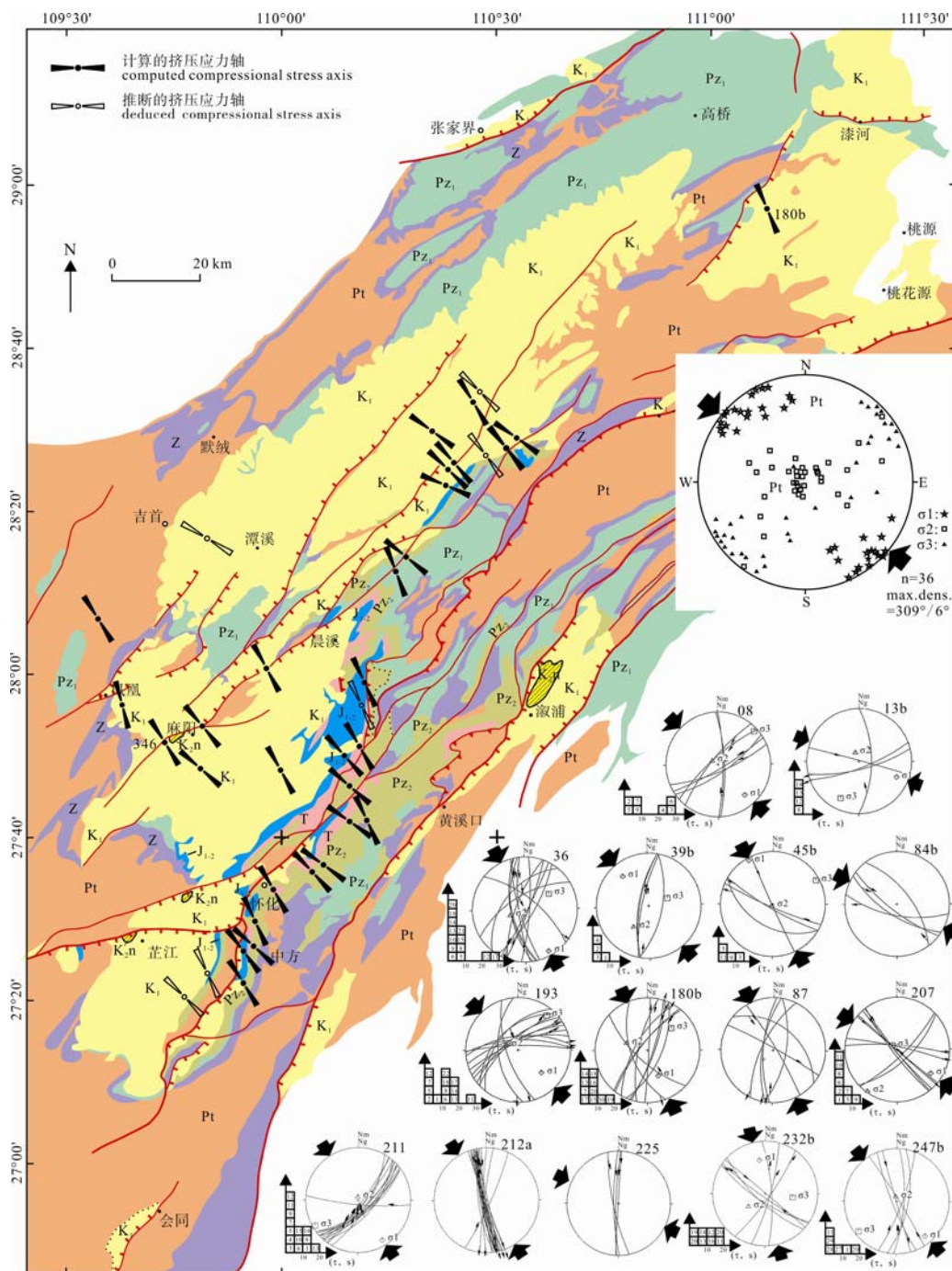


图 5 沅麻盆地早白垩世 NW—SE 向挤压构造应力场

Fig. 5 Early Cretaceous NW-SE compression in Yuanma basin

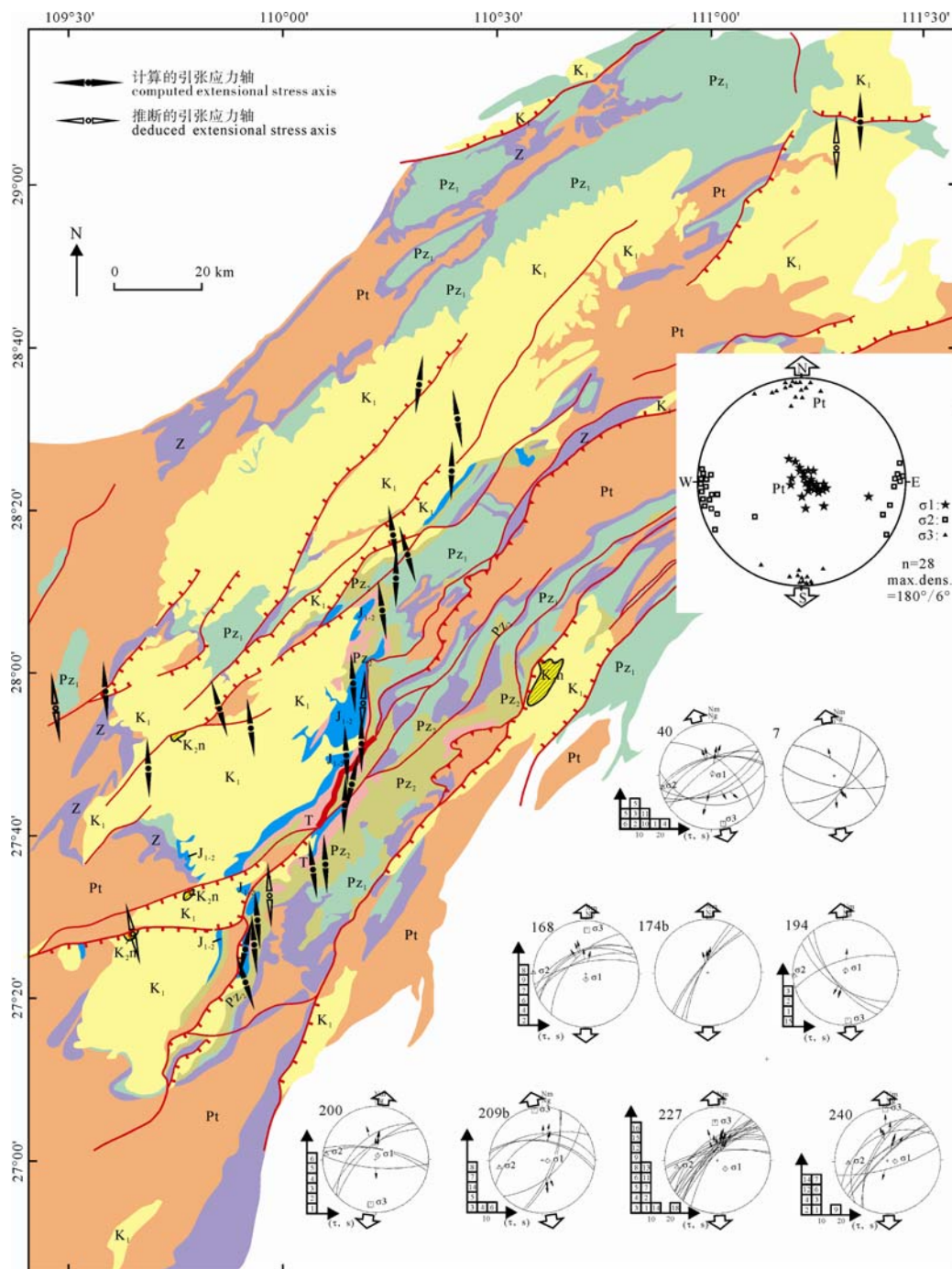


图6 沅麻盆地晚白垩世 N—S 向伸展构造应力场
Fig. 6 Late Cretaceous N-S extension in Yuanma basin

宽缓, 而晚期 NE—NEN 向褶皱相对较紧闭。在南部地区, 两组褶皱横跨叠加产生的盆-穹状构造型式非常显著, 而靠近北部的江南隆起地区, 北东向褶皱幅度相对较弱, 早期 WNW 至近 W—E 向褶皱构造占主导地位。晚期 NE—NEN 向褶皱作用伴随平行褶皱轴的逆冲断层而发育, 这组断层斜切早期 WNW 向褶皱(张岳桥等, 2009)。

另外, 该区发育印支期岩体(Wang et al., 2002,

2005b, 2007), 其长轴沿 NWW 复背斜褶皱轴展布, 受到早期褶皱构造的控制, 这说明早期褶皱构造主体形成于中三叠世的印支运动早期。

1.2.2 湘南地区横跨叠加褶皱型式

在湘南地区, 可见两组褶皱构造的叠加: 晚期一组褶皱走向近 N—S 至 NEN—SWS 向, 卷入的地层包括 D-T₂ 和 T₃-J₁₋₂ 沉积构造层, 褶皱构造样式有: 断折褶皱、断层传播褶皱等(图 8)。褶皱构造样式受

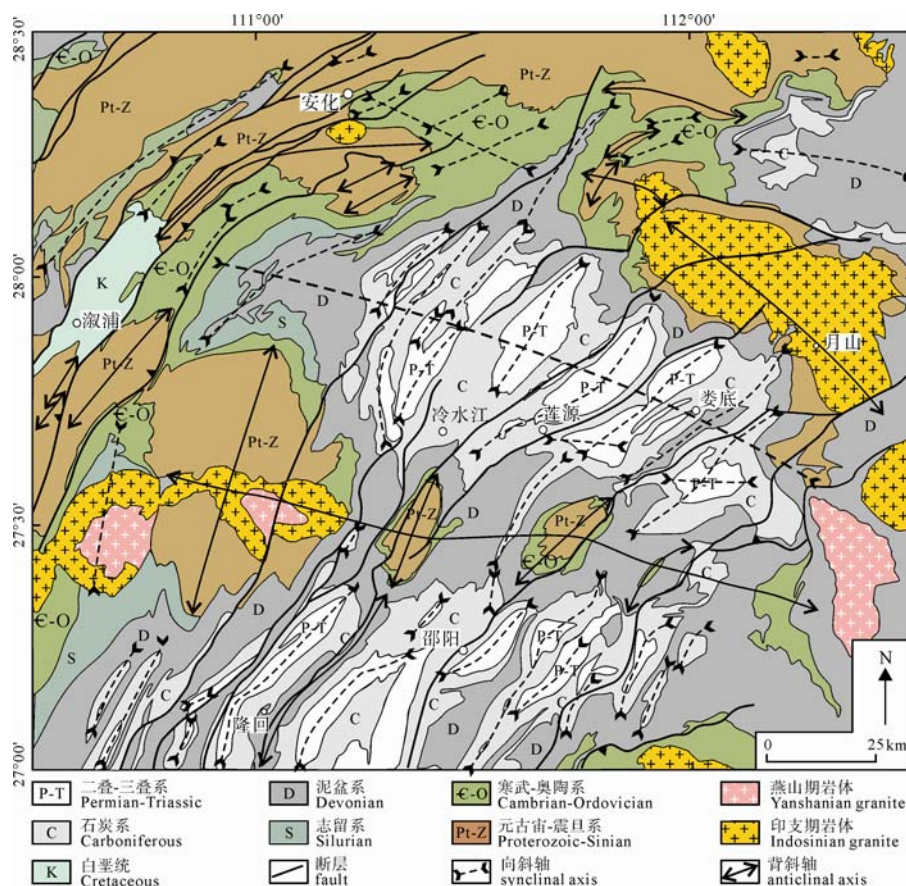


图7 湘中涟源地区横跨叠加褶皱构造图

Fig. 7 Simplified structural map of the superposed folding pattern in Lianyuan area of central Hunan Province

到地层岩性和地层厚度的控制,如在中下三叠统的薄层泥质灰岩中,发育紧闭的尖棱褶皱。早期一组褶皱主要发育在西部地区,近W—E走向,褶皱形态较宽缓,卷入的地层不仅有D-T₂沉积层,前泥盆基底也卷入其中。这组东西向褶皱构造被包容在晚期形成的近南北向构造带中。另外,三叠纪花岗岩体沿东西向背斜轴发育,而晚侏罗世-早白垩世岩体切穿D-T₂褶皱构造层。

1.2.3 早中生代两期褶皱构造形成时限

要确定2个世代叠加褶皱构造形成的时代,关键是要分析叠加褶皱作用与岩浆活动之间的时代关系。前已述及,在叠加褶皱构造发育的地区,早期近东西向褶皱通常控制了印支期的岩体,但晚侏罗世-早白垩世岩体不完全受NNE向褶皱构造的控制。笔者根据已发表的花岗岩和火山岩同位素年龄数据统计结果显示,华南地区在早侏罗世早期(195~205 Ma)存在一个明显的岩浆活动寂静期(Zhou et al., 2006),将三叠纪印支期岩浆序列和侏罗纪岩浆序列截然分开。印支期岩体呈面状分布,但主要集中在湘中的雪峰山地区和沿十万大山—云开大山—武夷

山一带(图1)。分析表明,印支期岩体可以分为两个亚阶段(Wang et al., 2002, 2005b, 2007):早期以过铝质片麻状花岗岩为主,是同构造期地壳深熔作用的产物,高精度SHRIMP U-Pb锆石年龄测试结果集中在230~240 Ma,这类岩体非常少;晚期岩体年龄集中在210~230 Ma,代表伸展构造环境下地壳重熔的产物。根据印支岩体的同位素年龄及其空间展布,我们推断,华南东部地区近东西向褶皱构造带主要形成于印支早期,即230~240 Ma。

NEN至N—S向褶皱构造的形成时代可以通过侏罗纪岩浆事件的分析来制约。在湘中南地区发现近N—S向褶皱构造被晚侏罗世岩体所侵入,典型的例子是骑田岭岩体(图8)。该岩体侵入于NNE向褶皱构造带,近年来高精度SHRIMP锆石U-Pb测年结果展示该岩体侵位时代在155~161 Ma(朱金初等, 2003, 2005; 李华芹等, 2006; 付建明等, 2004; 赵葵东等, 2006),是典型的晚侏罗世岩体,表明NNE向褶皱构造形成的时代必然早于161 Ma。再考虑到该地区早中侏罗世的伸展构造背景,我们将NNE向褶皱构造的形成时代初步限制在中晚侏罗世之交(165~175 Ma)。

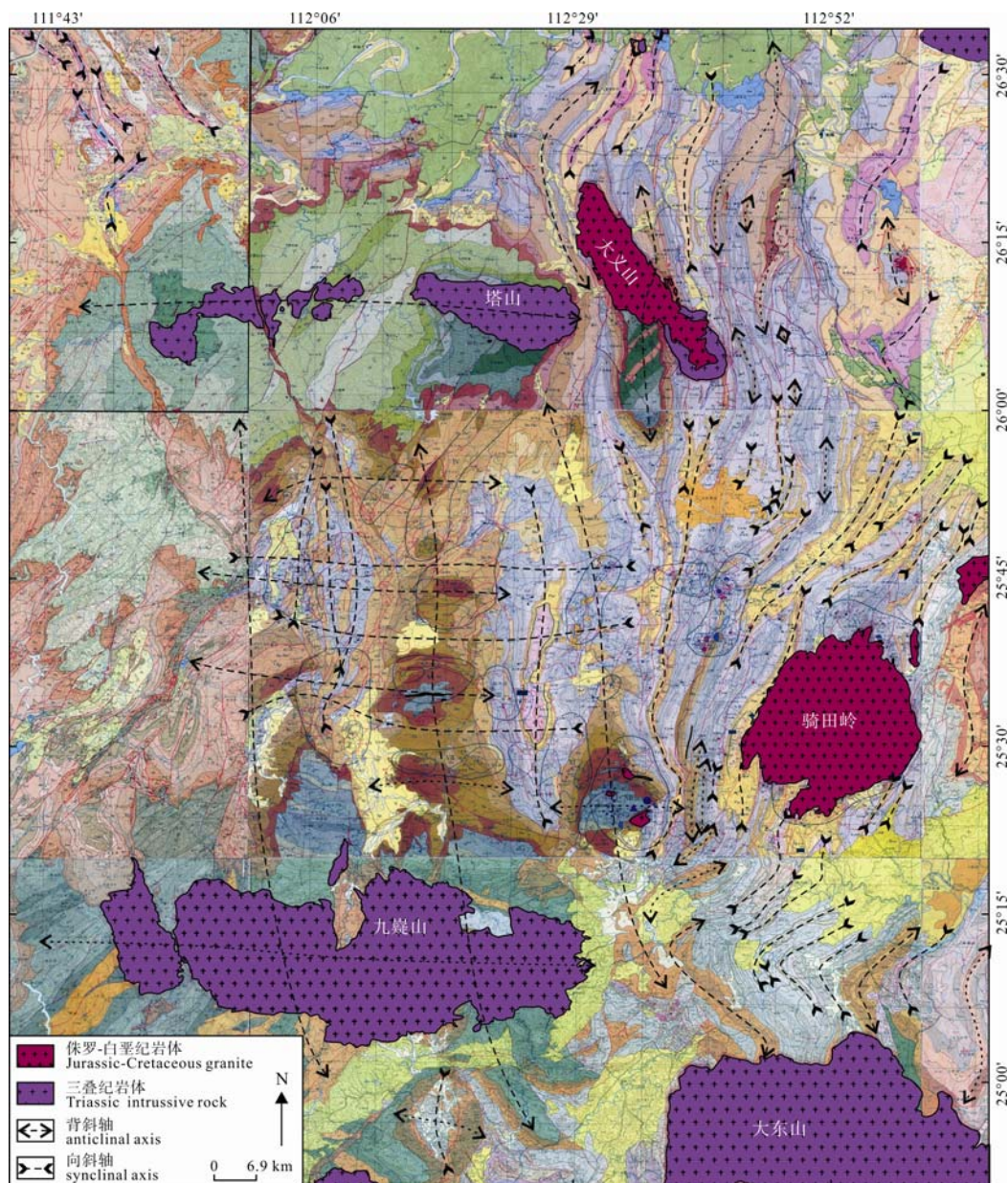


图 8 湖南南部骑田岭地区横跨叠加褶皱构造图

Fig. 8 Simplified structural map showing the cross folding pattern in Qitianling area of south Hunan Province

1.2.4 早中生代大地构造过程

我们将华南中部地区发育的两组叠加褶皱构造与早中生代大地构造过程联系起来，探讨该地区早中生代构造动力体制转换和大地构造过程。笔者认为，两期叠加褶皱构造分别代表了两期地壳挤压和增厚事件：即印支早期近南北向挤压和燕山早期近东西向挤压。这两期近于横跨叠加的褶皱构造同时记录了兩個不同构造体制在华南地区的表现和转换，即从印支期以东西向构造为主的特提斯构造域向燕山早期以 NEN 向构造为主的滨太平洋构造域的转变。

从构造动力学角度分析，华南地区印支期近东西向褶皱构造带的形成与华南大陆南北边缘地块碰撞作用有关。研究表明，扬子地块和华北地块沿秦岭—大别—苏鲁构造带碰撞开始于晚二叠世，强烈的陆内深俯冲发生在中三叠世，大别山、苏鲁造山带出露的超高压变质带变质年龄峰值为约 240 Ma (Li et al., 1993, 1996; Hacker et al., 1998)。这期强烈的陆-陆碰撞造山作用不仅导致扬子前陆褶皱构造带的形成和发育，向南波及到江南隆起以南的整个华夏地块，使该地块发生挤压增厚，地壳增厚诱发的深熔作用导致了华南地区独特的印支期过

铝质花岗岩的发育(Wang et al., 2007)。同时, 在华南地块西南边缘发生大陆地块增生事件, 印支地块沿松马—松达缝合线增生到华南地块(Carter et al., 2001)。这期增生事件导致南盘江复理石盆地的闭合和褶皱, 沿十万大山发生由 SSE 向 NNW 方向的强烈逆冲, 导致十万大山前陆盆地的发育。而 NNE 向褶皱构造系的形成和发育是古太平洋板块向华南大陆之下俯冲作用的结果, 是对大洋板块向大陆岩石圈之下低角度俯冲初期的变形响应。显然, 叠加褶皱构造分析结果并不支持 Li Z X 等(2007)提出的观点, 这个模式将古太平洋板块的俯冲起始时间放在晚二叠世并持续到侏罗纪。从岩浆活动记录考虑, 尽管华南地区发育印支期地壳重熔性花岗岩侵入, 但迄今没有报道与俯冲有关的火山岩。与大洋俯冲有关火山活动开始于晚侏罗世(约 160 Ma), 而大规模火山喷发则发生在早白垩世早期((140±5) Ma)。

1.3 早白垩世伸展拆离断裂系统与变质核杂岩构造

经历了中、晚侏罗世的挤压缩短变形之后, 于早白垩世, 华南大陆便进入了区域性伸展变形阶段, 并伴随着断陷盆地的形成、岩浆侵入和火山作用等。如何确定从挤压构造应力体制到伸展构造应力机制发生转变的时间节点, 是华南大地构造研究的又一个关键科学问题。

本次研究工作集中对衡山变质核杂岩西缘拆离带进行了详细的野外调查和构造测量, 系统测量了该拆离带韧性剪切和脆性变形的几何学和运动学要素, 并系统采集了拆离带中钠长岩样品, 开展了钠长石中锆石 U-Pb SHRIMP 年代学测试分析工作。这个大型拆离带的发现, 对于深入研究华南地区早白垩世中晚期大规模地壳伸展作用及其伴随的岩浆作用和成矿作用, 具有重要的理论意义。

1.3.1 早白垩世大型拆离断裂

在湖南地区, 发育有两类断陷盆地: 一类盆地的沉积-沉降作用受到边缘高角度正断裂的控制, 另一类则与低角度拆离断层有关。低角度拆离断裂主要发育在衡山以西地区, 目前发现有 2 条: 一条位于衡山西缘的界牌断裂带, 另一条为资源断裂。野外调查显示, 这类拆离断层一致向西倾, 倾角在 25°~35°之间, 拆离带上盘为早白垩世红色沉积, 下盘为不同时代的地层和岩体。拆离带上发育韧性剪切形成的糜棱岩, 拉伸线理指示近东西向伸展作用(图 9)。

1.3.2 界牌拆离断裂带与衡山变质核杂岩构造

前人早已认识到衡山变质核杂岩构造, 并基于

初步的野外观察, 对该变质核杂岩构造进行了解释(徐汉林等, 1998)。本项目对衡山变质核杂岩的西缘拆离带进行了详细的野外调查和构造测量, 开展了拆离带韧性剪切变形的组构分析和年代学测试研究工作。如图 10 所示, 界牌拆离带沿衡山岩体西缘展布。岩整个拆离带有钠长石脉贯入, 并发生了强烈的韧性剪切变形, 形成典型的糜棱岩带(图 11), 厚度在 2~4 km; 沿剪切面拉伸线理发育, 岩石薄片的显微镜下分析指示上盘向西倾滑(图 12)。在韧性剪切带的顶部, 出现了几米厚的微角砾岩层, 记录了拆离带晚期脆性变形。拆离带下盘为衡山花岗岩体, 测年结果显示其侵位时代在晚侏罗世-早白垩世。靠近拆离带的岩体没有发生明显的韧性剪切变形。

本次研究对拆离带韧性剪切变形构造进行了锆石 U-Pb 和 Ar-Ar 年代学测试分析, 目前初步获得了钠长岩锆石的 SHRIMP U-Pb 测年结果。分析结果显示, 这些热液锆石大部分是热液活动过程中捕获的继承锆石, 年龄指示了印支期和侏罗纪岩体。新形成的热液锆石的显著特点是高含 U 量, 获得的平均年龄约 137 Ma。我们将这个年龄解释为钠长岩脉的结晶年龄, 因为该岩脉发生了强烈的同构造拉伸作用, 因此, 钠长岩脉的结晶年龄也代表了伸展拆离作用的时间。

1.4 东南沿海长乐—南澳构造带早白垩世岩浆作用: 对晚中生代陆缘造山作用的时代制约

长乐—南澳构造带位于华南大陆的东南缘, 是揭示晚中生代洋-陆相互作用和陆缘构造演化过程的关键地带。该带 NE—SW 向延伸, 长大于 400 km, 出露宽 40~60 km(图 13)。沿该带出露一套变质岩层, 区域地质调查结果将该套地层划归为 T_3-J_1 , 其上为白垩纪火山岩所覆盖。野外调查发现, 这套所谓的 T_3-J_1 地层对应一套片麻状花岗岩或含石榴子石细粒花岗岩, 其中残留有角闪岩相的变质岩, 由副片麻岩、混合岩化片麻岩、变粒岩、角闪岩、石英岩、石墨云母片岩等组成。对这套片麻状花岗岩和所包裹的变质岩, 前人对其进行了大量的年代学研究工作, 其目的是确定这个构造带的变形时代。Jahn 等(1976, 1990)基于 Rb/Sr 年代学分析结果, 认为这套变质岩经历了 2 期变质事件: (165±13) Ma 和 90~120 Ma。晚期构造热事件被大量的角闪石和云母 Ar-Ar 测试分析结果所证实, 变质岩的坪年龄集中在 130~80 Ma(Chen et al., 2002)。Tong 等(1996)详细研究了东山岛混合花岗岩片麻岩, 给出的单个锆石 U-Pb 年龄为 122 Ma, 认为至少部分片麻状花岗岩形成于早白垩世。最近, 冯艳芳等(2011)报道了东山岛

晚侏罗世花岗质石榴黑云片麻岩锆石 U-Pb 年龄约 152 Ma。从这些年代学研究结果可以看出, 长乐—南澳构造带在晚中生代经历了多期次构造-岩浆事件, 年龄集中在 152 Ma、140~120 Ma 和 100~90 Ma。尽管已积累了一批年代学数据, 但对出露于长乐—南澳构造带的这套片麻状花岗岩和混合片麻岩的形成时代, 尚缺乏系统的、高精度的年代学测试工作, 因此对其形成的构造背景及其在华南大陆晚中生代陆内造山过程中的地位和意义, 认识不够深入。

本次研究工作主要对长乐—南澳构造带内的这套片麻状花岗岩、片麻岩和粒状花岗岩等进行了详细的野外调查和采样(图 14), 运用锆石 U-Pb 测年手段和球化学分析方法, 对构造带中的混合岩、片麻状花岗岩、粒状花岗岩、花岗岩脉等进行了系统的年代学测试分析, 确定了该构造带属于华南大陆晚中生代陆缘造山带。

野外调查发现了两类早白垩世岩浆岩: 一类表现为片麻状花岗岩, 片麻理发育, 其中以包裹体形

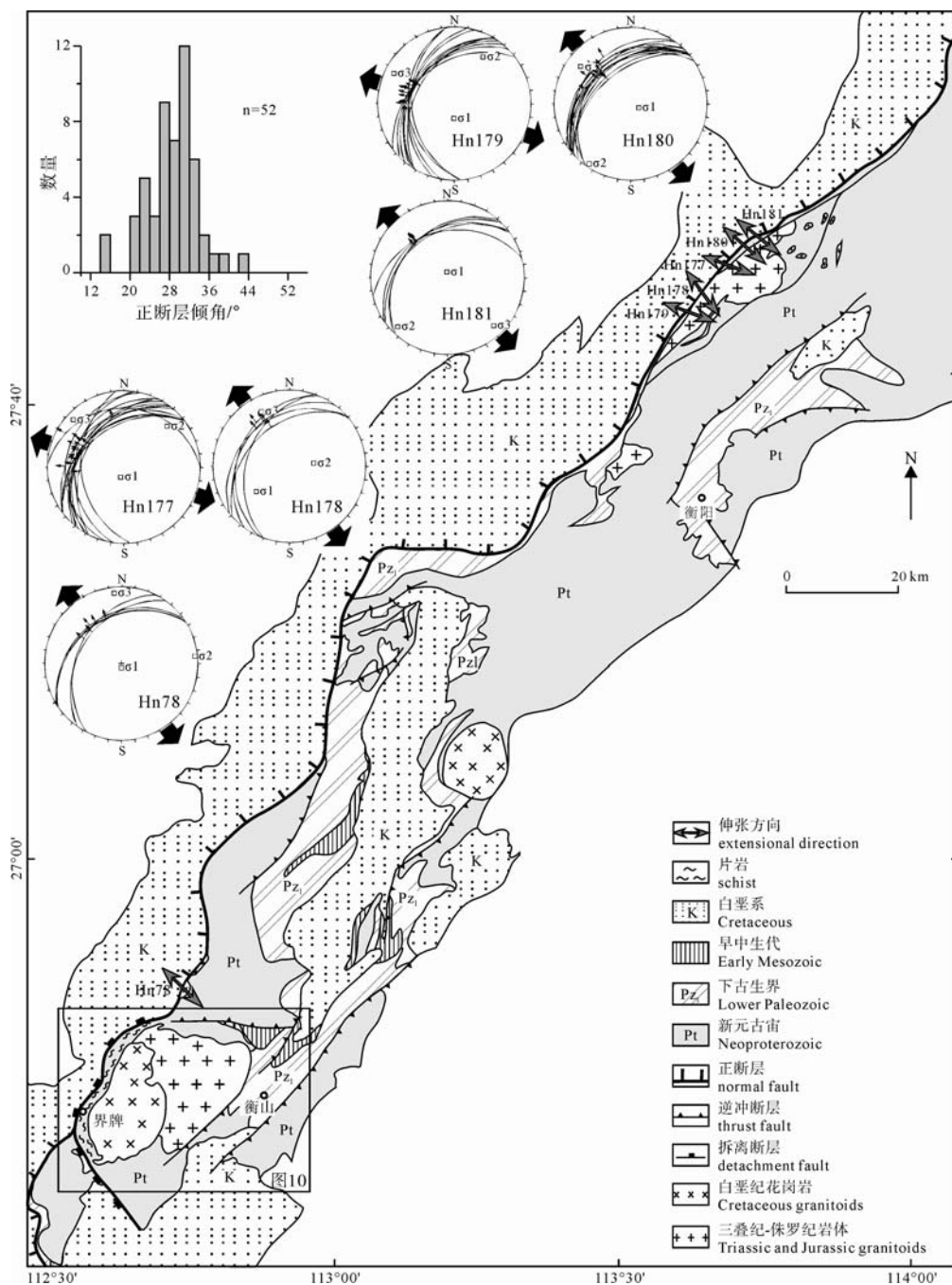


图 9 湖南界牌拆离断裂带与衡山变质核杂岩

Fig. 9 Structural map showing Jiepai normal detachment fault zone and Hengshan metamorphic core complex in Hunan Province

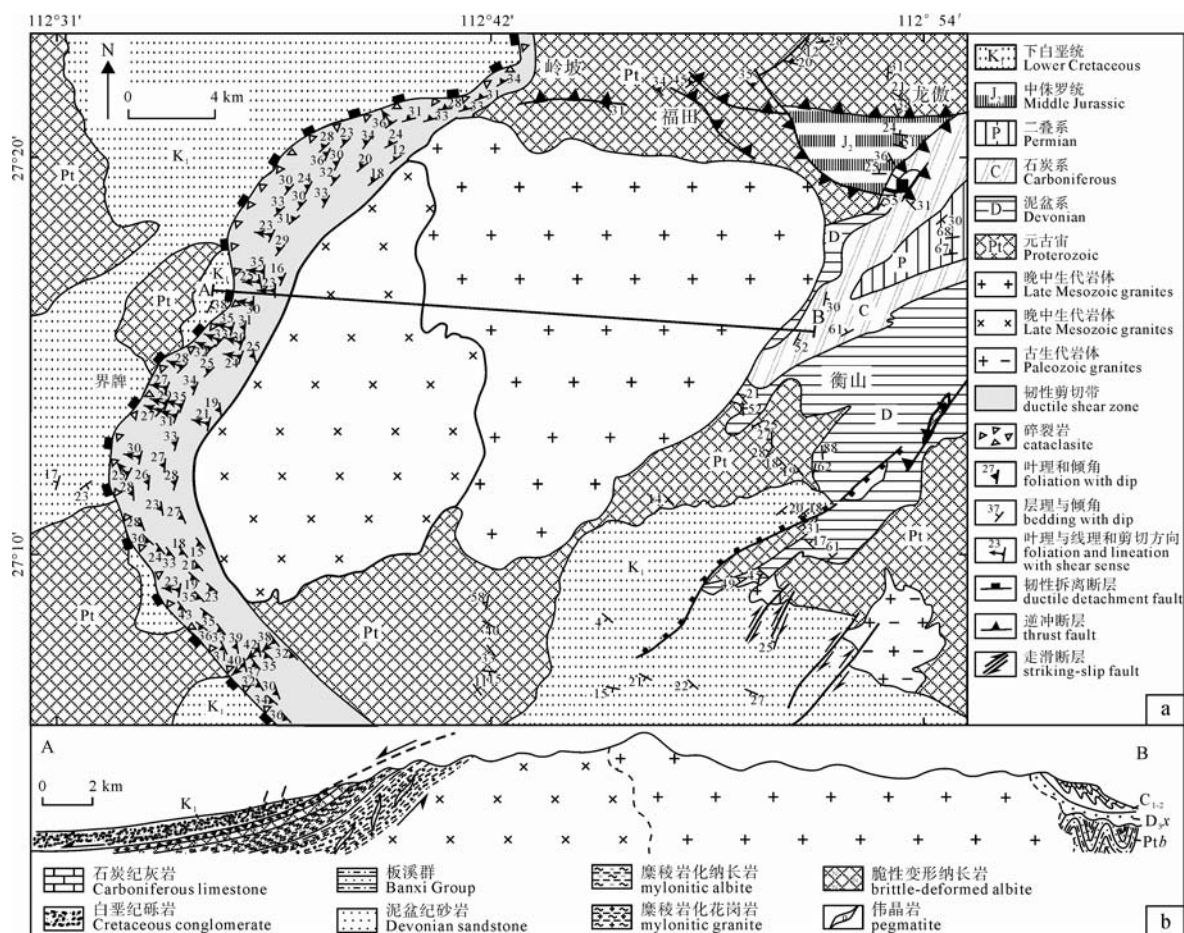


图 10 衡山变质核杂岩构造图(a)与构造横剖面图(b)

Fig. 10 Simplified structural map of Hengshan metamorphic core complex(a) and structural cross section(b)

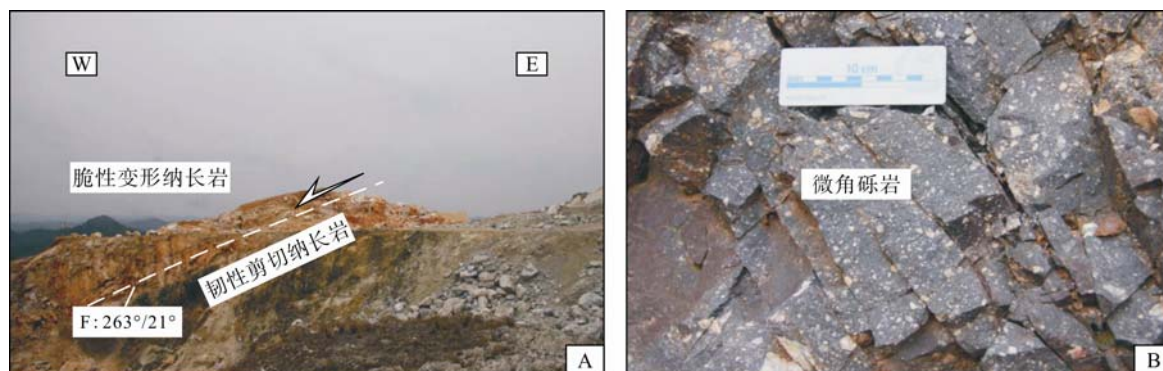


图 11 界牌拆离带钠长岩韧性剪切(A)和脆性微角砾岩(B)的野外特征

Fig. 11 Field views of ductile shear(A) and brittle deformation(B) of albite in Jiepai detachment zone

式残留有混合片麻岩、混合岩和角闪岩等变质岩。这类岩石发生了强烈的构造变形,片麻理方向平行构造带,推测是造山作用的产物;另一类是粒状花岗岩,有的岩体含石榴子石,岩体没有发生变形,是造山后伸展环境下的地壳熔融。对这两类岩石做了锆石 SHRIMP U-Pb 测试分析。

12 个样品的锆石 U-Pb 测年结果(图 15)区分了早白垩世两期构造-热事件:早期(145~135 Ma)表现

为强烈的混合岩化作用和深熔作用形成的片麻状花岗岩、花岗片麻岩等;晚期(135~115 Ma)岩浆岩体以含石榴子石花岗岩为主,粒状结构。结合岩石学和地球化学的分析结果,我们认为长乐—南澳构造带是一个晚中生代陆缘造山带,其造山作用很可能起始于晚侏罗世(155 Ma 之前),并持续到早白垩世早期。早白垩世晚期的岩浆作用代表了造山后伸展环境下的地壳熔融产物。

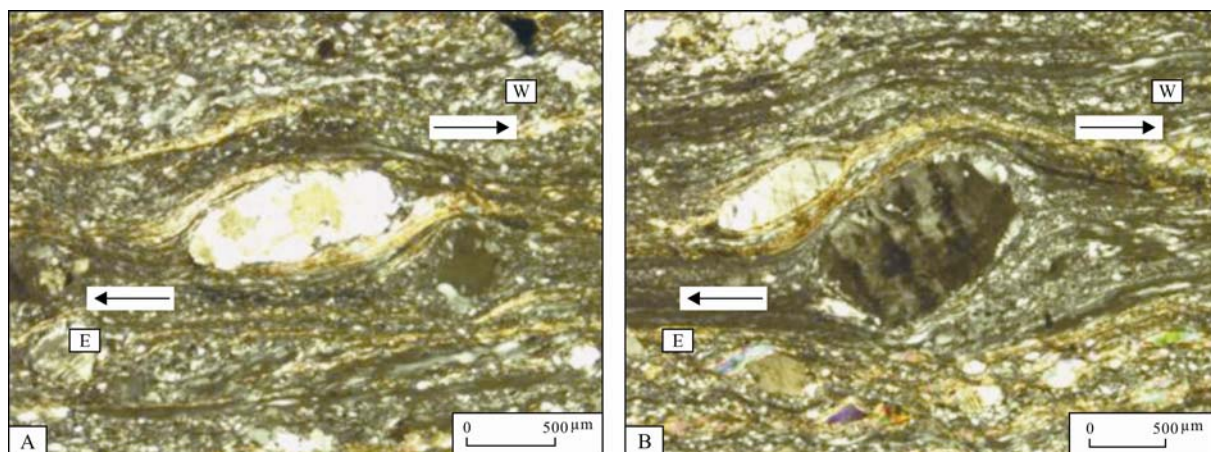


图 12 拆离带钠长岩韧性剪切变形的显微组构特征(A), 钠长石旋转碎斑指示上盘向西倾滑(B)

Fig. 12 Microscopic views of shear deformation of albite in the detachment zone(A), the rotation of porphyroblast indicates top-to-W motion(B)

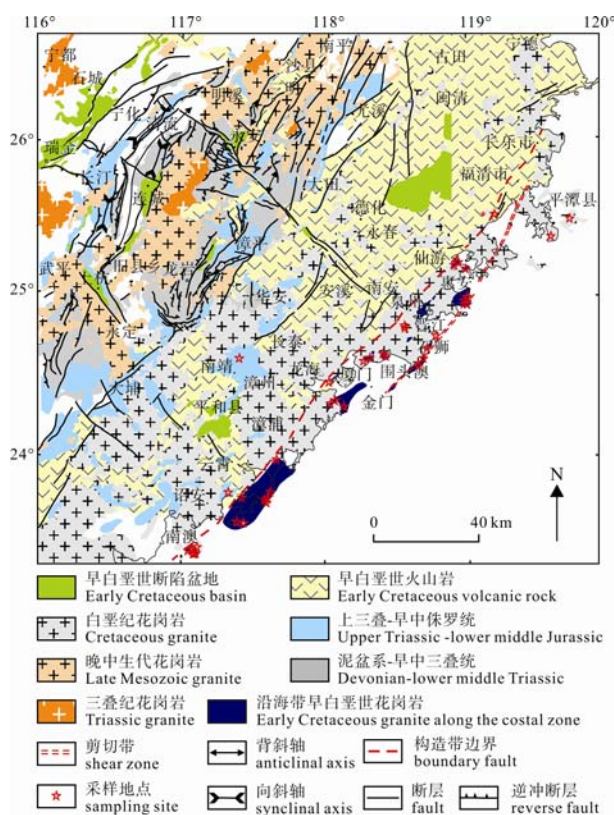


图 13 华南东南沿海构造地质简图

Fig. 13 Simplified geological map of the coastal zone of South China

这个研究结果从岩石学找到了证据, 证明华南沿海构造带晚中生代时期从挤压构造体制向伸展构造体制转换的时间在约 135 Ma, 华南大陆内部在白垩世拆离断裂带的形成时代基本一致。

2 讨论: 华南中生代构造作用的动力体制

2.1 华南中生代大地构造演化序列

综合华南东部地区沉积充填历史、构造变形特

征和岩浆活动历史, 我们将该区中生代大地构造历史划分为 3 个大的陆内变形阶段(图 16):

(1)三叠纪, 与特提斯构造域碰撞造山作用有关的陆内挤压褶皱及其后随的伸展变形和岩浆活动。该阶段又可以进一步划分为早、中三叠世的挤压变形和晚三叠世伸展作用和岩浆活动。根据华南地区的岩体年代学测试结果, 岩浆活动主要发生在晚三叠世 230~210 Ma。

(2)中晚侏罗世至早白垩世(170~135 Ma), 与古太平洋洋壳向东亚大陆俯冲作用有关的陆内造山及其后随的区域伸展作用。挤压造山作用开始于 170 Ma, 并一直持续到 135 Ma。这个陆内造山过程与大洋板块的低角度俯冲有关, 陆内变形呈幕式发展, 内陆地区主要褶皱构造形成于 160 Ma 之前的晚侏罗世, 而沿海地区挤压造山起始于 155 Ma 之前, 并持续到 135 Ma。自 135 Ma 开始, 整个华南地区发生了区域性伸展构造作用, 形成了一系列早白垩世断陷盆地, 岩浆侵入作用和火山作用强烈。并在早白垩世晚期, 发生了一次构造反转事件, 导致断陷盆地的挤压反转。

(3)晚白垩世至古近纪, 华南大陆经历了一期伸展和一期挤压作用, 这个时期的构造变形受到喜马拉雅特提斯构造域和古太平洋西缘构造动力作用的联合影响。

2.2 华南地区的“印支运动”与“燕山运动”及其构造动力体制的转换

根据经典造山构造理论, 通常将三叠纪地壳运动称为“印支运动”, 而将侏罗-白垩纪时期的构造变动称为“燕山运动”, 每个构造运动都有几个“构造幕”组成。从板块构造角度和华南中生代构造演

化历史看,“印支运动”可以表述为三叠纪时期亚洲大陆不同地块(华南地块、华北地块、印支地块等)之间的拼合过程及由此产生的地块之间碰撞造山作用,如秦岭—大别—苏鲁造山带的形成以及超高压变质岩体的快速折返。相对于造山带而言,地块内部挤压变形(褶皱和剪切作用)相对较弱,主要表现为地块的整体抬升和剥蚀作用。在地块内部,印支运动的最显著特征是结束了扬子地块的海相沉积历史。“燕山运动”则可以表述为侏罗-白垩纪时期的板内或陆内造山作用,这种造山作用显然不同于“印支运动”时期的碰撞造山作用,其产生的板块

动力背景是周缘板块从不同方向大致同时向东亚大陆汇聚,从而引起强烈的板内造山作用(Dong et al., 2008; Zhang et al., 2008),其显著的特点包括:(1)多向性:古老的纬向造山带,如阴山—燕山造山带、秦岭构造带、南岭构造带等,都不同程度地发生再生造山,在造山带两侧前陆地带形成新的前陆构造带;(2)同时性:不同方向造山带的构造变形几乎在中晚侏罗世同时启动,并经历了大致相同的幕式构造演化阶段;(3)弥散性:陆内造山作用弥散性变形特征表现在造山带宽度从几百 km 至千余 km,如华南地区宽达 1300 km 的褶皱-逆冲构造带;(4)前陆盆地不

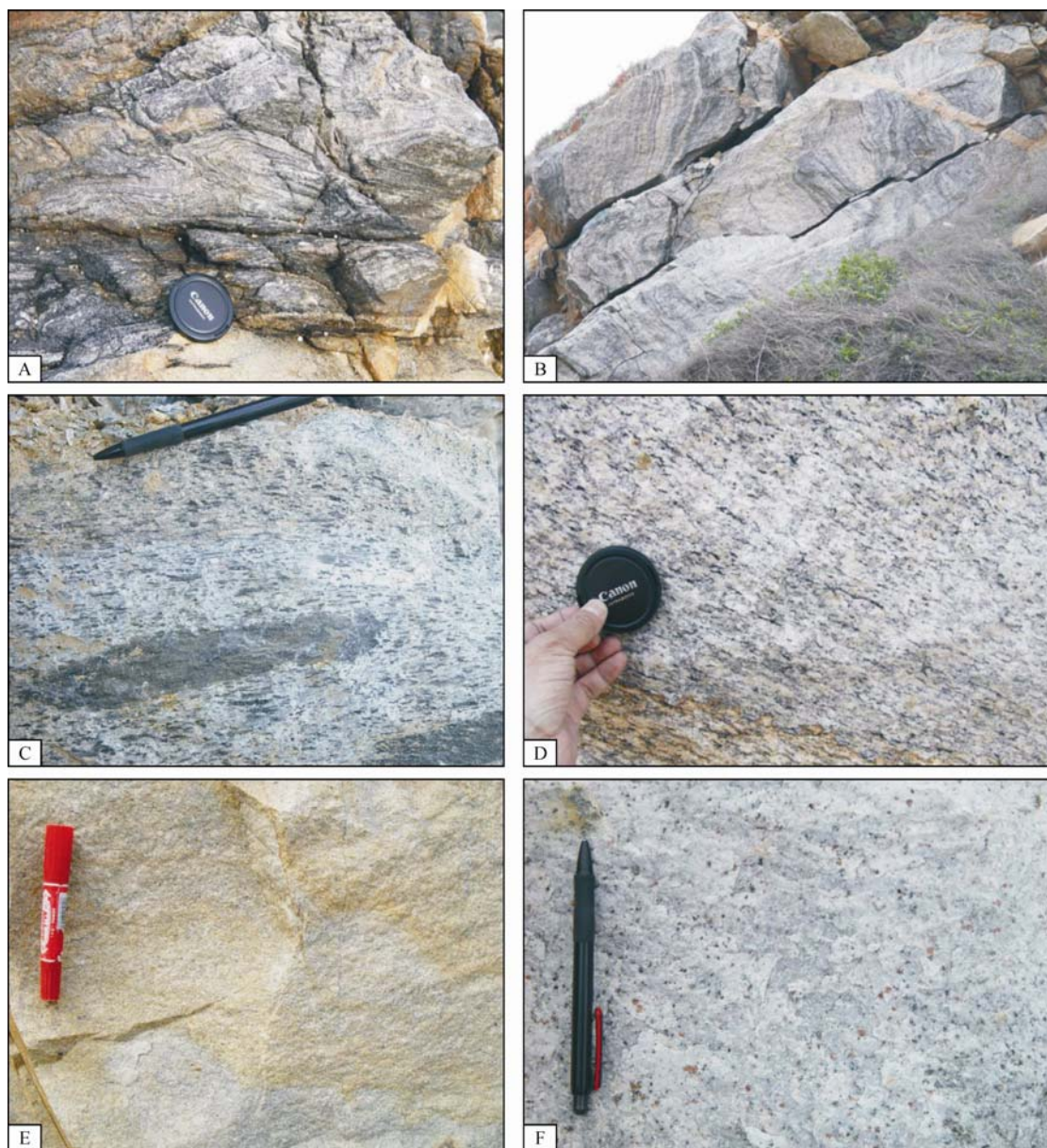


图 14 长乐—南澳构造带发育的早白垩世岩浆岩和变质岩

Fig. 14 Field views of Early Cretaceous granites and metamorphic rocks from the coastal Changle-Nan'ao zone

A, B-片麻岩和混合岩; C, D-片麻状花岗岩; E, F-细粒状花岗岩

A, B-gneiss and migmatite; C, D-gneissic granite; E, F-fine-grained granite

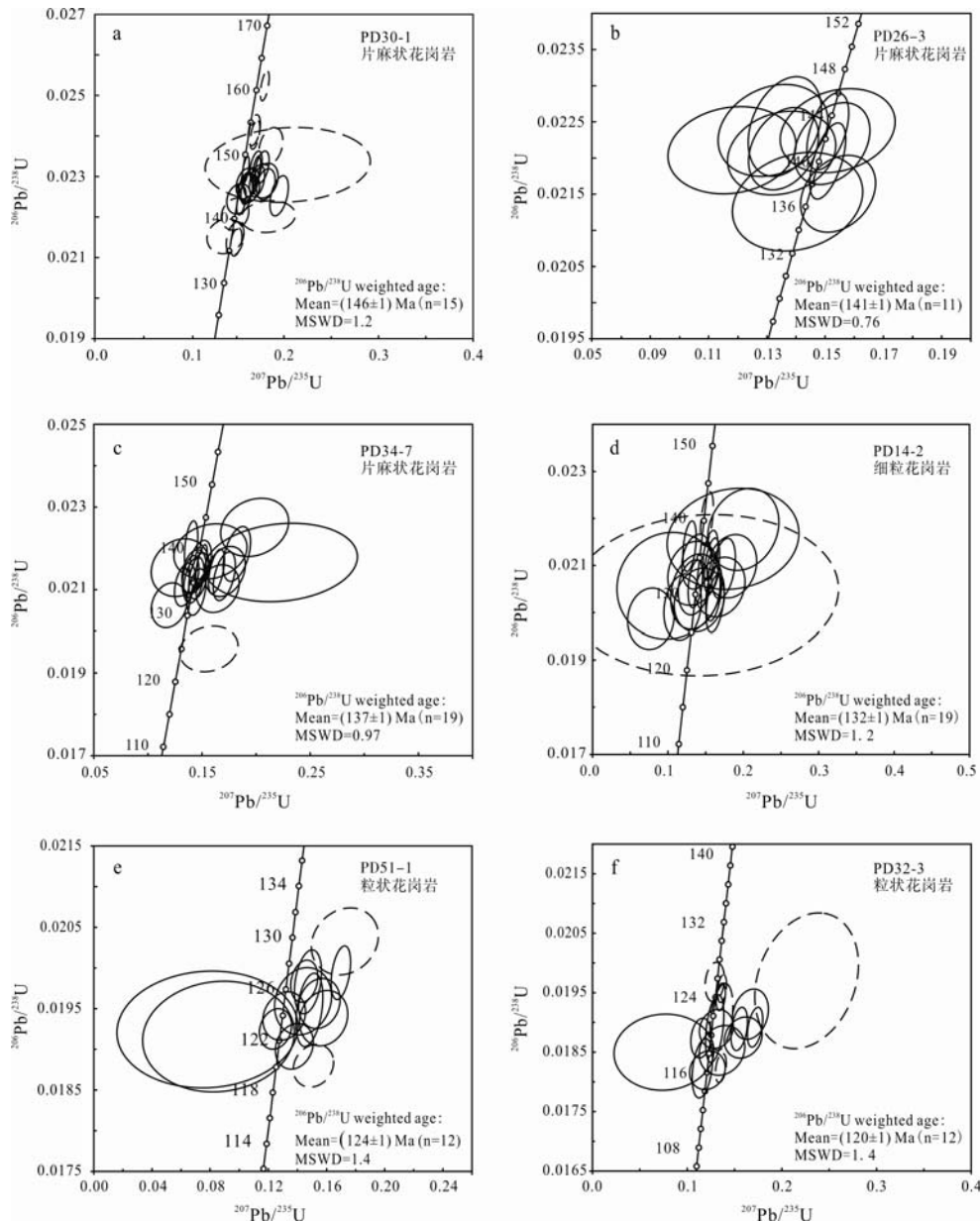


图 15 长乐—南澳构造带早白垩世两类岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果

Fig. 15 SHRIMP zircon U-Pb concordia diagrams of Early Cretaceous gneissic granites and fine-grained granitoids from the coastal Changle-Nan'ao zone

发育：大多数侏罗-白垩纪陆内造山带不发育前陆盆地(张岳桥等, 2011)。

那么，上述两个“构造运动”发生的构造动力体制何时发生转换？这个问题也可以表述为：地块之间的碰撞造山作用何时结束？古太平洋洋壳向东亚大陆俯冲作用何时开始？以下我们从华南东部地区早中侏罗世岩浆作用特征及其包含的深部构造背景，来简单回答这个问题。

早、中侏罗世构造变动相对稳定，在华南东部地区发育一套伸展型火成岩，包括双峰式火山岩和 A 型花岗岩以及碱性正长岩，零星分布在湘南—赣南—闽西—粤北地区，沿南岭东西向构造带展布，

少量沿江—绍断裂带西段发育。在双峰式火山岩中，玄武岩和流纹岩几乎各占一半，形成时代为 183~175 Ma，形成于陆内裂谷环境(Zhu et al., 2010)。A 型花岗岩与碱性正长岩发育部位与双峰式火山岩相毗邻，如柯树北 A 型花岗岩((189±3) Ma, Li X H et al., 2007)、寨背 A 型花岗岩((176±10) Ma, 陈培荣等, 1998)以及塔背正长岩((188.6±2.2) Ma, Chen et al., 2005)和黄埠正长岩((179.3±1.0) Ma, 贺振宇等, 2007)。中侏罗世基性岩浆活动包括白面石玄武岩((173±5.5) Ma, 陈培荣等, 1999)、长城岭玄武岩((178±3.6) Ma, Zhao et al., 1998)、宁远玄武岩((170~174) Ma, Li et al., 2003)和回龙迁煌斑岩

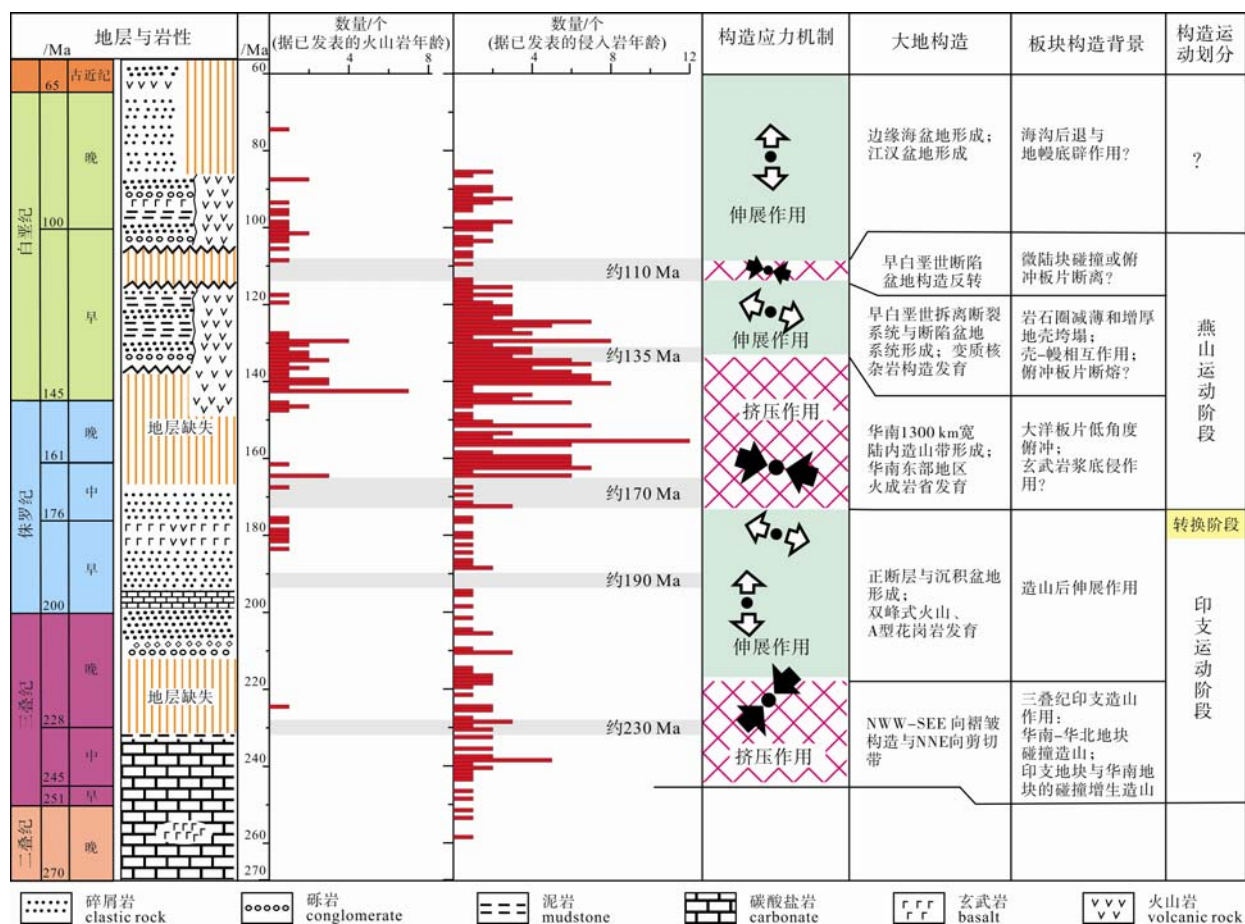


图 16 华南中生代沉积-构造-岩浆演化综合柱状图与构造运动阶段划分

Fig. 16 Composite columnar section of Mesozoic tectono-sedimentary and magmatic evolution of South China and division of tectonic stages

((169~172) Ma, Wang et al., 2003)以及车步辉长岩 ((172.9 ± 4.3) Ma, Li et al., 2003)、梅州辉长岩 ((178.7 ± 3.9) Ma, 邢光福等, 2001)。这些岩体的地球化学特征指示了板内伸展构造背景下软流圈上涌与岩石圈相互作用的产物。它们的形成与大洋岩石圈的俯冲没有直接关系。

笔者认为, 华南东部地区早侏罗世岩浆活动可能展示了上述两个构造动力体制的转换, 中侏罗世岩浆活动((170~175) Ma)是大陆弱挤压环境下地壳熔融的结果, 可能预示了古太平洋洋壳开始向华南大陆俯冲。

2.3 挤压构造体制向伸展构造体制的转变

关于中国东部晚中生代构造体制转变的论题, 前人已做了大量论述和讨论(Dong et al., 2008; 邢光福等, 2008)。本研究结果显示, 华南大陆在早白垩世发生了区域性的构造应力体制转变, 即从中晚侏罗世以陆内造山作用为主导的挤压构造体制向早白垩世的伸展构造体制转变。这个转变反映了华南大陆深部动力作用环境的变化。而这个转变时间节点的

确定对于深入理解华南晚中生代大地构造过程具有重要的意义。通过对衡山岩体西缘低角度拆离带的构造年代学研究结果表明, 内陆地区于 137 Ma 左右发生了强烈的伸展作用; 在东南沿海地带, 早白垩世侵入岩体岩石学和同位素年代学分析结果指示, 从挤压造山到造山后伸展作用发生转变的时间大致在 135 Ma 左右。早白垩世伸展垮塌作用形成了一系列 NE—NNE 向的断陷盆地, 同时伴随有火山作用。从现有年代学测试数据可以看出, 这个区域性伸展作用在华南东部地区大致同时发生(135~137 Ma)。

发生这种构造体制转变的可能的深部动力学机制有: 俯冲洋壳板片的俯冲倾角增大, 由低角度俯冲转变为高角度俯冲, 海沟后退, 增厚的大陆地壳在松弛应力环境下发生伸展垮塌。岩石圈对流剥离: 受到板片俯冲倾角的变化, 增厚的岩石圈发生对流剥离, 导致岩石圈减薄和地壳拉伸。

3 结语

本研究结果深化了对华南中生代大地构造演

化历史的理解, 获得的主要认识如下:

1) 通过对雪峰山西侧沅麻盆地的详细野外调查, 建立了沅麻盆地的构造格架及变形特征, 确定了盆地晚中生代 5 期构造应力场及其演替序列: 中晚侏罗世近 W—E 向挤压、早白垩世 NW—SE 向伸展、早白垩世中晚期 NW—SE 向挤压、晚白垩世近 N—S 向伸展、古近纪晚期 NE—SW 向挤压。这个演化序列为华南大陆晚中生代构造演化历史提供了重要的构造地质依据。

2) 识别了湖南地区横跨叠加褶皱构造样式及其基本特征, 基于地层接触关系分析和已有火成岩同位素年代学数据分析, 认为该地区两组叠加褶皱构造记录了早中生代两期构造挤压和地壳增厚事件: 早期近东西向褶皱构造是对三叠纪印支运动时期华南地块南北边缘大陆碰撞和增生作用的远程响应, 晚期 NE—NNE 向褶皱构造则是对中晚侏罗世古太平洋板块向华南大陆之下低角度俯冲作用的变形响应。

3) 首次确认了湖南衡山西缘拆离断裂和变质核杂岩构造, 系统调查了拆离带的变形结构和运动学特征, 获得了拆离构造带形成的锆石 U-Pb 年龄, 从而确定了华南晚中生代从挤压构造体制为主向区域伸展构造体制为主的转换时代在 137 Ma。

4) 通过锆石 U-Pb 年代学测试分析, 揭示了东南沿海长乐—南澳构造带早白垩世 2 期构造-岩浆事件: 早期(145~135 Ma)表现为强烈的混合岩化作用和深熔作用形成的片麻状花岗岩、花岗片麻岩等; 晚期(135~115 Ma)岩浆岩体以含石榴子石花岗岩为主。这个结果为华南大陆晚中生代陆缘造山作用的挤压-伸展变化时代提供了岩石学和年代学制约。

由于研究工作正在进行中, 实验测试结果也在进一步完善和解释, 本文的研究结果仍是初步的, 不妥之处敬请批评指正。

参考文献:

陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 蔡笔聪, 凌洪飞, 倪琦生. 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, 王银喜, 倪琦生, 章邦桐, 凌洪飞. 1999. 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.

董树文, 李廷栋, SinoProbe 团队. 2011. 深部探测技术与实验研究(SinoProbe)[J]. 地球学报, 32(S1): 3-23.

董树文, 施炜, 张岳桥, 胡健民, 张忠义, 李建华, 武红岭, 田蜜, 陈虹, 武国利, 李海龙. 2010. 大巴山晚中生代陆内造山构

造应力场[J]. 地球学报, 31(6): 769-780.

郭福祥. 1998. 中国南方中生代大地构造属性和南华造山带褶皱过程[J]. 地质学报, 72(1): 25-33.

冯艳芳, 邓晋福, 肖庆辉, 邢光福, 陆松年, 崔显岳, 公凡影, 甄世民, 贾德龙, 齐钊宇. 2011. 福建东山县澳角村澳角群花岗岩石榴黑云片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 38(1): 103-108.

付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 2004. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国地质, 31(1): 96-100.

贺振宇, 徐夕生, 陈荣, 邢光福. 2007. 赣南中侏罗世正长岩-辉长岩的起源及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(6): 1457-1469.

李华芹, 路远发, 王登红, 陈毓川, 杨红梅, 郭敬, 谢才富, 梅玉萍, 马丽艳. 2006. 湖南骑田岭芙蓉矿田成岩成矿时代的厘定及其地质意义[J]. 地质论评, 52(1): 113-121.

任纪舜. 1984. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义[J]. 地球学报, 6(2): 31-42.

任纪舜. 1990. 论中国南部的大地构造[J]. 地质学报, 64(4): 275-288.

舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 12(4): 418-431.

邢光福, 杨祝良, 孙强辉, 沈加林, 陶奎元. 2001. 广东梅州早侏罗世层状基性-超基性岩体研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(3): 172-175.

邢光福, 卢清地, 陈荣, 张正义, 聂童春, 李龙明, 黄家龙, 林敏. 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[J]. 地质学报, 82(4): 451-463.

徐先兵, 张岳桥, 贾东, 舒良树, 王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 36(3): 573-593.

徐汉林, 付万德, 徐嘉伟. 1998. 衡山界牌倾滑韧性剪切带的变形特征与应变分析[J]. 湖南地质, 17(2): 85-90.

赵葵东, 蒋少涌, 姜耀辉, 刘敦一. 2006. 湘南骑田岭岩体芙蓉超单元的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2611-2616.

张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 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体系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 16(1): 234-247.

张岳桥, 董树文, 李建华, 施炜. 2011. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J]. 中国地质, 38(2): 233-250.

赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘, 11(3): 319-328.

朱金初, 黄革非, 张佩华, 李福春, 饶冰. 2003. 湘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.

朱金初, 张辉, 谢才富, 张佩华, 杨策. 2005. 湘南骑田岭竹枧水花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学和岩石学[J]. 高校地质学报, 11(3): 335-342.

References:

- ANGELIER J. 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 89(B7): 5835-5848.
- CARTER A, ROQUES D, BRISTOW C, KINNY P. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam[J]. *Geology*, 29(3): 211-214.
- CHARVET J, LAPIERRE H, YU Y W. 1994. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 387-396.
- CHARVET J, SHU Liang-shu, SHI Yang-shen, GUO Ling-zhi, FAURE M. 1996. The building of South China: collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3-5): 223-235.
- CHEN Jiang-feng, FOLAND K A, XING Feng-ming, XU Xiang, ZHOU Tai-xi. 1991. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China[J]. *Geology*, 19(8): 815-818.
- CHEN Jiang-feng, JAHN B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 284(1-2): 101-133.
- CHEN Pei-rong, KONG Xing-gong, WANG Yin-xi, NI Qi-sheng, ZHANG Bang-tong, LING Hong-fei. 1999. 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 Pei-rong, ZHANG Bang-tong, KONG Xing-gong, CAI Bi-cong, LING Hong-fei, NI Qi-sheng. 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 Pei-rong, ZHOU Xin-min, ZHANG Wen-lan, LI Hui-min, FAN Chun-fang, SUN Tao, CHEN Wei-Feng, ZHANG Min. 2005. Petrogenesis and significance of early Yanshanian syenite-granite complex in eastern Nanling Range[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(7): 912-924.
- CHEN W S, YANG H C, WANG X, HUANG H. 2002. Tectonic setting and exhumation history of the Pingtan-Dongshan Metamorphic Belt along the coastal area, Fujian Province, Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 829-840.
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, SinoProbe Group. 2011. Deep Exploration Technology and Experimentation (SinoProbe)[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(S1): 3-23(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, SHI Wei, ZHANG Yue-qiao, HU Jian-min, ZHANG Zhong-yi, LI Jian-hua, WU Hong-ling, TIAN Mi, CHEN Hong, WU Guo-li, LI Hai-long. 2010. The Tectonic Stress Field in the Dabashan Orogen Resulting from Late Mesozoic Intra-Continental Orogeny[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(6): 769-780(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, ZHANG Yue-qiao, LONG Chang-xing, YANG Zhen-yu, JI Qiang, WANG Tao, HU Jian-ming, CHEN Xuan-hua. 2008. Jurassic Tectonic Revolution in China and New Interpretation of the "Yanshan Movement"[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 334-347.
- ENGEBRETSON D C, COX A, GORDON R G. 1985. Relative motion between oceanic and continental plates in the Pacific basin[J]. *Special Paper Geological Society America*, 206: 1-55.
- FAURE M, NATAL'IN B. 1992. The geodynamic evolution of the Eastern Eurasian margin in Mesozoic times[J]. *Tectonophysics*, 208(4): 397-411.
- FAURE M, SUN Y, SHU L, MONIÉ P, CHARVET J. 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogen: the case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, southeastern China)[J]. *Tectonophysics*, 263(1-4): 77-106.
- FENG Yan-fang, DENG Jin-fu, XIAO Qing-hui, XING Guang-fu, LU Song-nian, CUI Xian-yue, GONG Fan-ying, ZHEN Shi-min, JIA De-long, QI Fan-yu. 2011. Zircon U-Pb SHRIMP isotopic dating of granitic granet-biotite gneiss of the Aojiao Group at Aojiao village of Dongshan county, Fujian province, and its geological significance[J]. *Geology in China*, 38(1): 103-108(in Chinese with English abstract).
- FU Jian-ming, MA Chang-qian, XIE Cai-fu, ZHANG Ye-ming, PENG Song-bai. 2004. Zircon SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, South China, and its significance[J]. *Geology in China*, 31(1): 96-100 (in Chinese with English abstract).
- GUO Fu-xiang. 1998. Meso-Cenozoic Nanhua (South China) orogenic belt-subaerial tridirectional orogen[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(1): 25-33(in Chinese with English abstract).
- HACKER B R, RATSCHBACHER L, WEBB L, IRELAND T, WALKER D, DONG S W. 1998. U/Pb zircon ages constrain

- the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1-4): 215-230.
- HE Zhen-yu, XU Xi-sheng, CHEN Rong, XING Guang-fu. 2007. Genesis of Middle Jurassic syenite-gabbro in southern Jiangxi province and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1457-1469(in Chinese with English abstract).
- HSÜ K J, LI J L, CHEN H H, WANG Q C, SUN S, ŞENGÖR A M C. 1990. Tectonics of South China: key to understanding west Pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 183(1-4): 9-39.
- HSÜ K J, SUN S, LI J L, CHEN H H, PEN H P, ŞENGÖR A M C. 1988b. Mesozoic overthrust tectonics in south China[J]. *Geology*, 16(5): 418-421.
- HSÜ K J, SUN Shu, LI Ji-liang. 1988a. Huanan Alps, not South China Platform[J]. *Science in China, Series B*, (1): 109-119.
- HUANG T K. 1945. On Major Tectonic Forms of China[J]. *Geological Memoirs, Serial A*, 20: 1-165.
- JAHN B M, CHEN P Y, YEN T P. 1976. Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 87(5): 763-776.
- JAHN B M, ZHOU X H, LI J L. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints[J]. *Tectonophysics*, 183(1-4): 145-160.
- 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[J]. *Tectonophysics*, 274(4): 321-338.
- LI Hua-qin, LU Yuan-fa, WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, YANG Hong-mei, GUO Jing, XIE Cai-fu, MEI Yu-ping, MA Li-yan. 2006. Dating of the Rock-forming and Ore-forming Ages and Their Geological Significances in the Furong Ore-field, Qitian Mountain, Hunan[J]. *Geological Review*, 52(1): 113-121(in Chinese with English abstract).
- LI J H, ZHANG Y Q, DONG S W, LI H L. 2011. Late Mesozoic-Early Cenozoic deformation history of the Yuanma basin, central South China[J]. submitted to *Tectonophysics*.
- LI S G, XIAO Y L, LIOU D L, CHEN Y Z, GE N J, ZHANG Z Q, SUN S S, CONG B L, ZHANG R Y, HART S R, WANG S S. 1993. Collision of the North China and Yangtse Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes[J]. *Chemical Geology*, 109(1-4): 89-111.
- LI Shu-guang, HAGOUTZ E, XIAO Yilin, GE Ning-jie, CHEN Yi-zhi. 1996. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Su-Lu terrane: I. Sm-Nd isotope system[J]. *Science in China (Series D)*, 39(6): 597-609.
- LI X H, CHEN Z, LIU D Y, LI W X. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from Southern Jiangxi province, SE China: Age, origin, and tectonic significance[J]. *International Geology Review*, 45(10): 898-921.
- LI X H, LI W X, WANG X C, LI Q L, LIU Y, TANG G Q, GAO Y Y, WU F Y. 2010. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension[J]. *Lithos*, 119(3-4): 427-438.
- LI X H, LI Z X, LI W X, LIU Y, YUAN C, WEI G J, QI C S. 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?[J]. *Lithos*, 96(1-2): 186-204.
- LI X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293-305.
- LI Z X, LI X H, WARTHON J A, CLARK C, LI W X, ZHANG C L, BAO C M. 2010. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5-6): 772-793.
- 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[J]. *Geology*, 35(2): 179-182.
- MARUYAMA S, ISOZAKI Y, KIMURA G, TERABAYASHI M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present[J]. *The Island Arc*, 6(1): 121-142.
- MERCIER J L, ARMIJO R, TAPPONNIER P, CAREY-GAILHARDIS E, LIN H T. 1987b. Change from late Tertiary compression to Quaternary extension in southern Tibet during the India-Asia collision[J]. *Tectonics*, 6(3): 275-304.
- MERCIER J L, SOREL D, SIMEAKIS K. 1987a. Changes in the state of stress in the overriding plate of a subduction zone: The Aegean Arc from the Pliocene to the Present[J]. *Annales Tectonicae*, 1(1): 20-39.
- REN J Y, TAMAKI K, LI S T, ZHANG J X. 2002. Late Mesozoic

- and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 344(3-4): 175-205.
- REN Ji-shun. 1984. The Indosinian orogeny and its significance in the tectonic evolution of China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 6(2): 31-42(in Chinese with English abstract).
- REN Ji-shun. 1990. On the geotectonics of southern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 64(4): 275-288(in Chinese with English abstract).
- RODGERS J. 1989. Comments on "Mesozoic overthrust tectonics in south China"[J]. *Geology*, 17(7): 671-672.
- ROWLEY D B, ZIEGLER A M, NIE G. 1989. Comment on "Mesozoic overthrust tectonics in south China"[J]. *Geology*, 17(4): 384-386.
- SHARP W D, CLAGUE D A. 2006. 50-Ma initiation of Hawaiian-emperor bend records major change in Pacific Plate motion[J]. *Science*, 313(5791): 1281-1284.
- SHU L S, ZHOU X M, DENG P, WANG B, JIANG S Y, YU J H, ZHAO X X. 2009. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China Block: New insights from basin analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 376-391.
- SHU Liang-shu. 2006. Predevonian Tectonic Evolution of South China: from Cathaysian Block to Caledonian Period Folded Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418-431(in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Tectonophysics*, 267(1-4): 303-316.
- UYEDA S, KANAMORI H. 1979. Back-Arc opening and the mode of subduction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 84(B3): 1049-1061.
- WANG Y J, FAN W M, SUN M, LIANG X Q, ZHANG Y H, PENG T P. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province[J]. *Lithos*, 96(3-4): 475-502.
- WANG Y J, ZHANG Y H, FAN W M, PENG T P. 2005a. Structural signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Indosinian Xuefengshan tectonic belt, South China Block[J]. *Journal of Structural Geology*, 27(6): 985-998.
- WANG Yue-jun, FAN Wei-min, GUO Feng, PENG Tou-ping, LI Chao-wen. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implications for the Lithospheric Boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *International Geology Review*, 45(3): 263-286.
- WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, LIANG Xin-quan, PENG Tou-ping, SHI Yu-ruo. 2005b. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan Province and its petrogenetic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(13): 1395-1403.
- WANG Yun-jun, FAN Wei-ming, GUO Feng, LI Hui-min, LIANG Xin-quan. 2002. U-Pb dating of early Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province, South China and its petrogenetic implications[J]. *Science in China(Series D)*, 45(3): 280-288.
- WATSON M P, HAYWARD A B, PARKINSON D N, ZHANG Z M. 1987. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 4(3): 205-225.
- WU F Y, LIN J Q, WILDE S A, ZHANG X O, YANG J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103-119.
- XING Guang-fu, LU Qing-di, CHEN Rong, ZHANG Zheng-yi, NIE Tong-chun, LI Long-ming, HUANG Jia-long, LIN Min. 2008. Study on the Ending Time of Late Mesozoic Tectonic Regime Transition in South China-Comparing to the Yanshan Area in North China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 451-463(in Chinese with English abstract).
- XING Guang-fu, YANG Zhu-liang, SUN Qiang-hui, SHEN Jia-lin, TAO Kuai-yuan. 2001. Early Jurassic Layered Mafic-Ultramafic Intrusions in Meizhou, Guangdong Province[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 20(3): 172-175(in Chinese with English abstract).
- XU Han-lin, FU Wan-de, XU Jia-wei. 1998. The deformational feature and strain analysis of the Jiepai dip-slip ductile shear zone in Hengshan mountain[J]. *Hunan Geology*, 17(2): 85-90(in Chinese with English abstract).
- XU X S, DONG C W, LI W X, ZHOU X M. 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: the significance of the gabbro-diorite-granite association[J]. *Lithos*, 46(2): 299-315.
- XU Xian-bing, ZHANG Yue-qiao, JIA Dong, SHU Liang-shu, WANG Rui-rui. 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. *Geology in China*, 36(3): 573-593(in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- YAN D P, ZHOU M F, SONG H L, WANG X W, MALPAS J. 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze block (South China)[J]. *Tectonophysics*, 361(3-4): 239-254.
- YIN A, HARRISON T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280.
- YU Xin-qi, HOU Ming-jin, WANG De-en. 2005. No evidence for a large Mesozoic overthrust in the Lantian area of Anhui Province, south China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(4): 601-609.
- ZHANG Y Q, DONG S W, SHI W. 2003. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China[J]. *Tectonophysics*, 363(3-4): 243-258.
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, LI Jian-hua, SHI Wei. 2011. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan basin[J]. *Geology in China*, 38(2): 233-250(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, ZHAO Yue, ZHANG Tian. 2008. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 310-326.
- ZHANG Yue-qiao, XU Xian-bing, JIA Dong, SHU Liang-shu. 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234-247(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Kui-dong, JIANG Shao-yong, JIANG Yao-hui, LIU Dun-yi. 2006. SHRIMP U-Pb dating of the Furong unit of Qitangling granite from southeast Hunan province and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2611-2616(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yue, XU Gang, ZHANG Shuang-hong, YANG Zheng-yu, ZHANG Yue-qiao, HU Jian-ming. 2004. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia[J]. *Earth Science frontiers*, 11(3): 319-328(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhen-hua, BAO Zhi-wei, ZHANG Bo-you. 1998. Geochemistry of the Mesozoic basaltic rocks in southern Hunan Province[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 41(S1): 102-112.
- 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[J]. *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[J]. *Episodes*, 29(1): 26-33.
- ZHU Jin-chu, HUANG Ge-fei, ZHANG Pei-hua, LI Fu-chun, RAO Bing. 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).
- ZHU Jin-chu, ZHANG Hui, XIE Cai-fu, ZHANG Pei-hua, YANG Ce. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology, petrology and geochemistry of the Zhujianshui granite, Qitianling pluton, Southern Hunan province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 335-342(in Chinese with English abstract).
- ZHU W G, ZHONG H, LI X H, HE D F, SONG X Y, REN T, CHEN Z Q, SUN H S, LIAO J Q. 2010. The early Jurassic mafic-ultramafic intrusion and A-type granite from northeastern Guangdong, SE China: Age, origin, and tectonic significance[J]. *Lithos*, 119(3-4): 313-329.
- ZHU Z M, MORINAGA H, GUI R J, XU S Q, LIU Y Y. 2006. Paleomagnetic constraints on the extent of the stable body of the South China Block since the Cretaceous: New data from the Yuanma Basin, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1-2): 533-544.