

华南陆缘晚中生代造山及其地质意义

崔建军¹ 张岳桥¹ 董树文¹ 江博明²
徐先兵³ 马立成¹ 李建华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. 台湾大学地球科学系, 台北 10699;
3. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

摘要: 长乐—南澳带位于华南大陆的东南缘, 是揭示晚中生代古太平洋板块与欧亚大陆相互作用和华南陆缘地质演化的一条关键性构造带。该构造带的 T_3 -J 含煤地层不整合下伏于下白垩统南园组之下, 或以角闪岩相包体形式赋存于晚侏罗—早白垩世片麻状花岗岩体内。这些具有透入性混合岩化特征的副变质岩包体 (T_3 -J) 与围岩 (片麻状花岗岩) 发生过同变形, 并且被未变形的白垩纪岩体/脉侵入。这些晚三叠—早侏罗世地层的变质和变形具有朝陆内 (NW) 方向减弱的特征。下白垩统南园组普遍发生褶皱和绿片岩相变质, 并且被未变质的上白垩统石帽山群不整合覆盖。长乐—南澳带的主要岩石单元与构造特征表明华南陆缘在晚中生代经历过两期挤压 (造山)。在第一期挤压 (造山) 过程中, T_3 -J 陆相地层发生褶皱和变质。随后, 这些经历了变形和变质的 T_3 -J 沉积地层与中—上地壳的其他岩石在早白垩世早期发生构造折返, 其间伴随着大规模同构造岩浆作用 (147~135 Ma) 和区域性混合岩化。在第二期挤压过程中, 早白垩世南园组发生褶皱和变质。华南陆缘 110~100 Ma 的岩浆杂岩、100~90 Ma 的 A 型花岗岩和 90~80 Ma 的双峰式火成岩可能分别与这次挤压事件及其后的地壳伸展、减薄过程有关。因此, 华南晚中生代两大岩浆旋回 (165~120 Ma 和 110~80 Ma) 可能受控于同期的两大构造旋回 (165~120 Ma 和 115~80 Ma)。每个构造旋回包括一个地壳受挤压增厚过程和一个随后发生的地壳伸展减薄过程。值得注意的是, 华南沿海地区的晚中生代构造—岩浆作用与陆内同期构造—岩浆作用似乎具有可比性。

关键词: 长乐—南澳构造带; 平潭—东山杂岩带; 福清—云霄变质带; 晚中生代; 陆缘造山

中图分类号: P542+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)01-0086-20

1 引言

长乐—南澳带是沿华南陆缘分布的一条 NE—SW 走向的构造带 (图 1)。它长逾 400 km, 宽 40~60 km, 东南方向与台湾海峡相邻, 西北方向与华南大陆相连接^[1]。这条陆缘构造带朝 NE 方向延伸可能经过朝鲜半岛南部和日本, 并与俄罗斯远东地区的锡霍特造山带相连, 共同构成一条长达 5 000 余千米的陆缘构造带^[2-13]。作为这条规模宏伟的陆缘构造带的一部分, 长乐—南澳带的大多数 (>85%) 岩石与构

造形成于晚中生代, 是揭示侏罗—白垩纪古太平洋板块与欧亚大陆相互作用及华南陆缘地质演化的关键地区, 因而备受地质学家的关注。然而, 由于后期构造的叠加与改造, 长乐—南澳带的很大一部分已经沉入海底, 所以目前对这条具有重要地质意义的陆缘构造带的延伸、构造框架及其晚中生代构造属性等还有不同认识, 存在多种不同的观点和演化模式^[1, 14-31], 如: 中生代地槽褶皱带, 非地槽褶皱造山环境背景上的断块造山动力变质带, 陆缘造山带, 外来地体拼贴、缝合带、构造混杂岩带和大型陆缘韧性剪

收稿日期: 2012-11-08; 改回日期: 2013-01-21

基金项目: 国家科技专项 (SinoProbe-08-1) 资助。

作者简介: 崔建军, 男, 1973 年生, 博士后, 主要从事岩石与大地构造研究; E-mail: cagscjj@126.com。

通讯作者: 张岳桥, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 从事构造地质、新构造和盆地分析研究; E-mail: zhangyueqiao@tom.com。

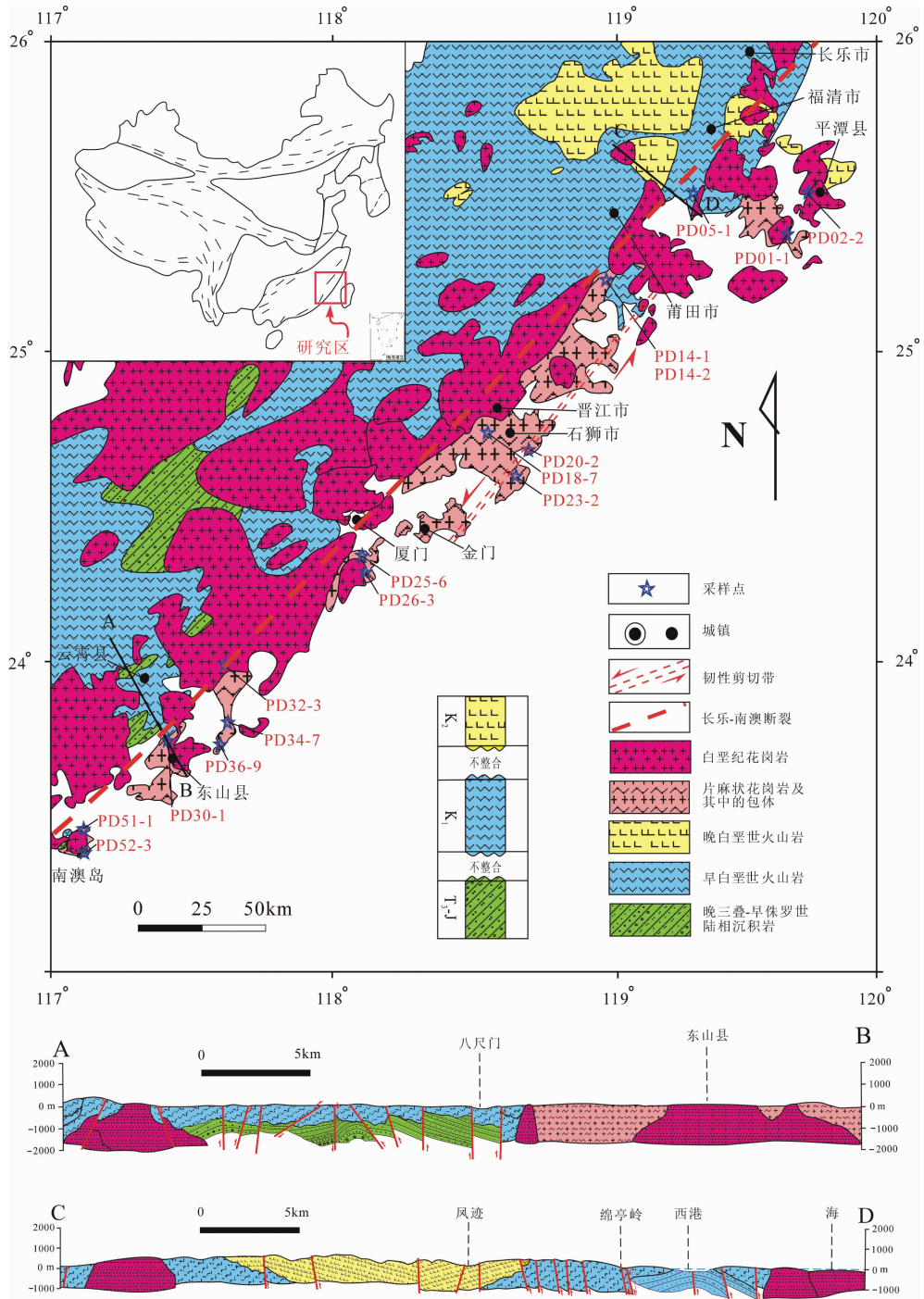


图 1 长乐—南澳带地质简图(据 Cui et al., 2012b^[25]修改)

Fig.1 Simplified geological map of the Changle-Nan'ao zone(modified after Cui et al., 2012b^[25])

切带/变质带/逆冲构造带,等等^[1-3, 14-32, 38, 41-44]。

近几年,笔者对长乐—南澳带进行了详细的野外地质调查和构造地质学、岩石学、地球化学和同位素年代学综合研究,获得了一些关于该构造带的基本构成和地质演化的新资料。这些最新的研究成果

支持长乐—南澳带是一个晚中生代的陆缘造山带。本文将从以下五个方面对这一陆缘造山带加以说明:(1)造山带结构和组成,(2)造山带的变形、变质和岩浆作用;(3)造山时间与阶段划分;(4)陆缘造山与陆内造山的关系;以及(5)造山动力学。基于对该

陆缘构造带晚中生代造山过程的研究和区域地质资料的分析,本文最后还探讨了华南中生代岩浆作用的成因机制和时-空演化过程。

2 华南陆缘造山带的结构和组成

以 NE-SW 向延伸的长乐—南澳断裂为界,华南陆缘造山带通常被划分为“福清—云霄变质带”和“平潭—东山变质带”两个并列的次级构造单元^[1]。研究区的地层主要沿西北侧的福清—云霄变质带分布,并以两个区域性角度不整合为界划分为 3 个构造地层单元^[1,24],由老至新为:上三叠统—下侏罗统(T_3-J),下白垩统(K_1)和上白垩统(K_2)^[24]。其中,上三叠统—下侏罗统(T_3-J)以大坑组(T_3)和梨山组(J_1)为代表,断续出露于研究区的西北部,是一套经历过褶皱变形和不同程度变质的陆相含煤岩系(图 1)。朝陆内方向(NW),这些 T_3-J 变质地层渐变为正常的沉积地层;朝大洋(SE)方向, T_3-J 地层的变质和变形程度具有不断增强的趋势。在滨海地区(平潭—东山带),强烈变形的 T_3-J 地层常以包体形式赋存于晚中生代花岗岩内。下白垩统(K_1)以南缘组为代表,占研究区地层总面积的 80%以上。这套经历过区域性

绿片岩相变质和褶皱变形的陆相火山—沉积地层与下伏地层单元之间为一区域性角度不整合^[1,24]。南缘组的主要岩性为陆相中、中酸—酸性熔岩,夹火山碎屑岩和沉积岩^[1]。其中的火山岩多数形成于早白垩世早期^[11,14,24-32]。值得注意的是,南缘组在平潭—东山带的出露十分有限,总体具有朝大洋方向减少的趋势(图 1)。上白垩统以石帽山群为代表,主要分布于福清—云霄带的东北部,为一套没有变质记录的陆相火山—沉积层。石帽山群与南缘组之间是一个区域性角度不整合,局部被白垩纪花岗岩或基性岩脉侵入。同位素年代学研究结果显示,石帽山群与侵入其中的岩体/岩脉多数形成于 100~80 Ma^[31-35]。

长乐—南澳带的岩浆岩出露广泛,占研究区基岩总面积的一半左右。这些岩浆岩的类型比较复杂,包括中基性(少量基性和超基性)、中性、酸性及超酸偏碱性岩类。其中,白垩纪花岗岩(图 2-A,E,F)是主体^[1,24,32-33],并且可以进一步划分为未变形花岗岩和片麻状花岗岩两大类,前者分布范围比较广,矿物粒度比较细小;后者主要沿平潭—东山带分布,被未变形花岗岩侵入。研究区的中—基性岩数量不多(<10%),呈小岩株、岩墙、岩脉和岩瘤状产出,单个面

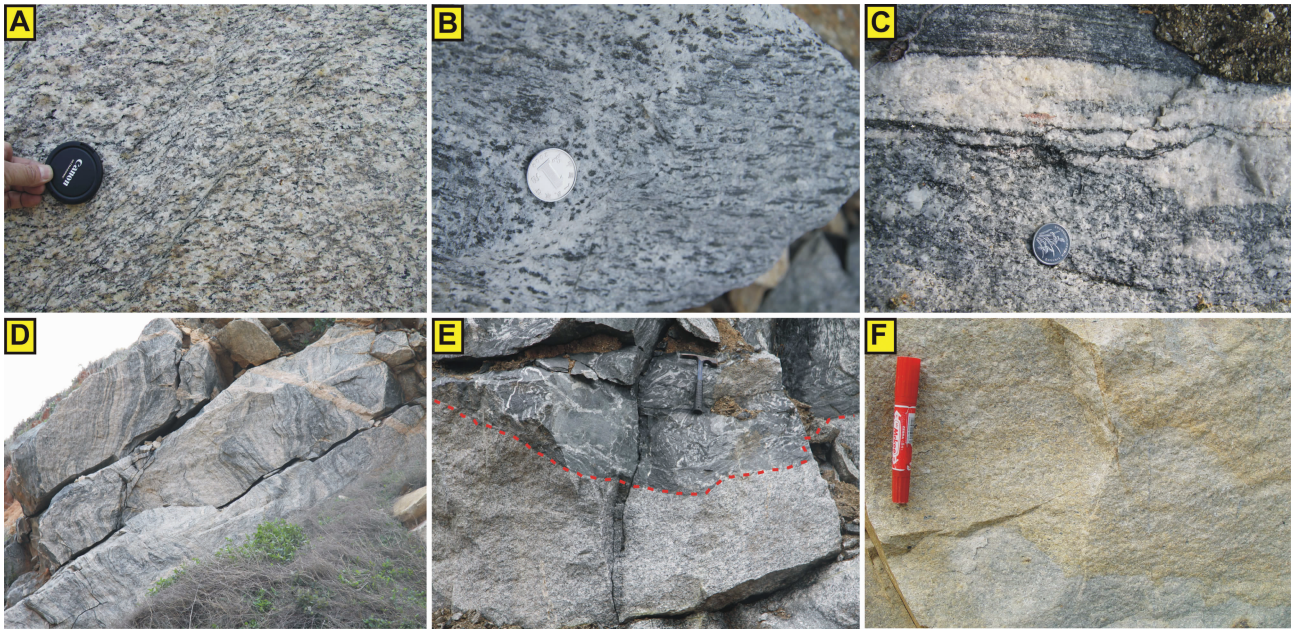


图 2 平潭—东山带中的岩浆岩和变质岩照片

A—片麻状花岗岩;B—混合岩化的晚侏罗世花岗岩;C—具有透入性混合岩化特征的副片麻岩包体;D—混合岩;
E—片麻状花岗岩中的变质包体;F—未变形细粒状花岗岩

Fig.2 Field photographs of magmatic and metamorphic rocks in the Pingtan-Dongshan zone

A-Gneissic granites; B-Migmatitized Late Jurassic granites; C-Paragneiss enclaves with penetrative migmatization;
D-Migmatite; E-Metamorphic enclaves in gneissic granites; F- Undeformed fine-grained granite

积一般小于 1 km²。据野外观察,这些中-基性岩脉可能是多期热事件的产物。早期的中-基性岩具有明显的变形特征,常常以包体的形式赋存于白垩纪中-酸性岩体中。其中有一期中-基性岩脉侵入到下白垩统南园组中,并且与围岩发生同褶皱变形^[1]。晚期侵位的中-基性岩脉不仅切过了未变形花岗岩,而且自身也没有变形。

平潭—东山带是华南陆缘造山带的重要组成部分。它总体呈 NE 45°±5°方向的条带状断续出露于福建平潭与广东南澳岛之间。其 NW 方向与福清—云霄变质带相邻,其余三向(NE、SW 和 SE)均延伸潜没于海域之中。笔者在此称之为“平潭—东山杂岩带”。已有的研究成果对该构造带进行过多方面制约^[1,14~33,36~38],详细的野外调查和已有的地质资料表明,平潭—东山带的岩石主要由三部分组成:(1)晚中生代片麻状花岗岩(图 2-A,B), (2)变质岩包体(图 2-C,D,E)和(3)白垩纪未变形岩体(图 2-F)。其中,晚中生代片麻状花岗岩占平潭—东山带基岩总面积的 40%左右,是该构造带变形岩石的主体。这些片麻状花岗岩在形成和就位的过程中俘获了一定数量的变质岩包体,并且与这些包体发生过同构造变形。这些同构造花岗岩经历过高温条件下塑性变形的证据是:野外露头直接可以见到条带状和拔丝状石英及塑性变形的长石斑晶(图 2-A)。片麻状花岗岩中的变形大都具有透入性特征(图 2-A,B)。已知的多数片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 153~136 Ma^[25,30,31,38]少数为 200~187 Ma 和 100 Ma(表 1)。

第二部分是这些片麻状花岗岩中的变质岩包体(图 2-C,D,E)。这些包体大小悬殊,从数百米至几厘米不等。多数包体的形态比较复杂,以层状、似层状和透镜状最为常见,并且显示与寄主岩石协调一致的变形特征。其常见岩性包括:含矽线石或石榴石的云母片岩、副片麻岩、正片麻岩、斜长角闪岩、石榴角闪岩、石英岩等。但野外考察中很少见到大理岩(华南陆缘的多数古生代碳酸盐岩在晚中生代造山之前已经被剥蚀?)。这些与造山带密切相关的矿物和岩石组合显示角闪岩相变质特征。变质包体中的各种片麻岩、混合片麻岩、片麻状混合岩、片麻状花岗岩、混合花岗岩呈现连续过渡和相互交叠的复杂图像,显示不同地壳岩石在较高温度下发生部分熔融和深熔作用(图 2-B,C,D)。由于混合岩化程度较高,包体中的构造要素遭到不同程度的破坏,而且多

数矿物发生了重结晶。在一些具有高度混合岩化特征的变质岩中,隐约可见一些早期构造的“残余”(图 2-D)。锆石 U-Pb 定年和阴极发光图像显示,这些具有残余构造(“鬼影构造”)的变质岩中包含典型的岩浆锆石,而且发育明显的核-边结构。其中,核部年龄为(160±5)Ma,边部年龄为(140±5)Ma(表 1)。由于 1 件副片麻岩样品(PD02-2)中包含早侏罗岩岩浆锆石(表 1),所以,平潭—东山带的副片麻岩的原岩至少有一部分是上三叠统—下侏罗统(相当于大坑组和梨山组)。

第三部分是基本未变形的白垩纪岩体(图 2-F),占平潭—东山带岩浆岩的 40%以上。这些晚期花岗质岩体侵入或俘获了早期的变质和变形岩石。野外观察发现,部分晚期花岗岩局部也出现微弱变形。这些构造变形可能与白垩纪中期的构造事件有关^[34~39]。

3 晚中生代变形、变质和岩浆作用

3.1 晚中生代两期褶皱和两期变质

现有的地质资料表明长乐—南澳带在晚中生代经历过两期挤压事件(图 3 A-F)。由于 T₃-J 陆相含煤地层在研究区或以蛻变角闪岩相包体的形式赋存于早白垩(145~135 Ma)片麻状花岗岩内,或被下白垩统火山岩不整合覆盖(图 1,表 1)。所以,晚中生代第一期陆壳收缩、地层褶皱和进变质作用可能发生在侏罗纪晚期。同时,由于这些侏罗纪变质岩包体(图 3-E,F)与围岩发生过同构造变形,所以退变质作用可能发生在这些变质包体与围岩的构造抬升过程中。在时间上可能与早白垩早期的同构造岩浆作用和区域性混合岩化作用一致。锆石 U-Pb 定年结果显示,平潭—东山带的同构造岩浆岩、混合岩和韧性变形构造多数形成于 145~135 Ma(表 1)。由于这些早白垩世片麻状花岗岩包含晚侏罗世(165~150 Ma)岩浆锆石,所以晚中生代第一期变质作用的时限为 165~135 Ma。同时,下白垩统南缘组中的褶皱和变质(图 3-A,B)和石帽山群(K₂)之下的区域性角度不整合把华南陆缘的第二期陆壳收缩、地层褶皱和变质的时间限定于早白垩世晚期(115~100 Ma?)。这次事件与华南 115~110 Ma 的岩浆活动低谷期和 110~100 Ma 的岩浆杂岩的形成时间基本一致。随后,沿海地区的陆壳/岩石圈可能经历了快速的减薄过程(100~90 Ma)。其间可能还伴随着软流圈的上涌。其主要证据包括:(1)平潭—东山带发育

表 1 长乐-南澳构造带现有同位素年龄统计

Table 1 Geochronological data from the Changle-Nan'ao tectonic zone

采样点	经度 (E)	纬度 (N)	样品号: 野外特征	年龄/Ma	测试方法	地质意义	资料来源
古元古代—三叠纪的多旋回岩浆作用:							
南务里	119°43.90'	25°29.745'	PD02-2: 含石榴石 副片麻岩	1827±23	LA-ICPMS	继承锆石年龄	[25]
				764~730		继承锆石年龄	[25]
				637±6		继承锆石年龄	[25]
				461~410		继承锆石年龄	[25]
				347~313		继承锆石年龄	[25]
				285±2		继承锆石年龄	[25]
				251~257		继承锆石年龄	[25]
	202~196	继承锆石年龄	[25]				
	<196	沉积和变质时间	[25]				
侏罗纪早期岩浆作用:							
福清锦城	119°32.59'	25°22.96'	PD01-1: 片麻状花岗岩	199±2	LA-ICPMS	岩体侵位时间	待发表
福清锦城	119°32.319'	25°23.140'	DS39-1: 片麻状花岗岩	187±1	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[105]
晚侏罗—早白垩世 (165~135 Ma) 同构造岩浆岩、混合岩和变质岩:							
深沪	118°40.75'	24°36.78'	PD23-2: 混合片麻岩包体	160~145(核)	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[25]
				140±1(边)		混合岩化时间	[25]
东山 礁头村	117°24.49'	23°43.23'	PD30-1: 发混合岩化 片麻状花岗岩	160~150	SHRIMP	继承锆石年龄	[25]
				146±1		混合岩化/岩体侵位	[25]
东山陈岱	117°26.336'	23°39.621'	DS-19: 黑云母片岩	143±2	LA-ICPMS	变质年龄	[105]
白坑	118°06.99'	24°18.70'	PD26-3: 片麻状花岗岩	141±1	SHRIMP	岩体侵位时间	[25]
东山澳角			F28-1: 石榴黑云片麻岩	153±2	SHRIMP	岩体侵位时间	[38]
东山澳角	117°25.684'	23°39.619'	DS-10: 黑云母片岩	144±1	LA-ICPMS	变质年龄	[105]
古雷	117°36.45'	23°46.38'	PD34-7: 片麻状花岗岩	165~150	LA-ICPMS	继承锆石	[25]
				139±1		岩体侵位时间	[25]
港尾	118°05.03'	24°20.58'	PD25-6: 片麻状花岗岩	147±1	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[25]
港尾	118°05.595'	24°21.288'	DS-24-2: 眼球状花岗岩	147±2	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[105]
东山县	117°27.871'	23°39.617'	DS-7-3: 片麻状花岗岩	147±2	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[105]
东山县	117°23.485'	23°39.620'	DS-16: 片麻状花岗岩	146±2	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[105]
东山县	117°27.847'	23°39.618'	DS-8: 黑云母片岩	142±2	LA-ICPMS	变质年龄	[105]
东山县	117°29.287'	23°39.616'	DS-1: 黑云母片岩	140±2	LA-ICPMS	变质年龄	[105]
古雷山	117°35.51'	23°44.04'	PD36-9: 片麻状花岗岩	139±2	LA-ICPMS	岩体侵位时间	待发表
金门岛			片麻状花岗岩	139	锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[26]
晋江	118°32.24'	24°46.57'	PD18-7: 片麻状花岗岩	136±2	LA-ICPMS	岩体侵位时间	待发表
				160~155		继承锆石年龄	[25]
南澳岛	117°07.07'	23°24.06'	PD52-3: 片麻状花岗岩	136±1	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[25]
				133~123		晚期热事件改造	[25]

续表 1

采样点	经度 (E)	纬度 (N)	样品号: 野外特征	年龄/Ma	测试方法	地质意义	资料来源
柳厝	118° 58.48'	25° 10.72'	PD14-1: 无变形含榴淡色花岗岩	145	LA-ICPMS	继承锆石年龄	[25]
				135±2		岩体侵位时间	[25]
132~117 Ma 未变形或弱变形岩浆岩:							
柳厝	118° 58.48'	25° 10.72'	PD14-2: 无变形细粒花岗岩	132±1	SHRIMP	岩体侵位时间	[25]
福清	119° 29.051'	25° 22.066'	DS-38: 眼球状花岗岩	130±1	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[105]
惠安苏厝			Pu2-1: 变形闪长岩包体	130±1	锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[40]
惠安割山			Pu1-4: 变形花岗岩闪长岩	131	锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[40]
南澳岛	117° 08.58'	23° 24.83'	PD51-1: 微弱变形花岗岩	124±1	SHRIMP	岩体侵位时间	[25]
杜浔	117° 38.40'	23° 56.83'	PD32-3: 微弱变形花岗岩	120±1	SHRIMP	岩体侵位时间	[25]
平潭岛			角闪辉长岩	115	锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[36]
平潭岛			花岗岩	125	锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[36]
漳州上房			辉长岩	123	Rb-Sr 等时线	岩体侵位时间	[40]
漳州长泰			花岗岩闪长岩	123	Rb-Sr 等时线	岩体侵位时间	[40]
秋芦溪	119° 05.71'	25° 31.00'	PD05-1: 无变形岩脉	117±2	LA-ICPMS	岩脉侵位时间	[25]
110~100 Ma 岩浆作用:							
晋江	118° 34.175'	24° 30.913'	DS-27-1: 眼球状中-粗粒花岗岩	108±1	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[105]
永宁	118° 42.17'	24° 39.92'	PD20-2: 片麻状花岗岩	100±1	LA-ICPMS	岩体侵位时间	待发表
晋江	118° 34.175'	24° 30.913'	DS-27-2: 细粒状花岗岩	100±3	LA-ICPMS	岩体侵位时间	[105]
泉州桃花山			角闪辉长岩	107	锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[40]
福州丹阳			二长花岗岩	103	Rb-Sr 等时线	岩体侵位时间	[40]
福州			正长花岗岩	104	Rb-Sr 等时线	岩体侵位时间	[40]
100~90 Ma 伸展背景下的岩浆岩:							
青田			碱性花岗岩	101	单颗粒锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[40]
金門岛			花岗岩	101	锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[26]
晋江石圳			混合花岗岩	99	黑云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[40]
晋江灵秀山			二长浅粒岩	98	白云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[40]
莆田苏厝			变形闪长岩包体	95	角闪石 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[40]
普陀桃花山			碱性花岗岩	93	单颗粒锆石 U-Pb	岩体侵位时间	[40]
福州魁岐			碱性花岗岩	93	Rb-Sr 等时线	岩体侵位时间	[40]
福州笔架山			碱性花岗岩	92	Rb-Sr 等时线	岩体侵位时间	[40]
133~117 Ma 冷却过程:							
平潭			FJ01: 片麻岩	133±3	角闪石 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[39]
平潭			FJ02: 片麻岩	127±2	黑云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[39]
莲花山			FJ04: 辉长岩	131±1	角闪石 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[39]
平潭			FJ03: 片麻岩	127±3	黑云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[39]
平潭			FJ03: 片麻岩	117±3	钾长石 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[39]
惠安割山			黑云斜长变粒岩	118	黑云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	冷却年龄	[22]

续表 1

采样点	经度 (E)	纬度 (N)	样品号: 野外特征	年龄/Ma	测试方法	地质意义	资料来源
110~80 Ma 冷却年龄:							
平潭-东山带			FJ05: 片麻岩	110±3	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
莆田			FJ07: 片麻岩	109±3	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
惠安杜厝			眼球状糜棱岩	109	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[22]
东山东古			花云母片岩	108	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[22]
东山澳角			石英白云母片岩	108	白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[22]
晋江围头			黑云母花岗岩片麻岩	107	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[22]
莆田			FJ07: 片麻岩	107±3	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ05: 片麻岩	105±2	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ12: 糜棱岩	103±2	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ13: 片麻岩	102±2	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
惠安			FJ08: 片麻岩	102±3	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
惠安			FJ08: 片麻岩	101±3	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ05: 片麻岩	101±2	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
后厝			FJ09: 片麻岩	100±2	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
金门岛			片麻岩	100	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[40]
金门岛			花岗岩	97	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[40]
莆田			FJ06: 片岩	99±2	白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
惠安			FJ08: 片麻岩	98±2	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
金门			FJ15: 基性岩脉	97±2	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
金门岛			片麻岩	97	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[40]
莆田			FJ07: 片麻岩	95±2	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ10: 片麻岩	94±2	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
东山			FJ20: 片麻岩	94±2	白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
东山			FJ18: 片岩	92±2	白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ17: 片麻岩	92±2	角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
金门			FJ16: 片麻岩	90±2	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
后厝			FJ09: 片麻岩	90±1	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ11: 片麻岩	90±2	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
东山			FJ19: 片麻岩	88±2	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ12: 糜棱岩	88±2	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
东山			FJ20: 片麻岩	88±2	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ11: 片麻岩	87±1	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ13: 片麻岩	87±2	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ17: 片麻岩	87±2	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ10: 片麻岩	86±1	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
东山			FJ19: 片麻岩	84±2	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]
平潭-东山带			FJ14: 基性岩脉	82±2	全岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	冷却年龄	[39]

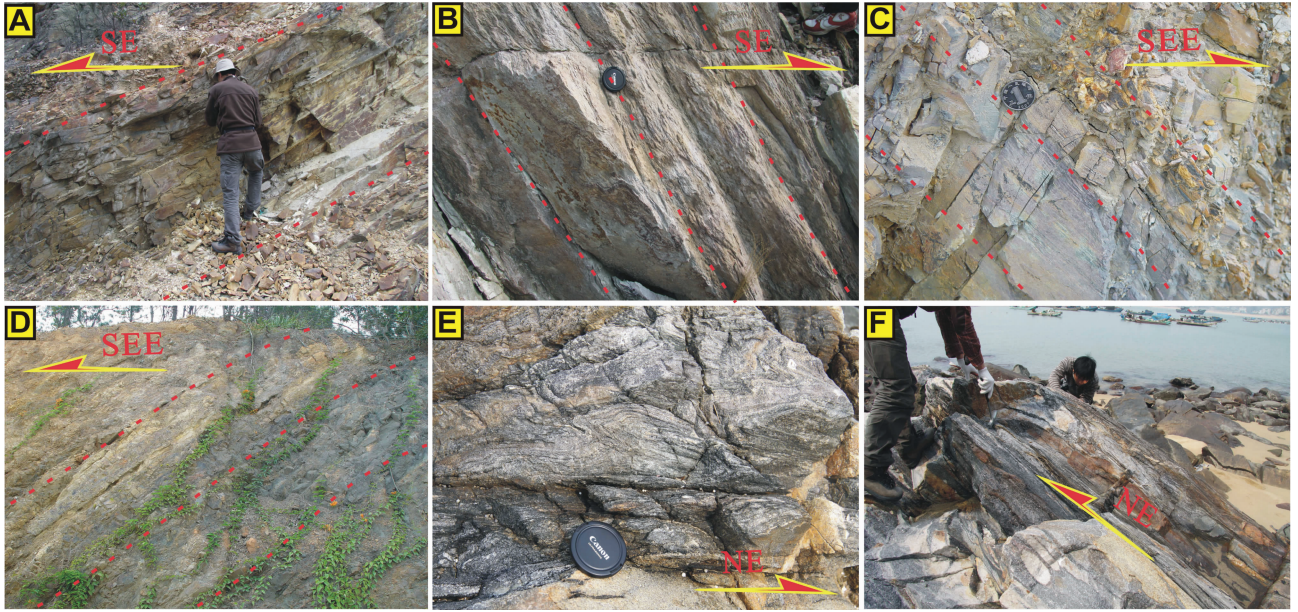


图 3 长乐—南澳构造带 T₃-K₁ 沉积岩中的两期变质和两期褶皱

A—褶皱和变质的下白垩统南园组(福清—云霄带); B—褶皱和变质的下白垩统南园组(福清—云霄带); C—褶皱和变质的上三叠统—下侏罗统沉积岩(福清—云霄带); D—褶皱和变质的上三叠统—下侏罗统沉积岩(福清—云霄带); E—褶皱和变质的上三叠统—下侏罗统沉积岩(平潭—东山带); F—褶皱和变质的上三叠统—下侏罗统沉积岩(平潭—东山带)

Fig.3 Two episodes of folding and metamorphism in T₃-K₁ sedimentary rocks from the Changle-Nan'ao tectonic zone A—Folded and metamorphosed Lower Cretaceous Nanyuan Formation (Fuqing-Yunxiao zone); B—Folded and metamorphosed Lower Cretaceous Nanyuan Formation (Fuqing-Yunxiao zone); C—Folded and metamorphosed Upper Triassic-Lower Jurassic sedimentary rocks (Fuqing-Yunxiao zone); D—Folded and metamorphosed Upper Triassic-Lower Jurassic sedimentary rocks (Fuqing-Yunxiao zone); E—Folded and metamorphosed Upper Triassic-Lower Jurassic sedimentary rocks (Pingtan-Dongshan zone); F—Folded and metamorphosed Upper Triassic-Lower Jurassic sedimentary rocks (Pingtan-Dongshan zone)

100 Ma(锆石 U-Pb 年龄)的同构造花岗岩,其中的低角度韧性剪切构造指示顶朝 SE 方向剪切(表 1,图 4-F);(2)研究区的角闪石、白云母和黑云母中的 ³⁹Ar-⁴⁰Ar 同位素体系普遍记录了 100~90 Ma 的冷却事件;(3)沿海地区的 A-型花岗岩多数形成于 100~90 Ma;(4)少量(<10%)双峰式火成岩形成于 90~80 Ma^[33, 39, 45-49, 59-60]。上述构造与岩石特征说明,华南陆缘地壳在晚中生代经历过两个旋回(165~120 Ma 和 115~80 Ma)的收缩增厚和伸展减薄过程。这一认识的另一个证据是陈斌等(1997)^[28]通过变质作用研究在平潭—东山带识别出的两期变质作用。其中,第一期变质作用的温压条件为 P=0.55~0.62 Gpa, T=692~717 °C, 达高角闪岩相;第二期变质作用的温压条件为 P=0.2~0.5 GPa, T=400~560 °C, 属于绿片岩相—低角闪岩相变质。第一期变质作用的变质程度明显高于第二期变质作用^[28]。

3.2 白垩纪两期低角度韧性剪切

中—低角度(≤ 60°)的韧性剪切构造在平潭—

东山带占据明显优势。大量同构造淡色长英质岩脉或伟晶岩脉往往顺这些低角度韧性剪切面理侵入(图 4-F)。其中以透入性的低角度(<35°)糜棱岩带最为常见(图 4-B, F)。这些低角度韧性剪切构造在永宁镇、古雷半岛、东山岛和南澳岛都有发育。运动学标志多数指示顶部朝 SE 方向剪切(图 4-A, B, F)。这些花岗质糜棱岩的面理倾向、糜棱面理上的线理倾伏向和剪切运动方向基本一致。野外构造解析和室内年代学研究表明,这些低角度韧性剪切构造主要形成于两个时期,即早白垩世早期(约 135 Ma)和晚白垩世早期(100~90 Ma)。其中,早白垩世的低角度韧性剪切构造最发育(图 4-A, B;表 1)。

平潭—东山带的低角度剪切变形伴随着普遍的深熔作用。混合岩化作用与低角度变形过程相互叠加,同时又被多世代的岩体(脉)所穿插,使该杂岩带的岩石类型和构造类型都变得十分复杂。除部分片岩和火山岩包体外,多数变质岩的原岩难以恢复。在一些混合岩中,可见由黑云母定向形成的条带状构



图 4 长乐—南澳构造带中的两期白垩纪构造

A—早白垩世岩体中的低角度剪切构造(港尾);B—早白垩世岩体中的低角度剪切构造(古雷半岛);C—高角度左行走滑剪切构造(平潭—东山带);D—高角度左行剪切构造(平潭—东山带);E—侵入未变形花岗岩的基性岩脉(平潭—东山带);F—白垩纪中期花岗岩中的低角度剪切构造(永宁)

Fig.4 Two stages of Cretaceous structures in the Changle-Nan'ao tectonic zone

A—Lower-angle shearing structures in Early Cretaceous intrusive rocks (Gangwei); B— Lower-angle shearing structures in Early Cretaceous intrusive rocks (Gulei Peninsula); C— High-angle left-lateral shearing structures (Pingtan-Dongshan zone); D— High-angle left-lateral shearing structures (Pingtan-Dongshan zone); E—Basic dykes that intruded into insignificantly deformed granites (Pingtan-Dongshan zone); F—Lower-angle shearing structures in middle Cretaceous granites (Yongning)

造。混合岩中的长英质脉体发育,形态复杂,常见蛇曲状、石香肠状、网状和树枝状等,而且以中—低角度的脉体比较常见。野外露头尺度直接可见局部的片麻理和长英质脉发育不对称小褶皱。在各种变质岩的围岩(片麻状花岗岩)中也可以观察到中—低角度的韧性剪切构造。这些片麻状花岗岩中的长石呈眼球状、透镜状定向排列的变形斑晶;石英呈条带状、拔丝状、网状定向,显示塑性条件下的流变特征。这些可能是中地壳层次发生减压熔融和大规模剪切变形的记录。

3.3 早白垩世高角度左行韧性剪切构造

据野外观测,长乐—南澳带发育一期高角度左行韧性剪切构造(图 4-C,D)。在莆田市的滨海地区(如:文甲、山柄和山亭)可见长英质糜棱岩,其中的剪切面走向变化于 NE 45°~55°,倾角变化于 75°~90°。XY 剪切面上的线理倾伏向为 225°~235°或反转为 45°~55°,倾伏角介于 0°~10°,不对称构造在露头尺度和显微尺度均指示左行剪切(图 4-C)。该韧性剪切带的野外出露宽度>50 m,两侧边界全

部隐伏于新近系盖层或海平面以下(图 4-D)。据此笔者推断:该剪切带的实际宽度>100 m。据野外构造关系和同位素测年结果,这些高角度走滑剪切构造的发育时间为早白垩世早期,与第一期低角度剪切构造发育的时间大体一致。因为它们都切过早白垩世的火山—岩浆岩,同时又被未变形的早白垩岩体(脉)侵入(图 1, 4-A~F)。由于这期高角度走滑剪切构造在长乐—南澳带的多数基岩露头不发育,因此,它们是否可以作为该构造带的“最主要”构造值得进一步研究。

由于缺乏高精度的年代学和系统的构造地质学研究,前人对长乐—南澳带的地质演化和基本构造属性持有多种不同的观点^[1,14-24,26-31]。其中,影响较广的是“陆缘剪切带”模式^[24,41]。因此,长乐—南澳带通常又被称为“长乐—南澳剪切带”^[24,30-31,41]。这条陆缘构造带与华南其他构造带中的左行剪切构造通常被认为“是古太平洋板块在早白垩世早期相对东亚大陆朝 NE 方向俯冲和平移的记录”^[24]。与这些左行走滑剪切构造有关,一些学者认为,长乐—南澳带是一个

“以左行走滑为主的大型陆缘剪切带”,而且“其中的岩浆、构造和变质作用均与这一走滑剪切带的形成与发育有关”^[24]。但以下事实并不完全支持这种认识:(1)长乐—南澳带的混合岩、同构造岩浆岩和角闪岩相变质岩主要出露在该断裂的东南侧(平潭—东山带);(2)长乐—南澳断裂两侧的构造特征、岩石组合、变质作用和变形程度存在显著差别;(3)长乐—南澳断裂两侧地质体(平潭—东山带和福清—云霄带)中的高角度走滑构造不是很发育。其实,高角度左行剪切构造不仅出现在长乐—南澳带,而且也出现在秦岭—大别—苏鲁带和其他构造带^[24]。问题的关键是:左行剪切是否可以代表这一陆缘构造带的本质?以及能否把一个宽度为40~60 km的构造带确定为“一条陆缘剪切带”?这显然有进一步商榷的必要。

3.4 多期陆缘岩浆作用和晚中生代两大岩浆旋回

Jahn et al.(1976)^[3]曾对平潭—东山带的花岗质岩石进行过比较系统的Rb-Sr等时线定年,并且认为所获的两期热事件((165±13) Ma和(120~90) Ma)与燕山期造山有关。早期的研究者把这条滨海杂岩带中那些强烈变形的“变质岩”称为“东山群”或“澳角群”,并且认为是一套以挤压片理化乃至超变质强混合交代之动力变质岩,变质时代介于早侏罗世和早白垩世之间^[1]。Tong and Tobisch(1996)^[24]对东山岛的一个强烈变形的花岗质岩体进行过单颗粒锆石U-Pb定年。由于来自这一岩体的锆石全都具有典型岩浆锆石特征,因而将所获的4颗锆石(147 Ma, 131 Ma, 123 Ma和123 Ma)的平均年龄解释为该岩体的侵位时间。Tong and Tobisch(1996)^[24]据此推断,所谓的东山群至少有一部分是白垩纪花岗岩。后来的年代学研究结果显示,华南陆缘经历过多期火山-岩浆作用,而且目前出露的多数(>80%)火成岩形成于140~120 Ma和110~80 Ma^[11,32-33,48-54],115~110 Ma是一个火山-岩浆活动低谷期^[47,51]。对各种岩石的单矿物(角闪石、白云母和黑云母)氩-氩年代学研究表明,平潭—东山带在白垩纪经历过两个阶段冷却(133~117 Ma和100~80 Ma)^[39-40]。但许多火成岩年龄(140~120 Ma和100~90 Ma)^[24-25,30-34,40]的地质意义并不十分明确。最近,冯艳芳等(2011)^[38]发现所谓的“东山群”或“澳角群”至少有一部分是经历过强烈改造的侏罗纪岩浆岩。

Cui et al(2012)基于系统的年代学研究认为华

南陆缘经历过多期岩浆作用:1827 Ma、764~730 Ma、637 Ma、461~410 Ma、347~313 Ma、285 Ma、251~207、202~196 Ma。其中,新元古代—早侏罗世岩浆事件与华南其他地区的岩浆事件基本一致(表1)。这些结果支持长乐—南澳带具有古-中元古代结晶基底,而且经历过与华南其他地区自新元古代以来相似的地质演化过程^[25]。

其实,中国沿海地区(包括长乐—南澳带)的两期侏罗纪火成岩(200~170 Ma, 165~145 Ma)^[25,32,38,53-56],与内陆地区的两期(200~170 Ma, 165~145 Ma)侏罗纪火成岩^[51,57-58]在形成时间上没有差别,难以用“华南中生代岩浆作用逐渐迁移”的假说来解释,也不支持所谓的“150~140 Ma 岩浆宁静期”^[11,51,53,57]。本文基于对现有地质资料的综合分析认为,华南晚中生代两期岩浆杂岩(165~145 Ma和110~100 Ma)、两期同构造岩浆岩(145~135 Ma和100 Ma)和两个岩浆活动高峰期(135~120 Ma和100~90 Ma)(含两期A型花岗岩和两期双峰式火成岩)是两个岩浆旋回(165~120 Ma和110~80 Ma)的产物,与华南晚中生代两个旋回的地壳收缩与伸展过程有关。

4 晚中生代陆缘造山的时间与阶段划分

平潭—东山带的变形岩石以晚侏罗世—早白垩世片麻状花岗岩为主,与造山作用密切相关的各种变质岩以角闪岩相包体赋存于同构造岩体内。部分副片麻岩的原岩是T₃-J陆相沉积岩(表1)。在区域上,这些T₃-J地层或被早白垩世岩体侵入,或不整合下伏于下白垩统之下。因此,长乐—南澳构造带经历第一期褶皱和变质(图3-C,D,E,F)的时间被限定在早侏罗梨山组形成之后到未变形花岗岩侵位之前(图1)。由于华南在侏罗纪早期(200~170 Ma)处于印支造山后的伸展阶段(A型花岗岩、双峰式火山岩、伸展盆地和海侵事件)^[11,61],所以,晚中生代第一期褶皱和变质可能发生在170 Ma之后。同时,平潭—东山带的多数同构造花岗岩形成于153~136 Ma(表1)。侵入其中的一部分未变形岩体/脉形成于132~117 Ma。这两期岩浆岩把同构造—岩浆作用向后构造岩浆作用的转换时间限定在136~132 Ma(表1)。白垩纪两套火山岩之间的区域性角度不整合将“第二期”地壳收缩增厚过程限定于下白垩统南缘组火山岩(145~120)形成之后和上白垩统石帽山群

(100~80 Ma)形成之前。同时,考虑到研究区发育100 Ma的同构造花岗岩(PD20-2)(图4-F)和两期变质作用^[29],本文认为华南陆缘在晚中生代经历两旋回地壳收缩与伸展的时限是比较清楚的。

5 晚中生代陆缘造山与陆内构造的关系

平潭—东山带的多数变形岩石为片麻状花岗岩。以前一直认为这些岩石是 T_3 - J_1 的动力变质岩^[129],但笔者详细的野外调研和系统的锆石U-Pb定年结果证明该构造带的多数变形岩石是晚侏罗世—早白垩世早期侵位的同构造花岗岩^[29]。平潭—东山带发育的少量正片麻岩、副片麻岩、石榴斜长角闪岩、斜长角闪岩、石英岩等估计是这些同构造花岗岩在形成和侵位过程中捕获的围岩。这些同构造花岗岩总体呈条带状沿华南陆缘延伸方向展布(图1),其内部的变质包体发生过强烈的固态流变和透入性混合岩化(图2-C,D,E)。在东山岛,一个较大的地层包体中可以观察到紧闭同斜褶皱(图3-E,F)。褶皱轴面高角度($>65^\circ$)倾向SE方向,褶皱枢纽低角度($<10^\circ$)朝SW或NE方向倾伏。褶皱轴面理上的矿物线理的倾伏方向与褶皱枢纽方向一致。对来自这一变质包体的碎屑锆石进行锆石U-Pb定年的结果表明,其中最年轻的岩浆锆石形成于侏罗纪早期(未发表)。这些说明东山岛的 T_3 - J_1 地层可能是在经历了NW-SE向挤压、褶皱和变质之后被同构造岩体俘获的。同时,对东山岛及其邻区的同构造花岗岩(147~136 Ma)的研究结果也支持这种认识。例如,位于礁头村附近(201省道旁)的一个晚侏罗世岩体(PD30-1)具有透入性混合岩化特征(图2-B),暗色矿物(黑云母和角闪石)明显定向,矿物生长线理的优势方位为NE-SW,但该岩体中的构造面理并不发育。显微镜下观察,该岩体的多数石英发生了亚颗粒化和动态重结晶,长石发生过塑性变形。阴极发光图像显示,来自这一岩体的多数锆石具有良好的韵律环带,而且有核-边分区现象。测年结果表明,部分锆石颗粒的核部和边部存在明显的年龄差(>10 Ma),估计是重结晶的结果。该岩体中定向的暗色矿物指示NW-SE向流变,估计是晚侏罗世—早白垩世早期NE-SW向挤压作用的结果。考虑到长乐—南澳带的高角度左行走滑剪切构造,笔者认为平潭—东山带的构造应力场在早白垩世早期可能经

历过由NW-SE向挤压向NW-SE向伸展兼具NE-SW向走滑的转变。

平潭—东山带的多数片麻状花岗岩年龄(147~136 Ma)与区域混合岩化的时间(146~135 Ma)一致(表1),比未变形的早白垩世岩体侵位时间(132~117 Ma)略早。这些证据表明,这套片麻状花岗岩的形成与侵位可能与平潭—东山带普遍发育的混合岩化及“第一期”(约135 Ma)低角度韧性剪切构造,共同记录了华南陆缘地壳在早白垩世发生的减压熔融和构造抬升过程。也就是说,平潭—东山带 T_3 - J_1 含煤地层在侏罗纪晚期被挤入到中地壳深度(甚至更深?)发生变质和变形,随后在早白垩世早期(147~136 Ma)与其他时代的岩石一起发生构造折返。其间,发生了大规模的同构造岩浆作用、区域性混合岩化、同构造变形和退变质作用。最后这些岩石被早白垩世中期(132~117 Ma)的岩浆岩侵入或俘获。

由于平潭—东山带的角闪岩相变质岩、深成侵入岩、韧性剪切构造和混合岩均形成于地下 >10 km的深度范围,所以这些岩石与构造的出露过程很可能伴随着华南陆缘地壳的大幅(>10 km)减薄。与此形成鲜明对比的是:位于长乐—南澳断裂西北侧的福清—云霄带不仅缺少同构造岩浆岩和混合岩,而且 T_3 - J_1 地层的变质程度只达到低绿片岩相(图3-C,D)。目前,这两个特征迥异的长条状地质体以长乐—南澳断裂为界并置于同一地壳深度(地表),说明长乐—南澳断裂在调节这种差异性抬升的过程中发挥了重要作用。

区域地质资料显示华南在晚中生代经历过陆内挤压(造山)。主要证据包括:(1)晚三叠世—中侏罗世(T_3 - J_2)陆相地层中的逆冲、褶皱和局部变质;(2)下白垩统之下的区域性角度不整合;(3)侏罗纪(200~145 Ma)多数($>80\%$)岩体的侵位时间是165~150 Ma。这些晚侏罗(165~150 Ma)岩浆杂岩包括一些标志地壳增厚的强过铝质(S-型)花岗岩;(4)从区域范围看,印支期构造体系被燕山期构造体系所叠加、改造和替代的过程中,卷入的最新地层为中—下侏罗统。这些侏罗纪地层往往被逆冲和压盖于前中生代地层之上;(5)晚侏罗—早白垩世(J_3 - K_1)造山形成了广泛的 J_3 - K_1 磨拉石建造;(6)沿亚洲大陆东南缘在 J_3 - K_1 形成了一条长达约6 000 km的增生杂岩带^[5-7,32,47-49,57,62-72]。

上述证据表明华南晚中生代陆缘造山与陆内挤

压(造山)过程是基本一致的,说明它们可能受控于相同的动力学机制。由于晚中生代岩浆、变质和变形作用的强度具有由陆缘朝陆内方向减弱的趋势,所以陆内挤压(造山)的动力可能来自陆缘。由于晚中生代构造-热事件在陆缘和陆内没有明显时差,所以同一地质过程在其作用范围内可能具有“准同时性”或“可比性”(图 5)。

6 晚中生代陆缘造山的动力学分析

区域地质资料显示,华南侏罗纪早期(200~170 Ma)的伸展和海侵与潘吉亚(Pangea)早期裂解(200~170 Ma)造成的全球性伸展和海侵^[80-82]是一致

的。同时,太平洋板块也是在侏罗纪早期(200~170 Ma)诞生于三个古大洋板块(Izanagi、Farallon 和 Phoenix)的交会处(RRR)^[81-84]。伴随着这一新生大洋板块的生长和扩张,其周缘的洋中脊、大洋玄武岩高原和陆壳碎片等“地质体”不断被推向周围的海沟俯冲带^[82]。当这些“地质体”来到海沟俯冲带时,不仅会阻碍(影响)大洋板块的消减速度,还会改变俯冲板片消减的角度、方向和其他构造因素^[85]。洋中脊的扩张作用在克服这些“阻力”时会挤压陆缘。陆缘会因此而发生增厚和造山。同时,陆缘的挤压应力被迅速传入陆内,引起陆内地壳收缩、增厚和熔融(陆内造山)^[86-87]。当这些“难俯冲地质体”潜没于地幔或与

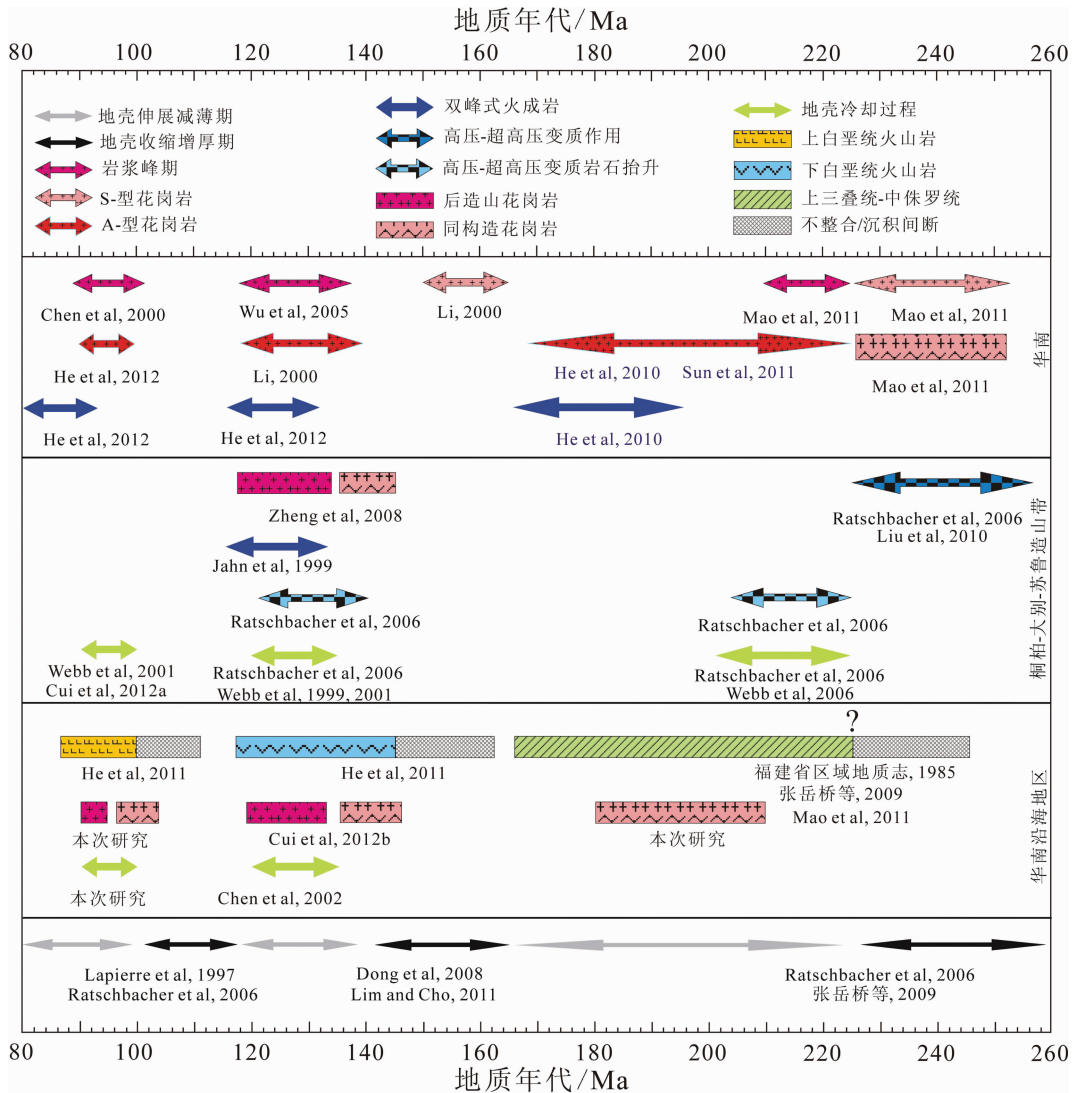


图 5 华南中生代构造、沉积、岩浆作用和“大陆地壳的三个旋回收缩与伸展”

Fig.5 Mesozoic tectonics, sedimentary, magmatism, and the “three cycles of continental crust contraction and extension” in Southeast China

大洋板块之间发生解耦而拼贴于陆缘之后,大洋板块的消减会逐渐恢复正常。陆缘所受挤压应力也随之减小。陆缘减压则会导致增厚大陆地壳的熔融和剪切变形。这或许是环太平洋地区晚中生代造山^[2-3,7,47-49,64-72,88]的动力学机制。

另外三个值得注意的关系是:其一,太平洋板块扩张的“低谷期”(165~135 Ma)^[81-82]与环太平洋地区晚中生代主造山期(165~135 Ma)^[68,72,88]一致;其二,华南早白垩伸展(135~120 Ma)和岩浆高峰期(135~120 Ma)与南大西洋打开(135~120 Ma)的时间一致^[89];其三,华南晚白垩伸展(100~80 Ma)和岩浆高峰期(100~90 Ma)与冈瓦纳大陆的最终裂解过程(100~90 Ma)同步^[89]。笔者认为华南侏罗—白垩纪构造与岩浆作用可能是对潘吉亚(Pangea)超大陆裂解过程的响应。如果这些认识成立,华南晚二叠—三叠纪造山(印支运动)就可能是 Pangea 聚合过程的表现。

7 中生代岩浆作用的成因机制与时空过程分析

华南中生代岩浆作用的成因机制和时空演化过程一直是地质学界激烈争论的重大科学问题^[3-4, 11,32,45-55,57-58,70,73-76]。多数研究者认为中国沿海侏罗—白垩纪岩浆作用与古太平洋板块朝欧亚大陆下的俯冲作用有关^[3-4,45,54,73,75-76]。例如,Zhou and Li(2000)^[50]认为:华南侏罗—白垩纪岩浆作用具有由陆内朝陆缘方向迁移的特征,是古太平洋板块俯冲角度随时间发生变化的表现。Li and Li(2007)^[11]认为华南印支期岩浆作用发生在 265~190 Ma,而且印支期岩浆岩具有“由陆缘朝陆内逐渐变年轻的特征”。其原因“是古大洋板块在 265~190 Ma 发生过平俯冲和印支期造山作用由陆缘朝陆内迁移”。该模型认为华南 190~155 Ma 的岩浆作用是古太平洋板块在平俯冲后发生拆沉的表现。“华南晚中生代岩浆作用由陆内朝陆缘方向迁移”被解释为“俯冲带在 150 Ma 前后发生了朝大洋方向的跃迁”^[11]。同时,也有学者认为华南的岩浆作用具有多旋回特征,并且与印支期造山、早燕山期造山和晚燕山期造山相关^[15,32,70]。

对华南“侏罗—白垩纪火成岩总体呈现由陆内朝陆缘方向变年轻的趋势^[32,38,50,53-56]”也有不同认识。一种观点认为侏罗纪岩浆作用发生在内陆,因此,沿海地区缺少侏罗纪火成岩^[11,50-51,53,58];另一种观点认为沿海地区的侏罗纪火成岩在后期被改造、剥蚀或者

被覆盖^[25]。值得注意的是:(1)沿海地区(台湾、香港、广东、福建和浙江)近几年也发现了许多侏罗纪火成岩;(2)长乐—南澳带与桐柏—大别—苏鲁带虽然相距较远,但它们在白垩纪的构造、岩浆和冷却过程却比较相似^[25,40,46-49,90-92,93-97]; (3)华南内陆 110~80 Ma 的火山—岩浆岩比较少。这些说明华南晚中生代第一旋回(165~120 Ma)构造—岩浆作用影响到陆内>1000 km 的地方,第二旋回构造—岩浆作用(110~80 Ma)的影响范围比较小。

总之,本文把华南晚中生代(165~80 Ma)构造过程概括为两个构造旋回(165~120 Ma 和 115~80 Ma)。每个构造旋回包括一期地壳收缩增厚过程和随后发生的伸展减薄过程(图 5,6)。华南陆缘晚中生代造山、造山带垮塌和软流圈上涌等地质过程可能是同期洋—陆相互作用和壳—幔相互作用(拆沉、底侵和软流圈波动)的综合表现。它们共同控制了这一时期(165~80 Ma)的两个岩浆旋回(165~120 Ma 和 110~80 Ma)(图 6)。多数研究者认为,古太平洋板块在晚中生代不同时期的消减对华南陆缘施加作用的强度和方向是不同的^[68,70,99-101,105],这或许是华南晚中生代两个岩浆旋回作用范围不同的重要因素。这些初步的认识是否正确尚需今后实践的检验。

8 结 论

(1)平潭—东山带的主体可能不是前人认为的 T₃-J 动力变质岩,而是经过多期构造变形的晚中生代杂岩。其中,白垩纪花岗岩是各种岩石的主体,早白垩世早期的同构造花岗岩是各种变形岩石的主体。白垩纪构造变形主要发生在 145~135 Ma,其次是(100±10)Ma。在这一杂岩带中,变质和褶皱的晚三叠世—侏罗纪早期的陆相沉积岩常以角闪岩相包体的形式赋存于早白垩岩体中,并且与围岩发生过同构造变形和混合岩化。

(2)华南陆缘在侏罗纪晚期—早白垩世早期经历过安第斯型造山的主要证据包括:上三叠统大坑组和下侏罗统梨山组的褶皱和变质,晚侏罗世—早白垩世早期(153~135 Ma)的同构造岩浆作用、混合岩化作用、低角度韧性剪切构造及下白垩统南园组之下的区域性角度不整合。其中,早白垩同构造岩浆作用和区域性混合岩化是同造山晚期增厚地壳发生减压熔融和同构造剪切流变的记录。这些特征可能是 T₃-J 陆相沉积岩在侏罗纪晚期经历了褶皱变形

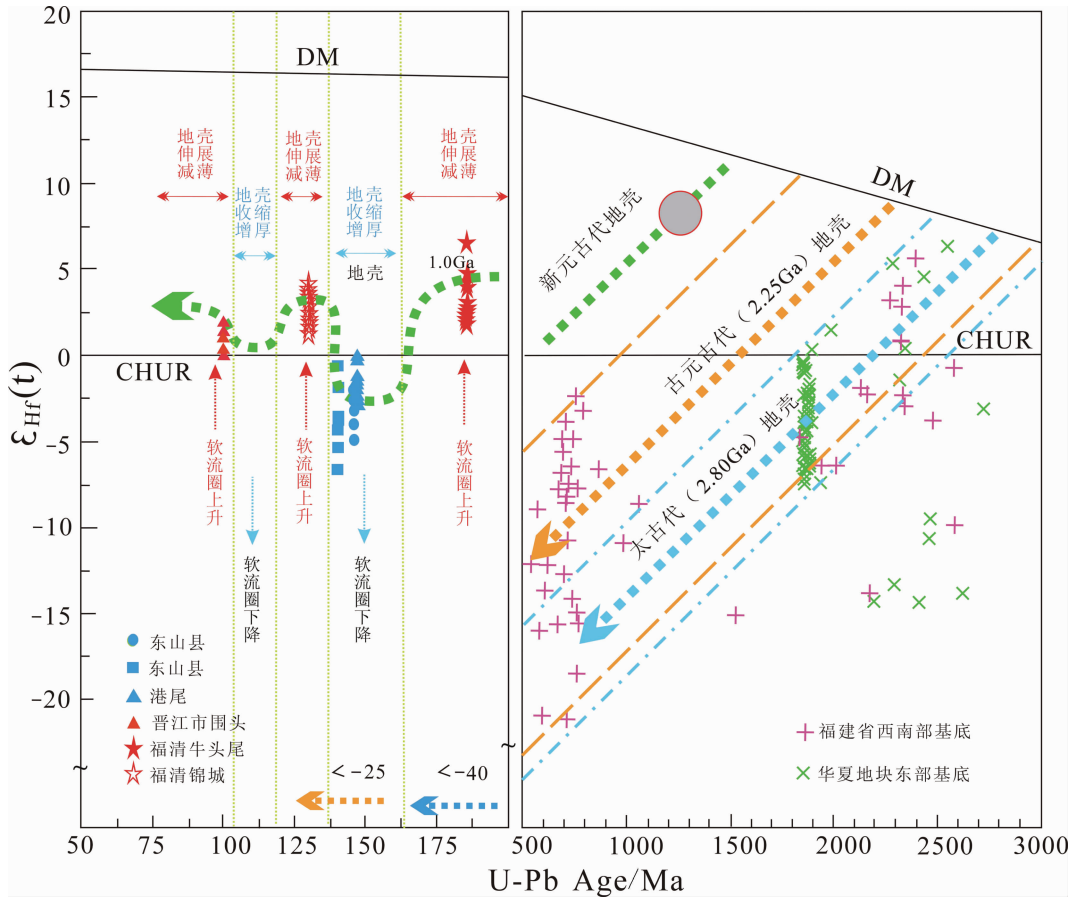


图 6 福建沿海变质岩和岩浆岩锆石的铪同位素特征(据 Yu et al., 2005, 2009, 2010^[102-104]; Liu et al., 2012^[105])
 Fig.6 Hf isotopic compositions of zircons from metamorphic and magmatic rocks in the coastal areas of Fujian Province
 (modified after Yu et al., 2005, 2009, 2010^[102-104]; Liu et al., 2012^[105])

和进变质之后, 与造山带深部物质一同向近地表折返过程的记录。对这些构造-热事件的研究表明, 被挤压到中地壳深度的侏罗纪变质岩的抬升过程主要发生在早白垩世早期。在这一过程中, 侏罗纪变质岩不仅与同造山期岩浆岩一起发生了构造变形, 而且还经历了不同程度的部分熔融。后造山 (135~120 Ma) 伸展的表现是: 135~120 Ma 的双峰式火成岩、135~120 Ma 的 A-型花岗岩、135~120 Ma 的岩浆峰期和早白垩伸展/拉分盆地。

(3) 华南陆缘在白垩纪中期受古大洋板块挤压发生收缩和增厚的证据包括: 下白垩统南园组的褶皱与变质、110~100 Ma 的火山-岩浆杂岩和上白垩统石帽山群 (100~80 Ma) 之下的区域性角度不整合。华南陆缘地壳在晚白垩世初期减压熔融和伸展减薄的表现是: 100~90 Ma 的岩浆峰期, 100~90 Ma 的快速冷却过程、100~90 Ma 的 A-型花岗岩以及 90~80 Ma 的双峰式火成岩和晚白垩世伸展盆地。

(4) 华南陆缘在晚中生代 (165~80 Ma) 经历过两个旋回的收缩增厚和伸展减薄过程。这可能是华南晚中生代两个岩浆旋回 (165~120 Ma 和 110~80 Ma)、两期褶皱、两期变质、两个岩浆高峰期 (135~120 Ma 和 100~90 Ma)、两期同构造岩浆作用、两期伸展、两期冷却、两个区域性角度不整合形成和发育的原因。从根本上讲, 应该是华南陆缘在晚中生代受古大洋板块两期挤压 (造山) 的结果和表现。其中, 第二旋回 (115~80 Ma) 地壳收缩与伸展过程的持续时间较短, 强度较弱, 影响范围也比较小。

(5) 华南陆缘与内陆其他地区具有同样复杂的地质演化历史, 经历过早前寒武-晚中生代多期构造-岩浆作用 (包括侏罗纪岩浆作用)。白垩纪以前的火成岩现今在沿海地区出露较少的主要原因是后期强烈的改造和大面积白垩纪火山岩的覆盖。

致谢: 南京大学地质学系的舒良树教授对本文存在的问题给予了指导和建议, 同时还提出了重要的

修改意见。野外工作得到福建省地质调查院聂童春等多位同志的大力协助,中国地质科学院地质研究所刘敦一研究员及技术人员顾炳强、孙桂英和董春燕等的支持与帮助,样品测试和数据处理过程中西北大学大陆动力学国家重点实验室的柳晓明老师、第五春荣老师、长安大学资源学院的李佐臣老师、张晓飞硕士、陈有幸硕士等给予了有益的指导与帮助,一并深致谢忱。

参考文献 (References):

- [1] 福建省地质矿产局. 福建省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1985.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Fujian Province. Regional Geology of Fujian Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985(in Chinese with English abstract).
- [2] Jahn Bor-ming. Mesozoic thermal events in southeast China [J]. Nature, 1974, 248:480-483.
- [3] Jahn Bor-ming, Chen P Y, Yen T P, Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance [J]. Geological Society of America Bulletin, 1976, 86:763-776.
- [4] Jahn Bor-ming, Zhou X H, Li J L, Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints [J]. Tectonophysics, 1990, 183:145-160.
- [5] Maruyama S, Liu J G, Seno T. Mesozoic and Cenozoic evolution of Asia [C]// Ben-Avraham, Z (ed.). Evolution of the Pacific Ocean margins [M]. New York: Oxford University Press, 1989:75-99.
- [6] Maruyama S. Pacific-type orogeny revisited; Miyashiro-type orogeny proposed [J]. The Island Arc, 1997, 6:91-120.
- [7] Izozaki Y. Jurassic accretion tectonics of Japan [J]. Island Arc, 1997, 6:25-51.
- [8] Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, et al. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233:103-119.
- [9] Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, et al. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island [J]. The Journal of Geology, 2006, 114:341-353.
- [10] Ren Jianye, Tamaki K, Li Sitian, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas [J]. Tectonophysics, 2002, 344:175-205.
- [11] Li Zhengxiang, Li Xianhua, Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. Geology, 2007, 35:179-182.
- [12] Park Y S, Kim S W, Kee W S, et al. Middle Jurassic tectonic-magmatic evolution in the southwestern margin of the Gyeonggi Massif, South Korea [J]. The Association of Korean Geoscience Societies and Springer, 2009, 13:217-231.
- [13] Kee W S, Kim S W, Jeong Y J, et al. Characteristics of Jurassic continental arc magmatism in South Korea: Tectonic Implications [J]. The Journal of Geology, 2010, 118:305-323.
- [14] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 西太平洋中-新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化 [J]. 地质学报, 1983, 56 (1):11-21.
Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. On the formation and evolution of the Mesozoic and Cenozoic activity continental margin and island arc tectonic of the West Pacific Ocean [J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 56 (1):11-21 (in Chinese with English abstract).
- [15] 任纪舜, 陈廷愚, 刘志刚. 中国东部构造单元划分的几个问题 [J]. 地质论评, 1984, 30 (4):382-385.
Ren Jishun, Chen Tingyu, Liu Zhigang. Some problems on the division of tectonic units in eastern China [J]. Geological Review, 1984, 30 (4):382-385(in Chinese with English abstract).
- [16] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿 [M]. 北京:科学出版社, 1990.
Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui, et al. Tectonic Evolution of the Continental Lithosphere and Metallogeny in Eastern China and Adjacent Areas [M]. Beijing: Science Press, 1990 (in Chinese with English abstract).
- [17] 徐嘉炜, 崔可锐, 刘庆, 等. 东亚大陆边缘中生代的左行平移断裂作用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5 (2):51-63.
Xu Jiawei, Cui Kerui, Liu Qing, et al. Mesozoic sinistral transcurrent faulting along the continent margin in the East Asia [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1985, 5 (2):51-63 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李继亮, 何海清, 杨美芳, 等. 福建沿海中生代蛇绿混杂岩带的构造特点 [C] // 李继亮. 东南岩石圈结构与地质演化. 北京:冶金工业出版社, 1993:199-205.
Li Jiliang, He Haiqing, Yang Meifang, et al. Structure characteristics of the Mesozoic ophiolitic melange belt in coastal of Fujian [C] // Li Jiliang. Lithosphere Structure of Southeastern China and Tectonic Evolution. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993:199-205 (in Chinese with English abstract).
- [19] Zhu G, Xu J W, Gao D L, et al. Structural characteristics and deformation of the Changle-Nanao megashear zone along the southeast China [C] / / Gao J W (ed.). The Tancheng-Lujiang Wrench Fault System [J]. Wiley, Chichester, 1993:201-209.
- [20] 高俊, 张建新, 王荃. 福建长乐—东山构造带的变形特征及动力学研究 [J]. 地质论评, 1993, 39 (1):57-63.
Gao Jun, Zhang Jianxin, Wang Quan. Dynamics and deformation features of the Changle-Dongshan structural zone in Fujian Province [J]. Geological Review, 1993, 39 (1):57-63 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王志洪, 卢华复, 贾东. 长乐—南澳韧性剪切带中糜棱岩变形微构造研究 [J]. 地质科学, 1995, 30 (1):85-97.
Wang Zhihong, Lu Huafu, Jia Dong. Deformation microstructure of the mylonites in Changle-Nan'ao ductile shear zone [J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, 30 (1):85-97 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [22] 王志洪, 卢华复. 长乐—南澳韧性剪切带 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学研究 [J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27 (4): 294–299.
Wang Zhihong, Lu Huaifu. Study on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of Changle–Nan’ao ductile shear zone [J]. Science in China(Series D), 1997, 27 (4):294–299 (in Chinese with English abstract).
- [23] 孔华, 袁奎荣, 郭福祥. 福建长乐—南澳变质带演化的 PTtd 轨迹 [J]. 桂林工学院学报, 1996, 16 (4):19–25.
Kong Hua, Yuan Kuirong, Guo Fuxiang. Evolution’s PTtd path of Changle–Nan’ao metamorphic zone of Fujian [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1996, 16 (1):19–25 (in Chinese with English abstract).
- [24] Tong W X, Tobisch O T. Deformation of granitoid plutons in the Dongshan area, Southeast China; constrains on the physical conditions and timing of movement along the Changle–Nanao shear zone [J]. Tectonophysics, 1996, 267:303–316.
- [25] Cui Jianjun, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, et al. Zircon U–Pb geochronology of the Mesozoic metamorphic rocks and granitoids in the coastal tectonic zone of SE China: constraints on the timing of Late Mesozoic orogeny [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 2012b doi: 10.1016/j.jseae.2012.09.014.
- [26] Yui T F, Heaman L, Lan C Y. U–Pb and Sr isotopic studies on granitoids from Taiwan and Chinman–Liej and their tectonic implications [J]. Tectonophysics, 1996, 263:61–76.
- [27] Wang Zhihong, Lu Huaifu. Evidence and dynamics for the change of the strike–slip direction of the Changle–Nan’ao ductile shear zone, Southeastern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1997, 15 (6): 507–515.
- [28] 陈斌. 福建平潭—东山变质带夕线石榴云母片岩中两期变质作用的岩相学证据及其构造意义 [J]. 岩石学报, 1997, 13 (3): 380–393.
Chen Bin. Petrographic evidence and tectonic significance for two phase metamorphism in sillimanite – and garnet–bearing mica schist of Pingtan–Dongshan metamorphic zone of eastern Fujian, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1997, 13 (3):380–393(in Chinese with English abstract).
- [29] 舒良树, 于津海, 王德滋. 长乐—南澳断裂带晚中生代岩浆活动与变质—变形关系 [J]. 高校地质学报, 2000, 6 (3):368–377.
Shu Liangshu, Yu Jinhai, Wang Dezi. Late Mesozoic granitic magmatism and its relation to metamorphism–ductile deformation in Changle–Nan’ao fault zone, Fujian Province [J]. Geological Journal of China University, 2000, 6 (3):368–377 (in Chinese with English abstract).
- [30] 石建基, 张守志. 长乐—南澳断裂带中生代活动特征及大地构造属性 [J]. 吉林大学报(地球科学版), 2010, 40 (6):1333–1343.
Shi Jianji, Zhang Shouzhi. Characters of the Mesozoic tectonic activity and geotectonic setting of the Changle–Nan’ao fault zone [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40 (6):1333–1343 (in Chinese with English abstract).
- [31] 邢光福, 卢清地, 姜杨, 等. 闽东南长乐—南澳断裂带“片麻状”浆混杂岩的厘定及其地质意义 [J]. 地质通报, 2010, 29 (1):31–43.
Xing Guangfu, Lu Qingdi, Jiang Yang, et al. Identification and significance of “gneissic” magma–mixed complex in the Changle–Nan’ao fault zone, southeastern Fujian, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29 (1):31–43 (in Chinese with English abstract).
- [32] 邢光福, 卢清地, 陈荣, 等. 华南晚中生代构造体制转折时限研究—兼与华北燕山地区对比 [J]. 地质学报, 2008, 82 (4): 451–463.
Xing Guangfu, Lu Qingdi, Chen Rong, et al. 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, 2008, 82 (4):451–463 (in Chinese with English abstract).
- [33] 董传万, 张登荣, 徐夕生, 等. 福建晋江中—基性岩墙群的锆石 SHRIMP U–Pb 定年和岩石地球化学 [J]. 岩石学报, 2006, 22 (6):1696–1702.
Dong Chuanwan, Zhang Dengrong, Xu Xisheng, et al. SHRIMP U–Pb dating and litho geochemistry of basic–intermediate dike swarms from Jinjiang, Fujian Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22:1696–1702 (in Chinese with English abstract).
- [34] 邱检生, 肖娥, 胡建. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U–Pb 年代学、地球化学和 Nd–Hf 同位素制约 [J]. 岩石学报, 2008, 24 (11):2468–2484.
Qiu Jiansheng, Xiao Er, Hu Jian, et al. Petrogenesis of highly fractionated I–type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Nd–Hf isotopes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (11):2468–2484 (in Chinese with English abstract).
- [35] 王非, 杨列坤, 王磊, 等. 中国东南晚中生代火山沉积地层界线时代— $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及磁性地层研究 [J]. 中国科学(D 辑), 2010, 40 (11):1552–1570.
Wang Fei, Yang Liekun, Wang Lei, et al. The boundary ages of the late Mesozoic volcanic–sedimentary strata on South China: Constrains from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and paleomagnetism [J]. Science in China(Ser.D), 2010, 40:1552–1570(in Chinese).
- [36] 董传万, 周新民, 李惠民, 等. 闽东南晚中生代壳幔作用: 平潭火成杂岩的同位素证据 [J]. 科学通报, 1997, 42 (9):959–962.
Dong Chuanwan, Zhou Xinmin, Li Huimin, et al. Isotopic evidence of the Late Mesozoic crust–mantle interaction in Pingtan igneous complex, southeastern Fujian [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42 (9):959–962 (in Chinese).
- [37] 邹和平, 王建华, 丘元禧. 广东南澳和莲花山韧性剪切带 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义 [J]. 地球学报, 2000, 21 (4):356–364.
Zou Heping, Wang Jianhua, Qiu Yuanxi. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Nan’ao shear zone and the Lianhuashan shear zone in Guangdong Province and their significance [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 21 (4):356–364 (in Chinese with English abstract).
- [38] 冯艳芳, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 福建东山县澳角村澳角群花岗岩质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, 2011, 38 (1):103-108.
- Feng Yanfang, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, et al. 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*, 2011, 38:103-108 (in Chinese with English abstract).
- [39] Chen Wenshan, Yang H C, Wang Xin, et al. 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*, 2002, 20:829-840.
- [40] 李武显, 周新民, 李献华. 长乐-南澳断裂带变形火成岩的 U-Pb 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 [J]. *地质科学*, 2003, 38 (1):22-30.
- Li Wuxian, Zhou Xinmin, Li Xianhua. U-Pb and $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ datings of deformed igneous rocks from the Changle-Nanao fault [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38 (1):22-33 (in Chinese with English abstract).
- [41] 肖诗兴. 闽-粤东南沿海大陆边缘韧性剪切带的基本特征 [J]. *现代地质*, 1988, 2 (1):67-80.
- Xiao Shixing. Characteristics of the ductile shear zone along South-Eastern coast continental margin of China in Fujian-Guangdong [J]. *Geosciences*, 1988, 2 (1):67-80 (in Chinese with English abstract).
- [42] 卢华复, 贾东, 郭令智, 等. 闽台微大陆的组成与碰撞史 [C] // 李继亮. 东南岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 1993:12-29.
- Lu Huaifu, Jia Dong, Guo Lingzhi, et al. The composition and collision history of Fujian-Taiwan microcontinent [C] // Li Jiliang. *Lithosphere Structure of Southeastern China and Tectonic Evolution*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993:12-29 (in Chinese with English abstract).
- [43] 郭福祥, 袁奎荣. 长乐-南澳变质带形成的大地构造背景及变质幕 [J]. *桂林工学院学报*, 1996, 16 (2):102-108.
- Guo Fuxiang, Yuan Kuirong. Geotectonic background and metamorphic phases of the formation of Changle-Nan'ao metamorphic zone [J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 1996, 16 (2):102-108 (in Chinese with English abstract).
- [44] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 华南中生代大地构造研究新进展 [J]. *地球学报*, 2012, 33 (3):257-279.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, et al. The new progress in the study of Mesozoic tectonic of south China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33 (3): 257-279 (in Chinese with English abstract).
- [45] Lapierre H, Jahn Bor-ming, Charvet J, et al. Mesozoic magmatism in Zhejiang Province and its relation with the tectonic activities in SE China [J]. *Tectonophysics*, 1997, 274:321-338.
- [46] Chen Chenghong, Lin W, Lu H Y, et al. Cretaceous fractionated I-type granitoids and metaluminous A-type granites in SE China: the Late Yanshanian post-orogenic magmatism [J]. *GSA Special Papers* 2000, 350:195-205.
- [47] Chen Chenghong, Lin W, Lan Chingying, et al. Geochemical, Sr and Nd isotopic characteristics and tectonic implications for three stages of igneous rock in the Late Yanshanian (Cretaceous) orogeny, SE China. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh [J]*. *Earth Sciences*, 2004, 95:237-248.
- [48] Chen Chenghong, Lee C Y, Shinjo R. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China?: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts [J]. *Lithos*, 2008, 106:83-92.
- [49] Chen Chenghong, Lee C Y, Lu H Y, et al. Generation of Late Cretaceous silicic rocks in SE China: Age, major element and numerical simulation constraints [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31, 479-498.
- [50] Zhou Xinmin, Li Wuxian. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326:269-287.
- [51] Li Xianhua, Li Wuxian, Wang Xuance, et al. 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*, 2010, 119:427-438.
- [52] He Zhenyu, Xu Xisheng. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction [J]. *Chemical Geology*, 2012, 328 (18):208-221.
- [53] Li Zhengxiang, Li Xianhua, Chung Sunlin, et al. 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 [J]. *Tectonophysics*, 2012, 532-535:271-290.
- [54] Sewell R J, Davis D W, Campbell S D G. High precision U-Pb zircon ages for Mesozoic igneous rocks from Hong Kong [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 2012, 43:164-175.
- [55] Davis D W, Sewell R J, Campbell S D G. U-Pb dating of Mesozoic igneous rocks from Hong Kong [J]. *Journal of the Geological Society (London)*, 1997, 154:1067-1076.
- [56] 陈荣, 邢光福, 杨祝良, 等. 浙东南英安质火山岩早侏罗世锆石 SHRIMP 年龄的首获及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2007, 53 (1): 31-35.
- Chen Rong, Xing Guangfu, Yang Zhuliang, et al. Early Jurassic zircon SHRIMP U-Pb age of the dacitic volcanic rocks in the southeastern Zhejiang Province determined firstly and its geological significances [J]. *Geological Review*, 2007, 53 (1):31-35 (in Chinese with English abstract).
- [57] Li Xianhua. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18:293-305.
- [58] Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, et al. 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*, 2007, 96:186–204.
- [59] Wong Jean, Sun Min, Xing Guangfu, et al. Geochemical and zircon U–Pb and Hf isotopic study of the Baijuhuajian metaluminous A–type granite: Extension at 125–100 Ma and its tectonic significance for South China [J]. *Lithos*, 2009, 112:289–305.
- [60] 邢光福, 陈荣, 杨祝良, 等. 东南沿海晚白至世火山岩浆活动特征及其构造背景[J]. *岩石学报*, 2009, 25 (1):77–91.
Xing Guangfu, Chen Rong, Yang Zhuliang, et al. Characteristics and tectonic setting of Late Cretaceous volcanic magmatism in the coastal Southeast China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 25 (1): 77–91(in Chinese with English abstract).
- [61] He Zhenyu, Xu Xisheng, Niu Yaoling. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite–syenite–gabbro association from inland South China [J]. *Lithos*, 2010, 119:621–641.
- [62] Kimura G. Cretaceous episodic growth of the Japanese Islands [J]. *The Island Arc*, 1997, 6:52–68.
- [63] Chen A. Mirror thrusting in the south China orogenic belt: Tectonic evidence from western Fujian, southeastern China [J]. *Tectonophysics*, 1999, 305:497–519.
- [64] Chough S K, Kwon S T, Ree J H, et al. Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view [J]. *Earth–Science Review*, 2000, 52:175–235.
- [65] 董树文, 胡健民, 李三忠, 等. 大别山侏罗纪变形及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2005,21 (4):1189–1194.
Dong Shuwen, Hu Jianmin, Li Sanzhong, et al. The Jurassic deformation in the Dabie Mountains and its tectonic significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21 (4):1189–1194 (in Chinese with English abstract).
- [66] Sagong H, Kwon S T, Han R, et al. Cretaceous thermal event around the Gongsuwon thrust in the northeastern Okcheon belt: evidence from Rb–Sr geochronology of Paleozoic sedimentary rocks [J]. *Geosciences Journal*, 2006, 10 (1):59–66.
- [67] Jeon H, Cho M, Kim H, et al. Early Archean to Middle Jurassic evolution of the Korean peninsula and its correlation with Chinese cratons: SHRIMP U–Pb zircon age constraints [J]. *The Journal of Geology*, 2007, 115:525–539.
- [68] Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the “Yanshan Movement” [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008:334–347.
- [69] Lin Wei, Wang Qingchen, Chen Ke. Phanerozoic tectonics of south China block: New insights from the polyphase deformation in the Yunkai massif [J]. *Tectonics* 27, TC6004 doi: 10.1029/2007TC002207, 2008.
- [70] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 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*, 2009, 16 (1):234–247.
Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, et al. Deformation record of the change from Indosinian related tectonic system to Yanshanian subduction related tectonic system in South China during the Early Mesozoic [J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 2009, 16:234–247 (in Chinese with English abstract).
- [71] Ree J H, Han R, Kim J K. Prethrust deformation of the Jurassic Bansom Group along the Gongsuwon Thrust, South Korea [J]. *Geosciences Journal*, 2009, 13 (2):167–173.
- [72] Lim C, Cho M. Two–phase contractional deformation of the Jurassic Daebo Orogeny, Chungnam Basin, Korea, and its correlation with the early Yanshanian movement of China [J]. *Tectonics*, 2011, doi: 10.1029/2011TC002909.
- [73] Holloway N H. North Palawan Block, Philippines—its relation to Asian Mainland and role in evolution of South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66:1355–1383.
- [74] Gilder S A, Keller G R, Luo M, et al. Timing and spatial distribution of rifting in China [J]. *Tectonophysics*, 1991, 197: 225–243.
- [75] Charvet J, Lapiere H, Yu Y. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1994, 68:387–396.
- [76] Mardin H, Bonin B, Capdevila R, et al. The Kuiqi peralkaline granitic complex (SE China): Petrology and geochemistry [J]. *Journal of Petrology*, 1994, 35:983–1015.
- [77] Sewell R J, Campbell S D G. Geochemistry of coeval Mesozoic plutonic and volcanic suites in Hong Kong [J]. *Journal of the Geological Society (London)*, 1997, 154:1053–1066.
- [78] Zhu Weiguang, Zhong Hong, Li Xianhua, et al. The early Jurassic mafic–ultramafic intrusion and A–type granite from northeastern Guangdong, SE China: Age, origin, and tectonic significance [J]. *Lithos*, 2010, 119:313–329.
- [79] Mao Jianren, Takahashi Y, Kee W S, et al. Characteristics and geodynamic evolution of Indosinian magmatism in South China: A case study of the Guikeng pluton [J]. *Lithos*, 2011, 127:535–551.
- [80] Marzoli A, Renne P R, Piccirillo E M, et al. Extensive 200–million–year–old continental flood basalts of the central Atlantic magmatic Province [J]. *Science*, 1999, 284:616–618.
- [81] Bartolini A, Larson R L. Pacific microplate and the Pangea supercontinent in the Early to Middle Jurassic [J]. *Geology*, 2001, 29:735–738.
- [82] Pavoni N. Pacific microplate and the Pangea supercontinent in the Early to Middle Jurassic: Comment and Reply: comment [J]. *Geology*, 2003, 31, doi:10.1130/0091–7613–31.1.e1.
- [83] Larson R L, Chase C G. Late Mesozoic evolution of the western Pacific Ocean [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1972, 83: 3627–3644.
- [84] Hilde T W C, Uyeda S, Kroenke L. Evolution of the western Pacific and its margin [J]. *Tectonophysics*, 1977, 38:145–165.
- [85] Doglioni C, Carminati E, Cuffaro M, et al. Subduction Kinematics and dynamic constraints [J]. *Earth–Science Reviews*, 2007, 83: 125–175.
- [86] English J M and Johnston S T. The Laramide orogeny: What were

- the driving forces? [J]. *International Geology Review*, 2004, 46: 833–838.
- [87] Dyksterhuis S, Müller R D, Cause and evolution of intraplate orogeny in Australia [J]. *Geology*, 2008, 36:495–498.
- [88] Schweickert R A, Bogen N L, Girty G H, et al. Timing and structural expression of the Nevadan orogeny, Sierra Nevada [J]. *California GSA Bulletin*, 1984, 95:967–979.
- [89] Wilde S A, Zhou Xinhua, Nemchin A A, et al. Mesozoic crust–mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia [J]. *Geology*, 2003, 31:817–820.
- [90] Webb L E, Hacker B R, Ratschbacher L, et al. $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ thermochronologic constraints on deformation and cooling history of high- and ultrahigh-pressure rocks in the Qinling–Dabie orogen, eastern China [J]. *Tectonics*, 1999, 18:621–638.
- [91] Webb L E, Ratschbacher L, Hacker B R, et al. Kinematics of exhumation of high- and ultrahigh-pressure rocks in the Hong'an and Tongbai Shan of the Qinling–Dabie collisional orogen, eastern China [C]//Hendrix M S, Davis G A (eds.). *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. Memoir 194. Geological Society of America, Boulder, Colorado, 2001: 231–245.
- [92] Webb L E, Leech M L, Yang T N. $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ thermochronology of the Sulu terrane: Late Triassic exhumation of high- and ultrahigh-pressure rocks and implications for Mesozoic tectonics in East Asia [C]//Hacker B R, McClelland W C, Liou J G (eds.). *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction*. Geological Society of America Special Paper, 2006, 403:77–92.
- [93] Ratschbacher L, Franz L, Enkelmann E, et al. The Sino–Korean–Yangtze suture, the Huwan detachment, and the Paleozoic–Tertiary exhumation of (ultra)high-pressure rocks along the Tongbai–Xinxian–Dabie Mountains [C]//Hacker B R, McClelland W C, Liou J G (eds.). *Ultrahigh-pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction* [M]. Geological Society of America Special Paper, 2006, 403:45–75.
- [94] Zheng Yongfei. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie–Sulu orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53:3081–3104.
- [95] Liu Xiaochun, Jahn Bor-ming, Cui Jianjun, et al. Triassic retrograde eclogites and Cretaceous gneissic granites in the Tongbai Complex, central China: implications for the architecture of the HP/UHP Tongbai–Dabie–Sulu collision zone [J]. *Lithos*, 2010, 119:211–237.
- [96] Cui Jianjun, Liu Xiaochun, Dong Shuwen, et al. U–Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Tongbai complex, central China: implications for Cretaceous exhumation and lateral extrusion of the Tongbai–Dabie HP/UHP terrane [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47:155–170.
- [97] Jahn Bor-ming, Wu Fuyuan, Lo C H, et al. Crustal–mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr–Nd isotopic evidence from post-collisional mafic–ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China [J]. *Chemical Geology*, 1999, 157:119–146.
- [98] Sun Yang, Ma Changqian, Liu Yuanyuan, et al. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of late Triassic aluminous A-type granites in southeast China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42:1117–1131.
- [99] 舒良树, 周新民. 中国东南部晚中生代构造作用 [J]. *地质论评*, 2002, 48 (3):249–260.
Shu Liangshu, Zhou Xinmin. Late Mesozoic tectonism of southeast China [J]. *Geological Review*, 2002, 48 (3):249–260 (in Chinese with English abstract).
- [100] 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化 [J]. *地质通报*, 2004, 23 (9/10):876–884.
Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, et al. Geological features and tectonic evolution of Meso–Cenozoic basins in Southeastern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23 (9/10):876–884 (in Chinese with English abstract).
- [101] Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, et al. Mesozoic tectonic evolution of the southeast China block: New insights from basin analysis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34:376–391.
- [102] Yu Jinhai, Zhou Xinmin, O'Reilly S Y, et al. Formation history and protolith characteristics of granulite facies metamorphic rock in Central Cathaysia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 2080–2089.
- [103] Yu Jinhai, Wang Lijuan, O'Reilly S Y, et al. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China [J]. *Precambrian Research*, 2009, 174:347–363.
- [104] Yu Jinhai, O'Reilly S Y, Wang Lijuan, et al. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: evidence from U–Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments [J]. *Precambrian Research*, 2010, 181:97–114.
- [105] Liu Qian, Yu Jinhai, Wang Qin, et al. Ages and geochemistry of granites in the Pingtan–Dongshan Metamorphic Belt, Coastal South China: New constraints on Late Mesozoic magmatic evolution [J]. *Lithos*, 2012, 150:268–286.

Late Mesozoic orogenesis along the coast of Southeast China and its geological significance

CUI Jian-jun¹, ZHANG Yue-qiao¹, DONG Shu-wen¹, JAHN Bor-ming², XU Xian-bing³,
MA Li-cheng¹, LI Jian-hua¹, SU Jin-bao¹, LI Yong¹

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10699, China*; 3. *Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China*)

Abstract: The Changle-Nan'ao zone is situated along the southeastern margin of the Southeast China continent, hence it may hold a key to understanding the interactions between the Eurasian and Paleo-pacific plates and geological evolution of the coastal areas in Late Mesozoic. The T_3-J_1 sedimentary rocks in the coastal zone are unconformably overlain by Lower Cretaceous Nanyuan Formation or occur as amphibolite facies enclaves in late Jurassic-early Cretaceous gneissic granites. The metasedimentary rocks (T_3-J_1) enclaves with penetrative migmatization were deformed together with the wall rocks (gneissic granites) and intruded by insignificantly deformed Cretaceous granitic plutons or dykes. Metamorphism and deformation in the late Triassic to early Jurassic (T_3-J_1) metasedimentary rocks are characterized by cratonward (NW) weakening. The Lower Cretaceous Nanyuan Formation is characterized by extensive folding and greenschist facies metamorphism and unconformably covered by the Upper Cretaceous Shimaoshan Group, showing no signs of metamorphism. The major stratigraphic units and tectonics in the Changle-Nan'ao zone indicate that the continental margins underwent two stages of compression (orogenesis) in Late Mesozoic. During the first episode of orogenesis, the late Triassic to early Jurassic (T_3-J_1) continental sediments were folded and metamorphosed. Subsequently, the folded and metamorphosed T_3-J_1 sedimentary rocks were exhumed together with other rocks from the depth of middle and upper crusts in early Cretaceous, accompanied by large scale synkinematic magmatism (147–135 Ma) and regional migmatization. During the second stage of compression in Late Mesozoic, the Nanyuan Formation was folded and metamorphosed. The 110–100 Ma magmatic complex, the 100–90 Ma A-type granites, and the 90–80 Ma bimodal igneous rocks in coastal areas of Southeast China might be correlated with the middle Cretaceous crustal contraction and the subsequent crustal extensions, respectively. Consequently, the two Late Mesozoic magmatic cycles (165–120 Ma and 110–80 Ma) might be controlled by the two synchronous tectonic cycles (165–120 Ma and 115–80 Ma). Each of the Late Mesozoic tectonic cycles includes a crustal contraction and a subsequent crustal extension. It should be noted that the Late Mesozoic tectonics and magmatism in the coastal areas of Southeast China seem to be comparable with those that simultaneously occurred in the hinterland of the continent.

Key words: Changle-Nan'ao tectonic zone; Pingtan-Dongshan complex zone; Fuqing-Yunxiao metamorphic zone; Late Mesozoic; coastal orogeny

About the first author: CUI Jian-jun, male, born in 1973, postdoctoral, engages in the study of petrology and geotectonics; E-mail: cagscj@126.com.

About the corresponding author: ZHANG Yue-qiao, male, born in 1963, professor, supervisor of doctor candidates, engages in the analysis and study of neotectonic movement; E-mail: zhangyueqiao@tom.com.