

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

中国东南部晚中生代构造作用

舒良树 周新民

南京大学地球科学系, 210093

内容提要 濒太平洋西缘, 位居东亚陆缘南段的中国东南部, 是在 EW 向古亚洲构造域基底之上发育起来的。研究表明, 该区在早、中侏罗世经历了一次从 EW 向古亚洲构造域向 NE 向西太平洋构造域的体制转换, 其转换位置之一是在南岭一带, 其地质标志是侏罗纪盆地内近东西走向的灰色沉积岩层、同位素年龄值为 180 Ma 左右的双峰式火山岩和中侏罗世 A 型花岗岩等。到早白垩世, 本区已基本完成古亚洲域向西太平洋构造域的体制转换。中国东南部晚中生代火成岩的成因机制基本上可用古太平洋岩石圈消减作用、玄武岩浆底侵作用和地壳深熔作用相结合的模式来解释。日本中央构造线—台湾纵谷带—菲律宾民都洛—巴拉望带是晚中生代古太平洋板块向东亚陆缘的消减带。晚中生代古太平洋板块(伊泽奈琦和库拉板块)低角度($<30^\circ$)、快速率(>10 cm/a)的俯冲, 是西太平洋陆缘区能形成宽阔火山岩带的重要动力学原因。宽阔的火山—侵入杂岩区和 6 条区域断裂构成了中国东南部晚中生代的基本构造框架。台湾纵谷带为古太平洋板块的俯冲—缝合带, 而发育在大陆内部的 5 条区域断裂则具不同构造属性: 长乐—南澳带是晚中生代大陆内部的左旋走滑带, 上虞—政和—一大埔断裂是古基底隆升区与晚中生代火山—沉积盆地区的分界带, 绍兴—江山—东乡—萍乡断裂是晚白垩世—古近纪红色盆地的引张断裂, 东乡—德兴断裂在晚中生代是火山弧的北部边界线, 赣江断裂是晚中生代火山岩带的边界线。在早、晚白垩世之交, 研究区内曾发生过一次从挤压到拉张的构造转换, 导致陆内拉张断陷盆地的广泛发育。后三条断裂带均是晚中生代陆内红色断陷盆地的主控断裂带。最后用共轭断裂理论对广泛发育的倾向 SE 的断裂系的成因进行了探讨。

关键词 俯冲带 构造体制转换 构造格架 区域断裂 晚中生代 中国东南部

研究区位于西太平洋活动大陆边缘的南段, 是晚中生代火山—侵入杂岩和沉积盆地广泛分布的地区(图 1), 研究程度较高(郭令智等, 1980; 王德滋等, 1994)。迄今为止, 大多数学者都把该区看作中生代太平洋板块俯冲的产物。然而, 在诸如中生代板块俯冲带位置、宽阔火山岩带的形成条件(Zhou Xinmin et al., 2000)、古亚洲、特提斯、环太平洋三大构造域以及古亚洲构造域与环太平洋构造域两大构造体制的动力转换过程等关键问题上, 还存在一定的认识差别。进一步开展这些方面的研究, 对深入了解华南大地构造演化, 正确完善并建立中生代华南构造格架, 必能起到良好的推动作用。笔者在研究区有过多年的调查与研究, 近年又在上述问题上取得一些新的证据和认识。

1 两种大地构造体制及其转换

研究区囊括了江南古陆(即扬子陆块东南缘的

新元古代江南古岛弧)东南侧的广阔地区: 其北西侧以江绍断裂和江南古陆接壤, 南东边界则为海岸线。近年研究表明(任纪舜等, 1990, 1998), 区内存在两种重要的大地构造体制: EW 向的前侏罗纪古亚洲构造域和 NE 向的中、新生代西太平洋活动陆缘带。前者分布地域广, 经历了晋宁期、加里东期、印支期、燕山期等多期构造—岩浆热事件的演化; 后者则是一个发育在古亚洲构造域褶皱基底之上的中、新生代火山—侵入杂岩和陆相盆地带(Wang Hongzhen et al., 1995; Charvet et al., 1999)。近 SN 向的郟—庐断裂带是连接 EW 向与 NE 向两大构造域的分界断裂。郟—庐断裂原为古亚洲内部的大断裂(Gilder et al., 1999)。当晚三叠世—早侏罗世大别山东段朝华南撞击并引起华南盖层强烈褶皱断裂时, 郟—庐断裂是一条近 SN 向大陆剪切带。晚中生代古太平洋板块强烈活动、EW 向构造域逐渐被 NE 向构造域所取代时, 郟—庐断裂是一左旋走滑带, 成为 NE 向东

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40172067)、重点基金项目(编号 40132010)和中国地质调查局综合研究项目(编号 200113000053)资助成果。

收稿日期: 2001-03-22; 改回日期: 2001-12-10; 责任编辑: 任希飞。

作者简介: 舒良树, 男, 1951 年生。教授, 博士生导师, 构造地质学专业。长期从事教学与科研工作。通讯地址: 210093, 南京大学地球科学系; Email: lsshu@nju.edu.cn。

亚陆缘带的西界断裂(Tong et al., 1996; Lapierre et al., 1997)。其延伸的北段称依兰—伊通断裂,向南可能与赣江断裂相连(陆志刚等,1995)。研究区保存了两种地球动力学体制的物质记录:古生代主体受南北向应力机制控制,构造带呈EW向展布;从三叠纪开始,则受到特提斯洋和古太平洋板块的联合作用(任纪舜等,1990;赵越等,1994),一部分EW向构造带开始被改造;到早白垩世,除少数地段现出早先的EW向构造外(如浙闽,特别是福建地区断续的EW向断裂带和厦门—福州沿海地带花岗岩中7处近EW向分布的“鱼群状”岩石包体),大部分EW向构造带已完成了向NE向构造带的转换。在上虞—政和—大浦断裂南东侧的地区则几乎完全被西太平洋构造域所取代。

南岭地区是保留有上述两种构造体制物质与形态记录较多的地段,是构造体制转换位置之一。该地区深部表现为EW向的粤北幔坳—佛冈幔坡—广州幔隆带和近EW向均匀单一完整重力梯度带(-20~-40 mGal)(陆志刚等,1995),应是其深部古亚洲构造域的反映。南岭地貌是由越城岭、都庞岭、萌渚岭、骑田岭、大庾岭等五大山岭所组成的纬向山系,但内部各个山岭和晚燕山期花岗岩体、白垩纪—古近纪红色盆地却呈NE向雁行排列,很好地表现了上述两种构造体制在南岭汇聚与转换的时空关系。

近年沿藏东碧土—滇西昌宁—孟连一带发现了印支期蛇绿混杂岩和韧性剪切带,上三叠统磨拉石不整合堆积其上,代表印支期东南亚陆块与扬子陆块的碰撞缝合带(钟大赉等,1998)。与之相对应,南岭地区早侏罗世陆相磨拉石普遍发育,近东西向分布,反映造山后期的挤压前陆盆地环境。中侏罗世开始,南岭发生了由挤压向拉张应力场的构造转换,其地质标志是在闽西—赣南—粤东地区发育有近40个近东西向展布的早、中侏罗世沉积盆地,岩层多呈杂色,盆内广泛发育中侏罗世双峰式火山岩(闽西永定潘坑、赣南龙南里仁、粤东河源黄村等)、拉斑质玄武岩(赣南龙南东坑、临江,广东梅州、阳春)、层状基性超基性杂岩体(梅州),盆地边缘发育A型花岗岩(定南寨背、龙南陂头等),

测年值为160~180 Ma(许美辉,1992;陈跃辉等,1998;陈培荣等,1999;李献华等,2001)。这种力学性质转换的动力来源目前尚不清楚。晚侏罗世开始,盆地向东迁移,火山与沉积作用受到NE向和EW向断裂构造的联合控制。早白垩世以来,南岭受古太平洋板块斜向俯冲碰撞及其SE—NW方向挤压应力场的强烈制约,所形成的沉积盆地均呈NE向展布。基本完成了古亚洲域向西太平洋构造域的体制转换。

目前尚待深入研究的一个问题是中生代特提斯体系对研究区的作用程度。从上述闽西—赣南—粤东地区的早、中侏罗世盆地构造、沉积岩相、双峰式火山岩等看(Gilder et al., 1991; 张伯友等,1994; 任纪舜等,1998; 陈培荣等,1999),很可能当时的特提斯有一窄支从西向东扩张到了南岭。但在其他地段,早、中侏罗世的裂谷表现并不显著。笔者注意到,当中生代特提斯朝北往欧亚大陆俯冲消减时,中国东南部与该大洋之间隔着一个宽度>1000 km的扬

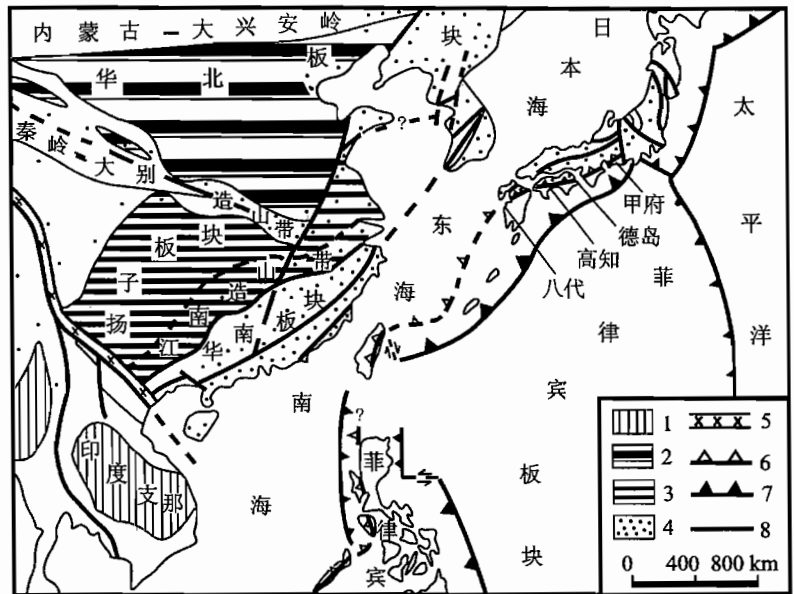


图1 亚洲东部构造框架图

Fig. 1 Simplified geological and tectonic map of East Asia

1—前寒武纪陆块;2—华北板块;3—扬子板块;4—晚中生代火成岩;5—印支期缝合带;6—晚中生代缝合带;7—新生代板块俯冲带;8—断裂带;图中的黑点为晚中生代火山—侵入杂岩的大致分布区;黑点的疏密度代表岩浆岩出现的强度(新生代俯冲带,据 Grosvenor, et al., 1995; 日本中央构造线与晚中生代火成岩,据 Geological Survey of Japan, 1992; 台湾纵谷带,据 Ernst, 1983; 何春芬, 1994; 西菲律宾晚中生代缝合带,据 Faure et al., 1989; 印支期缝合带和南海—印度支那,据 Charvet et al., 1999; 中国境内地质界线与晚中生代火成岩,据中国地质科学研究院, 1973, 略作修改)
1—Pre-Cambrian continental block; 2—North China Plate; 3—Yangtze Plate; 4—Late Mesozoic igneous rocks; 5—Indosinian suture zone; 6—Late Mesozoic suture zone; 7—Cenozoic subduction zone; 8—fault zone. Black points in the figure show the outcrop and distribution of Late Mesozoic igneous rocks

子刚性陆块,远离了其俯冲力的作用范围。迄今为止的基础资料,并不存在特提斯大规模穿过扬子进入研究区的物质记录。此外,当东亚陆缘早白垩世发生强烈俯冲和大规模岩浆活动时,印度—欧亚大陆尚未接触碰撞,难能构成对本区改造的强大动力源。因此笔者初步认为,虽然新生代印度、欧亚两个大陆的碰撞对本区造成了一定的叠加改造,但晚中生代时特提斯动力体系并未对中国东南部构造格架的形成构成太大的影响。

2 中国东南部晚中生代火成岩—沉积盆地带的成因与演化

2.1 古太平洋动力学体系的构造制约

晚中生代西太平洋边缘火成岩带,东起西南日本、朝鲜岭南、台湾、西菲律宾,西到郯-庐断裂;北起锡霍特、库页岛、北海道,向南经燕山、鲁东、宁芜、中国东南部,南迄南海基底。是一条彼此相连、宽度 >600 km、延伸近 5000 km的巨型线状晚中生代酸性火山—侵入岩带和沉积盆地带。这种几何学形态,显然与古太平洋体系的构造制约有关。徐志刚(1985)收集了中国东部中生代火山岩带2039组化学成分数据,求得平均成分 SiO_2 65.94%, Na_2O 3.40%, K_2O 4.24%,里特曼指数2.54,属钙碱性安山英安岩,也存在一些碱度较高的玄武岩和双峰式火山岩。其中中国东南部的怀宁、庐枞、六合、宁芜及郯城以碱质岩系为主;其他地区主要为流纹岩—英安岩组合。这一结论已被后来更大量的地球化学工作所证实。对该带的成因,迄今为止的绝大多数意见仍然将古太平洋的消减作为其主控因素(徐志刚,1985;万天丰,1993;Maruyama et al.,1997;任纪舜等,1998;Gilder et al.,1999;Zhou Xinmin et al.,2000)。

现代西太平洋俯冲带倾角普遍大于 60° ,俯冲速率为 $4\sim 7$ cm/a (Shiono et al.,1980);这种高角度和慢速的俯冲不可能形成宽阔的火山岩带(Uyeda,1983)。如琉球北段俯冲角度约 70° ,速率 $4.4\sim 5.4$ cm/a,火山弧宽度仅 50 km \pm ;而琉球南段俯冲角度 50° ,速率 $5.4\sim 6.5$ cm/a,其火山弧就宽些,约 100 km(Uyeda,1983;Engebretson et al.,1985)。显然,晚中生代洋壳以目前这种倾角和速率向东亚俯冲是无法形成宽阔火山岩带的。

研究表明,中生代大洋板块在俯冲方向、速率、角度等动力学要素上随时间是不断变化的(Uyeda,1983;Engebretson et al.,1985;Gilder et al.,

1996)。Engebretson等(1985)据古地磁数据,提出太平洋朝东亚陆缘的俯冲,方向是不断变化的:180~145 Ma朝NW运动,145~85 Ma变成朝NNW俯冲,85 Ma后才转朝正西。古太平洋在135~85 Ma期间是低角度的快速俯冲,速率 >200 mm/a (Maruyama et al.,1986)。这样大的俯冲速率,可以使大洋板块下插到很远的大陆之下,从而产生十分宽阔的火山岩带。Zhou等(2000)已从岩石学上证实存在低角度、高速率的俯冲,并探讨过随时间推移俯冲角增大、致使岩浆作用向洋带状迁移的原因。由于大陆边缘总体上呈南北向,145~85 Ma洋壳朝NW的运动属斜向俯冲,使欧亚陆缘产生强大的剪切应变,形成大规模左旋走滑断层,多沿强度最弱的火山弧发育,它能引导岩浆上侵的方向。历史上,古太平洋多朝NW消减,故东亚陆缘中的断裂及火成岩多呈NE方向展布,由此改变了东亚前中生代东西向的构造格局。因此,晚中生代古大洋板块低角度($<30^\circ$)、快速率的俯冲,是形成上述宽广火山岩带的重要动力学原因。

2.2 大陆深部构造作用的制约

最近十几年区内岩石学等方面的一系列新发现,使人们开始注意到大陆内的深部构造作用对大规模火山岩带形成机理的影响和制约。在沿海地区福建平潭、漳州、福州,浙江的普陀山、桃花岛、青田;大陆内部的浙江桐庐、安徽庐枞,江西广丰、横峰港边、龙南、安远,闽西永定以及南岭地区,均报道有证据确凿、成分可靠的碱性玄武岩、双峰式火山岩、晶洞花岗岩、复合岩流、花岗岩中玄武岩包体等现象(王德滋等,1994;陈培荣等,1999)。虽然所有这些岩石尚不足钙碱系列火成岩总量的10%(Zhou et al.,2000),但用传统单一的板块俯冲机制无法说明这些岩类的成因。在沿海地区 $12\sim 20$ km深处,广泛发育 $2\sim 4$ km厚的低速带,多与地表的热田分布位置一致,可能是地幔上隆的标志(徐鸣洁等,2001)。另外一个重要现象是,在大陆内部的赣南—湘南—粤北一带,岩石圈厚度 >100 km,到沿海地区急剧减薄至 $60\sim 80$ km(Zhou et al.,2000),这是否表明中国东部发生过岩石圈拆沉作用,尚待深入研究。现在看来,中国东部火山岩带的形成是多成因的;除古太平洋俯冲主控因素外,发育在陆内的深部构造—岩浆作用,比如玄武岩浆底侵作用、壳幔混合、地幔柱上隆以及岩石圈拆沉等均是不可忽视的重要动力学原因(Maruyama et al.,1997;Zhou et al.,2000;Li,2000;李献华等,2001)。鉴于:①巨型带状的地质产

状;② 钙碱岩系面积、总量占绝对优势;③ 存在明显的壳幔混合证据、碱性玄武岩、双峰式火山岩、复合岩流等,Zhou等(2000)提出,中国东南部晚中生代火成岩的成因机制是岩石圈消减作用、玄武岩浆底侵作用和地壳深熔作用相结合的模式。这是比较符合于研究区具体情况的。

2.3 早、晚白垩世之交从挤压向拉张力学机制转换

100~90 Ma期间,西太平洋陆缘区发生了一次极其强烈的挤压变形事件,以日本西南地区、中国东南部—台湾和西菲律宾地区最为显著;其原因是古洋壳上的陆块地体朝东亚陆缘带的拼贴碰撞(Charvet et al., 1985, 1999; Ichikawa et al., 1990)。沿缝合带,蛇绿混杂岩、高压变质岩、对变质带、韧性剪切带普遍可见,碰撞型花岗岩发育。经严格的年代学测定,日本和台湾的对变质带年龄值为100~90 Ma (Jahn Borming, 1974; Minato et al., 1985; Lo, 1996)。东南沿海长乐—南澳大型左旋走滑剪切带的形成也与此事件有关(Charvet et al., 1990; 舒良树等, 2000)。

本期碰撞结束之后,东亚陆缘区发生了晚白垩世—古近纪持续的大规模伸展减薄活动。主要地质标志有三:① 日本海和台湾海峡的形成(日本海拉伸宽度>1000 km);② 火山弧区和弧后区晚白垩世—古近纪断陷盆地群的形成;③ 复式岩流、花岗岩中大量的玄武岩包体、碱性玄武岩、晶洞花岗岩的形成,主要分布在海边和陆内引张断裂带。其动力学原因与此时俯冲带变陡,弧后区微型扩张、壳幔交换作用、玄武岩浆底侵作用有关(Maruyama et al., 1997)。

研究表明,晚侏罗世—早白垩世时日本和东亚大陆是相连的(Minato et al., 1985)。晚白垩世时,日本岛弧后方发生微型扩张,始新世达到盛期,结果是使日本脱离东亚陆缘朝大洋运移,到新近纪才定位于现今位置(张庆龙等, 1989)。东南沿海与台湾晚白垩世岩浆作用的年代与类型相仿,两者晚古生代基底性质及化石也相似(杨泰铭等, 1985),表明它们当时也是相连的。分隔中国东南部与台湾岛的台湾海峡就是在这期拉伸事件中形成的(曹荣龙等, 1990)。

在大陆一侧,这期拉张事件形成了一系列NE—NNE方向的断陷盆地群。由于强烈的伸展,从晚白垩世开始,陆内的一些区域断裂如绍兴—江山—萍乡大断裂变成了裂谷盆地带(Gilder et al., 1996);一些早白垩世弧后盆地如江西信江盆地演变

成为晚白垩世—古近纪陆内断陷盆地,俗称红层盆地,由红色泥砂质岩层所组成,局部夹碱性玄武岩薄层或基性岩流。东亚陆缘带的东北松辽盆地、华北盆地、苏北—南黄海盆地、绍兴—江山—东乡—萍乡盆地等,均为此阶段的拉张断陷盆地。这期伸展作用也形成了从粤闽浙沿海经下扬子、苏鲁到辽东的晚白垩世A型花岗岩带,时代为70~100 Ma(王德滋等, 1995)。东南沿海一带的福州魁岐、平潭岛、漳州新村、舟山桃花岛、普陀岛等地的A型花岗岩、晶洞花岗岩体、复合岩流,属于这期拉伸作用产物。

2.4 新近纪—新生代构造作用对中国东南部影响

从新近纪开始,太平洋俯冲带已东跃至千岛—西南日本—琉球—马尼拉—菲律宾海沟和日本伊豆—小笠原—马里亚纳海沟。洋壳消减方向主体朝西,倾角陡,沟-弧间隙处于拉张应力状态(Uyeda, 1983),俯冲速率小(4~7 cm/a),形成的岛弧规模较小。然而,弧后区的扩张作用却非常强烈,在海区形成了规模宏伟的新生代弧后盆地群,如日本海、南海等。

新生代太平洋构造作用对中国东南部的叠加改造不容忽视。一方面,如各省地质图所示,闽浙赣粤原火山岩区及弧后区受新近纪区域伸展构造的叠加改造明显,形成一系列新的陆相断陷盆地和碱性玄武岩夹层等,但规模均不大。另一方面,在大洋一侧,从新近纪开始发生了弧-弧碰撞及其派生的转换挤压作用。此时,菲律宾板块以70 mm/a的速率朝NW运动(Suppe, 1986, 1988),导致吕宋弧朝东亚陆缘斜向碰撞,形成台湾纵谷左旋走滑带、日本中央构造线右旋走滑带。更新世以来,原晚白垩世—古近纪的台湾边缘海—冲绳海槽朝东朝琉球群岛—台东岛屿之下垮塌消亡(许靖华, 1994),形成利吉蛇绿混杂岩层和一系列朝东倾斜、向西逆冲的断裂系。同时,使台湾西部沉积物褶皱变形,其缩短率达65.4%(Suppe, 1986),导致了台西—澎湖前陆盆地的形成。

2.5 日本地区、中国东南部中、新生代构造演化及其对比

Maruyama等(1997)据地质和古地磁资料,将日本250 Ma以来的构造活动分为一系列演化阶段:① 250~210 Ma为法拉龙板块消减阶段,伴有210 Ma三郡高压变质岩和S型花岗岩的形成。② 210~120 Ma为古大洋板块强烈活动阶段。其中210~180 Ma为法拉龙板块消亡阶段,180~120 Ma为伊泽奈琦板块强烈俯冲、火山—岩浆活动的高峰

阶段,伴有地体的拼贴和增生。③ 120~90 Ma 为挤压向拉张的转换期。此时,大洋俯冲带变陡,速度减慢,岩浆活动变弱。期间,在 100~90 Ma,日本南西部发生了一次强烈的陆块地体碰撞缝合事件,伊泽奈琦板块消亡,伴有高压蓝片岩和大型走滑韧剪带的形成。随后进入地壳的伸展减薄阶段(Ichikawa et al., 1990)。④ 90~40 Ma 为拉张向挤压的转换期。期间,90~60 Ma 发生过拉张成盆作用,但库拉板块的高角度俯冲也产生了小规模火山—侵入杂岩。60 Ma 以来为现代太平洋朝西朝东亚陆缘和日本东侧高角度俯冲阶段,弧后陆缘区则以断陷盆地为特征。⑤ 40~15 Ma 为东亚陆缘地幔柱活动高峰期。强烈拉张导致日本盆—岭构造的形成,最终形成现代日本海和渤海。菲律宾海板块、伊豆—小笠原岛弧也形成于此阶段。⑥ 15 Ma 至今为东亚陆缘弧后全面扩张阶段。但在大洋一侧,菲律宾海板块朝北俯冲运动,日本海和南海变为收缩区;5 Ma 时吕宋弧和日本岛弧的南西部发生碰撞,伴有右旋走滑剪切。日本中生代以来的这些构造演化规律对人们进一步认识西太平洋陆缘地区的岩石圈结构、构造和动力学演化具有一定的参考价值。

笔者研究表明,中国东南部也曾经经历过多期构造演化,但和日本略有不同,其原因是古、新太平洋板块对两者的作用强度不同。它们是:① 晚三叠世—早侏罗世近东西向的前陆盆地阶段,多发育在碰撞造山带的前缘。② 早、中侏罗世陆内裂谷阶段,以南岭地区表现最显著。③ 晚侏罗世—早白垩世火山—侵入岩浆活动高峰期,研究区基本完成了古亚洲动力学体制向西太平洋动力学体制的转换。在此阶段,陆内深部地质作用也很强烈。和日本碰撞缝合事件相对应,研究区在早白垩世晚期也发生过一次强烈的左旋走滑剪切活动,以浙闽粤沿海地区和长乐—南澳断裂带表现最为显著。④ 晚白垩世—始新世区域伸展断陷盆地阶段。晚白垩世之初曾发生挤压向拉张的力学机制转换,导致大陆内部强烈拉张,形成大规模含油气的陆内断陷盆地。⑤ 渐新世表现为区域隆升和剥蚀,普遍缺失渐新统,以苏北盆地为典型。中新世以来陆内仍以拉张为特征。但受印度—亚洲板块碰撞和吕宋弧—日本弧碰撞的联合作用,研究区一些地段发生强烈右旋走滑剪切,如郯—庐断裂和渤海(Gilder et al., 1999);在大洋一侧,受菲律宾海板块与台湾岛弧碰撞的影响,台湾海峡和台

西发生强烈挤压,导致地壳缩短,形成前陆盆地(Suppe, 1988)。

3 晚中生代俯冲带位置

对中国东南部晚中生代俯冲带位置的认识一直在不断深化,前后计有:台湾海峡靠大陆侧 40 m 等深线(郭令智等,1983)、古南海(Hsu et al., 1990)、长乐—南澳带(刘建华等,1996)、台湾纵谷带(Ernst,1983; Faure et al., 1989; 何春荪,1994; Lo et al., 1996; Lapierre et al., 1997; Zhou et al., 2000)。本文认为日本中央构造线—台湾纵谷带—菲律宾宾都洛—巴拉望带是东亚地区晚中生代的俯冲带(图 2)。

3.1 日本中央构造线

从九州八代经四国的高知、德岛到本州的甲府,全长 1000 多千米,宽 40~50 km。走向 NE,是一个由超镁铁岩、镁铁岩、硅质岩、枕状熔岩和浊积岩所组成的大型蛇绿混杂岩带,并经历了新生代的右

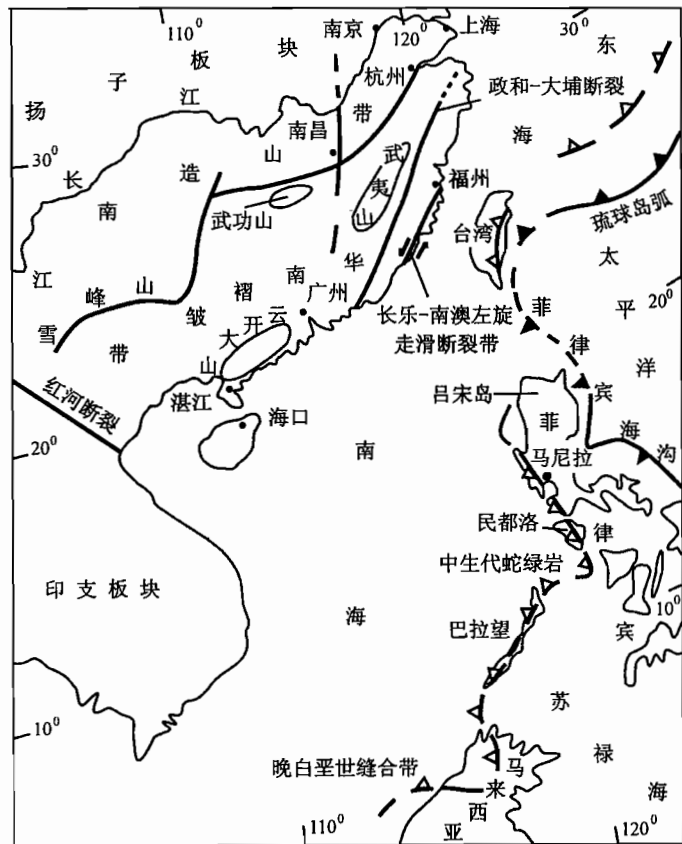


图 2 亚洲东部中生代晚期碰撞缝合线与新生代俯冲带 (图例同图 1)

Fig. 2 Late Mesozoic collision-suture zone and Cenozoic plate subduction zone in Eastern Asia (Legends the same as in Fig. 1)

旋走滑剪切。在本州和四国,从蛇绿岩套的硅质岩中获放射虫,年龄为晚三叠世—早侏罗世(Ichikawa et al., 1990)。超镁铁岩碎块已与侏罗纪沉积岩和火山碎屑岩强烈混杂。在中央构造线的本州段,发育高压低温和低压高温对变质带,东南侧以三波川蓝闪石片岩带为标志,蓝闪石和红帘石高压矿物的 K-Ar 年龄为 102~82 Ma, Rb-Sr 年龄为 110~85 Ma (Ichikawa et al., 1990); 西北侧为领家红柱石—夕线石片岩带,年龄为 90 Ma (Ichikawa et al., 1990)。中央构造带倾向 NW, 其上盘为白垩纪中酸性火山岩和侵入岩,白垩纪花岗岩侵入侏罗系中。因此,中央构造线作为古太平洋在中生代俯冲、早白垩世末期碰撞的缝合带是较为合理的。

3.2 台湾纵谷带

走向近 SN, 宽约 10 km, 是一切入上地幔的断裂带; 断面近直立, 目前为一左旋走滑断裂 (Ernst, 1983; 何春荪, 1994), 也是一个地震活动带。地球物理上, 西侧为重力负值区, 东侧为重力正值区 (Ernst, 1983)。西侧为中央山脉大南澳群变质岩, 其结晶灰岩中产拟纺锤鲣类和瓦根珊瑚, 时代为二叠纪 (颜沧波等, 1951); 其大理岩 Rb-Sr 年龄为 200~240 Ma (江博明, 1984)。东侧的东海岸为新近纪玄武质火山岩。大南澳群的西侧为台澎拗陷带, 已被新近系沉积层所覆盖。据北港及澎湖钻井资料, 新生代之下为侏罗纪—白垩纪的酸性凝灰岩, 岩石组合和东南沿海相同, 并发现白垩纪 Aptian 阶的菊石 (何春荪, 1982)。说明台湾海峡、台湾西部与华东南沿海地区曾是相连的地质体, 属统一的晚中生代火山岩带。纵谷带中有蛇绿混杂岩, 超镁铁岩—镁铁岩呈岩块构造混杂在片岩、片麻岩、结晶灰岩和变质火山碎屑岩中。该带两侧发育有高压型和高温型变质带。其东侧为玉里高压蓝闪石片岩带, 江博明 (1977) 对蓝闪石片岩作 Rb-Sr 法测年, 获 79 ± 7 Ma; 近年台湾学者对蓝闪石和绿辉石作 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年, 获 110~100 Ma 年龄值 (Lo, 1996); 西侧为太鲁阁片岩、片麻岩夹混合岩, 片麻岩中伟晶花岗岩的白云母 K-Ar 年龄为 87 ± 5 Ma (Jahn Borming, 1974), 表明其形成于早—晚白垩世之交。

3.3 西菲律宾民都洛—郎布隆—巴拉望带

台湾纵谷俯冲带向南可能与此带相接 (图 1)。它是一个沿走向弧形弯曲、弧凸朝东的近 SN 向蛇绿混杂岩带; 向南去向不明。从上到下, 由 4 个单元所组成: ① 前始新世泥砾岩层; ② 蛇绿混杂岩带, 放射虫时代为早白垩世; 多呈巨大的推覆体出现,

动向朝南; ③ 片状泥砂岩、大理岩、片状基性岩, 灰岩中化石时代为早白垩世 (Faure et al., 1989); ④ 片麻岩单元, 代表西菲律宾的陆壳基底。②、③、④之间均为断裂接触。运动学研究表明 (Faure et al., 1989), 该带经历了晚侏罗世—早白垩世古太平洋岩石圈从北向南朝亚洲的俯冲阶段、早白垩世朝南韧性推覆阶段、以及早白垩世晚期开始、古新世 (65 Ma) 结束的巴拉望微大陆与东民都洛陆块碰撞阶段 (伴有 NE 向左旋走滑变形) 等复杂演化过程。目前为止, 西菲律宾缝合带内尚无高压变质岩的报道。

4 晚中生代构造格架

4.1 基本框架

中国东南部晚中生代火山—侵入杂岩带, 呈 NE 方向展布, 南东起自台湾岛, 北西达江西的怀玉山和浙江的莫干山。火山岩集中分布在浙闽粤沿海和怀玉—武夷地区, 而同期的花岗岩大部分出露在武夷山—武功山—赣南—云开大山一带。在赣江断裂以东常有同源、同时、同空间的流纹质火山岩—侵入杂岩出露。在这条边界断裂的西边, 晚中生代火山岩基本消失。与晚中生代火山—侵入杂岩带有密切成因联系的区域断裂有如下 6 条: ① 台湾纵谷俯冲带; ② 长乐—南澳带; ③ 上虞—政和—大埔带; ④ 绍兴—江山—东乡—萍乡带; ⑤ 德兴—东乡带; ⑥ 赣江火山岩线 (图 3)。宽阔的晚中生代火山—侵入杂岩区和这些区域断裂构成了中国东南部晚中生代基本构造格架。

4.2 台湾纵谷带

这是一个晚中生代古太平洋板块的俯冲带、早白垩世末期的碰撞缝合带。详细特征前已叙述。

4.3 长乐—南澳断裂

在沿海地区, 凡强烈变质变形的岩石都只分布在长乐—南澳断裂带附近, 所有岩石均沿 $\text{NE}40^\circ \sim 50^\circ$ 方向呈狭带状展布, 都经历过达角闪岩相的变质和石英—长石矿物相的韧性剪切变形。在莆田和晋江, 有少量超镁铁岩团块, 但未发现与之配套的蛇绿岩套中火山—沉积岩组合。在台湾海峡打开之前, 闽东南与台湾是相连一块的整体, 同为早白垩世高温变质带。花岗片麻岩和片麻状花岗闪长岩是该带的代表性岩石, 其同位素年龄集中分布在 100~120 Ma (舒良树等, 2000), 恰与区域上古太平洋岩石圈朝大陆斜向俯冲时间一致, 属同构造—岩浆期产物。

花岗片麻岩、片麻状花岗闪长岩和围岩的透入性组构完全一致: 剪切面理走向 NE, 朝 SE 陡倾

斜；拉伸线理朝 NE 平缓倾伏，倾伏角 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ；各种非同轴不对称韧剪组构非常发育。从韧性剪切带中心或岩体向外，变质程度由角闪岩相逐渐变为绿片岩相；特征矿物从夕线石变为石榴子石、云母以及绿泥石；韧性剪切变形作用也从韧性剪切带或岩体中心向外侧不断减弱。运动学研究确定长乐—南澳带是一左旋走滑韧性剪切带(舒良树等, 2000)。

鉴于高温矿物和强烈韧性变形多出现在花岗片麻岩、片麻状花岗闪长岩附近；远离走滑断裂及岩体，变质和变形逐渐减弱，故我们认为至少有一部分变质变形的热源是由断裂和岩浆提供的。长乐—南

澳带中心部位花岗片麻岩中的显微组构记录了一期同岩浆期的走滑变形历史。据此，长乐—南澳带内的花岗岩是受走滑剪切热和岩浆热双重制约的，是在走滑运动过程中实现的。因此，这是一个既控制变质变形又控制岩浆活动的断裂带。100~120 Ma 花岗岩岩浆侵位与变质变形的动力学来源应该与太平洋板块沿 NW 方向朝东亚陆缘的斜向俯冲有关、与长乐—南澳带左旋走滑作用有关。法国诺曼底的华力西期走滑型花岗岩和围岩经历了相同的变质和韧剪变形，其运动学组构均为走滑(Berthe et al., 1979)；长乐—南澳带钙碱性花岗片麻岩、花岗闪长岩的形态

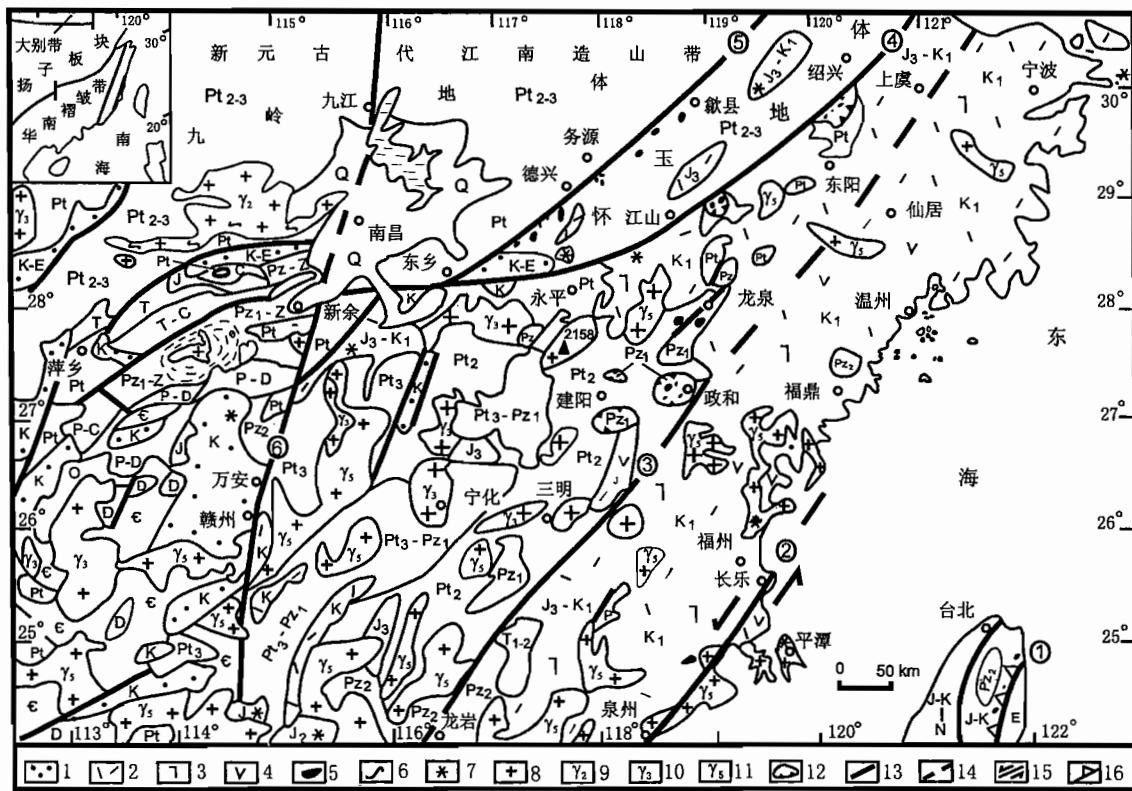


图 3 中国东南部晚中生代地质构造图

Fig. 3 Late Mesozoic tectonic map of southeast China

Q—第四纪；K₁—早白垩世；J₃—晚侏罗世；T—三叠纪；P—二叠纪；D—泥盆纪；O—奥陶纪；Є—寒武纪；Z—震旦纪；Pz—古生代；Pt—元古宙；1—红层；2—流纹岩；3—玄武岩；4—安山岩；5—蛇绿岩块；6—片麻岩；7—碱性火成岩或复合岩流；8—花岗岩；9—新元古代花岗岩；10—早古生代花岗岩；11—晚中生代花岗岩；12—飞来峰；13—区域断裂带；14—隐伏断裂带；15—左旋走滑带；16—晚中生代缝合带；①—台湾纵谷晚中生代缝合带；②—长乐—南澳早白垩世左旋走滑构造—岩浆带；③—上虞—政和—大埔基底隆升区与火山盆地地区的分界断裂；④—绍兴—江山—萍乡晚白垩世—古近纪断陷盆地(赣杭带)；⑤—德兴—东乡晚中生代火山岩界线；⑥—赣江晚中生代火山岩线

Q—Quaternary；K₁—Early Cretaceous；J₃—Late Jurassic；T—Triassic；P—Permian；D—Devonian；O—Ordovician；Є—Cambrian；Pz—Paleozoic；Z—Sinian；Pt—Proterozoic；1—red bed；2—rhyolite；3—basalt；4—andesite；5—ophiolitic block；6—gneiss；7—alkaline igneous rock or composite magma flow；8—granite；9—Neoproterozoic granite；10—Early Paleozoic granite；11—Late Mesozoic granite；12—klippe；13—regionalfault zone；14—burried fault zone；15—sinistral strike-slip zone；16—Late Mesozoic suture zone；①—Late Mesozoic Taiwan Longitudinal suture zone；②—Changle—Nanao sinistral strike-slip shear zone；③—Shanyu—Zhenghe—Dapu fault zone；④—Shaoxing—Jiangshan—Pingxiang Late Cretaceous-Eogene rifted basin zone；⑤—Dexing—Dongxiang boundary of Late Jurassic-Late Cretaceous volcanic rock domain；⑥—Ganjiang River Late Mesozoic volcanic line

和形成机制与它颇为相似。

构造属性：晚中生代大陆内部左旋走滑型构造—岩浆带。

4.4 上虞—政和—大埔断裂

该断裂呈 NE 向延伸，原为早古生代末的大型韧性剪切带 (Charvet et al., 1999)，年龄 390~420 Ma (舒良树等, 1999)。其东南侧为东南沿海地区，地壳薄，为晚中生代强烈的岩浆活动区，钙碱性火山—侵入杂岩广泛分布。花岗岩类多属 I 型，其地球化学特征指示其为活动大陆边缘背景 (Zhou et al., 2000)。其西北侧为古亚洲构造域的前泥盆纪基底隆起区，称华南加里东期褶皱带 (郭令智等, 1980; 任纪舜等, 1990)；时代老，地壳厚，广泛出露元古宙混合岩、片麻岩和早古生代岛弧火山岩 (杨树锋等, 1995)。此基底隆起区已遭受古太平洋动力学体系的改造，区内分布了一系列小规模的中生代火山—沉积盆地和花岗岩体，它们多呈 NE 方向延伸，与西太平洋陆缘火山岩带展布方向一致，表明两者同受太平洋动力学体系的制约。在中生代构造—岩浆事件中，这种富硅铝成分的基底，必然会影响到部分熔融花岗岩浆的成分，致其高铝或过铝 (Harris et al., 1986)。事实上，在断裂西北侧的武夷山和赣江以西地区，地表分布的岩体确有众多晚侏罗世强过铝质花岗岩类 (Zhou et al., 2000)，其物质源自古亚洲构造域的地壳或沉积岩。

构造属性：基底隆升区与火山盆地区的分界带。

4.5 绍兴—江山—东乡—萍乡断裂

在华夏古陆新元古代末期解体之前，该带是华夏与扬子地块的碰撞缝合带 (舒良树等, 1999)。从震旦纪至泥盆纪，北侧一直是稳定的浅海碳酸盐台地，岩浆活动微弱，无变质。南侧却为强烈活动区，为笔石碎屑岩沉积和火山岩—火山碎屑岩组合，厚度大，普遍遭受了低绿片岩相变质。一直到晚三叠世，南北两侧的沉积环境和构造形态才趋统一。

晚中生代岩浆活动显然已越过此古老边界，纵深到西北侧较远的地方，形成若干晚侏罗世陆相火山盆地 (Shu et al., 1996)。从晚白垩世开始，沿断裂发生强烈的区域拉张作用，晚白垩世复合岩流多处分布，流纹岩和橄榄玄武岩互层产出 (Gilder et al., 1996)，并沿断裂带形成一系列陆相断陷盆地，如新余、东乡、信江、金华—衢州等盆地。盆地的形态、规模和产状均严格受该断裂控制。

构造属性：晚白垩世—古近纪赣杭断陷盆地的

主控断裂。

4.6 东乡—德兴断裂

该断裂走向 NE，是新元古代含蓝闪石—硬玉高压矿物的蛇绿混杂岩带和左旋走滑剪切带 (Shu Liangshu, 1996)。断裂北西侧，晚中生代火山岩已基本消失，花岗岩也极少分布，可看作中生代火山岩的北界。沿断裂带分布着几个狭长型的晚侏罗世陆相沉积盆地，呈 NE 方向延伸 (舒良树等, 1995)。断裂南东侧，分布一系列晚侏罗世酸性火山岩 (如德兴、浦江—莫干山等) 和早白垩世花岗岩 (如福泉山、大茅山—怀玉山、黄山等)，并有大型金矿、铅锌银矿和超大型斑岩铜矿产出。深部构造研究表明，该断裂是一个鲜明的布格重力异常带和航磁异常带，东南侧为重力负值区，西北侧为正值区；东南侧为宽几十千米的高磁值区，正负磁异常频繁交替，西北侧为大面积低值平缓异常区， ΔT 异常值为 0 至几十纳特所圈定。人工地震测深表明，断裂两侧莫霍面起伏落差 2.1 km，为超岩石圈断裂 (舒良树等, 1995)。

构造属性：晚中生代火山山弧的北界、断陷沉积盆地的主控断裂。

4.7 赣江断裂

赣江断裂展布范围并不限于赣江谷地，而是包括北段湖口、彭泽、南昌，中部清江、吉安、万安，南部赣州、龙南的广阔地带。长度 > 600 km，宽 30~50 km，走向 $NE15^\circ$ ，向北可能与郟庐断裂相接，南端过龙南后的地表走势不清。地球物理上是一个显著的近南北向的重力、航磁异常梯度带 (江西省地质矿产局, 1984)。该断裂开始于古生代，活跃于侏罗纪—白垩纪，一直持续到新生代。在中段，它切割了途经的前第三纪所有岩层。

沿该断裂带分布着一系列 NNE 走向的晚白垩世—古近纪的红色沉积盆地。断裂带两侧的火成岩组合差异明显：东侧晚中生代火山岩广泛分布，且有“同源同时空”的花岗质火山—侵入杂岩发育；西侧缺失火山岩，而花岗岩仍然大量分布。西侧武功山地区发育十分典型的花岗穹隆伸展构造和变质核杂岩 (Shu et al., 1998; Wang Dezi et al., 2001)，而东侧迄今未见这方面报道。构造形迹研究表明，在樟树—永丰一带该断裂表现为明显的正断层。915 大队的钻井资料显示，断面朝东倾斜，东盘第三系下滑，落差 > 600 m。因而笔者认为，这种大型的正断层很可能是东侧火山岩层能被大量保存的原因之一。在其他地段，多属左旋走滑性质，位移距离 10~40 km，如瑞昌的震旦系—三叠系被左旋平移 30~40 km。

笔者沿断裂带发现有新生代橄榄玄武岩和辉绿岩分布,新干县神政乡辉绿岩的 K-Ar 年龄为 9.4 Ma (南京地矿所李贵章 1999 年测定)。在南昌赣江大桥边的鱼木山,见元古宙千枚岩推覆在古近系红色粉砂岩之上。笔者在新余市东侧新余群($E_1\sim_2x$)红层中发现逆冲断层,取断层泥作热释光测年,获 24.4 ± 1.81 万年(国家地震局计凤桔 1998 年测定),表明晚新生代构造作用在此断裂带表现仍很强烈。

构造属性:晚中生代火山岩线、晚白垩世—古近纪陆相盆地的主控断裂。

4.8 晚中生代火山弧内的反向逆冲断层系

在闽浙赣火山岩区,一个不寻常的构造运动学表现是,许多地段火山岩层的产状是朝 SE 倾斜,朝 NW 逆冲的。这与前述的中生代大洋板块朝 NW 俯冲、上盘岩块向 SE 逆冲的认识不符。原因何在?虽然这一现象理论上可用武夷山结晶基底沿政和大断裂朝 SE 下冲来解释,但目前尚无足够证据证明这一点。法国学者 Boillot(1979)的共轭断裂理论似乎更能合理地解释这一现象。当俯冲面平缓、速率较大时,俯冲容易进行,沟-弧间隙处于高应力强挤压状态,上盘出现宽阔的火山岩区,如智利的安第斯沟-弧体系。此时,与俯冲面平行的断裂将广泛发育在沟弧间隙和火山弧区;而与俯冲面倾斜相反的断裂系,只局部出现在火山弧冲断带。另一方面,高角度俯冲属低应力型,速率小,沟弧间隙处于拉张状态(Uyeda, 1983),上盘火山活动区狭窄(热力近垂向上升,侧向热力影响宽度小),沟弧间隙和弧区引张应力发育,弧后盆地发育。与俯冲面倾斜相反的断裂系将广泛发育在火山弧和弧后盆地区。Zhou 等(2000)研究认为,俯冲带变陡是从晚白垩世开始的。因此,中国东南部火山岩区广泛发育的 SE 向倾斜断裂,应该属于与陡峻大洋消减带同期共轭的断裂系,是在晚白垩世从挤压到拉张的构造转换期才形成的。

5 结论

(1) 中国东南部濒太平洋西缘,发育在东西向古亚洲构造域基底之上。在早、中侏罗世经历了一次从东西向的古亚洲构造域向北东向的西太平洋构造域的体制转换,其转换位置之一可能是在南岭一带。到早白垩世,本区已基本完成从古亚洲域向西太平洋构造域的体制转换。在早、晚白垩纪之交,研究区内曾发生过一次从挤压到拉张的构造转换,导致陆内拉张断陷盆地的广泛发育。

(2) 日本中央构造线—台湾纵谷带—菲律宾民都洛—巴拉望带是晚中生代古太平洋板块朝东亚陆缘的消减带。

(3) 晚中生代古太平洋板块朝东亚大陆之下的低角度($<30^\circ$)、快速率(>10 cm/a)俯冲,是西太平洋陆缘区能形成宽阔火山岩带的重要动力学原因。中国东南部晚中生代火成岩的成因机制不能用单一的俯冲机制来说明,而岩石圈消减作用、玄武岩浆底侵作用和地壳深熔作用相结合的模式可能是一种较佳解释。

(4) 宽阔的火山—侵入杂岩区和 6 条区域断裂构成了中国东南部晚中生代的基本构造框架。6 条区域断裂具有不同的构造属性和表现形式。

(5) 用共轭断裂理论对广泛发育的倾向 SE 的断裂系的成因进行了探讨。认为它们属于与陡峻大洋消减带同期共轭的断裂系,形成于晚白垩世构造应力的转换期。

本文数易其稿。郭令智院士、王德滋院士、卢华复教授为提高本文质量提出过很好的建设性和技术性建议;匿名审稿专家提出了重要的修改意见;江西局杨明桂教授级高工、吕细保高工、陈祥云高工、郭英杰高工对本研究给予野外工作的很多帮助,一并深致谢忱。

参 考 文 献

- 曹荣龙,朱寿华. 1990. 中国东南沿海及台湾中生代古构造体系. 科学通报, 35(2):130~134.
- 陈跃辉,陈肇博,陈祖伊,等. 1998. 华东南中生代伸展构造与铀成矿作用. 北京:原子能出版社, 1~262.
- 陈培荣,孔兴功,倪琦生,等. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山岩的厘定及意义. 地质论评(增刊), 45:734~741.
- 何春荪. 1982. 台湾地体构造的演变——台湾地体构造图说明书. 台湾经济部:1~110.
- 何春荪. 1994. 台湾地质概论——台湾地质图说明书. 台湾地质调查所, 1~163.
- 郭令智,施央申,马瑞士. 1980. 华南大地构造格架和地壳演化. 国际交流地质学论文集(1),北京:地质出版社,109~116.
- 郭令智,施央申,马瑞士. 1983. 西太平洋中、新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成和演化. 地质学报, (1):11~20.
- 江博明,刘忠光. 1977. 台湾蓝闪石片岩的年龄与其对构造环境的追认所受的地球化学的约束. 台湾地质学会会刊, 2号:129~140.
- 江博明,马提诺,柯尼契. 1984. 台湾中央山脉中结晶石灰岩所含锶同位素成分的地质时代意义. 台湾地质学会专刊, (6):295~301.
- 江西省地矿局. 1984. 江西省区域地质志. 北京:地质出版社:1~921.
- 李献华,周汉文,刘颖,等. 2001. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义:II. 微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学. 地球化学, 30(1):57~65.
- 刘建华,吴华,刘福田. 1996. 华南及其海域三维速度分布特征与岩石圈结构. 地球物理学报, 39(4):483~492.

- 陆志刚, 高天均, 陶奎元. 1995. 东南沿海火山岩基底构造、火山-侵入作用与成矿研究. 南京: 地矿部南京地矿所, 1~465.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1~205.
- 任纪舜, 牛宝贵, 和政军, 等. 1998. 中国东部的构造格局和动力演化. 北京: 原子能出版社, 1~12.
- 舒良树, 施央申, 郭令智, 等. 1995. 江南中段板块—地体构造与碰撞造山运动学. 南京: 南京大学出版社, 1~174.
- 舒良树, 卢华复, 贾东, 等. 1999. 华南武夷山早古生代构造事件的⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年代研究. 南京大学学报(自然科学), 35(6): 668~674.
- 舒良树, 于津海, 王德滋. 2000. 长乐—南澳断裂带晚中生代岩浆活动与变质—变形特征. 高校地质学报, 6(3): 368~378.
- 万天丰. 1993. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用. 北京: 地质出版社, 1~103.
- 王德滋, 周金城, 邱检生. 1994. 东南沿海早白垩世火山活动中的岩浆混合及壳幔作用证据. 南京大学学报(地球科学版), 6(4): 317~325.
- 王德滋, 赵广涛, 邱检生. 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约. 高校地质学报, 1(2): 13~21.
- 王铠元. 1987. “三江地区”深断裂和板块俯冲带. 构造地质—地质力学(2). 北京: 地质出版社, 77~115.
- 许靖华. 1994. 弧后碰撞造山作用及其大地构造相. 南京大学学报(地球科学), 6(1): 1~12.
- 许美辉. 1992. 福建永定地区早侏罗世双峰式火山岩及其构造环境. 福建地质, (2): 115~125.
- 徐志刚. 1985. 从构造应力场特征探讨中国东部中生代火山岩成因. 地质学报, (2): 109~124.
- 徐鸣洁, 舒良树. 2001. 华东南晚中生代岩浆作用的深部条件制约. 高校地质学报, 7(1): 21~33.
- 颜沧波, 盛健君, 耿文溥. 1951. 台湾变质杂岩中含纺锤虫石灰岩之发现. 台湾地质调查所汇刊, (3): 23~26.
- 杨树锋, 陈汉林, 武光海, 等. 1995. 闽北早古生代岛弧火山岩的发现及其大地构造意义. 地质科学, 30(2): 105~116.
- 杨泰铭, 黄文荣, 柳昌华. 1985. 福建东南沿海存在古老基底的新证据. 大地构造与成矿学, 9(4): 372.
- 张伯友, 俞鸿年. 1994. 粤西海西印支碰撞带深层次推覆构造. 北京: 地质出版社, 1~119.
- 张庆龙, 水谷伸治郎, 小崎智, 等. 1989. 黑龙江省那丹哈达地体构造初探. 地质论评, 35(1): 67~71.
- 赵越, 扬振宇, 马醒华. 1994. 东亚大陆构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2): 105~119.
- 钟大赉, 吴根耀, 李建清, 等. 1998. 滇东南发现蛇绿岩. 科学通报, 43: 1365~1370.
- 中国地质科学研究所. 1973. 中华人民共和国地质图集. 北京: 中国地质科学研究所.
- tectonogenetic aspects of SW Japan: an Alpine-type orogen in an island-arc position. In: Nasu N, et al, ed. Formation of Active Ocean Margin. Terra Scientific Pub. Co., Tokyo, 791~817.
- Charvet J, Faure M, Xu Jiawei, et al. 1990. La zone tectonique de Changle—Nanao, Chine du sud-est. C. R. Acad. Sci. Paris, t310, Serie 2: 1271~1278.
- Charvet J, Cluzel D, Faure M, et al. 1999. Some tectonic aspects of the pre-Jurassic accretionary evolution of East Asia. In: Metcalfe I, Ren J, Charvet, J, Hada S, ed. Gondwana dispersion and Asian accretion, A. A. Balkema/Rotterdam/brookfield. 37~65.
- Chen Peirong, Kong Xinggong, Ni Qisheng, et al. 1999. Ascertainment and implication of the Early Yanshanian Bimodal volcanic association from South Jiangxi Province. Geological Review, 45(Sup.): 734~741 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuehui, Chen Zhaobo, Chen Zuyi, et al. 1998. Meso-Cenozoic extensional tectonics and uranium metallogenesis in Southeast China. Beijing: Atomic Energy Publishing House; 1~261 (in Chinese with English abstract).
- Chinese Academy of Geological Sciences. 1973. Geological map of P. R. China. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.
- Engelbreton D C, Cox A, Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. Geol. Soc. Am. Spec. Paper, 1~59.
- Ernst W G. 1983. Mountain-building and metamorphism, a case history from Taiwan. In: Hsu K J, ed. London: Mountain building, Academic Press, 247~256.
- Faure M, Marchadier Y, Rangin C. 1989. Pre-Eocene synmetamorphic structure in the Mondoro-Romblon-Palawan area, west Philippines, and implications for the history of Southeast Asia. Tectonics, 8(5): 963~979.
- Geological Survey of Japan. 1992. Geological Map of Japan (1:1,000,000). Third Edition. Ibaraki-Ken: Geological Survey of Japan.
- Gilder S A, Keller G R, Luo Ming, et al. 1991. Eastern Asia and the western Pacific timing and spatial distribution of rifting in China. Tectonophysics, 197: 225~243.
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. 1996. Isotopic and paleomagnetic constrains on the Mesozoic tectonic evolution of South China. Journal of Geophysical Research, 101: 16137~16154.
- Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, et al. 1999. Tectonic evolution of the Tancheng—Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic Paleomagnetic data. J. Geophysical Research, 104 (B7): 15365~15390.
- Grosvenor G, Allen W, Shupe J. 1995. The Earth's fractured surface (1:48,000,000). Washington: National Geographic Society, USA.
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. 1980. Geotectonic framework and crust evolution of the South China. Scientific papers on geology for international exchange (I). Beijing: Geological Publishing House: 109~116 (in Chinese).
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi. 1983. On the formation and tectonic evolution of the Mesozoic-Cenozoic active continental margin and island arcs in the western Pacific area. Acta Geologica Sinica, (1): 11~20 (in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M P, Ries A C, ed. Collision Tectonics. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 19: 67~81.
- He Chunsun. 1982. Tectonic evolution of Taiwan. Explanatory text of

References

- Berthe D, Choukroune P, Jegouzo P. 1979. Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites; the examples of the South Armorican shear zone. J. Struct. Geol., 1: 31~42.
- Boillot G. 1979. Geologie des marges continentales. Paris: Masson, Chapter IV: 67~92.
- Cao RongLong, Zhu Shouhua. 1990. Mesozoic paleo-tectonic system in the southeastern coast and Taiwan of Chiona. Chinese Science Bulletin, 35(2): 130~134 (in Chinese).
- Charvet J, Faure M, Caridroit M, et al. 1985. Some tectonic and

- the tectonic map of Taiwan. Economic Ministry of Taiwan; 1~110 (both in Chinese and in English).
- He Chunsun. 1994. General geology of Taiwan. Explanatory text of the geological map of Taiwan. Geological Survey of Taiwan; 1~163 (in Chinese).
- Hsu K J, Sun S, Li J L, et al. 1990. Tectonics of South China; Key to understanding West Pacific geology. *Tectonophysics*, 183: 9~39.
- Hsu K J. 1994. Orogeny of back-arc collision and its tectonic facies. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 6(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Ichikawa K, Mizutani S, Hara I, et al. 1990. Pre-Cretaceous terraces of Japan. Publication of IGCP 224; Pre-Jurassic evolution of Eastern Asia. Osaka, 1~413.
- Jahn B M. 1974. Mesozoic thermal events in Southeast China. *Nature*, 248: 480~483.
- Jahn Borming, Liou Zhongguang. 1977. Age and geochemical constraints of glaucophane schists of Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, (2): 129~140 (in Chinese).
- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1984. Regional geology of Jiangxi Province. Beijing: Geol. Publ. House; 1~921 (in Chinese with detailed English abstract).
- Lapierre H, Jahn B M, Charvet J, et al. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with tectonic activity in SE China. *Tectonophysics*, 274: 321~338.
- Li Xianhua. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 293~305.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, et al. 2001. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance; II. Trace elements and Sr-Nd isotope. *Geochemica*, 30(1): 57~65 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianhua, Wu Hua, Liu Futian. 1996. Features of 3-D velocity distribution and lithosphere structure in South China and its contiguous sea area. *Acta Geophysica Sinica*, 39(4): 483~492 (in Chinese with English abstract).
- Lo C H, Yui T H. 1996. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of high-pressure rocks in the Tananao basement complex, Taiwan. *J. Geol. Soc. China*, 39(1): 13~30.
- Lu Zhigang, Gao Tianjun, Tao Kuiyuan. 1995. The basement of volcanic rocks, volcano-intrusion action and mineralization in Southeastern coast of China. Nanjing: Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources; 1~465 (in Chinese).
- Maruyama S, Seno T. 1986. Orogeny and relative plate motions; example of the Japanese islands. *Tectonophysics*, 127: 305~329.
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *The Island Arc*, 6(1): 121~142.
- Minato M, Hunahashi M. 1985. Crustal structure of the Japanese islands, Japan Sea, coastal part of western Pacific and Phillipine Sea. *Bulletin of the Japan Sea Research Institute, Kanazawa University*, (17): 13~42.
- Ren Jishun, Chen T. 1989. Tectonic evolution of the continental lithosphere in eastern China and adjacent areas. *J. Southeast Asian Earth Sci.*, 3: 17~27.
- Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui, et al. 1990. The tectonics and mineralization of continental lithosphere in the East China and adjacent region. Beijing: Science Press; 1~205 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Niu B G, He Z J, Xie G L, Liu Z G. 1998. The geotectonic framework and its dynamic evolution of the eastern China, In: Liu F R, et al., ed. The lithospheric texture and tectonic-magmatic evolution of the eastern China. Beijing: Atomic Energy Publishing House; 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Shiono K, Mikumo T, Ishikawa Y. 1980. Tectonics of the Kyushu—Ryukyu arc as evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow to intermediate-depth earthquakes. *J. Phys. Earth*, 28(1): 17~44.
- Shu Liangshu, Shi Yangshen, Guo Lingzhi, et al. 1995. The Late Proterozoic plate tectonics and collisional kinematics in the middle part of the Jiangnan belt. Nanjing: Nanjing University Publishing House; 1~174 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Charvet Jacques. 1996. Kinematic and geochronology of the Proterozoic Dongxiang—Shexian ductile shear zone (Jiangnan region, South China). *Tectonophysics*, 267(1~4): 291~302.
- Shu Liangshu, Sun Yan, Wang Dezi, et al. 1998. Mesozoic extensional tectonics in the Wugongshan area, South China. *Science in China (Series D)*, 41(6): 601~608.
- Shu Liangshu, Lu Huaifu, Jia Dong, et al. 1999. Study of the ^{40}Ar - ^{39}Ar isotopic age for the early Paleozoic tectonothermal event in the Wuyishan region, South China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35(6): 668~674 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Yu Jinhai, Wang Dezi. 2000. Late Mesozoic granitic magmatism and metamorphism-ductile deformation in the Changle—Nanao fault zone, Fujian Province. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 368~378 (in Chinese with English abstract).
- Suppe J. 1986. Reactivated normal faults in the western Taiwan fold-and-thrust belt. *Memoir of the Geological Society of Taiwan*, (7): 187~200.
- Suppe J. 1988. Tectonics of arc-continent collision on both sides of the South China Sea: Taiwan and Mindoro. *Acta Geologica Taiwanica*, (26): 1~18.
- Tong W X, Tobisch O T. 1996. Deformation of granitoid plutons in the Dongshan area, Southeast China; constraints on the physical conditions and timing of movement along the Changle—Nanao shear zone. *Tectonophysics*, 267: 303~316.
- Uyeda S. 1983. Comparative subductology. *Episodes*, 2: 19~24.
- Wan Tianfeng. 1993. Meso-Cenozoic stress field of intraplate deformation structures and its application. Beijing: Geological Publishing House; 1~103 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng. 1994. The magma mixing in Early Cretaceous volcanic activities and evidence for crust-mantle interaction in Southeastern coast of China. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 6(4): 317~325 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Zhao Guangtao, Qiu Jiansheng. 1995. The tectonic constraint on the Late Mesozoic A-type granitoids in Eastern China. *Geological Journal of China Universities*, 1(2): 13~21 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Shu Liangshu, Faure M, Sheng Weizhou. 2001.

- Mesozoic magmatism and granitic dome in the Wugongshan massif, Jiangxi Province and their genetical relationship to the tectonic events in Southeast China. *Tectonophysics*, 339: 259~277.
- Wang Hongzhen, Mo Xuanxue. 1995. An outline of the tectonic evolution of China. *Episodes*, 18(1~2): 6~16.
- Wang Kaiyuan. 1987. The deep fault and plate subduction zone. Special Issue for Structural geology and Geomechanics (2), Beijing: Geological Publishing House; 77~115 (in Chinese with English abstract).
- Xu Meihui. 1992. The Early Jurassic bimodal volcanic rocks and their tectonic setting in the Yongding area, Fujian. *Geology of Fujian*, (2): 115~125 (in Chinese with English abstract).
- Xu Mingjie, Shu Liangshu. 2001. A deep geological setting constraining the Late-Mesozoic magmatism in the SE-China. *Geological Journal of China Universities*, 7(1): 21~33 (in Chinese with English abstract).
- Yan Cangbo, Sheng Jianjun, Geng Wenpu. 1951. The discovery of fusuline limestone in the metamorphic complex of Taiwan. *Bull. Deol. Surv. Taiwan*, (3): 23~26 (in Chinese).
- Yang Taiming, Huang Wenrong, Liu Changhua. 1985. New evidence of ancient basement existing in the southeastern coast of Fujian. *Geotectonica et Metallogenia*, 9(4): 372 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shufeng, Chen Hanlin, Wu Guanghai, et al. 1995. Discovery of Early Paleozoic island-arc volcanic rock in northern part of Fujian Province and the significance for tectonic study. *Scientia Geologica Sinica*, 30(2): 105~116 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Boyou, Yu Hongnian. 1994. On the deep-level nappe structure in Hercynian—Indosinian collision belt in Western Guangdong. Beijing: Geological Publishing House; 1~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qinglong, Mizutani S, Kojima S, et al. 1989. The Nadanhada terrane in Heilongjiang Province. *Geological Review*, 35(1): 67~71 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Yang Zhenyu, Ma Xinghua. 1994. Geotectonic transition from Paleo-Ocean system and Paleo-Asian system to Paleo-Pacific active continental margin in Eastern Asian. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai, Wu Gengyao, Ju Jianqing, et al. 1998. The Ophiolite discovered in the Southeastern Yunnan. *Chinese Science Bulletin*, 43: 1365~1370 (in Chinese).
- Zhou Xinmin, Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269~287.

Late Mesozoic Tectonism of Southeast China

SHU Liangshu, ZHOU Xinmin

Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract

Southeast China is located on the western margin of the Pacific and in the southern segment of the Eastern Asian Continental Margin. It developed on the basement of the Paleo-Asian tectonic system with E-W striking. During the Early Cretaceous, the transition from the Paleo-Asian to the Paleo-Pacific tectonic system was finished. The Nanling zone is probably one of the tectonic exchange domains. Late Mesozoic large-scale volcano-intrusion complex in the area was generated mainly by the subduction of the Paleo-Pacific plate. However, there are alkaline series basalt, bimodal volcanic rock, mixed crust-mantle rock in the area, implying the deep level tectono-magmatism or basalt underplating. The Late Mesozoic subduction zone is located in the zone from the Median Tectonic Line of Japan to the Longitudinal Valley of Taiwan and then to the Mindoro-Palawan of the Philippines. The subduction with lower angle ($<30^\circ$) and fast velocity (>10 cm/a) is an important geodynamic mechanism that formed a huge volcanic belt along the Eastern Asian Continental Margin. A huge linear volcanic-intrusion complex belt and six large regional faults comprise a principal tectonic framework of the Late Mesozoic Southeast China Region. These six faults have the following geological property: the Taiwan Longitudinal Valley was a Late Mesozoic subduction zone of the Paleo-Pacific plate; the Changle-Nanao fault was a tectono-magmatic and sinistral strike-slip zone that was developed within the South China Continental Block; the Lishui-Zhenghe-Dapu fault was a boundary separating the Mesozoic volcanic-intrusion complex to southeast from pre-Mesozoic Paleo-Asian system to northwest; the Shaoxing-Jiangshan-Pingxiang zone was a boundary fault controlling Late Cretaceous-Eogene extensional basins; the Dexing-Dongxiang fault was the northern boundary of the Late Mesozoic volcanic domain and the Ganiiang fault was the western boundary of the Late Mesozoic volcanic domain. A transition from compression to extension took place about 100~90 Ma. Finally, the origin of the Late Mesozoic fault system dipping SE is discussed.

Key words: subduction zone; change of tectonic system; tectonic framework; regional faults; Late Mesozoic; Southeast China