

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

# 中国东南部中—新生代地球动力学背景 若干问题的探讨

谢桂青<sup>1,2,3)</sup>, 毛景文<sup>2)</sup>, 胡瑞忠<sup>3)</sup>, 李瑞玲<sup>3)</sup>, 曹建劲<sup>3)</sup>

1) 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京, 100083

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037

3) 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵阳, 550002

**内容提要:** 近年来, 有关中国东南部中新生代地球动力学背景的研究已取得了重要的进展, 主要体现在: 地幔性质、岩石圈减薄、岩石圈伸展和构造背景四个方面。研究表明, 中国东南部中新生代的地幔性质主体是亏损地幔和 EM II 型富集地幔混合, 中生代以富集地幔为主, 而新生代主体为亏损地幔。中国东南部晚中生代经历了岩石圈减薄, 并伴生了玄武质底侵作用, 具有较为复杂的岩石圈增生—减薄过程。大量事实表明中国东南部中新生代存在多期岩石圈伸展事件, 侏罗纪存在局部岩石圈伸展, 主要集中于内陆地区, 白垩纪经历了区域性岩石圈伸展。近二十年来, 中国东南部大规模岩浆的构造背景一直存在着争论, 焦点在于太平洋俯冲对中国东南部产生什么的影响。从目前已有的资料来看, 白垩纪地幔源区受到太平洋俯冲的影响, 太平洋俯冲和玄武质岩浆底侵诱发了地壳加厚, 岩石圈拆沉和软流圈上涌而导致岩石圈伸展是中国东南部主要构造背景。但是, 中国东南部晚中生代以来的岩石圈伸展—减薄及其深部动力学机制是目前急需进一步深入探讨的问题。

**关键词:** 地幔性质; 岩石圈减薄; 地壳拉张; 构造背景; 中国东南部

中国东南部(包括湘桂赣浙闽粤六省)位于太平洋板块和欧亚板块接合部位, 是欧亚大陆板块的边缘, 中生代发生岩石圈大规模减薄和古老岩石圈地幔被亏损软流圈替换的地质事件, 被认为是研究边缘大陆动力学的理想“实验地”(邢光福等, 1999); 同时, 中国东南部是超大型钨、锡、铜、金和铀等多金属矿产的集中地区, 是环太平洋成矿带的重要组成部分, 中生代大规模成矿受到矿床学界的关注(毛景文等, 2000)。中生代以来中国东南部地区地球动力学背景, 包括地幔性质、岩石圈减薄、地壳拉张和构造背景等四个方面, 一直是地质学者研究的热点。近十年来不少学者对此进行了探索, 取得了重要进展。本文拟对以上几个方面系统分析其研究现状, 并在此基础上对中国东南部中新生代地球动力学背景的研究进行展望。

## 1 中国东南部中新生代地幔性质

上世纪 80 年代以来, 对中国东南部新生代玄武

岩做过大量的微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素研究以确定地幔性质, 时代主要集中在新近纪和第四纪 (Fan et al., 1991; Chung et al., 1994; Ho et al., 2003), 玄武岩总体上明显富集大离子亲石元素、中度富集高场强元素和轻稀土元素, 呈现无 Nb 和 Ta 负异常或正异常, 微量元素的 MORB 标准化分布模式类似于 OIB, 同位素以相对低铍和高钨组成为特征 (Peng et al., 1986; Basu et al., 1991; Tu et al., 1991, 1992; Flower et al., 1992; Liu et al., 1994)。暗示玄武质岩浆主体源于亏损软流圈地幔, 不同程度的富集岩石圈地幔也参与了玄武质岩浆的形成。碱性玄武岩的源区可能含有较多的软流圈组份, 而亚碱性玄武岩可能源于大离子亲石元素亏损的岩石圈地幔 (Zhou et al., 1982)。玄武岩的铅同位素研究进一步表明其源区为亏损地幔 (MORB 或 DMM) 和 EM II 型富集地幔混合 (Zou et al., 2000), 另外, 还存在极少量的 EM I 型富集岩石圈地幔 (Chung et al., 1995), 其中 EM II 型富集岩石圈地幔以澎湖列

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号 40402011 和 40434011)、国家重点基金项目 (编号 G1999043211)、中国博士后基金资助项目、中国科学院创新项目 (编号 KZCX3-SW-125) 和中国科学院地球化学研究所开放实验室基金资助项目 (编号 200402) 的成果。

收稿日期: 2004-02-01; 改回日期: 2005-05-08; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 谢桂青, 男, 1975 年生。2003 年在中国科学院地球化学研究所地球化学专业获得博士学位, 主要从事岩石学和成矿学研究。通讯地址: 100037, 北京阜外百万庄大街 26 号; 电话: 010-68999656; Email: guiqingxie@sohu.com。

岛第二类辉石岩为代表(Ho et al., 2000)。

中国东南部新生代玄武岩寄主有大量各种类型的地幔包体,它们是研究岩石圈地幔的“岩石探针”。地幔包体主要为尖晶石(二辉)橄榄岩、石榴子石(二辉)橄榄岩和辉石岩,另外还有部分方辉橄榄岩(Fan et al., 1989; Tatsumoto et al., 1992; Qi et al., 1995; Xu et al., 1996, 2000, 2003; Fan et al., 2000; Xu et al., 2002; Yu et al., 2003)。对地幔包体中矿物的组成、温压计、微量元素及同位素地球化学特征研究表明,中国东南部的热梯度较高,与软流圈地幔上涌有关(Xu et al., 2000)。岩石圈地幔具有明显的分层性,大陆岩石圈地幔黄铁矿的 Os 同位素模式年龄约 2.3~1.9Ga,相当于元古宙(Wang et al., 2003),古老岩石圈地幔于中生代—古近纪逐渐被新生的和热的富集地幔所置换而形成了增生的岩石圈地幔,新增生的岩石圈地幔具有“大洋”的特征,富集作用是近期 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 流体的地幔交代作用所致(Xu et al., 2003)。不过古老岩石圈地幔至今仍有一部分残留在岩石圈顶部,以方辉橄榄岩地幔包体为代表(Xu et al., 2002)。中国东南部岩石圈地幔的替换与软流圈上涌、岩石圈伸展和减薄事件密切相关(Fan et al., 2000; Xu et al., 2000; Wang et al., 2003)。

相对于中国东南部新生代地幔的研究,对中生代地幔性质的研究明显不足,且多集中于浙闽沿海一带所发育的中生代岩浆岩,同时中生代地幔性质有富集地幔和亏损地幔之争(邢光福等,1999)。通过中生代玄武岩的同位素对比,认为浙闽沿海中生代地幔与新生代一样,可能是亏损地幔和 EM II 型富集地幔混合,只不过中生代地幔相对于新生代含有较高的 EM II 型富集地幔组分(谢昕等,2001)。最近对湘南道县晚侏罗世玄武岩中地幔包体的研究认为华夏地块岩石圈地幔主体是显生宙石榴子石和尖晶石二辉橄榄岩组成(Zheng et al., 2004)。笔者对江西白垩纪—古近纪基性岩墙的源区进行了初步研究,表明白垩纪地幔主体为富集的,直至今新世亏损地幔组分增加(谢桂青,2003)。

## 2 中国东南部中生代岩石圈减薄

近五年来的深部地震反射记录揭示了中国东部古生代岩石圈厚度为 160km(Yang, 2003),新生代岩石圈厚度为 78 km(Yang, 2003)和 70~90km(一般小于 100km)(Yu et al., 2003),明确表明中国东部新生代岩石圈厚度相对于古生代存在明显的减

薄。吴福元等(2003)述评了中国东部岩石圈减薄研究中存在的几个问题,指出中国东部岩石圈减薄的概念来源于对华北地区的研究,但从中国东部中生代岩石建造的整体特点来看,认为中国东南部同样经历了岩石圈减薄。其实,在江南古陆的湘西等多处发现古生代钾镁煌斑岩和金刚石砂矿,暗示古生代中国东南部存在大于 200km 的岩石圈根(邓晋福等,1994);而新生代中国东南部的岩石圈厚度约为 70~90km,一般小于 100km,且地温梯度较高(110mW/m<sup>2</sup>)(Yu et al., 2003),明确表明中国东南部中生代确实发生了大规模的岩石圈减薄。但是,对地球物理资料研究表明中国东部中生代岩石圈厚度为 70km(Yang, 2003),略小于新生代岩石圈厚度,暗示中国东部新生代可能存在岩石圈地幔的增生(吴福元等,2003; Yang, 2003),这点得到胶东地区和华北北缘早白垩世岩石圈厚度比新生代薄(Xu et al., 2001; Zhang et al., 2003)的佐证,以上这些研究暗示中国东部晚中生代以来经历了比较复杂的岩石圈减薄。

中国东南部岩石圈减薄的时间至今存在很大争论,正如吴福元等(2003)指出岩石圈减薄不是一个短暂的过程,不同学者看待这个问题的视角不同而对减薄时间的认识不同。通过对深部地震资料、玄武岩、地幔包体和大规模成矿作用等方面的研究,认为中国东部岩石圈减薄时间开始于晚侏罗世—早白垩世(Yang, 2003; Yan et al., 2003)。若从中国东部岩浆和成矿作用最强烈的时间来看,岩石圈减薄的高峰可能为早白垩世(吴福元等,2003)。通过精确成矿时代的收集、成矿系列和规律的研究暗示中国东南部可能于 120±Ma 发生了与大规模岩石圈减薄有关的锡、金、银、铀矿化事件,从成矿学的角度探讨了地球动力学背景(毛景文等,2004),华北地区成矿事件与岩石圈减薄关系有类似的结论(Mao et al., 2003; Yang et al., 2003; 毛景文等,2005)。另外,中国东部在新生代期间岩石圈也可能发生过减薄事件,对沿海一带新生代玄武岩的地球化学特征、玄武岩寄主的地幔包体深度计算和区域地球物理资料的研究表明中国东南部在中新世发生最强烈的岩石圈减薄(Chung et al., 1994, 1995; Ho et al., 2003)。中国东南部火山岩在 56±2Ma 时  $\epsilon_{Nd}(t)$  由负值转向正值,暗示岩石圈在 56±2Ma 发生大规模伸展减薄作用(Zhu et al., 2004)。但若从岩浆岩规模来看,新生代岩石圈减薄幅度不大,主要表现为由于热冷却而导致的原生岩石圈地幔的增生和岩石圈增厚(吴福

元等,2003)。笔者通过对江西省晚中生代基性岩的年代学和地球化学特征的研究,发现中国东南部白垩纪存在岩石圈减薄(谢桂青,2003)。

对于中国东南部岩石圈减薄的机制和构造控制因素,前人对此已经予以述评(吴福元等,2003);在此主要讨论一下中国东南部晚中生代玄武岩底侵对岩石圈减薄的影响。中国东南部中生代存在玄武质岩浆底侵(Zhou et al.,2000),可从以下几点证据得到体现:①广泛存在的低 TDM 带和低 TDM 区(Gilder et al.,1996;Chen et al.,1998),这些带和区可能是发生玄武岩岩浆底侵的活跃地区;②在新生代玄武质角砾岩筒中发现了年轻的下地壳辉长岩—麻粒岩捕虏体(112Ma±),同位素组成与同时代辉长岩和玄武岩类似,它是底侵的玄武质岩浆结晶—变质的直接产物(Zhou et al.,2000);③广泛存在基性和酸性的岩浆混合现象,在赣中相山盆地发现辉长岩淬冷包体,这表明中国东南部内陆存在玄武岩底侵作用(范洪海等,2001);④地球物理资料揭示中国东南部下地壳底部存在壳幔混合层(孙涛等,2002)。根据岩石学和地球物理资料,可以推断中国东南部燕山期玄武质岩浆底侵活动开始于中侏罗世,高潮发生于早白垩世,玄武质岩浆底侵与岩石圈减薄事件密切有关(孙涛等,2002)。

模拟计算表明中国东南部印支期可能存在玄武岩底侵作用,陆内挤压变形作用导致地壳叠置加厚(Wang et al.,2002),后来因地壳的热—应力松弛而产生岩石圈伸展和减薄(孙涛等,2003;范蔚茗等,2003)。国内不少学者从埃达克质岩的角度,华夏地块存在晚白垩世的埃达克岩,与玄武质岩浆的底侵作用有关(Xiong et al.,2003)。因此,中国东南部晚中生代岩石圈减薄可能与重力失稳导致的岩石圈拆沉和伸展有关。

中国东南部新生代无明显花岗岩的侵位,暗示玄武岩底侵的可能性不大。中国东南部新生代存在强烈的岩石圈伸展和拉张,晚期导致岩石圈裂解而造成南海的扩张(Zhu et al.,2004),这可能是新生代岩石圈减薄的主要机制。

### 3 中国东南部中新生代岩石圈伸展和拉张事件

随着研究的深入,许多学者分别从岩浆混合、富碱侵入岩(包括 A 型花岗岩)、双峰式火山岩、玄武岩、花岗岩—花岗闪长岩组合、盆地、变质核杂岩、钾玄质侵入岩、橄榄玄粗岩、基性岩墙群及大规模成矿

等方面认识到中国东南部中生代岩石圈处于伸展构造体制(Liu et al.,1986;Faure et al.,1996;Li et al.,1998,2003;Li,2000;Xu et al.,1999;王强等,2002;Chen et al.,2002;王德滋等,2002;谢桂青,2003;Xing et al.,2004;毛景文等,2004)。

早期地质学者认为中国东南部晚中生代地球动力学背景与太平洋俯冲密切相关,晚白垩世岩石圈才开始伸展(Jahn et al.,1990;Lampierre et al.,1997),但此认识的研究工作多集中于浙闽粤沿海一带。后来基于火山岩年代学和地球化学资料整合分析,认为中国东南部从挤压向扩张机制转换时代为晚侏罗世—早白垩世(140±5Ma)(毛建仁等,1998),但未充分考虑赣、湘南基性侵入岩体等因素。最近通过对中国东南部内陆基性侵入岩体的系统研究,再结合大量碱性正长岩、A 型花岗岩、钾玄质侵入岩体、双峰式火山岩、玄武岩、基性岩脉、花岗闪长岩—闪长岩组合、裂谷和断陷带、大规模成矿作用的时代和地球化学资料,证明中国东南部在中侏罗世开始岩石圈伸展和拉张(Chen et al.,2002;Li et al.,2003;Xie et al.,2005),且主要分布于中国东南部内陆,此认识是中国东南部中生代构造背景取得的重大成果之一。近年来对双峰式火山岩、基性岩墙和镁铁质岩体的深入研究,表明中国东南部白垩纪存在区域性岩石圈伸展事件(Li et al.,1998;范蔚茗等,2003;Xing et al.,2004)。

从已有的资料来看,中国东南部晚中生代岩石圈伸展可能存在周期性,并不是连续的。如:通过对粤北基性岩墙群进行 K-Ar 和<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法同位素测年研究,表明其形成时代主要集中于 139~143Ma、103~110Ma、88~93Ma 三个阶段,对应于中国东南部拉张时间(Li et al.,1998)。笔者在对江西基性岩墙(群)测年和地球化学研究的基础上,收集了中国东南部与拉张有关的基性岩墙(体)和富碱侵入岩(包括 A 型花岗岩)的时代数据,进行数理统计,认为它们主要集中于 160~180Ma、140±Ma、125±Ma、100~110Ma 和 80~90Ma,可能对应于伸展和拉张的时限(谢桂青,2003)。毛景文等(2004)对华南中生代矿床的精确测年和成矿规律分析,认为大规模成矿作用主要发生在 170~150Ma,140~126Ma 和 110~80Ma 三个时间段,这些阶段的大规模成矿与华南—华北地块后碰撞、太平洋板块俯冲引起弧后多阶段岩石圈伸展有关,从成矿学角度探讨岩石圈伸展期次。

中国东南部新生代岩石圈伸展时间可能主要为

古近纪和晚新生代,前者可从基性岩墙、拉伸盆地、岩浆岩活动得到体现(谢桂青,2003;Zhu et al.,2004;Zheng et al.,2004);后者还存在一定争论,磁异常的研究表明,南海的扩张开始于晚渐新世(30~16Ma)(Chung et al.,1997),但与南海的海底玄武岩年代学和构造证据相矛盾,部分学者认为17~12Ma华夏、东海至日本海岩石圈出现强烈的北东向伸展和裂解(Zhu et al.,2004)。另外,部分学者对华南大陆架和附近北部湾盆地资料的研究,认为中国东南部岩石圈伸展主要出现于中晚始新世—晚渐新世(45~26Ma)(Clift et al.,2001)。

对中国东南部岩石圈伸展的深部过程研究相对较少,周新民(2003)明确提出中国东南部燕山期处于伸展构造环境,燕山早期( $J_2$ — $J_3$ )属于板内伸展造山,处于快速张裂构造环境;而燕山晚期( $K_1$ — $K_2$ )为岛弧型伸展造山,处于较慢速张裂环境中。

#### 4 中国东南部中生代构造背景的研究现状

中国东南部新生代构造背景的研究相对较少,一般都认为它为裂谷或岩石圈伸展和裂解的构造环境。因晚中生代发育有大量的花岗岩和流纹岩,燕山期岩浆活动的构造背景一直是近80年来最受关注、开展研究最多的地质问题,但其地球动力学模型仍未取得共识(周新民,2003)。早期对构造背景的研究代表性观点有:①它是与古太平洋板块俯冲相关的安第斯型的活动大陆边缘(Holloway et al.,1982),沿海的基性侵入岩中钙质斜长石为其矿物学标志(周新民等,1994),这是主流观点;②许靖华等(Hsu et al.,1990)认为中国东南部中生代为阿尔卑斯型碰撞造山带;③徐嘉炜等(Xu et al.,1987)认为中国东部燕山期岩浆岩形成的机制是与北北东向左行郯庐断裂系有关的断裂—重熔。由于新的地质现象发现和认识上的更新,部分观点得到了发展和补充。

前面证据表明中国东南部中生代开始出现岩石圈伸展和拉张,到白垩纪大规模的岩石圈伸展和拉张,这些让我们对中国东南部中生代的地球动力学背景为古太平洋板块俯冲安第斯型的活动大陆边缘的认识提出质疑(Li,2000)。以下证据均不支持中国东南部存在中生代阿尔卑斯型碰撞造山带的结论:①随着人们对印支运动的研究,认为印支运动在中国东南部并非表现为褶皱造山,中国东南部不存在三叠纪碰撞造山带(Guo et al.,1996);②福建沿海一带辉长岩的测年和地球化学特征暗示它们可

能形成于白垩纪(130~95Ma)伸展构造环境(Wang,2002);③通过对中国东南部侏罗纪道县和古近纪平南玄武岩中地幔包体的系统研究,认为华夏地块是前寒武纪地台的碎片(Zheng et al.,2004)。与北北东向左行郯庐断裂系有关的断裂—重熔的观点无法解释中国东南部广泛发育北北东向大面积花岗岩且大部分花岗岩既没有变形又与断裂无关(Li et al.,2003)。近十年来认识到中国东南部中生代构造背景的复杂性,因此,有些学者认为现有的构造模式均不能解释中国东部的构造背景,认为岩石圈根/去根是中国东部“活化”的原因(邓晋福等,1994,2000)。

目前两种典型的观点能够代表目前中国东南部中生代构造背景的现状:

(1)改造型古太平洋俯冲+底侵作用模式。根据花岗岩和火山岩类时空分布特征,认为古太平洋板块自中侏罗世开始向中国东南大陆消减(古俯冲带位置在现今中央山脉东侧,消减时角随时间增大),引起镁铁质岩浆底侵—中下地壳部分熔融以及弧后伸展所产生的地壳深熔作用(Zhou et al.,2000);但同时认识到赣江断裂以西无火山岩伴生的大面积分布的花岗岩,不能简单地套用此模式(王德滋等,2002)。从现有资料来看,该模式可以解释中国东南部,特别是沿海一带的诸多地质现象,但是否适合于中国东南部内陆中侏罗世还值得探索,如湘、赣南中侏罗世玄武岩、基性岩侵入岩体、钾玄质侵入岩体无明显的Na和Ta负异常,同位素以相对较高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为特征,暗示源区可能无明显的俯冲组分(Chen et al.,2002;Li et al.,2003;Xie et al.,2005),无法用太平洋俯冲机制加以解释。

(2)大陆拉张和裂谷模式。根据对中国东南部花岗岩、双峰式火山岩、辉长岩体和基性岩墙以及古地磁等方面资料的研究,部分地质学者认为自中侏罗世后中国东南部处于软流圈上涌和岩石圈伸展构造体制,构造环境为大陆边缘裂谷(Gilder et al.,1991,1996;Li,2000;Li et al.,2003;Ren et al.,2002)。但白垩纪岩浆岩具有岛弧地球化学特征(王德滋等,2002;谢桂青,2003;周新民,2003),可能与太平洋俯冲有关。从目前已有的资料来看,白垩纪地幔源区受到太平洋俯冲的影响,太平洋俯冲和玄武质岩浆底侵诱发了地壳加厚,岩石圈拆沉和软流圈上涌而导致岩石圈伸展是中国东南部主要构造背景。

## 5 研究展望

近十年来,由于分析测试手段和大陆地球动力学理论的空前发展,对中国东南部中—新生代地球动力学背景的研究取得了许多重要的研究成果,如岩石圈伸展和拉张事件与软流圈上涌有关,岩石圈减薄与岩石圈伸展和拉张密切相关,岩石圈伸展—减薄导致地幔源性性质时空演化,这几个方面科学问题都相互密切联系。就目前研究而言,中国东南部晚中生代研究中存在以下几个方面的问题急需解决:

(1)中国东南部中生代伸展是制约岩浆作用的主要因素(孙涛等,2002),但对中国东南部中生代伸展构造时限、规模和深部地质过程的研究有必要加强。前人探讨过中国东南部岩石圈伸展期次,但目前对与岩石圈伸展有关的基性岩墙和玄武岩时代的研究多根据全岩 K-Ar 法(80%以上)来确定(谢桂青,2003),而全岩 K-Ar 法的影响因素较多,可靠性较差,因此有必要对代表不同期次的基性岩墙和玄武岩进行多元同位素体系精确测年。虽然对中国东南部花岗岩分布和物质组成的研究揭示了侏罗纪和白垩纪岩石圈伸展的深部机制不同(周新民,2003),但还需要进一步结合花岗岩和基性岩的精确年代和地球化学对比分析,深入地研究岩石圈伸展的时空演化规律及其深部过程。

(2)中国东南部中生代发生岩石圈大规模减薄和古老岩石圈地幔被亏损软流圈替换的地质事件,但对其深部过程研究相对较少。前人的研究多集中于晚中生代花岗岩和流纹岩,对出露面积不及5%的基性岩的研究程度明显不够。而选择岩石类型齐全且侵入时间长的地区为研究区域,结合花岗岩和流纹岩的资料,重点研究不同时空基性岩(包括玄武岩)的年代学和地球化学特征,是讨论中国东南部中生代地幔性质、时空演化规律和其深部地质作用的重要途径。在此基础上,注意结合地质学、地球物理和模拟计算等多学科、多层次面上的资料,从地球系统科学概念探讨中国东南部岩石圈减薄时限、壳幔演化及其深部动力学机制。

### 参 考 文 献

- 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等. 1994. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”——东亚型大陆动力学模式研究计划. 现代地质, 8: 349~356.
- 邓晋福,赵国春,赵海玲,等. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程. 地质论评, 46(1): 41~48.

- 范洪海,王德滋,刘昌实,等. 2001. 江西相山潜火山岩中淬冷包体的发现及其成因机制探讨. 地质学报, 75(1): 64~69.
- 范蔚茗,王岳军,郭峰,等. 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. 地学前缘, 10(3): 159~169.
- 毛建仁,陶奎元,薛怀民,等. 1998. 东南沿海高钾钙碱性系列火山岩带的成因. 见:任纪舜,杨巍然,主编. 中国东部岩石圈结构与构造岩浆演化. 北京:原子能出版社, 29~38.
- 毛景文,王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其地球动力学背景的初步探讨. 矿床地质, 19: 289~296.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11(1): 45~56.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次和相应的地球动力学环境. 岩石学报, 21: 169~188.
- 孙涛,周新民. 2002. 中国东南部晚中生代伸展应力体制的岩石学标志. 南京大学学报(自然科学版), 38: 737~746.
- 孙涛,周新民,陈培荣,等. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. 中国科学(D), 33: 1209~1218.
- 王德滋,周新民,等. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山—侵入杂岩成因与地壳演化. 北京:科学出版社, 1~294.
- 王强,赵振华,熊小林,等. 2002. 华南绍兴—恩平富碱侵入岩带的厘定及其动力学意义初探. 地球化学, 31: 433~442.
- 吴福元,葛文春,孙德有,等. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10(3): 51~60.
- 谢桂青. 2003. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例. 贵阳:中国科学院地球化学研究所博士论文. 1~128.
- 谢昕,徐夕生,邹海波,等. 2001. 中国东南沿海中—新生代微量元素和 Nd—Sr—Pb 同位素研究. 岩石学报, 17: 617~628.
- 邢光福,陶奎元,杨祝良,等. 1999. 中国东南沿海中生代火山岩成因研究现状与展望. 矿物岩石地球化学通报, 18: 189~193.
- 周新民,徐夕生,董传万,等. 1994. 中国东南活动大陆边缘的矿物标志: 钙长石质斜长石. 科学通报, 39: 1011~1014.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556~565.

### References

- Basu A R, Wang J, Huang W, et al. 1991. Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth and Planetary Science Letters*, 105: 149~169.
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101~133.
- Chen P, Hua R, Zhang B, et al. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region——petrological constraints and geodynamic settings. *Science in China(D)*, 45: 755~768.
- Chung S L, Sun S S, Tu K, et al. 1994. Late Cenozoic basaltic volcanism around the Taiwan Strait, SE China: Product of lithosphere—asthenosphere interaction during continental extension. *Chemical Geology*, 112: 1~20.
- Chung S L, Jahn B M, Chen S J, et al. 1995. Miocene basalts in northeastern Taiwan: evidence for EM-type mantle sources in the continental lithosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 549~555.
- Chung S L, Cheng H, Jahn B M, et al. 1997. Major and trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleocene volcanism in South China prior to the South China Sea opening.

- Lithos, 40: 203~220.
- Clift P, Lin J. 2001. Preferential mantle lithospheric extension under the south china margin. *Marine and Petroleum Geology*, 18:929~945.
- Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. 1994. The lithospheric root/removal root and continental "active"—plan of continental dynamics model of east Asian. *Modern Geology*, 8:349~356 (in Chinese with English abstract).
- Deng J F, Zhao G C, Zhao H L, et al. 2000. The Yanshanian igneous structure associations and orogenic—deep geology process. *Geological Review*, 46 (1): 41~48 (in Chinese with English abstract).
- Fan H H, Wang D Z, Liu C S, et al. 2001. Dicsocery of quenched enclaves in subvolcanic rocks in Xiangshan, Jiangxi province and its genetic mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 64~69 (in Chinese with English abstract).
- Fan Q C, Hooper P R. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China; implications for upper mantle composition and the paleogeotherms. *Journal of Petrology*, 30: 1117~1158.
- Fan Q C, Hooper P R. 1991. The Cenozoic basaltic rocks of eastern China; petrology and chemical composition. *Journal of Petrology*, 32:765~810.
- Fan W M, Wang Y J, Guo F, et al. 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan—Jiangxi provinces and the lithospheric extension. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 159~169 (in Chinese with English abstract).
- Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. 2000. On and off the North China Craton; where is the Archaean keel? *Journal of Petrology*, 41: 933~950.
- Faure M, Sun Y, Shu L, et al. 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogen. the case study of wugoshan dome (Jiangxi province, southeastern China). *Tectonophysics*, 263:77~106.
- Flower M F J, Zhang M, Chen C Y, et al. 1992. Magmatism in the South China Basin: 2. post-spreading Quaternary basalts from Hainan Island, south China. *Chemical Geology*, 97: 65~87.
- Gilder S A, Keller G R, Luo M, et al. 1991. 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 constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7):13137~16154.
- Ho K S, Chen J C, Smith A D, et al. 2000. Petrogenesis of two groups of pyroxenite from Tungchihsu, Penghu Islands, Taiwan Strait; implications for mantle metasomatism beneath SE China. *Chemical Geology*, 167: 355~372.
- Ho K S, Chen J C, Lo C H, et al. 2003.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating and geochemical characteristics of late Cenozoic basaltic rocks from the Zhejiang—Fujian region, SE China; eruption ages, magma evolution and petrogenesis. *Chemical Geology*, 197: 287~318.
- Holloway N H, North P B. 1982. Philippines—its relation to Asian mainland and role in evolution of South China. *American Association Petrology Geology Bulletin*, 66: 1355~1383.
- Hsu K J, Li J L, Chen H H, et al. 1990. Tectonics of south China; key to understanding west Pacific geology. *Tectonophysics*, 183: 9~39.
- Jahn B M, Zhou X H, Li J L. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan; isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183:145~160.
- Lampierre H, Jahn B M, Charver J, et al. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274: 321~338.
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China. *Journal of Asian Earth Science*, 18:293~305.
- Li, X H, McCulloch M T. 1998. Geochemical characteristics of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China; Age, origin and tectonic significance. In: Flower M F J, Chung S-L, Lo C H, et al., eds. *Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia*. Washington: AGU, *Geodynamics*, 27: 405~419.
- Li X H, Chen Z G, Liu D Y, Li W X. 2003. Jurassic gabbro—granite—syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China; age, origin, and tectonic significance. *International Geological Review*, 45:898~921.
- Liu C Q, Masuda A, Xie G H. 1994. Major- and trace- element compositions of Cenozoic basalts in eastern China; petrogenesis and mantle source. *Chemical Geology*, 114:19~42.
- Liu H. 1986. Geodynamics scenario and structural styles of Mesozoic and Cenozoic basins in China. *American Association Petrology Geology Bulletin*, 70:377~395.
- Mao J W, Wang Z L. 2000. A preliminary study on time limits and geodynamic setting of large-scale metallogeny in east China. *Mineral Deposits*, 19: 289~296 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhang Z H, Wang Y T, et al. 2003. Nitrogen isotope and content record of Mesozoic orogenic gold deposits surrounding the North China Craton. *Sciences in China (D)*, 33:231~245.
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, et al. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension from South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45~56 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in north China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21:169~188 (in Chinese with English abstract).
- Peng Z C, Zartman R E, Futa K, et al. 1986. Pb, Sr and Nd isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chemical Geology*, 59: 3~33.
- Qi Q, Taylor L A, Zhou X. 1995. Petrology and geochemistry of mantle peridotite xenoliths from SE China. *Journal of Petrology*, 36:55~79.
- Ren J, Tamaki K, Li S, et al. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344:175~205.
- Su T, Zhou X M. 2002. Petrological symbol of late Mesozoic extension in southeast China. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 38:737~746 (in Chinese with English abstract).
- Su T, Zhou X M, Chen P R, et al. 2003. Origin of Mesozoic strongly peraluminous granites from east Nanling and its tectonic setting. *Science in China(D)*, 33: 1209~1218 (in Chinese).
- Tatsumoto M, Basu A R, Huang W, et al. 1992. Sr, Nd, and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China; enriched components EMI and EMII in subcontinental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 113: 107~128.
- Tu K, Flower M F J, Carlson R W, et al. 1992. Magmatism in the South China Basin; 1. Isotopic and trace-element evidence for an

- endogenous Dupal mantle component. *Chemical Geology*, 97: 47~63.
- Tu K, Flower M F J, Zhang M. 1991. Sr, Nd, and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (south China): Implications for a subcontinental lithosphere Dupal source. *Geology*, 19: 567~569.
- Wang D Z, Zhou X M, et al. 2002. Crust evolution and origin of Late Mesozoic granite volcano—intrusive complexes in SE China. Beijing: Science Press, 1~294 (in Chinese).
- Wang K L, O'Reilly S Y. 2003. Proterozoic mantle lithosphere beneath the extended margin of the South China block: In situ Re-Os evidence. *Geology*, 31: 709~712.
- Wang Q, Zhao Z H, Xiong X L, et al. 2002. Ascertainment of the Shaoxing—Enping alkali-rich intrusive rocks zone and preliminary discussion on its geodynamic implications. *Geochimica*, 31(5): 433~442 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Zhang Y, Fan W M, et al. 2002. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan province: basaltic underplating versus tectonic thickening. *Science in China (D)*, 45: 1042~1056.
- Wang Z. 2002. The origin of the Cretaceous gabbro in the Fujian coastal region of SE China: implications for deformations—accompanied magmatism. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 144: 230~240.
- Wu F Y, Ge W C, Sun D Y, et al. 2003. Discussion on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51~60 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q. 2003. Late Mesozoic mafic dikes (body) from Southeastern China: geological and geochemical characteristics and its geodynamics—a case of Jiangxi Province. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1~128 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Hu Ruizhong, et al. 2005. Jurassic intra-plate basaltic magmatism in southeast China: evidence from geological and geochemical characteristics of the Chebu gabbroite in Southern Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 79 (in press).
- Xie X, Xu X S, Zou H B, et al. 2001. Trace element and Nd—Sr—Pb isotope studies of Mesozoic and Cenozoic basalts in coastal area of SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 617~628 (in Chinese with English abstract).
- Xing G, Yang Z, Chen R, et al. 2004. Three stages of Mesozoic bimodal igneous rocks and their tectonic implications on the continental margin of southeastern China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 78: 27~39.
- Xiong X L, Li X H, Xu J F, et al. 2003. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate: the late Cretaceous Zhangtang andesites in the Huichang basin, SE China. *Geochemical Journal*, 37: 233~252.
- Xu J, Zhu G, Tong W X, et al. 1987. Formation and evolution of the Tancheng—Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific ocean. *Tectonophysics*, 134: 273~310.
- Xu X, O'Reilly S Y, Zhou X, et al. 1996. A xenolith-derived geotherm and the crust—mantle boundary at Qilin, southeastern China. *Lithos*, 38: 41~62.
- Xu X, Dong C, Li W, et al. 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian SE China: the significance of the gabbro—diorite—granite association. *Lithos*, 46: 299~315.
- Xu X, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2000. Genesis of young lithospheric mantle in SE China. *Journal of Petrology*, 41: 111~148.
- Xu X, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2003. Enrichment of upper mantle peridotite: petrological, trace element and isotopic evidence in xenoliths from SE China. *Chemical Geology*, 198: 163~188.
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Achaean lithospheric keel beneath the Sino—Korean craton in China: evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26: 747~757.
- Xu Y G, Sun M, Yan W, et al. 2002. Xenoliths evidence for polybaric melting and stratification of the upper mantle beneath South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 937~954.
- Yan J, Chen J F, Xie Z, et al. 2003. Mantle xenoliths from Late Cretaceous basalt in eastern Shandong Province: New constraint on the timing of lithospheric thinning in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2139~2144.
- Yang J H, Wu F Y, Wild S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale late Mesozoic gold mineralization in the North China craton: an association with lithosphere thinning. *Ore Geology Reviews*, 23: 125~152.
- Yang W. 2003. Flat mantle reflectors in Eastern China: possible evidence of lithospheric thinning. *Tectonophysics*, 369: 219~230.
- Yu J H, O'Reilly S Y, Griffin W L, Xu X, Zhang M, Zhou X. 2003. The thermal state and composition of the lithospheric mantle beneath the Leizhou Peninsula, South China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 122: 165~189.
- Zhang H F, Zheng J. 2003. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts from the North China Craton: A case study in Fuxin, Liaoning Province. *Chinese Science Bulletin*, 48: 924~930.
- Zheng J, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. 2004. Nature and evolution of Mesozoic—Cenozoic lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China. *Lithos*, 74: 41~65.
- Zhou X M, Xu X S, Dong Z W, et al. 1994. Mineral evidence for active continental margin in southeast China: anorthite plagioclase. *Chinese Science Bulletin*, 39: 1011~1014 (in Chinese).
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rock in SE China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269~287.
- Zhou X M. 2003. My thinking about granite genesis of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556~565 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X, Armstrong R L. 1982. Cenozoic volcanic rocks of eastern China—secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 58: 301~329.
- Zhu B, Wang H, Chen Y, et al. 2004. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asian. *Journal of Asian Earth Science*, 24: 163~175.
- Zou H, Zindler A, Xu X, et al. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance. *Chemical Geology*, 171: 33~47.

## Discussion on Some Problems of Mesozoic and Cenozoic Geodynamics of Southeast China

XIE Guiqing<sup>1,2,3)</sup>, MAO Jingwen<sup>2)</sup>, HU Ruizhong<sup>3)</sup>, LI Ruling<sup>3)</sup>, CAO Jianjin<sup>3)</sup>

1) State Key Lab. of Geological Processes and Mineral Resources, and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083; 2) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

3) Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002

### Abstract

In recent year, many achievements in scientific research on Mesozoic and Cenozoic geodynamics setting in Southeast China have been made, which include mantle source, lithosphere thinning, lithosphere extension events and tectonics setting in southeast China. Geochemical and isotopic studies indicated that mantle source are composed of depleted asthenospheric mantle and enriched lithospheric mantle beneath the crust, the subcontinental lithospheric mantle (SCLM) are predominantly EM II lithospheric mantle in the Mesozoic while asthenospheric mantle in the Cenozoic in southeast China. It is suggested that the lithospheric thinning took place in the late Mesozoic accompanied by basaltic magma underplating, which has complicated lithospheric accretion and thinning process beneath the crust in southeast China. Several lines of evidences demonstrated that lithospheric extension occurred in this region during the Late Mesozoic to Cenozoic. Moreover, local extension occurred in inland area of southeast China in the Jurassic while regional extension in the Cretaceous in southeast China. The tectonic setting that accounts for Mesozoic magmatism in southeast China has been an issue of little consensus since the last two decades and focused on whether the extensive magmatism province are related to Pacific plate subduction in the regions. From available data, it is thought that Cretaceous mantle sources have affected by Pacific plate subduction and basaltic magma underplating resulted in the lithospheric thinning and subsequent lithospheric delamination and asthenospheric upwelling. However, lithospheric extension—thinning and its deep process beneath the crust in the Mesozoic to Cenozoic in southeast China remains to be further studied.

**Key words:** mantle source; lithospheric thinning; lithospheric extension; geodynamics setting; southeast China

达尔文(Charles DARWIN),著. 1859. 舒德干,等. 译. 2005. 物种起源. 北京大学出版社,第二版(2001年第一版). 小16开,精装,共300余页. 定价35元. 本书是“科学素养文库·科学元典丛书”之一,全书由丛书主编任定成写的弁言(6页)、达尔文及有关人、景的图画(8页)、舒德干教授写的导读(29页)、西蒙·康威莫里斯先生1998年为《物种起源》中译本写的前言、达尔文原著(290页)、舒德干教授写的译后记(4页)等组成. 书中辑录了《物种起源》1859年第一版的扉页照片,其中书名为: *On The Origin of Species by Means of Natural Selection, or The Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. 舒德干教授关于《物种起源》“导读”的要点如下:①除引言和绪论外,《物种起源》的正文共有15章,可归纳为3个自然部分(每部分包括5章). 各章的“导读”除了介绍一些写作背景和学术要点外,还包含译者的少量“评述”. ②《物种起源》所创立的生物进化论包括两个基本点:A. 所有的物种都是自然演化的产物,而与上帝无关;B. 生物演化的主要机制是自然选择作用. ③达尔文的“物种是自然演化的产物”思想最初的表达方式是他1837年

绘制的极简洁的“动物演化分叉树图”;22年后,《物种起源》中唯一的插图又使这个“分叉树”规范了许多. 然而,他却将勾画完整的现代动物演化树和构建该树的早期起源模型两大难题留给了后人. 我国澄江动物群研究为后一难题提供了初步答案. ④达尔文当年所面临的另一难题是寒武纪大爆发. 早期生命研究、尤其是对澄江动物群的探索为这一谜团的破译提供了重要证据;寒武纪大爆发的研究成果支持并丰富了进化理论. ⑤《物种起源》所表达的进化论确以“渐变论”为基调;另一方面,达尔文关于物种演变的某些论述却又与现代流行的“间断平衡”理论如出一辙. 诚然,地球生命的演化历程宛如一部由渐变与突变交织而成的壮丽史诗. 既然如此,达尔文何以要反复强调“自然界不存在飞跃”的渐进演变呢?如果我们能设身处地站在一个半世纪前偏爱突变机制的神创论一统天下的大背景里去思考,也许不难悟出达尔文论战艺术的高明之处. 译后记的最后一句话是:“真诚地希望,达尔文先生这本书能像一盘可口的点心,成为您闲暇时的消遣品”. 本书邮购部电话:86-010-62752015.