



谨将此书献给第三十届国际地质大会

华南大陆地壳生长过程 与地幔柱构造



谢爽克 马荣生 张禹慎 赵西西 R. S. Coe 等著

地质出版社



华南大陆地壳生长过程 与地幔柱构造

谢舜克 马荣生
张禹慎 赵西西 R. S. Coe 等著

地 质 出 版 社
· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造/谢谏克等著. -北京:地质出版社,1996.6

ISBN 7-116-02171-X

I. 华… II. 谢… III. ①地壳运动-研究-中国-华南地区②地幔-地质构造-研究-中国-华南地区
IV. P548.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 08749 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:郑长胜

*

北京科技印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092 ¹/₁₆ 印张: 16.5 插页: 3 字数: 400000

1996 年 6 月北京第一版·1996 年 6 月北京第一次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 38.00 元

ISBN 7-116-02171-X
P·1630

前言

我们怀着极其喜悦的心情写了《华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造》一书，并庆幸它的出版。这并不是因为此书的内容有多大的建树，也不是由于它的出版将会获得什么大奖，而是庆幸它诞生在一个好时机，庆幸它遇上了一批“有识之士”的“催生”和一批有志于地质事业的国内、国际合作者的共同努力。因此，我要真诚感谢他们，感谢他们的支持和帮助。

本书是作者长期在华南地区工作成果的积累，主要是“七五”和“八五”期间对华南大陆基底构造的系统、深入研究的总结。通过“八五”期间所作的“皖南前震旦纪变质火山-沉积岩系中 Cu、Pb、Zn 富集成矿条件研究”、地矿部重大攻关项目“东南沿海基底变质杂岩及其对成矿作用的意义”、“华南大陆深部地壳结构及其演化（南区）”、1:100 万“东南沿海基底构造图”的编制等，使有些资料得以不断积累和深化，最终提出了本书中的一些新观点和新思路。

当然，我决没有忽视近几年在华南地区开展研究工作的学者所提供的极其丰富的信息。这些信息进一步帮助了我们对华南大陆演化过程的认识。

华南大陆的动力学特征，主要表现为地壳生长和大陆增生以及地幔柱构造，并且比较清楚地记录了 25 亿年以来大陆根区质量迁移、化学平衡和热历史前进演化的整个过程。通过地质—地球化学—地球物理综合研究和一致性解释，揭示了华南地壳生长和大陆增生过程是通过大陆裂解，地球深部内层物质向地表的质量迁移，最终在大陆块中稳定完成的地质效应和行为。从当前能分辨的地质记录表明，三次巨大的幕式灾变事件是推动华南大陆前进演化的原动力，也是全球灾变事件的一部分，并表现出质的飞跃。然而，每次事件都铸造出具有不同性质的独特的壳-幔结构和大陆构造模型。因此，它奠定了各旋回之间不同的大陆构造格局，并使大陆地壳由原始状态进入不稳定的低级阶段，逐渐进化为成熟的、相对稳定的大陆壳；三次全球性灾变事件不仅控制了地壳构造演化，而且强烈地表现出大范围核-幔分异，由原始地幔向亏损地幔、富集地幔、大陆地壳前进演化的规律；并且每一次灾变期所提供的物质组成和元素分配都具模糊的均一化特征。值得注意的是，随着前进演化过程，其物理-化学性质和结构都表现为不可逆。它使地球系统水圈、气圈同步发生变化，最后导致生物圈由原始型生命向高级生物进化；同时，地球物理信息同样反映壳-幔结构，只有在全球系统发生灾变幕时才能破坏或改变“原始”壳-幔结构构造。因此，华南的壳-幔结构出现“残存”与“新生”并存，新的层析成像图像揭示了古衰亡地幔柱，以及中、新生代太平洋超地幔柱的“冷盆”及“热火山链”的存在等中国东部的地球动力学特征。新—时期地幔柱构造大多数发生在大陆边缘，古地磁信息揭示了华南大陆板块迁移轨迹及大陆增生行为。

然而，上述认识并不成熟，甚至肤浅，只想提出问题，意在探索，旨在推动在新时期建立新的地球动力学和与地球完全不同的行星相互联系的行为模式。考虑表征地球非线性

动力学和动力学过程的多维模型。因此，对地球生命过程的探索，将对新时期经济建设具有不可估量的潜在效益。

作者在研究工作和编写该书过程中，曾得到各方面诸多同志的支持和帮助。其中，同位素地球化学组成的测试，由中国地质科学院地质所张宗清、付国民、陈启桐，南京地矿所赵连才、林蓉南、李坤英、修连存等，以及当时在德国哥廷根大学地球化学所工作的郑永飞完成。书中的地球物理资料，除来自美国加州大学 Santa Cruz 分校大地构造研究所张禹慎博士所作的欧亚大陆东部地区深部层析成像及该校古地磁学家 R. S. Coe 和赵西西所作的成果外，福建物探队许绳铭、广东物探队许宗尧、浙江物探队刘平山等都提供了可贵的资料。参加研究工作的有南京地矿所沈振丰、王道华、潘国民、施华生、王敬东，安徽省地矿局 332 地质队马荣生、胡济元、王爱国等学者。英文摘要由邱永泉翻译，戚建忠、张平校稿；古地磁一节的翻译为姜月华，张南海校稿。著者在此表示衷心感谢！

由于作者水平限制，书中难免有些不当之处或论点错误，旨在抛砖引玉，望读者多加批评指正。

谢宝克

一九九六年元月于南京

目 录

前 言

第一章 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造的几点新认识	(1)
第二章 华南大陆前寒武系变质基底岩石性质	(12)
第一节 古扬子块前寒武系基底岩层岩石学特征	(12)
第二节 古武夷块前寒武系基底岩层岩石学特征	(16)
第三章 华南大陆前寒武纪变质基底的同位素年龄信息	(22)
第一节 古扬子块东南前寒武纪变质基底的同位素年龄信息	(22)
第二节 粤西—桂东南云开大山前寒武纪变质基底的同位素年龄信息	(29)
第三节 海南岛前寒武纪变质基底的同位素年龄信息	(32)
第四节 古武夷块东北部前寒武纪变质基底的同位素年龄信息	(33)
第五节 古武夷块西南部变质基底的同位素年龄信息	(36)
第四章 华南大陆地壳及上地幔岩石的地球化学组成及行为	(42)
第一节 华南大陆古扬子块基底杂岩岩石化学及同位素组成特征	(42)
第二节 华南大陆古武夷块基底杂岩岩石化学及同位素组成特征	(56)
第三节 华南深部岩石铅同位素组成及铅同位素组成不均一性的分区特征	(63)
第四节 华南大陆构造边界及基底杂岩氧同位素组成	(64)
第五节 华南地壳及上地幔岩石地球化学组成及行为所提供的地壳生长和大 陆增生信息	(77)
第五章 华南大陆根带的地质特征及其性质	(78)
第一节 东南大陆捕虏岩特征	(80)
第二节 华南大陆爆破岩筒的岩石、地球化学特征	(87)
第六章 江南隆起前寒武系变质基底演化特征	(93)
第一节 江南隆起古、中元古代变质基底岩石学剖面及矿物相特征	(93)
第二节 江南隆起前寒武系基底杂岩的地球化学特征及原岩恢复	(100)
第三节 江南隆起区前寒武纪基底杂岩时代及地层对比讨论	(140)
第四节 华南大陆前寒武纪变质杂岩岩石磁各向异性研究	(147)
第七章 华南大陆地球物理特征及区内地学断面的地球物理—地质—地球化学 一致解释	(155)
第一节 区域地球物理与基底构造特征	(155)
第二节 深部地球物理特征与壳幔结构和大陆生长的相关关系	(158)
第三节 华南及邻区地幔 P 波和 S 波波速图像及地球动力学	(167)
第八章 华南大陆动力学特征及大地构造格局	(174)
第一节 华南地区大陆动力学	(174)
第二节 华南大陆基底构造演化特征	(177)

第三节 华南大陆构造格架·····	(182)
附录 中国古地理的古地磁制约——对冈瓦纳大陆的一些启示·····	(186)
主要参考文献·····	(224)
英文摘要·····	(245)

第一章 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造的几点新认识

华南位于欧亚大陆东南端，濒临西太平洋，其地球动力学特征主要表现为大陆边缘地壳生长和大陆增生，并具独特的演化模式，其演化过程又与南亚和西南太平洋的核-幔结构有着密切联系。因此，华南大陆地质已成为当今地学界普遍关心的焦点。

华南大陆是欧亚板块东南缘地壳生长和大陆增生最活跃的大陆边缘，也是陆-洋过渡带，核-幔质量传输最强烈的构造带，地球上最显著的侧向不连续地区，全球幕式灾变和地幔迁移、地幔柱生长最明显的地带。它记录了地壳生长和大陆增生的几乎全部过程。研究结果揭示了华南大陆形成过程的特殊性和大陆形成规律。通过大陆深部结构探测，对建立华南大陆地质—地球化学—地球物理多维模型奠定了坚实基础。鉴于此，获得了以下几点新认识。

一、华南联合大陆的组成

华南大陆是由不同时期的大陆块体不断拼贴联合组成的。约 1000Ma 期间，扬子块向北俯冲，在秦岭—大别山与华北板块拼接；约 500Ma 期间，武夷陆块向扬子块东南仰冲，拼贴在东南侧；210Ma 期间，东南亚陆块以软接触式拼贴在华南大陆南端，形成华南联合大陆（图 1-1）。135—85Ma 期间，在郯（城）—庐（江）—九（江）—泰（和）—韶（关）—四（会）—吴（川）以东，由于太平洋地幔柱活动，大陆基底被改造，形成广泛的中生代岩浆侵入和大陆型火山喷发。因此，该界限东侧为活动的太平洋构造域，西侧为相对稳定的扬子-特提斯构造域。

二、华南大陆前寒武纪基底杂岩的年代学特征

华南大陆前寒武纪基底，总的可分为扬子块基底和武夷山块基底。

扬子块基底，具有由西向东变新的趋势。西部川滇地区，康定群和哀牢山群的麻粒岩时代大约在 2800—2070Ma；鄂西兴山崆岭群混合花岗岩单颗锆石 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 年龄，一颗 (D—30) $2759 \pm 28\text{Ma}$ ，另一颗 (D—17) 内层 $2617 \pm 26\text{Ma}$ ，表层 $2517 \pm 48\text{Ma}$ ；黑云斜长变粒岩变质锆石 (U-Pb 法) 年龄 2891Ma（鄂西地质大队，1987；林家有，1990）；表明西部有太古宙古老基底。至江南—雪峰隆起出露古-中元古代基底杂岩，安徽休宁上溪群 Sm-Nd 等时线年龄 $2182.94 \pm 121.9\text{Ma}$ ；江西婺源障公山细碧角斑岩 Sm-Nd 等时线年龄 $1939 \pm 162\text{Ma}$ ；庐山变细碧岩 Rb-Sr 等时线年龄 $1515 \pm 214\text{Ma}$ （马长信，1991）；星子斜长角闪岩结晶锆石 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 年龄 2029—2180Ma（甘晓春、李惠民，1994）。雪峰隆起南端元宝山橄榄质科马提岩 Sm-Nd 同位素等时线年龄 $2219 \pm 111\text{Ma}$ （毛景文，1990），云开大山信宜县贵子斜长角闪岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄 2625Ma（庄文明等，1994）。

向东南，扬子块古大陆边缘，皖南、浙西、赣东北、湘东、桂东一带，最具特色的前寒武纪基底则是橄榄-辉长-辉绿-细碧角斑岩—富铝堇青石斜长花岗岩套，这套岩石的年龄为 1124—889Ma。用 Sm-Nd 法测得的年龄，皖南伏川“蛇绿岩”为 $935 \pm 10\text{Ma}$ （邢凤鸣，

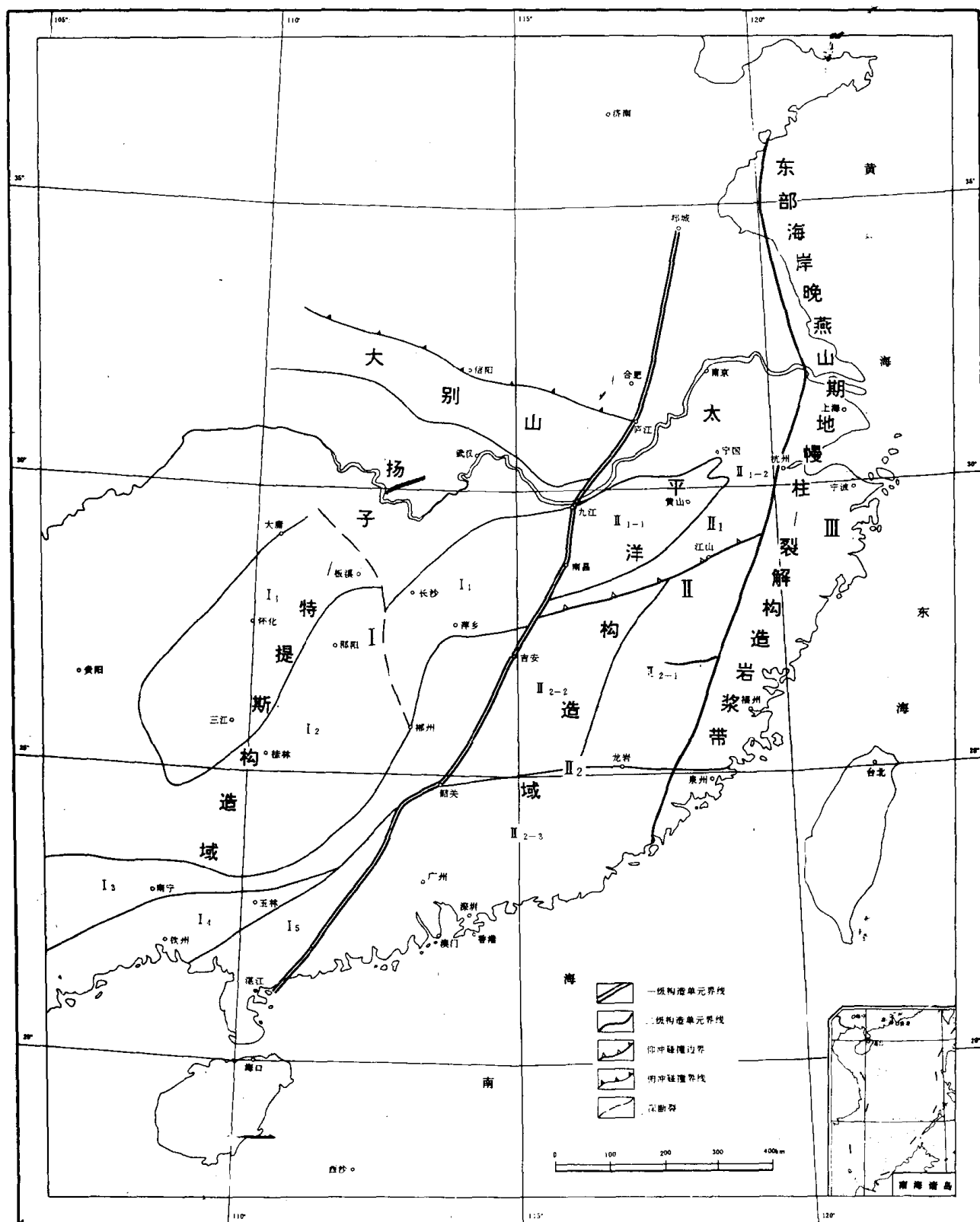


图 1-1 华南大陆地质构造图

I—扬子-特提斯构造域；I₁—九岭-雪峰山隆起；I₂—湘中-桂中特提斯构造带；I₃—湘东南-桂东加里东岩浆构造带；I₄—钦州坳断带；I₅—云开大山变形隆起带。

II—太平洋构造域；II₁—下扬子构造域；II₁₋₁—江南隆起；II₁₋₂—浙西-赣东北边缘褶皱断带；II₂—华夏构造域；II₂₋₁—武夷山变质隆起带，II₂₋₂—赣南加里东期构造褶皱带，II₂₋₃—粤东-闽东南印支期被动大陆边缘。III—东部海岸晚燕山期地幔柱-裂解构造岩浆带。

1992), 铺岭组 $1084 \pm 50\text{Ma}$, 井潭组 $1023 \pm 140\text{Ma}$, 赣东北“蛇绿岩” $955 \pm 44\text{Ma}$ (李献华等, 1994), 浙江平水群 891Ma , 湖南益阳角斑岩 821Ma , 攸鸟细碧岩 950Ma , 广西丹洲群 837Ma , 鹰扬关群 1124Ma 。

与这套火山岩伴生的堇青石斜长花岗岩的同位素年龄值也在 1000Ma 左右, 如安徽歙县岩体 928.1Ma , 浙江平水岩体 $853 \pm 18\text{Ma}$ (祁岨等, 1986), 江西九岭岩体 937.3Ma (胡世玲等, 1985), 湘东平江出露的堇青石斜长花岗岩 $844-951\text{Ma}$, 桂北本洞岩体 $1063-1198\text{Ma}$, 三防岩体 $730-808\text{Ma}$, 田蓬岩体 $952 \pm 86\text{Ma}$, 元宝山岩体 768.88Ma 。

扬子块基底岩石年龄表明, 其古老“陆核”在西北侧, 随着时代的变新, 它显示了扬子块由西北向东南, 从太古宙到新元古代地壳逐渐生长的特征。

武夷山块基底, 近年所获得的同位素年代学资料表明, 由西北武夷山, 向东南沿海, 从太古宙到古生代。西北侧为 $2300-2700\text{Ma}$; 逐渐变新至古-中元古代 $1800-2200\text{Ma}$; $1500-1700\text{Ma}$; $450-550\text{Ma}$ 。

福建建宁西部伊家湾出露的斜长角闪岩 Sm-Nd 全岩等时线年龄 $2682 \pm 148\text{Ma}$ (付树超等, 1991)。江西瑞金大柏地变粒岩的单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 $2369 \pm 3\text{Ma}$, 会昌永隆变粒岩中单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为 $2410 \pm 12\text{Ma}$ 。这些同位素年龄数据充分表明, 武夷山块腹地有太古宙至古元古代古老基底存在。

往东南, 建阳长坪—莒口一带变粒岩 Sm-Nd 等时线年龄 2116Ma (袁忠信等, 1992); 浙南八都群 Sm-Nd 等时线年龄 $2199 \pm 95\text{Ma}$ (胡雄健等, 1991); 景宁三枝树斜长角闪岩 $2071 \pm 48\text{Ma}$ (林源贤)。

上杭娄子坝群变质凝灰-硅质千枚岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1670.8 \pm 143\text{Ma}$, 尤溪梅仙变质火山岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1599 \pm 88\text{Ma}$ (黄青鹏等, 1992)。

至沿海, 广州—南澳—长乐一带的基底变质杂岩同位素年龄为广州地区片麻岩 U-Pb 单颗粒锆石 $412-548\text{Ma}$ (李昌发等, 1991), 福建东山 Sm-Nd 等时线年龄 $535 \pm 170\text{Ma}$, 福清黑云角闪斜长变粒岩 Rb-Sr 法等时线年龄 $463 \pm 15\text{Ma}$ (杨泰铭, 1985)。

深部岩石研究表明, 不管是扬子块或武夷山块, 其捕获锆石的年龄都有大于 3100Ma 的岩石存在。值得提出的是, 并不因为有古老岩石存在, 就推断华南大陆自太古宙以来就是“克拉通”, 或从那时起就具有稳定的大陆地壳性质。

三、华南大陆前寒武系基底岩石组成

华南大陆基底岩石组成的揭示, 对探索地球早期形成和发展, 以及地球动力学过程起着重要作用, 华南大陆前寒武系基底不仅表现出两大岩块时代不同, 而且显示出两大块具有不同的岩石性质。

扬子块, 基底主要表现为二层岩石结构。下地壳为以麻粒岩和科马提玄武岩、奥长花岗岩—斜长角闪岩为主组成的科马提绿岩带。目前确认存在麻粒岩的一处是大别山区, 另一处是云开隆起高州一带, 均出现在块体边界。它是下地壳在聚合边界逆冲到地表, 还是“正常下地壳”残存岩石, 抑或非正常地壳, 尚不清楚? 这些以紫苏辉石、铁铝榴石、钾长石、堇青石组成的麻粒岩, 峰期变质条件 $p = \pm 0.4-0.6\text{GPa}$, $T = 700-800^\circ\text{C}$, 退变质条件 $p = \pm 0.4\text{GPa}$, $T = 650-710^\circ\text{C}$, 地热梯度可达 $54^\circ\text{C}/\text{km}$, 形成条件为高温低压 (周汉文, 1995)。本区出现的科马提绿岩带表明, 在古元古代曾有上升的深地幔柱物质通过核-幔边界以部分熔融的方式直接从地幔中快速析出。

而上地壳则由一套分布在新元古代古大陆边缘的变质橄榄岩、辉长-辉绿-细碧角斑岩-流纹岩-堇青石斜长花岗岩组成的花岗绿岩套。这套岩系表明在活动古大陆边缘上地幔有部分侵位。上、下地壳之间除岩石组合、变质程度迥然不同之外,约1000Ma的强烈不整合构造运动,表明它们之间在地球前进演化进程中发生了质的变化。

武夷块,前寒武纪基底岩石组成为一层结构,主要为变粒岩和角闪岩类。其原岩主要属于大陆钙碱性玄武岩和大陆边缘杂砂岩。

四、华南大陆岩浆活动

岩浆大多数起源于地幔或者由于幔源岩浆加热,使地壳熔融而产生。地球系统不同历史时期幕式岩浆活动不仅反映地幔迁移,同样也反映了深部大范围地幔岩性质的前进演化特征,它产出的地球动力学环境构成了反映地球总的演化方向的动力学体系。因此,岩浆的形成、运移和侵位是地壳生长的基本过程。深部内层物质向地表的质量迁移,进一步揭示了华南地区大规模岩浆活动的构造位置是在大陆边缘。

华南大陆岩浆活动随着时代变新,幕式岩浆逐渐向南迁移,100Ma后突发向东迁移。大规模幕式岩浆作用,记录比较清楚的是从1000Ma以来,而强烈表现为地幔柱型岩浆作用,则大致为1000Ma和100Ma两期。

1000Ma时期,岩浆杂岩主要出现在扬子块上,大多数为幔源型堇青石斜长花岗岩、橄榄-辉长-细碧角斑岩系列,其构造定位在扬子块的江南—雪峰隆起两端,安徽歙县、桂北四堡及九岭山和古大陆边缘皖南、浙西—赣东北、湘东、桂东北一带。通过堇青石斜长花岗岩及石英闪长岩类的矿物学研究,表明,过铝堇青石、铁铝榴石、斜长石等矿物,开始结晶于低氧逸度的下地壳,约24km的深度。平衡结晶温度780—820℃(含2%—5%水时)。同位素组成,如浙江平水,石英闪长岩 $\epsilon_{Nd} = +4.2$ (徐克勤, 1989), $I_{Sr} = 0.7024$; 安徽休宁岩体 $\epsilon_{Nd}(t) = -0.4 \sim -0.7$, $I_{Sr} = 0.7039$; 江西九岭岩体 $\epsilon_{Nd} = 0.2$, $I_{Sr} = 0.7026$; 桂北本洞岩体 $\epsilon_{Nd} = +0.2$ (徐克勤等, 1989), $I_{Sr} = 0.7026$ (赵子杰等, 1987)。它们均靠近亏损地幔演化线,表明它们具有上地幔的同位素组成。

与它伴生的上绿岩带(橄榄-辉长-辉绿-细碧-流纹岩组合)同位素组成:平水群 $\epsilon_{Nd} = +5.98$, $I_{Sr} = 0.70417$ (林清龙, 1992); 皖南铺岭组 $\epsilon_{Nd} = +4.4$, $I_{Sr} = 0.7072$; 赣东北 $\epsilon_{Nd} = +4.3 \sim +6.7$ (李献华等, 1994); 赣西北辉绿-细碧岩, $\epsilon_{Nd} = +8$, $I_{Sr} = 0.7087$ (马长信等, 1992); 彭山群角斑岩 $\epsilon_{Nd}(t) = +2.9$; 湖南新化 $\epsilon_{Nd}(t) = +1.0019$, $I_{Sr} = 0.7058$, 浏阳变辉绿-细碧岩 $\epsilon_{Nd}(t) = +2.0$; 怀化辉绿岩 $I_{Sr} = 0.70629$ (等时线年龄 1145 ± 17 Ma), 也表现出强烈亏损地幔组成特征,同时具有相似的物质来源。

450Ma期间,岩浆作用带向南迁移,大致在北纬28°以南,北纬25°以北,其构造定位在古扬子块南缘;增生边缘位于扬子块与武夷块的软碰撞边缘。代表性岩体如江西宁冈岩体(426Ma)、上犹岩体(377Ma)、严屋岩体(400Ma)、慈竹岩体(477Ma)、乐安岩体(450Ma)、(黄萱等, 1989)、汤湖岩体(427Ma) (李献华等, 1989), 湖南雪花顶岩体(446Ma)、吴集岩体(346Ma); 广东扶溪岩体(464Ma); 福建竹洲岩体(460Ma) (袁忠信等, 1992), 南平西芹岩体(450Ma) (陈云钊, 1992)、宁化岩体(410Ma)等。

这些岩体的模式年龄 t_{DM} 大多数集中在1900—2000Ma和1600—1500Ma, $\epsilon_{Nd}(o)$ 为高负值 $-7 \sim -18$, 平均 -12.6 , $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 $-5.9 \sim -13.8$, 平均为 -8.2 。而 I_{Sr} 值绝大多数在0.709—0.728之间。这些岩浆作用反映了在板块边界,古元古代基底杂岩被向南迁移的陆

下地幔热作用,较强的地温梯度形成部分熔融和高度分馏的部分熔融高温岩浆,所以岩浆的同位素组成靠近地壳演化线,表明它们只是与地幔密切相关,但不是这一岩浆幕的地幔派生物。

210—250Ma,岩浆作用继续向南迁移,大多数出露在 $N25^{\circ}$ 以南, $N22^{\circ}$ 以北的印支造山带,主要以二长闪长岩为代表。其中以广西旧州岩体(250Ma)、台马岩体(235Ma)、牛庙岩体(211Ma)、同安岩体(211Ma)为代表。在湘中还有关帝庙岩体(230Ma)、丫江桥岩体(200Ma)、将军庙岩体(210Ma)等。

旧州岩体和台马岩体的模式年龄 t_{DM} 达3177—3400Ma, $\epsilon_{Nd}(0)$ 是华南大陆所见最大负值 -28.6 — -29.6 , $\epsilon_{Nd}(t)$ 也大到 -26.5 — -27.1 , $I_{Sr}0.72003$ — 0.72417 (黄萱等,1989);而牛庙岩体和同安岩体, t_{DM} 只有2300Ma, $\epsilon_{Nd}(0)$ 也只有 -20.1 , $\epsilon_{Nd}(0)t$, -17.9 (朱进初等,1990);至湘中各岩体, t_{DM} 为1528—2028Ma, $\epsilon_{Nd}(0)$ 为 -10.2 — -11.4 , $\epsilon_{Nd}(t)$ -8.5 — -9.4 , $I_{Sr}0.7158$ — 0.7209 。从同位素组成表明,华南大陆南缘岩浆杂岩的成岩物质均来自下地壳太古宙基底大陆地壳,向内陆熔融基底为古-中元古代地壳, $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 I_{Sr} 负值都相应减小。这些变化反映了印支期华南大陆边缘质量交换强烈,将熔融古老下地壳带至地表。其岩石组成基本上无地幔端元组分加入, ϵ_{Nd} 变化范围小, ϵ_{Sr} 变化范围大,表明这些岩浆具有一定的构造位置和继承性。

160—100Ma,华南大陆不仅有大规模的花岗岩类侵入,而且135—85Ma有数千米的大陆型中生代火山岩喷出,覆盖了欧亚大陆东南边缘。华南大陆岩浆活动在向南迁移过程中,100Ma期间突发向东迁移。最具典型意义的是,东部海岸带SN向巨型裂解带中,有独特的构造岩,碱性花岗岩—晶洞花岗岩侵入。这类花岗岩是在核-幔边界岩石圈薄弱的构造位置快速侵位的,深源、无水、高分异、非造山富碱岩浆。Nd和Sr同位素组成:在相当于103Ma岩套的 $\epsilon_{Sr}(t)$ 约45, $\epsilon_{Nd}(t)$ 约 -6 ;92Ma的碱性花岗岩套 $\epsilon_{Sr}(t)$ 约30, $\epsilon_{Nd}(t)$ 约 -3 (Martin H, 1991)。两个岩套的全岩样品 $\delta^{18}O$ 值为 $+6.1\%$ — $+8.8\%$ 之间,然而每个岩体 $\delta^{18}O$ 值变化范围都比较大,都向 $\delta^{18}O$ 值降低的方向变化,其最低值都低于花岗岩的正常下限值,并且从南向北有渐低的趋势,特别是黑龙江碾子山岩体的 $\delta^{18}O$ 可低到 -1.2% 。 δD 值变化范围也比较宽,并向 δD 值降低方向变化,最高值绝大部分低于 -100% ,似乎有一个共同的下限为 -145% 。水含量低,一般小于0.2%,变化范围窄,因而 δD 与 H_2O 含量之间普遍存在陡直的相关关系。

上述数值通常被解释为地幔来源的标志,没有地壳物质的大量参与。地球物理信息也证明该岩浆构造带下存在高热地幔软体,并侵位至陆下38km。

五、华南大陆地壳的地球化学组成

华南大陆地壳的同位素地球化学组成表明,不同时期的各生长层具有各自的地球化学组成特征,而且各生长层的地球化学性质表现了相对的模糊均一化。同时,各生长层的地球化学性质也反映出物源和地球系统之间物质的交换作用,并显示出自身的独特性。在长尺度的时间函数上观察,它们具有前进演化的趋势,由原始地幔→亏损地幔→富集地幔→大陆地壳。因为大陆地壳、地幔和地核是地球化学分异的基本表征,核-幔分异发生在地球历史的早期,而大陆的产生一直持续到现在。因此,大陆各生长层是地球长期化学和热演化的示踪,并赖以确定华南大陆地壳年龄、增长速率和机理。

华南大陆幔源与壳源岩石Nd-Sr同位素组成研究表明,华南大陆地幔存在明显的区域

不均一性, 据此可划分为两大块:

A. 扬子块, 由下地壳原始地幔(科马提下绿岩)组成。它们的模式年龄可代表 Sm-Nd 或稀土元素从地幔分离出的时间, 与成岩年龄接近一致, 表明未分异原始地幔直接形成初始地壳。如江南隆起“上溪群”模式年龄为 2164—1715Ma, 成岩年龄为 2184Ma; “障公山群”模式年龄 1988—1514Ma, 而成岩年龄为 1939Ma; 雪峰隆起“四堡群”模式年龄 2176—1992Ma, 成岩年龄 2219Ma。它们的 Nd、Sr 组成, 上溪群 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +9.43, I_{Sr} 0.7088—0.7093, 障公山群 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 5.81, 四堡群 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ +5.9, I_{Sr} 0.70390。大量的太古宙-古元古代岩石同位素组成表明, $\epsilon_{\text{Nd}}^{\text{CHUR}}$ 都接近正值或零, 以致于相当部分岩石为 $\epsilon_{\text{Nd}}(o)$ 为正值(+0.3—+5.3), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.704—0.705$, 可以视为未分异地幔值。当考虑形成岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为正值, 原始地壳初始值 0.703—0.708 时, 这种未分异储库的 Sm/Nd 值十分稳定, 而且接近于球粒陨石值, 可以认为成岩时有更老的地壳物质存在, 同时也表明在地球形成过程中, 地幔的原始化学成分和同位素组成就存在着不均一性。

扬子块的中地壳, 中-新元古代的花岗绿岩套(上绿岩), 同位素组成 Sm/Nd 都在 0.25—0.47 之间, 平均 0.33 左右, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.137—0.222$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.512449—0.513496, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 在 +0.08—+6.7, 一般为 +5.0 左右, 而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值一般在 0.7026—0.7072。这些高钕、低铈同位素组成, 明显位于地幔系列的亏损源地幔区。

B. 武夷块, Nd-Sr 同位素组成表现为富集地幔端员, 其 Sm/Nd = 0.19—0.28, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.511936—0.512686, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +7.289—+8.71。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为 0.7044—0.7070。Sm/Nd 值从接近地壳岩石值(0.195), 到偏离地壳、到接近地幔值, 反映这些岩石明显偏离原始地幔, 为地幔分馏的“多次源”产物, 或为再循环洋壳及其它混合岩母岩成因的端员组分。它与扬子块前寒武纪中、下地壳的原始地幔和亏损地幔组成完全不同。

当然, 武夷块的前寒武纪基底, 不存在与扬子块相同的 1000Ma 灾变事件, 在大陆边缘裂解带有大量侵位的亏损地幔物质。有意思的是, 地幔组分被 Hart (1984) 认为只存在南半球的 Dupal 带。武夷山块古地磁资料证实, 它们确为来自南半球的块体, 450Ma 期间增生到欧亚大陆东南边缘, 两者不谋而合。

Sm-Nd 模式年龄及 ϵ_{Nd} 的相关关系表明了华南大陆生长时间曲率及性质。同时显示出华南大陆扬子块与武夷块的生长历史完全不同。通过地幔储库 Sm-Nd 变化值研究, 表明这些岩石从具有 CHUR 地幔岩浆库中分异形成后到目前所经历的时间, $\epsilon_{\text{Nd}}(o)$ 值的分布情况反映了产生这些岩石源区 Nd 同位素组成的特性。

扬子块, 前寒武系岩石的 Nd 同位素组成, 表明有五个明显的生长层。第一生长层, 2200Ma, ϵ_{Nd} 为 -16—-19, 同时有 +2—+8, 显示了物质组成的“多源化”; 第二生长层, 1900—2000Ma, ϵ_{Nd} 为 -14; 第三生长层, 约为 1600—1800Ma, ϵ_{Nd} 为 -10; 第四生长层, 约为 1100Ma; ϵ_{Nd} 为 -2—-5; 第五生长层, 约为 900Ma, ϵ_{Nd} 从 -3—+6, 这一时期大多由 CHUR 地幔值的亏损地幔物质组成。

武夷块, 生长层明显的仅出现四层, 与扬子块生长期完全不同, 而且大多数低于球粒陨石 CHUR 演化线, 但存在高负值的 ϵ_{Nd} 太古宙岩石。四个生长层, 大致在 2600—2800Ma, ϵ_{Nd} 具高负值, 为 -26; 出露最广的生长层为 1900—2200Ma, ϵ_{Nd} 为 -14; 生长层 1700—1800Ma, ϵ_{Nd} 为 -10; 生长层 1200—1300Ma, ϵ_{Nd} 约为 -3。

根据不同 Nd 同位素组成所划分的生长层, 与地球物理所获得的波速层基本一致。这对

建立地质—地球物理地壳演化模型奠定了基础。

六、华南大陆地壳生长与地幔柱构造

华南地壳生长主要表现为沿大陆边缘大型裂解带下地幔上涌，地幔柱式对流控制的垂向生长。代表地幔柱已到达地面的特征则是热点。幕式地幔柱对流热和物质，通过地球深部内层物质向地表的质量迁移来完成。地幔柱构造的大部分特性取决于地球内部边界层的不稳定性，由于地幔柱源区和路径的内在不固定和非线性，地幔演化序列中短命地幔柱转变成“岩浆团”构造是非常不稳定的，而岩浆的形成、运移和侵位是地壳生长的基本过程。

地球内部地幔演化的最初阶段以生长构造为主的，湍流型对流起主导作用，地幔的热迁移是通过地幔柱型式发生的，而地幔柱刚好在核-幔边界沿地幔下部边界层上升。华南大陆太古宙-古元古代由这种成因形成的大型火山热点幕式岩浆，以出现在古扬子块东南边缘，江南—雪峰构造带上的科马提绿岩为代表，代表了通过一个上升的深层地幔柱的部分熔融方式，直接从地幔中析出的物质，清楚地记录了古大陆边缘地幔柱生长的特征。

1000Ma 的幕式灾变，则表明了地幔柱构造的不稳定性，在古扬子块大陆边缘裂解带中形成橄榄-辉长-辉绿-细碧岩套地幔生长层。它代表新的地幔柱——热点火山作用。而决定地幔柱类型和位置，是由冷地幔柱扰乱引起的。古扬子块边缘的地幔柱构造，表现了威尔逊旋回的概念，具线性排列。冷地幔柱在 CMB（核-幔边界）上诱发一条较小密度物质的热地幔柱链。这是扬子块 1000Ma 大陆边缘动力学过程地幔柱构造作用。

100Ma 的幕式灾变，为晚白垩世中国东部引发的周期性幕式地幔柱活动。地表所出现的是热点火山与重力塌陷。欧亚板块东部所出现的大规模线性沉降带，如台湾海峡、苏北沉陷、渤海湾等沉降带，是块体边缘的大型塌陷。它们是冷块体在轻浮的大陆岩石圈之下发育时，所产生的块体向下拉动岩石圈沉降产生的盆地和厚的大陆沉积带。冷的块体离开岩石圈板块，盆地上升，在裂解构造张力场中，冷的团体或冷地幔柱开始沉向更深处，疏开的空间将充填附近的下地幔内热物质。对流的地幔柱体，热物质上升，因此在欧亚大陆东部边缘裂解带中形成大规模的火山活动。所以 100Ma 期间，中国东部出现大面积与俯冲无关的大陆型火山，而与线性塌陷、非造山板内火山作用的潜在源——地幔柱构造机制有关，以致晚期阶段下地幔中存在一个超级冷地幔柱。层析成像已揭示了这一现象。

华南地壳生长是依赖地幔柱的迁移不断扩张的，而每隔 1000Ma 的不稳定周期幕式性活动是该区特性；深源岩浆同位素成分表明，它与喷发地理位置之间有强烈的相关性，也反映了不同时代地幔柱之间的主要界线和迁移过程。

七、华南不同构造域的大陆根带深度、分层和性质

华南大陆根带的密度、温度、成分变化、深度以及变形历史的研究，对探讨地幔演化过程以及大陆动力学有显著影响。通过层析成像和反射地震测量，陆下地幔的直接样品——捕虏岩和高度碱性熔岩的化学研究，获得的上地幔层序、地质温度、压力数据与地球化学模型、地球物理信息一致。

华南大陆的演化与西南太平洋地幔柱构造有着密切关联，表明中国东南沿海为高温、低压、浅大陆根（40—86km）的低速地幔软块——太平洋构造域。该构造域最大特点为地幔柱活动区，有大量的地幔捕虏岩通过火山喷发被带至地表，揭示了上地幔分层、性质和深度。东南大陆上地幔大致可分为四层，由沿海向内陆大陆根带逐渐变深。台湾、海南主要为方辉橄榄岩、纯橄岩，深 37—50km；沿海为尖晶石二辉橄榄岩，深 56—66km；往内陆

为石榴石/尖晶石二辉橄榄岩,深 62—80km;石榴石二辉橄榄岩,深 79—83km。这些已获得地球物理资料的验证(刘若新等,1985;张儒媛等,1982,1983,1987)。

扬子-特提斯构造域则与东部太平洋构造域完全不同,很少有被火山岩带至地表,直接反映大陆根带的岩石捕虏体,主要为来自深源大陆岩石圈的高度碱性熔岩——金伯利岩和类金伯利的玻基辉橄角砾岩,粗钾镁煌斑岩、橄辉云煌岩类的类金伯利岩爆破岩筒。其同位素组成, I_{Sr} 为 0.7055, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 为 0.512785, ϵ_{Nd} 为 +2.8,表明它们来自亏损地幔源区。推论来源深度,玻基辉橄岩筒为 100—120km,钾镁煌斑岩筒 120—150km。这一特征反映了该构造域为相对稳定的高阻、高速、低温硬块,具有较深层大陆根。这充分反映出燕山旋回以来组成华南大陆东西两大构造域的地壳构造及陆下深部结构的巨大差异。

八、中国东南大陆边缘南北向巨型裂解带

华南大陆边缘巨型裂解带,通过地质记录能认识的至少有三次灾变幕。然而裂解过程及地质、地球物理记录保存最清楚的为谢谠克 1987 年提出的,约 100Ma 左右晚白垩世中国东部南北向巨型裂解带。

沿着中国东部边缘,地表特征为 NS—NNE 向火山热点连接成的链状山脉,一些残存古破火山口呈环形构造及塌陷。

沿着东部海岸,覆盖数千米的大陆型中生代白垩世火山岩(125—85Ma)、英安流纹岩及侵入的富碱钾长花岗岩,它们是地幔热边界层不稳定产生的热地幔柱——板内热点火山作用的产物。随着时代变新,新一代彼此相互平行的裂解带,逐渐向东推进。而老的、已熄灭的古火山带向西迁移,远离正在活动的年轻热点——火山链,这是西太平洋构造演化的特点。

由于重力塌陷与地幔柱活动成对出现,由于周期性冷物质重力塌陷,致使下地幔出现下降流,大的下降流在下地幔形成吞没较小规模的冷地幔柱过程中,巨大而规则的地幔下降流可能在下地幔发育,大陆岩石圈便向冷的超级地幔柱移动。结果在大陆板块内形成一条被地幔流连续破坏的一系列孤立单元——岩浆团构造——地幔柱东部大陆火山链;同时,相邻一侧的华南东部边缘出现了一系列沉降盆地。它们都对应着上地幔低速层,低速层顶面深约 50km 左右。它们局部隆起是形成沉积盆地的深部机制。

裂解带的地球物理信息证明了该演化过程:

(1) 地幔流应力场分析表明,中国东部陆缘低阶地幔流应力场,从大陆到边缘海总体向洋一侧发散,这一地幔应力场以下降流为主导,在 $120^{\circ}E-123^{\circ}E$ 大陆边缘形成近 NNE—SN 向汇聚带,并近于垂直,说明这一地带为西太平洋核-幔边界不稳定带,地幔对流构造区(南海海洋研究所,1988)。

(2) 利用层析成像和模拟得出的地幔中密度场的结构和上、下地幔之间物质通量的性质、对流系统性状变化,对了解大陆构造是关键。中国东部 S 波三维速度结构(宋仲和等,1992) 研究表明,在纵剖面 SV 速度(km/s) 分布图(图略)中,东部沿海是质量交流地带,在 102—103 格陆下地幔 50—240km 深度出现的陡直波速界面,靠大陆一侧 SV 速度为 4.5—4.7km/s 的高速层,东侧海区为 3.9—4.1km/s 的低速层;116—117 格,同样在陆下地幔 110—240km 深度出现陡直界面,靠大陆一侧 SV 速度为 4.4—4.7km/s,东侧海区 SV 速度为 4.0—4.1km/s。50—100km 深度靠大陆一侧有 4.4—4.7km/s 的高速块体存在;126—127 格界线分明的陡直界面深度下降至 140—240km,大陆一侧为 4.5—4.7km/s,

东侧海区为 4.0—4.3km/s。值得注意的是，在 123 格西部三江地带同样出现 SV 速度两侧不同的陡直界面，东西两界面之间自身形成一对流环体系。这是华南大陆陆下地幔的重要结构（图 1-2）。

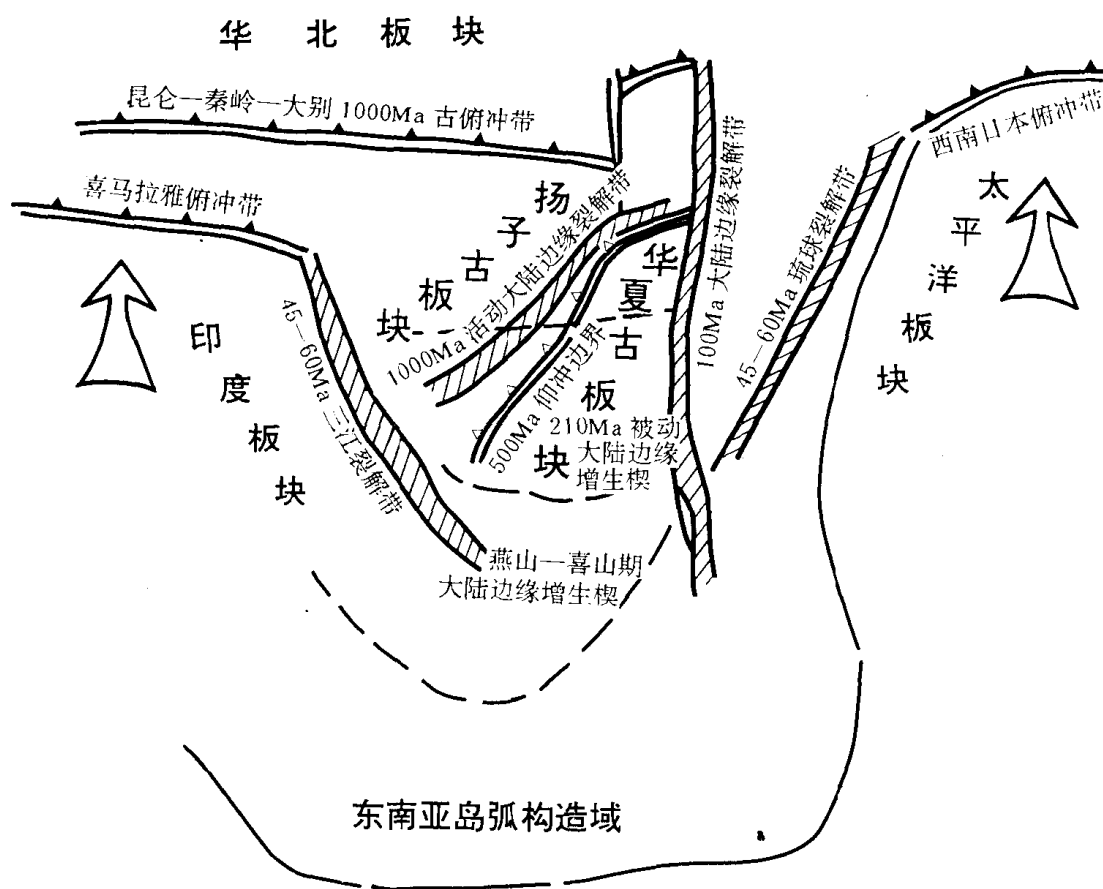


图 1-2 华南大陆与周边构造演化示意图

从上述 SV 速度结构表明，陡直界面是陆下地幔软、硬物质传输的构造带，东部大陆边缘裂解带对应的位置；剖面 SV 速度分布 50—110km 深度出现的高速硬块可能是下降冷块；东西两侧出现的对称陡直界面，是否表明华南东部沿海及西部三江地区同样存在对应的核-幔质量对流边界带。

最近，张禹慎通过 18000 多道地震面波记录，以 SV 波速度模型 RG5.5 所获得的深部结构图。从陆下 38km 至 410km 深度绘制成 8 张平面异常图，反映了西南太平洋低速塑性幔柱群组成的超级地幔柱构造，在上地幔中分裂成相互独立的，较小次地幔柱。平面图显示华南大陆及西南太平洋陆下 38km 至 250km 是低速区，为低速软流层；随着深度的增加，各分隔的低速软流层连接成片，并向南太平洋退让，被高速硬块所取代。

值得注意的是，陆下 210km 以上的低速软流层的分布，与华南大陆太平洋构造域一致。陆下高热、低波速、低阻异常带控制着华南大陆板块的演化，反映了组成华南大陆太平洋构造域与扬子-特提斯构造域的深部结构差异（详见第七章）。

(3) 华南大陆东部边缘裂解带重力场特征表明, 东南沿海岸带呈重力异常正、负值交界带。向东海域自西向东, 重力异常逐级上升, 由 $40 \times 10 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$, 升高至琉球海沟以东的 $260 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。它们与地下软体和质量汇聚带相一致, 可能为重力塌陷带的表征。

(4) 大地电磁测深电阻率断面图显示, 中国东南大陆边缘裂解带为高热、低阻带。泉州—昆山一线以东为低层电阻率梯级带, $50-100 \Omega \cdot \text{m}$ 电阻率等值线在地下 10km 内, 呈陡直紧密梯级带, 与 SV 波速陡直界面一致。显示了扩张裂解质量传输带的特征。上地幔高导层被撕裂, 上升至地下 20km 范围内 (地矿部第一综合物探大队, 物探研究所, 1990)。

(5) 东南大陆边缘热流场趋势特征为: 热流分布规律受总的地质构造部位所控制, 处于扩张环境的部位, 是深层高温地幔物质对流传输的有利地带。东部裂解带是环太平洋高热流带的一部分, 趋势变化十分规律, 热流等值线沿着东部大陆边缘呈近 NNE 方向。受中国东部深层地幔物质向东蠕散的影响, 热流趋势值升高由大陆 $40-60 \text{mW/m}^2$ 之间, 向东逐渐增至 80mW/m^2 , 至冲绳海槽热流密度值最高可达 200mW/m^2 , 台湾岛 160mW/m^2 (高志清, 1992)。这一高热流趋势区可与裂解带下深层地幔柱高温、低速层物质对应。因为地幔热迁移是通过地幔柱型式发生的, 而这种地幔柱被认为是刚好在核-幔边界上的地幔下部边界上升的。

(6) 东南大陆边缘裂解带具有独特的地壳结构。地壳结构为梯状, 具大陆向大洋过度的地壳—上地幔结构特征, 厚度比内陆薄 $2.5-4 \text{km}$, 地壳介质纵波速度 (P) 略高, 约 6.30km/s , 莫霍面 P 波速度低 (7.9km/s)。

长江下游昆山以东 ($EL121^\circ \text{N}$, $NL31^\circ$) 地震速度结构, 下地壳有 $PV=6.8 \text{km/s}$ 的高速层; 中地壳存在 $PV=5.9-6.0 \text{km/s}$ 的低速层和 $PV=6.3 \text{km/s}$ 的中速层, 上地幔顶部 $PV=7.92 \text{km/s}$; 福建宁德 ($EL119^\circ 31'$, $NL26^\circ 40'$) 下地壳下部为 $PV=7.00 \text{km/s}$; 往南至福州—汕头地壳结构, 下地壳高速层 $PV=7.21 \text{km/s}$, $H=7 \text{km}$, 中地壳低速层 $PV=5.52 \text{km/s}$, $H=4.00 \text{km}$ 。上地幔顶部速度 $PV=7.85 \text{km/s}$ (廖其林等, 1988.5); 南海东部 $EL119^\circ 27.6'$, $NL18^\circ 42.5'$, 大洋层 2 有中速层 $PV=6.3 \text{km/s}$, 大洋层 3 中有 $PV=7.4 \text{km/s}$ 的高速层。上述资料表明, 中国东南裂解带由北向南, 一直延入马尼拉海沟两侧, 地壳结构普遍存在下地壳高速层, 中地壳低速层及中速层。南段, 高速层速度偏高, 表明壳—幔混合强烈; 北段, 低速层为岩浆房及中速层动力变动面。它们反映了裂解带下核—幔边界热对流地幔柱构造特征。

九、华南大陆幕式灾变的地壳生长和大陆增生

华南大陆上、下地幔间物质通量对流是驱动块体运动和大陆裂解构造的主要机制。因此, 华南大陆生长主要地带——大陆边缘, 受幕式灾变幔柱构造垂直运动所控制。随之产生的岩片迁移则表现为水平运动。

因此, 华南地壳生长和大陆增长方式已否定了将造山带完全归因于板块俯冲、仰冲造山的简单板块模式。华南联合大陆所见 1000Ma 发生的秦岭—大别山古俯冲造山带; 萍乡—象山仰冲造山带之外; ①片体拼贴, 是华南大陆增生的重要形式之一。武夷山变质地体就是由三个逐渐向洋增生的大岩片组成; ②华南被动大陆边缘前陆盆地增生棱柱体; ③另一种重要的增生形式, 为大陆边缘裂解带的增生岩浆地体。如 1000Ma 期间古扬子块东南大陆边缘大量的辉绿—细碧角斑岩沿近 EW 向裂解带喷溢, 构成新元古代生长层; 100Ma 中国东部受近 SN 向裂解带控制, 大量的富碱酸性岩浆杂岩侵入和喷出, 构成华南大陆边缘新地