

中国大陆岩石圈结构与动力学

第六图书馆

大陆 岩石圈结构 动力学 地学断面 中国地球物理学报刘国栋不详1994第六图书馆

65-81

中国大陆岩石圈结构与动力学

刘国栋

(国家地震局地质研究所, 北京 100029)

摘 要

本文是作者受国际大地测量和地球物理联合会中国国家委员会的委托, 为 1995 年第 21 届 IUGG 大会编写的中国国家报告。报告涉及了 1991—1994 年期间中国在大陆岩石圈结构和动力学研究领域内的主要活动和所取得的重要成就, 以及各种深部地球物理探测手段在岩石圈研究中的进展情况。将中国大陆岩石圈以南北构造带为界划分为东、西两大部分, 在每一部分内又进一步划分出不同的区或带, 并较详细地论述了这些区和带的岩石圈结构特征。在此基础上, 结合地质学的某些主要研究成果, 重点探讨了中国东部大陆岩石圈演化和动力学过程。

关键词 中国大陆岩石圈结构, 动力学, 地学断面。

一、主要工作和研究领域

1991—1994 年中国对大陆及其海域的岩石圈结构与动力学研究的主要工作和研究领域包括:

1. 全球地学断面的编制、研究和出版

全球地学断面计划(Global Geoscience Transects Project, 简称 GGT)是国际岩石圈委员会制定的全球性地球科学重大的前沿性课题, 1985 年 8 月提出, 1986 年成立全球地学断面协调委员会(CC-7)。中国岩石圈委员会 1986 年 7 月在北京召开的第二次会议上, 确定在全国范围内编制 11 条地学断面, 后来根据实际情况调整为 9 条, 它们是:

(1) 江苏响水—内蒙古满都拉地学断面, 长 1200km, 国际编号为 GGT2, 国家地震局负责, 主编为马杏垣、刘昌铨和刘国栋。1991 年由国家地震局地学断面编委会以及国际岩石圈委员会和美国地球物理学会分别以中文和英文出版^[1,2]。

(2) 亚东—格尔木地学断面, 长 1400km, 国际编号为 GGT3, 地质矿产部负责, 主编为吴功建、肖序常和李庭栋。1991 年由国际岩石圈委员会和美国地球物理学会以英文出版^[3]。

(3) 内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟地学断面, 长 960km, 国际编号为 GGT13, 国家地震局负责, 主编为卢造勋和夏怀宽。由国家地震局地学断面编委会于 1992 年和 1994 年分别以中文和英文出版^[4,5]。

(4) 青海门源—福建宁德地学断面, 长 2200km, 国际编号为 GGT14, 国家地震局负责, 主编为林中洋、蔡文伯、陈学波和王椿镛。由国家地震局地学断面编委会于 1992 年和 1994 年分别以中文和英文出版^[6,7]。

(5) 湖北随县—内蒙古喀喇沁旗地学断面, 长 1200km, 国际编号为 GGT15, 国家地震局负责, 主编为孙武城、马宝林、宋松岩和胡鸿翔。由国家地震局地学断面编委会于 1992 年和

1994 年分别以中文和英文出版^[3,9].

(6) 云南遮放—马龙地学断面, 长 745km, 国际编号 GGT16, 国家地震局负责, 主编为阚荣举、韩源. 由国家地震局地学断面编委会于 1992 年和 1994 年分别以中文和英文出版^[10,11].

(7) 上海奉贤—内蒙古阿拉善左旗地学断面, 长 1700km, 国际编号为 GGT17, 国家地震局负责, 主编为孙武城、徐杰、杨主恩和张先康. 由国家地震局地学断面编委会于 1992 和 1994 年分别以中文和英文出版^[12,13].

(8) 台湾—阿尔泰地学断面, 长 4300km, 地质矿产部负责, 主编为袁学诚等, 本文简称为 GGT(T-A), 将出版^[14].

(9) 满州里—绥芬河地学断面, 长 1300km, 地质矿产部负责, 本文简称为 GGT(M-S), 将出版^[15].

中国的上述 9 条地学断面是完全按照全球地学断面编制指导书进行的^[16], 其内容包括 1/1000000 比例尺的 100km 宽地质走廊条带图、重力条带图(附有大地热流值和震中分布)和磁力条带图, 0—10km 深的地质断面图, 综合地球物理剖面图(含有宽角反射/折射剖面、大地电磁测深剖面、面波反演结果及地壳上地幔密度分布等信息)和解释性的岩石圈结构断面图, 还包括地层柱状图, 构造地层时-空图, 岩石圈构造概要图, 区域构造索引图和由古地磁数据得出的地质块体古纬度变化等图件; 此外, 每条地学断面还根据具体情况附有全断面的或部分地段的岩石圈演化模型. 可见地学断面内容十分丰富、齐全, 它包括了地质学、地球物理学和地球化学等学科的主要研究成果. 中国的每条地学断面在编制过程中, 还针对该断面所面临的地学热点问题开展了专题研究. 每条地学断面都附有详细的说明书.

中国的 9 条地学断面全长 15000km, 它们穿过了中国大陆的主要地质构造单元. 其中有 6 条地学断面的主要部分位于中国大陆的东部, 两条位于西部, 一条横跨东西. 地学断面的编制和研究对于了解中国大陆的岩石圈结构演化和动力学过程, 对于矿产和能源预测以及减轻地震灾害等都具有十分重要的意义. 本文将简述其主要研究成果. 除上述 9 条断面外, Rodnikov(前苏联), Isezaki 等(日本)和刘国栋(中国)还合作编制了华北平原—菲律宾—马里亚纳海沟长近 5000km 的地学断面, 并于 1991 年以俄文出版^[17].

2. 中国海区及邻域地质-地球物理系列图编制、研究与出版

这一系列图由刘光鼎主编, 1992 年出版^[18]. 系列图系统地整理了过去 30 多年来地质矿产部在中国海域地区所完成的海洋地质-地球物理调查和研究的成果, 并在此基础上深入总结了我国海域地质构造的形成和演化等问题. 系列图的编图范围为东经 102°—140°, 北纬 0°—42°. 中国海域在此图幅中大致呈北东—南西的弧带, 其西北部分是中国大陆的一部分. 该系列图比例尺为 1/2000000, 共 9 幅, 包括地形图、地貌图、空间重力异常图、布格重力异常图、磁力剖面平面图、地质图、地球动力学图和大地构造图.

3. 青藏高原岩石圈结构、现代地壳变形及动力学研究

青藏高原一直是世界地学界所瞩目的热点地区. 1991—1994 年期间像过去一样开展了多方面的地学研究, 其中关于岩石圈结构与动力学研究中比较重要的课题包括: 马宗晋负责的“青藏高原现今岩石圈变动与动力学研究”, 赵文津和 K. D. Nelson^[19]负责的“喜马拉雅和西藏高原深地震反射剖面计划”, 曾融生和 Wu^[20]负责的“西藏高原岩石圈结构调查”的中、

美合作研究项目。孔祥儒等负责的“青藏高原西部岩石圈结构和地球物理综合研究”项目以及姜枚和 A. Hirn^[21]负责的“青藏高原岩石圈结构与地壳厚度增厚和缩短机制研究”的中、法合作项目。

4. 造山带岩石圈结构与动力学研究

1991—1994 年除上述的对喜马拉雅新生代碰撞造山带进行详细的岩石圈结构探测外, 还对中国大陆的其他造山带进行了类似的研究, 例如吴宣志^[22]、崔作舟^[23]、高锐^[24]等对祁连山造山带所进行深部探测研究。袁学诚等^[25]对东秦岭褶皱带所进行的深地震反射剖面观测和研究。孔祥儒、熊绍柏等^[26, 27]对华南褶皱系所进行的岩石圈结构和综合地球物理研究。卢造勋、白登海等^[28, 29]对兴蒙造山带所进行的深部构造研究。

5. 大陆裂谷岩石圈结构和裂谷模型研究

1991—1994 年期间, 有关大陆裂谷区岩石圈结构的探测研究主要集中在新生代山西裂谷系^[30]和新生代华北平原裂谷系地区^[31]; 此外, 对云南西部的中生代楚雄裂谷和兰坪—思茅裂谷的岩石圈电性结构及裂谷模型也进行了比较详细的探测研究^[32]。

6. 板内大震震源结构及介质物性的探测研究

中国是板内大震多发国家, 特别是 20 世纪 60—70 年代华北地区发生了一系列强震, 造成了惨重的人员伤亡和财产损失。为了研究板内大震的震源结构、介质物性特征和孕震环境, 在 1991—1994 年期间, 由刘国栋、张先康和王椿镛负责对华北的几个大震区的地壳细结构进行了综合探测和研究。

上述的有关岩石圈结构与动力学的研究项目, 都是得到政府部门或国家自然科学基金会资助的重大或重要的科研项目, 并多数属于多手段的综合性研究项目。此外, 在 1991—1994 年期间, 还开展了多项专题研究, 例如利用面波反演中国大陆及海域的地壳上地幔三维速度结构^[33-36]。利用地震 CT 技术研究秦岭造山带及其南北缘的深部构造^[37], 研究山西裂谷带临汾地堑的地壳结构^[38], 研究渤海及其邻区的地壳上地幔速度图像^[39], 研究渭河断陷及邻近地区地壳速度图像^[40]等, 主要偏重于局部地区的地震层析成像研究。根据在中国大陆地区获得的 686 个大地热流值, 对大陆的大地热流分布特征、岩石圈热结构^[41]及热结构分类^[42]进行了研究, 同时在中国东南、华北、西北等地区进一步开展了大地热流观测^[43-45]。在 1991—1994 年期间, 利用大地电磁法对中国大陆的岩石圈电导率结构探测和研究做了大量工作。在这一期间内完成的大地电磁测点数约 4000 个, 其中深大地电磁测深点约占 1000 个, 主要分布在中国西南、东南地区, 部分分布在西藏、西北和东北地区(据 1994 年 10 月在武汉举行的中国第三届大地电磁学术会议提供的信息)。这些成果主要由石油天然气总公司的下属部门会同有关单位完成的, 其中绝大部分尚未公开发表。1993 年出版的“电磁方法研究与勘探”一书, 包括了部分岩石电性结构探测结果^[46]。此外, 近年来还开展了深部瞬变电磁法(LOTTEM)和电磁阵列剖面法(EMAP)研究^[46, 47]。

以研究岩石圈结构和动力学为目的的爆炸源地震测深剖面, 过去主要集中在东部大陆地区, 1991—1994 年期间在中国西部大陆地区也加强了研究, 其中除青藏高原外, 横穿塔里木盆地完成了两条地震转换波测深剖面^[48], 有一条地学断面穿过中国西部大陆^[49], 有 7 条人工地震测深剖面穿过青藏高原东缘和东北缘^[50-52], 它们为研究中国西部大陆岩石圈结构和动力学提供了有价值的信息。过去中国在研究地壳速度结构方面所采用的主要手段

是宽角反射/折射方法,到目前已完成了约 40000km 长的剖面工作量;80 年代后期以来强调了深地震反射法的应用,到目前共完成了 17 条全长 1412km 的深地震反射剖面,它们分别位于唐山地震区^[53]、邢台地震区^[54]、扬子地台区^[55]中生代大庆裂谷^[56]、新生代延庆—怀来地堑^[57]、东秦岭褶皱带^[25]、喜马拉雅山^[19]和北祁连山—河西走廊^[22]以及南海北缘东部^[58]。

二、中国大陆岩石圈结构与动力学研究

1. 南北构造带

根据地球物理场、岩石圈结构、地震活动性和区域地质构造特征,中国大陆可分为东、西两部分,其分界线位于大陆中部的东经 101°—106°(自南而北),称为南北构造带。南北构造带的主要地球物理和地质构造特征是^[59]:

(1)南北构造带是一条巨型重力梯级带,平均宽约 150km,梯度值约为 $0.7 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{km}$ 。南北构造带以东的区域布格重力场为 NE—NNE,异常值从海域的 $300 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 降至南北构造带东侧的 $-150 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;南北构造带以西的区域布格重力场为 NWW—EW 向,异常值由北部的阿尔泰地区的 $-100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,降至南部西藏高原的 $-525 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

(2)南北构造带是均衡重力异常的分界带,以东均衡异常从海域的 $(10-30) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,向西逐渐降至南北构造带东侧的 $(-10-30) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,基本处于均衡状态;以西,除青藏高原处于均衡补偿状态外,其周边和以北地区处于明显的不均衡状态,在高山区有高达 $(60-70) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的正异常,在盆地区有 $(-60-80) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的负异常。

(3)南北构造带也是区域磁异常的重要分界线,以东区域磁异常走向以 NE—NNE 为主,磁异常结构复杂,具明显的分区性;以西区域磁异常走向以 NWW—EW 占优势,具明显的线状分布特征。

(4)南北构造带是地壳厚度和岩石圈厚度明显变化的地带,地壳厚度从该带以东的 42—43km,增加到该带以西的 50—52km(北段)^[50,6]和 54—58km(中段和南段)^[51,14],并且显示出地壳有由西而东仰冲的特点。

(5)南北构造带下方是上地幔高导层隆起带,高导层顶界埋深 80—90km,比东西两侧分别浅 30km 和 50km。

(6)南北构造带是一条强烈的地震活动带,并且该带以西的强震活动带呈 NWW—EW 向展布,以东的强震活动带以 NNE 为主,同时西部的地震强度和频度比东部地区约高 10 倍。

(7)南北构造带以西的青藏高原自中新世以来整体强烈挤压抬升,青藏高原以北则为挤压构造发育区;南北构造带以东的华北区自新生代以来以引张作用为主,剪切正断层及张性盆地十分发育,而华南区是中国大陆新构造活动最弱的地区。南北构造带是青藏高原向北楔进而形成的一个巨型右旋剪切带^[40]。为论述方便,我们把南北构造带以西的中国大陆称为中国西部大陆,以东称为中国东部大陆和海域。

2. 中国西部大陆

中国西部大陆自南而北包括青藏高原、昆仑山脉、柴达木盆地、阿尔金—祁连山脉、塔里木盆地、天山山脉、准噶尔盆地和阿尔泰山。区域大地构造方向为 NW—EW 向。因青藏高原的岩石圈结构与动力学将有专门报告论述, 本文将不涉及外, 其他区域在 1991—1994 年期间的主要研究进展有:

(1) 北起塔里木盆地西南端的叶城, 沿 SSE 方向穿过昆仑山脉和喀喇昆仑山脉至冈底斯西段, 全长 800km, 完成一条由 27 个测点组成的大地电磁剖面^[41]。结果表明, 沿该测线的不同地段, 壳内含有一个或两个低阻层, 埋深分别为 10—35km 和 30—65km, 由南向北倾, 它们可能是壳内剪切滑脱面的反映; 上地幔存在两个高导层, 埋深分别为 100—150km 和 350—550km, 总体上由北向南倾; 视电阻率断面图在北昆仑缝合线和金沙江缝合线附近发生了最为显著的变化。

(2) 利用中国地震台网和 ISC 提供的区域地震和远震 P 波走时数据, 利用层析成像方法重建了塔里木盆地及其邻近地区的岩石圈三维速度图像并与其他深部探测结果比较可见^[62]; 地壳上部速度图像与地表大地构造明显相关; 柴达木、塔里木、准噶尔等盆地的莫霍界面上拱, 造山带则相对下凹; 柴达木盆地地壳平均厚 52km, 比周边造山带薄 5—10km, 盆地内的地壳含低速层和高速梯度夹层, 上地幔顶部速度 8.2km/s; 塔里木盆地地壳平均厚 42—44km, 周边造山带为 50—60km; 盆地下方上地幔软流圈上隆, 埋深约 110km; 地壳和上地幔结构在纵向与横向上都是不均匀的, 且被一系列深大断裂所切割。

(3) 利用天然地震转换波法穿越塔里木盆地在东西两侧完成两条探测剖面, 长度分别为 500km 和 600km, 结果表明^[48]; 塔里木盆地的地壳厚度在 40—50km 之间变化, 上地壳厚 10—20km, 平均速度 5.80km/s, 中地壳厚 10—15km, 平均速度 6.27km/s, 下地壳厚 10—15km, 平均速度 6.68km/s; 地壳结构的突出特点是, 地壳深浅界面同步变化, 例如在盆地基底隆起区, 壳内各界面也一致相对隆起, 地壳厚仅 40km, 在盆地基底拗陷区, 壳内各界面也一致相对下沉, 地壳厚度可达 50km; 在隆起和拗陷两侧能分辨出一系列壳内深断裂, 它们多数具逆断层性质; 岩石圈厚度大致在 120km 左右。这些表明塔里木盆地是在近南北向挤压应力作用下, 岩石圈各层同步挠曲变形的结果, 它与中国东部大陆的新生代伸展盆地的形成机制截然不同。

(4) 格尔木—额济纳旗的宽角反射/折射剖面, 长 900km, NNE 向, 穿过了中、新生代的柴达木盆地、祁连山造山带和河西走廊山前拗陷带。其结果表明^[23]: ①柴达木盆地地壳厚 50—53km, 局部可达 60km, 向西北加厚, 地壳平均速度 6.15—6.17km/s; 上地壳厚(包括沉积层)25—26km, 底部速度值 6.0—6.1km/s; 其下为一厚 6—8km, 速度为 5.8km/s 的低速层; 下地壳厚 18—20km, 速度值 6.6—6.8km/s; 上地幔速度值为 8.1km/s。②位于柴达木盆地之北的祁连山造山带, 地壳厚度为 55—66km, 地壳平均速度 6.35km/s; 上地壳可分两个亚层, 厚度分别为 11—12km 和 12—14km, 速度值分别为 4.5—6.1km/s 和 6.2—6.3km/s, 这可能反映了变质程度的差异; 中地壳厚 14—18km, 上部为 4—8km 厚, 速度为 5.8km/s 的低速层, 下部厚 10km, 速度值 6.4km/s; 下地壳厚 18—22km/s, 速度值 6.8km/s; 上地幔速度值 8.1km/s。地壳和壳内各速度层表现为南厚北薄, 在祁连山南侧的哈拉湖地区地壳增厚至 65—70km, 这可能是柴达木地壳向北插使下地壳增厚的结果。③很窄的河西走廊是祁连山造山带的山前拗陷带, 地壳厚 60km, 大于南邻的祁连山区。④北山构造带地壳较薄, 一般

为 40km, 无“山根”, 地壳平均速度 6.29km/s; 上地壳厚 15—17km, 速度值 5.3—6.2km/s; 中地壳厚 16—19km, 上部厚 7—9km, 速度值 6.0km/s, 下部厚 7—10km, 速度值 6.5km/s; 下地壳厚 6—10km, 速度值 6.9km/s. 可见, 该区的地壳变薄主要是下地壳减薄的结果. 在柴达木盆地北缘和河西走廊北缘均存在向北倾的 NWW 走向的新生代活动的逆冲断层, 显示了近南北挤压的特点. 横穿北祁连山和河西走廊的深地震反射剖面表明^[22, 24]: 北祁连山强烈地向北逆冲于河西走廊盆地上, 南祁连山向南逆冲于柴达木盆地上, 北山向南逆冲于河西走廊上. 这些逆冲带表现为强的反射带, 其倾角随深度变缓并大致在 11—13km 深度上变平. 在走廊带内的酒西盆地下方于 15—18km 深处发现向南倾的强反射带, 厚约 3km. 反射剖面所确定的莫霍界面和下地壳顶面均向南倾. 这种地壳结构特征表明, 柴达木盆地的地壳向北插, 南祁连山向南推覆, 北祁连山向北逆冲, 北山向南推覆. 格尔木—额济纳旗的大地电磁测深结果表明^[35]: 在壳内 10—20km 深处有一高导层, 厚 2—4km, 电阻率值数欧姆米, 但祁连山地区无此高导层, 北山地区壳内高导层深 30km, 上地幔高导层埋深一般为 150km, 祁连山地区为 160km.

(5) 当金山口—柳园—将军庙—可可托海的地学断面, 全长 1170km, 从南而北穿过了阿尔金—祁连山、东塔里木盆地、北山隆起、东天山的库鲁克塔格山、吐鲁番盆地和博格达山, 以及东准噶尔盆地和阿尔泰山等中国西北地区的主要地貌和大地构造单元. 该断面表明^[49]: ①东塔里木盆地和北山隆起的地壳厚度约 48—50km, 向南至敦煌一带加厚到 57km, 且中地壳底部存在低速薄层, 再南在阿尔金—祁连山区可能加厚至 70km, 并且在其北缘存在向南倾的逆冲深断裂. 这些可能表明, 阿尔金—祁连山地区除存在大规模左旋走滑外, 可能还存在北向逆冲. ②东天山的库鲁克塔格山地壳厚 53km, 是高阻的, 具反射性, 但莫霍界面反射不清楚, 上地幔速度 7.9km/s, 为重、磁高值带, 其南缘以北倾的逆冲断层与北山隆起为界; 东天山的博格达山与库鲁克塔格山具有相似地壳结构特点, 其北缘为南倾的逆断层与东准噶尔盆地为界. 据地质资料博格达山为石炭纪的裂谷; 上述两山之间为吐鲁番盆地, 盆地北半部地壳厚 44km, 南半部变厚, 中地壳速度逆转. ③东准噶尔地壳厚 44—50km, 向北变薄; 阿尔泰山地壳厚 56km; 东准噶尔与阿尔泰山之间为阿尔曼太断裂, 该断裂是宽的北倾的高导带, 缺少反射, 为重、磁低值带. 该断裂以北的地壳速度明显高于以南; 断裂以北于 7—8km 深处有 P_1 震相, 以南缺失; 断裂以南的上地壳存在连续的导电带, 它可能是拆离带的反映, 以北缺失. 认为阿尔曼太断裂是准噶尔大陆板块与阿尔泰弧之间的碰撞缝合带.

(6) 近年来在中国西部大陆地区进一步开展了大地热流观测. 在柴达木盆地实测的 22 个热流值其变化范围为 32—75mW/m², 平均热流值为 53mW/m²^[45]. 在塔里木盆地实测的 17 个热流值中多数为 40—45mW/m², 为低热流区, 仅盆地中部的隆起区热流值可达 60—70mW/m² (据王钧提供的资料).

3. 中国东部大陆

中国东部大陆自南而北包括华南褶皱系、扬子地台、秦岭—大别褶皱系、华北地台、吉黑褶皱系和兴蒙褶皱系. 考虑中、新生代以来的构造发展和岩石圈结构, 中国东部大陆自东而西可以划分为 4 个 NNE 向构造带和两个近 EW 向构造带^[9] (图 1). 它们是沿海山脉带 (带 I); 中、新生代裂谷盆地 (带 II); 中生代挤压隆起山脉带 (带 III); 中生代挠曲拗陷带 (带 IV). 郯庐断裂带、中国东部重力梯级带分别位于带 I 和带 II, 以及带 II 和带 III 之间, 南北构造带

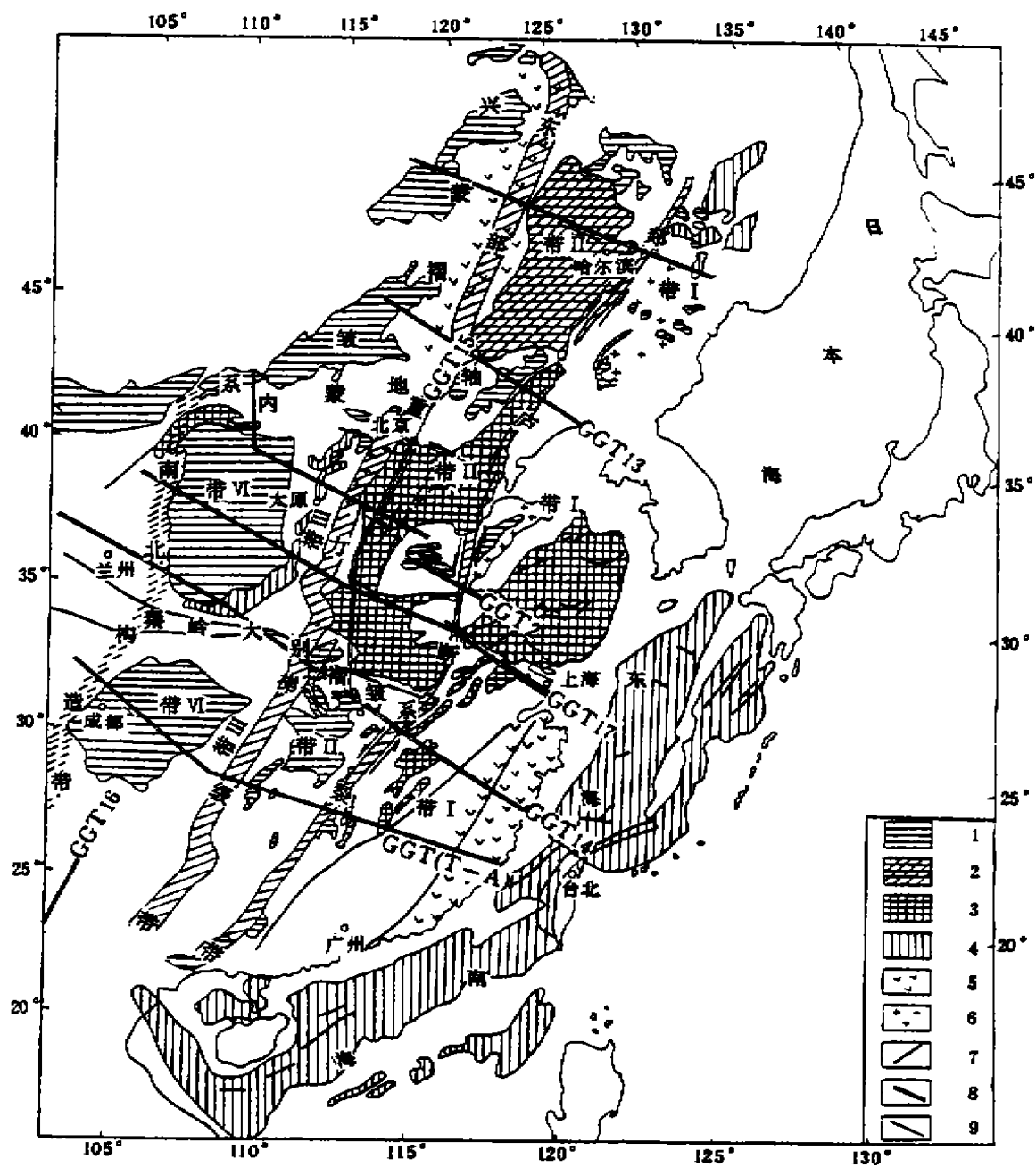


图1 中国东部大陆大地构造略图

表 1 中国东部大陆岩石圈结构基本参数

构造单元	上地壳		中地壳		下地壳		岩石圈厚度 (km)	说明	参考文献
	厚度 (km)	速度 (km/s)	厚度 (km)	速度 (km/s)	厚度 (km)	速度 (km/s)			
华南褶皱系	8-13	5.0-6.1	8-10	6.1-6.4	0.03	9.11	6.5-6.8	0.03	沿海岸地带中地壳顶部发育 5.8km/s 低速层 [14, 27, 65]
	12	6.0	11	6.2-6.4	0.02	8	6.8-7.0	0.03	中地壳顶部含 5.7km/s 低速层, 上地壳顶部含高导薄层 [6]
	10-13	5.2-6.15	7-9	6.2-6.3	0.01	12-14	6.6-6.8	0.02	中地壳底部含 5.9km/s 低速层 [28, 66]
江南隆起 (中段)	21-22	4.8-6.1				11-12	6.8-7.0	0.02	中、上地壳界线不清, 上地壳顶部含高导薄层 [6]
江南隆起 (北段)	13-15	5.0-6.15	7-10	6.2-6.3	0.01	11-14	6.6-6.8	0.02	中地壳底部含 5.9km/s 低速层 [26, 66]
苏南台褶带	9-11	2.5-5.8	11-12	6.2-6.5	0.03	9-12	6.8-7.1	0.03	中地壳底部含 6.3km/s 低速薄层, 上地壳顶部含高导层 [8, 67]
苏北断陷	8-9	2.5-5.8	14-16	6.2-6.5	0.02	9-11	6.8-7.1	0.03	中地壳底部含 6.3km/s 低速薄层 [8, 67]
苏北-皖南地体和胶东台隆	10-11	3.0-6.4	12-13	6.2-6.5	0.02	6-8	6.7-7.4	0.1	中地壳含 6.2km/s 低速薄层 [2, 68, 74]
华北地台	13-14	4.8-6.3	11-13	6.2-6.5	0.03	7-8	6.5-7.0	0.07	[4, 28]
张广才岭地体	14-15	5.8-6.1	6-10	6.5-6.7	0.03	7-15	6.8-7.0	0.02	[69, 80, 71]
鲁阳盆地	11	3.0-6.1	13	5.9-6.3		7	6.5-7.0		[14]
江南隆起 (南段)	8-11	3.0-6.1	14-18	6.1-6.4	0.02	8-10	6.9-7.1	0.02	某些地段中地壳顶部含 5.8km/s 低速层 [14]

续表 1

构造单元	上地壳		中地壳			下地壳			地壳厚度 (km)	岩石圈厚度 (km)	说明	参考文献	
	厚度 (km)	速度 (km/s)	厚度 (km)	速度 (km/s)	速度梯度 (s ⁻¹)	厚度 (km)	速度 (km/s)	速度梯度 (s ⁻¹)					
华北地台	南华北坳陷	10-12	2.5-6.1	8.5-11.5	6.0-6.3	0.03	10.5-14	6.5-7.0	0.04	30-35	90	开封坳陷中地壳顶部含 5.8km/s 低速体	[8]
	鲁西台隆	13	3.0-6.4	10.5	6.2-6.5	0.03	10	6.7-7.4	0.07	33-34	95	中地壳和下地壳顶部都含 6.0km/s 和 6.5km/s 低速薄层	[2, 68]
	华北裂谷系 (南段)	9-11	2.0-6.2	11-15	6.2-6.4	0.02	5-9	6.6-7.4	0.1	31-34		下地壳含 6.4km/s 低速体	[12, 72]
	华北裂谷系 (中段)	12-15	2.0-6.1	7-10	6.1-6.3	0.02	8-11	6.5-7.2	0.07	30-34	70-80	壳内结构复杂, 部分地段下地壳含 6.4km/s 低速体	[2, 12, 68]
	华北裂谷系 (北段)	13-15	2.5-6.3	6-12	6.2-6.4	0.02	7-10	6.7-7.5	0.09	31-34	80	中地壳含 6.1km/s 低速体	[4, 28]
扬子地台	松辽东盆地	11		12			7			30		地壳结构来自反射剖面, 没有速度值	[56]
	湘西褶皱隆起	9-13	4.0-6.1	8.5-11	6.0-6.3	0.03	16-23.5	6.5-7.0	0.03	40-42		部分地段中地壳底部都含 6.0km/s 低速层	[14]
	鄂西隆起带	12-14	5.4-6.2	11-15	6.2		13.5-20.5	6.5-6.7	0.01	42-44		上地壳底部都含 6.0km/s 低速薄层	[73]
	山西北地台 (南段)	12-14	4.5-6.1	9-10	6.3		16-21	6.5-7.1	0.03	39-43	100		[8]
	山西北地台 (中段)	25	4.0-6.4				18	6.6-7.0	0.02	43	100	上、中地壳之间界线不清	[2, 68]
兴蒙褶皱系	西拉木伦褶皱带	14-15	3.0-6.2	9-12	6.2-6.5	0.03	13-15	6.4-7.4	0.02	38-40			[4, 28]
	贺根山褶皱带	14	3.0-6.2	8.0-10	6.2-6.3	0.01	16-17	6.4-7.4	0.04	39-40	100		[4, 28]
	四川盆地	12-14	3.0-5.9	8.5-10	6.0-6.4	0.04	21-22	6.6-7.1	0.02	43-44			[14]
	鄂尔多斯盆地 (中部)	12	3.0-6.0	8-10	6.2		20-22	6.5-6.8	0.01	42-44	120		[8]
	鄂尔多斯盆地 (西北缘)	19	2.0-6.3	10-11	6.2-6.4	0.02	14-15	6.6-7.1	0.03	43-44	120		[8]
秦岭-大别褶皱系	秦岭褶皱带	9-14	5.0-6.0	11-14	5.8		7-9	6.8		35		中地壳为低速层	[6]
	大别隆起	10-12	5.0-6.2	10-13	6.4-6.6	0.02	8-15.4	6.7-7.2	0.04	33-35		中地壳顶部和下地壳底部分别含有 5.8km/s 和 6.7km/s 的低速层	[6, 12, 27]
	燕山褶皱带 (中段)	13-14	5.0-6.2	10-12	6.0-6.6	0.06	9-11	6.6-6.8	0.02	35-36	100	中地壳含 6.0km/s 低速薄层	[12]
	燕山褶皱带和内蒙地槽 (东北段)	13-19	3.6-6.2	9-13	6.0-6.5	0.04	5-10	6.5-7.0	0.06	36-37	105	中地壳含 6.0km/s 低速薄层	[4, 28]

注: 速度梯度指垂直速度梯度, 岩石圈厚度指上地壳低速带或高导层的厚度。

位于带Ⅳ西侧. 近 EW 向的秦岭—大别褶皱带和燕山构造带横亘于上述的 NNE 向构造带之中.

根据前述的通过中国东部大陆的 7 条地学断面和近年来完成的其他深部探测剖面结果, 将中国东部大陆岩石圈结构的基本参数列于表 1, 并作以下描述^[64].

(1) 带Ⅰ中的华南褶皱系广泛发育起因于壳内部分熔融的晚侏罗—白垩系的火山岩和中生代 S 型花岗岩, 胶东台隆、辽东台隆和张广才岭地体也有很多中生代花岗岩分布. 根据宽角反射/折射剖面结果^[6, 66], 华南褶皱系北段和中段的地壳向 NW 加厚; 中地壳顶部或底部发育有低速薄层, 速度值 5.7—5.9 km/s, 厚 3—5 km; 上地壳存在倾向 ES 的逆断层并收敛于中地壳的低速层之内. 根据来自莫霍界面的反射波组, 判断上地壳最上部似乎是一系列冲向 NW 的片状结构. 华南褶皱系与扬子地台的边界应为江绍断裂, 这里地壳局部上隆, 断裂两侧的壳内速度结构差异很大. 华南褶皱系南段的东南沿海, 地壳有向 NNW 加厚的趋势, 似乎有 NWW 向深断裂的存在; 中地壳顶部存在速度值 5.8 km/s 的低速异常, 其 Q_p 为 30—50 和 40—80, 与热田密切相关, 推测为部分熔融体^[65].

根据深地震反射剖面结果, 带Ⅰ内的下扬子地区存在 4 个向 NW 推覆的大型逆掩片, 它们的主拆离面 10—13 km 深, 浅部是逆冲, 下地壳是俯冲, 扬子的下地壳可能俯冲到华北地台之下, 这种挤压变形主要发生在中生代^[55]. 下扬子地壳也是从沿岸地区的 31 km 厚, 向 NW 逐渐加厚至其西界郯庐断裂带附近的 34 km, 莫霍界面起伏平缓, 下地壳有丰富的“叠层”状反射, 这可能反映了挤压变形之后的伸展过程的结果. 下扬子地区的岩石圈厚度约 76 km^[67]. 带Ⅰ内的苏北—胶南地体和胶东台隆壳内含有低速薄层, 地壳厚 29—33 km, 其下地壳似乎向西侧的郯庐带下方俯冲. 带Ⅰ内的辽东台隆和张广才岭地体虽然是高达 1000 多米的山区, 但地壳厚度仅为 29—35 km, 岩石圈厚度也较薄. 上述情况表明, 带Ⅰ在中生代时期可能遭受了来自 NW 向的挤压变形, 中生代末期以来遭受着引张伸展过程.

(2) 带Ⅰ的西界为 NNW 向郯庐断裂带, 在北起伊兰南至庐江长达 2200 km 的地段已由大量地质和地球物理证据所证实, 是一条晚侏罗—白垩纪大规模左旋, 新生代右旋的走滑断裂, 它是否继续南延没有结论. 目前已有 7 条折射剖面, 1 条反射剖面和 6 条大地电磁剖面在不同地段通过郯庐断裂带. 断裂带的深部结构具有某些共同的特征^[64]; 断裂带陡直地切过了莫霍界面, 其两侧的地壳速度结构明显不同, 莫霍界面深度有 2—3 km 的变化 (莱州湾以北为东深、西浅, 以南为东浅、西深), 在下扬子地段下地壳向郯庐带以西插入, 山东半岛可能也有这种特点. 地学断面 GGT14 在九江—黄梅和台湾—阿尔泰山地学断面在衡阳附近均发现地壳速度结构和莫霍界面深度的明显变化, 这可能是郯庐断裂带向南延伸的深部证据^[64].

(3) 带Ⅰ的松辽盆地是晚侏罗纪开始的裂谷盆地, 晚白垩世均匀下沉. NNE 向的北安—大庆左旋走滑的中央断裂对盆地的形成和演化具有重要意义^[75].

根据深地震反射剖面结果, 松辽盆地的下地壳反射强度明显高于上地壳. 在盆地西半部安达附近壳内存在东倾的剪切拆离带, 拆离带下方莫霍界面有局部起伏, 表明该区曾遭受来自 ES 向的挤压作用^[64]. 从表 1 可见, 松辽盆地是具有薄地壳和薄岩石圈的盆地, 故可推测松辽盆地在晚侏罗纪时期可能是与 NNE 向左旋走滑有关的拉分盆地, 白垩纪转化为与地幔上隆有关的坳陷盆地. 带Ⅰ内的新生代华北裂谷系, 下伏着规模不等的晚侏罗—白垩系断

陷盆地,深地震反射剖面结果表明,裂谷系下方存在着高角度的隐伏深断裂,它们可能控制了这些断陷盆地的形成,所以应具有拉分性质。带 I 内的新生代裂谷盆地据深地震反射剖面揭示,它受上地壳内的拆离带控制^[31]。从表 1 可见,华北裂谷系的地壳和岩石圈都薄,并且地壳结构复杂。根据对比研究,地壳的减薄是在晚白垩世和始新世以来的两个阶段实现的^[54]。带 I 的南部包括南华北拗陷、江汉盆地、衡阳盆地和南宁盆地等。带 II 应是晚白垩以来的引张带。

(4)带 I 的西界是中国东部巨型的重力梯级带,在中国境内该带北起大兴安岭,越燕山,沿太行,穿秦岭,然后向武陵山和苗岭一线延伸,呈 NNE 向,长约 4000km,宽 80—100km,梯度值 $(0.8—1.0) \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / \text{km}$,它与我国东部地貌分界线吻合,但是在反映古老变质基底组成的航磁图上没有显示;重力梯级带北段有大量的晚侏罗—白垩系的火山岩,中段有很多燕山期的碱性侵入岩分布。因此认为该重力梯级带是深部构造带,是燕山运动早期开始形成的^[59]。到目前已有 12 条折射剖面 and 8 条大地电磁剖面穿过了该重力梯级带,其结果表明^[64],重力梯级带下方的莫霍界面是显著西倾的斜坡,上地幔速度值受到很大扰动,壳内往往含有低速异常体。从表 1 可见,重力梯级带两边的带 I 和带 II 之间的地壳厚度相差 8—10km,岩石圈厚度相差 20—30km。

(5)带 II 的地壳厚度一般在 40—43km 之间,岩石圈厚度约 100km。带 II 在地表上是由燕山运动形成的山西高原复背向斜和湘西地区线状褶皱山脉所组成的挤压山脉带。根据在带 II 中段延庆—怀来盆地的深地震反射剖面结果^[57],下地壳是由两个“叠层”状反射层所组成,下层近水平状厚 9km,上层厚 8.5km,以近 30°角倾向 NWW,像是一个自东而西挤入的“楔状”体。故可推测带 II 的地壳增厚可能主要是下地壳的挤压增厚。

(6)带 IV 包括内蒙古高原、鄂尔多斯高原、四川盆地和云贵高原。带内发育两个大型的晚侏罗—白垩系的鄂尔多斯和四川挠曲盆地,盆地内部构造简单,沉积中心由东向西收缩。鄂尔多斯高原周边发育有新生代裂谷系。带 IV 下地壳结构简单,呈平行层状展布,地壳厚 42—44km;但周边的新生代裂谷系下方,地壳减薄了 3—6km,上地幔软流圈相对上隆了 10—20km^[1,76]。

(7)南北构造带以西地壳加厚至 50—60km,地壳由西向东仰冲。南北构造带是中国大陆内部的巨型构造带。

横亘于中国东部大陆的近 EW 向秦岭—大别褶皱系向西切过南北构造带而与祁连山造山带连接。根据穿过秦岭—大别山的两条地学断面^[6,8]和一条折射剖面^[27]可见秦岭—大别造山带的地壳厚 33—35km,没有“山根”。根据横穿东秦岭的深地震反射剖面^[25]可见:秦岭是印支—燕山期的碰撞缝合带,宽约 100km,其上地壳是一个巨型的推覆构造,由南北两个推覆体所组成,中地壳是一系列嘴向北张的鳄鱼式构造,很多剪切滑脱面收敛于下地壳,少量的插入到上地幔;扬子地台插入秦岭之下,秦岭插入华北地台之下;在秦岭地区来自莫霍界面的双程反射时间为 10—11s,与南北两侧的扬子地台和华北地台相同,相当于 30—33km 的地壳厚度。表明秦岭碰撞缝合带没有“山根”。“山根”的消失可能与碰撞后期中国东部遭遇的区域性伸展过程有关。

上述中国东部大陆的岩石圈结构特征可以用图 2 加以概括。对其动力学过程的一种解释是^[63],侏罗纪末期位于西太平洋的伊佐奈木板片可能沿 NW 向往中国东部大陆之下插

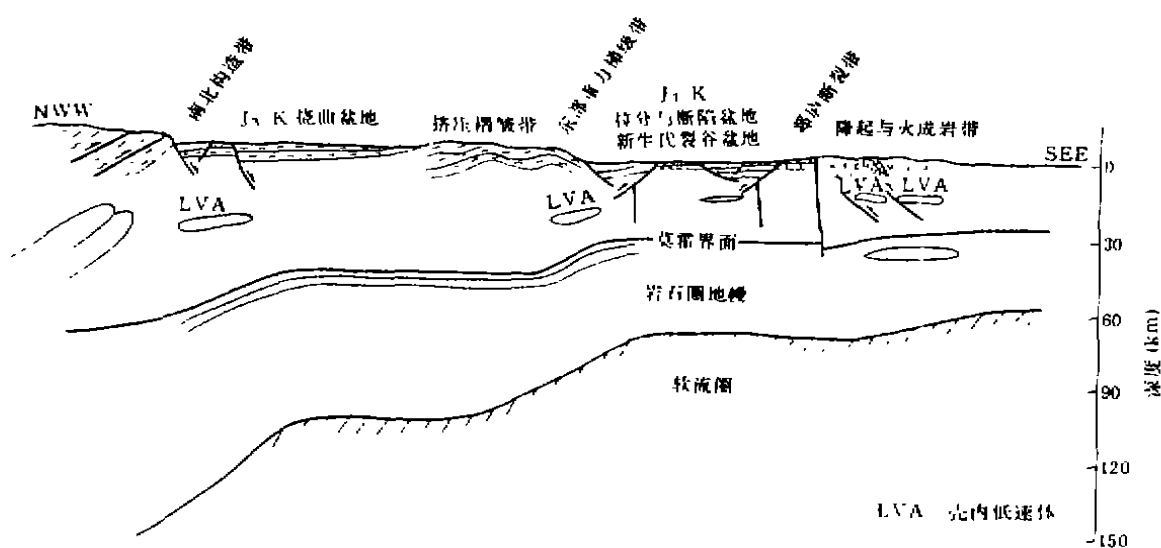


图2 中国东部大陆岩石圈结构断面示意图

入,这可导致:①带Ⅰ被挤压、隆升并向西俯冲;壳内强烈剪切、升温和部分熔融,形成火山喷发和花岗岩熔。②郯庐带大规模左旋平移,并在带Ⅰ内产生伴生的平行断裂和拉分盆地;在拉分过程中地壳遭受引张,地幔上隆、地壳减薄。③伊佐奈木板片向陆内楔入过程中,由于某种原因沿现今的大兴安岭—太行山—武陵山一带前进角度变陡,于是推进阻力增大,地壳迅速增厚,上地幔被强烈扰动,部分地段形成火山喷发和碱性岩浆侵入,形成巨型的 NNE 向重力梯级带。在重力梯级带以西的带Ⅱ内,仍是地壳的强烈挤压地带,浅层发生 NNE 向褶皱或复背向斜和推覆逆掩构造。④过 NNE 向重力梯级带后,伊佐奈木板片的楔入角再次变平,地表形成大型拗陷带(带Ⅳ)。最后伊佐奈木板片可能沿南北构造带消减于地幔之中,从而导致鄂尔多斯和四川盆地的沉积中心西移,南北带西侧的地壳向东仰冲。⑤白垩纪晚期,伊佐奈木板片活动停止,带Ⅱ以东地壳伸展、减薄,形成规模不等的晚白垩盆地,由于带Ⅱ伸展导致带Ⅱ继续陆升。⑥始新世以来,以两个近 EW 向的构造带为边界,带Ⅰ的构造发展明显不同于中生代:南部缓慢隆起,中部软流圈强烈上隆形成大型华北裂谷盆地,北部稳定。

从表可见,大别山以南的华南褶皱系和江南隆起的地壳厚度与大别山以北的华北裂谷和下扬子拗陷的地壳厚度均在 30—35km 范围内变动,几乎没有差异。但大别山以南和大别山以北的区域布格重力值且有很大差异,前者走向 NE,重力值在 $(0-50) \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 变动,后者走向 NNE,重力值在 $(30-20) \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 变动; $1^\circ \times 1^\circ$ 的平均重力异常值前者为 $(0-30) \times 10^{-5} \text{m/s}^2$,后者为 $(0-40) \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。这种区域重力值与地壳厚度之间的不一致性,可能起因于地壳内部物质组成上的不同。从表可见,大别山以南的华南褶皱系和江南隆起的下地壳速度值为 6.5—6.8km/s 或 6.8—7.0km/s,其垂直速度梯度为 $0.02-0.03 \text{ s}^{-1}$,而大

别山以北的华北裂谷和下扬子拗陷的下地壳速度为 $6.7\text{--}7.4\text{km/s}$ 或 $6.8\text{--}7.1\text{km/s}$, 垂直速度梯度为 $0.07\text{--}0.1\text{s}^{-1}$ 或 0.03s^{-1} . 后一地区明显地大于前一地区. 但从表可见, 两个地区的中地壳和上地壳(如果不考虑低速沉积层)的速度差异很小. 这可能表明, 在新生代时期由于华北裂谷和下扬子拗陷区的上地幔强烈活动, 有大量基性物质侵入地壳之中, 从而导致该区下地壳密度值加大, 速度值增高, 区域重力值变大.

4. 海域地区

中、美合作利用双船地震扩展排列剖面研究了南海北部陆缘东部的地壳结构, 结果表明^[58]: 从陆架、陆坡到深海平均地壳厚度呈 4 个台阶状减薄, 这 4 个台阶的地壳厚度分别是 $26\text{--}28\text{km}$, $23\text{--}24\text{km}$, $13\text{--}15\text{km}$ 和 $5\text{--}7\text{km}$ (海洋地壳); 由于这里发育有数公里厚的新生代沉积, 所以地壳的台阶状减薄反映地壳的拉张运动不止一次, 而是以幕式方式进行的, 第 4 幕将陆缘拉开, 产生新洋壳; 在每个地壳台阶上, 如果不考虑新生代沉积厚度, 那么上地壳厚度只是下地壳厚度的 $1/2\text{--}1/5$, 说明在引张应力场作用下结晶的上地壳显著拉伸减薄; 下地壳底部存在 $7.1\text{--}7.4\text{km/s}$ 、厚 $4.8\text{--}12\text{km}$ 的高速层, 它可能是来源于上地幔的冷却了基性物质; 如果减去这一高速层的厚度, 那么原有下地壳的厚度仅有 $0\text{--}13\text{km}$, 说明在上地幔隆起和地壳伸展过程中原有的下地壳也显著地伸展减薄.

5. 震源构造

中国东部大陆的华北和鄂尔多斯周边新生代裂谷系是现今的强震活动区, 有历史记载以来 $M \geq 7.0$ 级大震共发生 33 次, 仅 20 世纪以来就发生 8 次. 但现代的大震断层机制解均为带有某些倾滑分量的高角度走滑断层, 主压应力场为 NEE 向, 它们完全不同于控制新生代裂谷的、以 NNE 向为主的铲式正断层. 为了研究大震震源构造, 近些年来在邢台、海城、唐山和临汾等震区, 使用反射剖面、折射剖面、大地电磁和深部瞬变电磁法等多种手段, 对大震震源区的地壳细结构进行了详细探测和综合研究^[30, 54, 77-81]. 结果表明: ①大震区的地壳内部存在陡倾角的隐伏深断裂, 浅部存在引张断裂, 但两者并不连接. 大震震源位于深部隐伏断裂的顶部和深、浅断裂互不连接的空间范围之内; ②大震区存在着壳内剪切滑脱面, 该滑脱面似乎在震源区内被上述的隐伏深断裂所阻挡; ③大震区存在壳内低速-高导异常体, 主震常发生在异常体的上角隅附近. ④大震区附近莫霍界面存在局部上隆.

6. 岩石圈热结构

根据目前在中国大陆地区已获得的 686 个大地热流数据编制了中国大地热流图^[82], 中国大陆地区大地热流值变化范围相当大($30\text{--}320\text{mW/m}^2$), 但主要分布在 $40\text{--}100\text{mW/m}^2$ 之间, 其中 $60\text{--}70\text{mW/m}^2$ 比例最高, 占 24.8% , $70\text{--}80\text{mW/m}^2$ 占 18.5% , $50\text{--}60\text{mW/m}^2$ 占 17.1% , $40\text{--}50\text{mW/m}^2$ 占 18.5% , 而大于 90mW/m^2 和小于 40mW/m^2 分别占 7.0% 和 5.5% . 大地热流的区域分布特征是“东高西低”和“南高北低”^[83]. 东部地区的松辽盆地的平均热流值为 70mW/m^2 , 下辽河地堑为 66mW/m^2 , 华北裂谷为 62mW/m^2 ; 西部地区的塔里木盆地的多数热流值为 $40\text{--}50\text{mW/m}^2$, 柴达木盆地的平均热流值为 53mW/m^2 ^[45], 东昆仑北麓为 42mW/m^2 , 而藏南及喜马拉雅是高温区, 热流值可达 $91\text{--}146\text{mW/m}^2$ ^[84], 中部的鄂尔多斯和四川盆地平均热流值为 55mW/m^2 , 居中; 根据中国东南地区实测的 125 个热流值, 其变化范围是 $35.6\text{--}209\text{mW/m}^2$, 平均值为 67.9mW/m^2 ^[43]. 这种“东高西低”, “南高北低”的热流分布格局是中、新生代以来, 东部大陆受太平洋板块影响, 西部大陆受印度板块作用

的结果. 岩石圈热结构的研究结果表明^[22], 华北裂谷具有“冷壳热幔”的特点. 华北裂谷地幔热流可高达 38mW/m^2 , 为地表总热流量的 51%—62%, 而藏南地区的壳、幔热流比值大于 2, 即地壳比地幔的热贡献大两倍多. 温度计算表明, 华北裂谷的地幔温度比藏南地区高, 这可能与华北裂谷的地幔受扰动有关.

参 考 文 献

- [1] 马杏垣、刘昌钰、刘国栋, 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面, GGT2, 北京: 地震出版社, 1991.
- [2] Ma Xingyuan, et al. GGT2: Xiongsuu to Mandal Transect (North China), Copublished by the Inter-Union Commission on the Lithosphere and American Geophysical Union, 1991.
- [3] Wu Gongxian et al. GGT3: Yadong to Glomud Transect (Qinghai-Tibet plateau, China), Copublished by the Inter-Union Commission on the Lithosphere and American Geophysical Union, 1991.
- [4] 卢造勋、夏怀宽, 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地学断面, GGT13, 北京: 地震出版社, 1992.
- [5] Lu Zhaoxun, et al. GGT13: Dong Ujimqin Qi-Donggou Transect, Beijing: Seismological Press, 1994.
- [6] 林中洋、蔡文伯、陈学波、王椿桐主编, 青海门源至福建宁德地学断面, GGT14, 北京: 地震出版社, 1992.
- [7] Lin Zhongyang, et al. GGT14: Menyuan-Ningde Transect, Beijing: Seismological Press, 1994.
- [8] 孙武城、马宝林、宋松岩, 湖北随县至内蒙古喀喇沁旗地学断面, GGT15, 北京: 地震出版社, 1992.
- [9] Sun Wuchen, et al. GGT15: Suzhou, Hubei-Harqin Qi Nei Mongol Transect, Beijing: Seismological Press, 1994.
- [10] 阙荣举、韩 源, 云南遮放—马龙地学断面, GGT16, 北京: 地震出版社, 1992.
- [11] Kan Rongju, et al. GGT16: Zhefang-Malong Transect, Beijing Seismological Press, 1994.
- [12] 孙武城、徐 杰、杨主恩等, 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地学断面, GGT17, 北京: 地震出版社, 1992.
- [13] Sun Wuhen, et al. GGT17: Fengxian-Alxazouqi Transect, Beijing: Seismological Press, 1994.
- [14] 袁学诚等, 台湾至阿尔泰山地学断面, 地质出版社将出版.
- [15] 张贻侠等, 满洲里至绥芬河地学断面, 地质出版社将出版.
- [16] Monger, J. W. H., The Guidelines for the Global Geoscience Transect Project, 1987.
- [17] Rodnikov, A. G., et al. The North China Plain-Philippine Sea-Mariana Trench Geotraverse, Moscow, "NAUKA", 1991.
- [18] 刘光鼎, 中国海域及领域地质-地球物理系列图, 北京: 地震出版社, 1992.
- [19] Zhao, W. J., Nelson, K. D. and Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet, *Nature*, 366, 557—559, 1993.
- [20] Zeng, R. S., Wu, Francis T., et al., Lateral variation of the lithospheric structure and stress condition inside the Tibetan plateau, in Continental Earthquake, Selected Papers of the Second International Conference On Continental Earthquake, IASPEI Publication Series for the IDNDY Volume No. 3; 253—258, Beijing: Seismological Press, 1993.
- [21] 姜 孜、吕庆田、薛光琦, 中法两国联合进行青藏高原天然地震探测地壳结构的研究, 地球物理学报, 37, 412—413, 1994.
- [22] 吴宜志、吴春玲、卢 杰等, 深地震反射剖面对北祁连—河西走廊地壳细结构的研究, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 86, 1994.
- [23] 崔作舟, 格尔木—额济纳旗地学断面地壳结构与地质构造的关系, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 87, 1994.
- [24] 高 锐, 格尔木—额济纳旗地学断面地球动力学模型初探, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 144, 1993.
- [25] 袁学诚、徐明才、唐文榜等, 东秦岭陆壳反射地震剖面, 地球物理学报, 37, 749—758, 1994.
- [26] 孔祥儒、张 丽、白登海等, 屯溪—温州剖面岩石圈电性结构, 东南大陆岩石圈结构与地质演化, 北京: 冶金工业出版社, 245—249, 1993.

- [27] 熊绍柏, 中国东南地区的岩石圈结构, 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究, 北京: 科学技术出版社, 267—277, 1992.
- [28] 卢造勋、夏怀宽, 内蒙古东乌珠穆旗—辽宁东沟地质断面、地球物理学报, 36, 765—772, 1993.
- [29] 白登海、张丽、孔祥儒等, 内蒙古东部古生代块体碰撞区的大地电磁测深研究——I, 二维解释, 地球物理学报, 36, 773—783, 1993.
- [30] 刘国栋, 山西临汾地区的地壳上地幔构造、裂谷模型和大震震源结构, 发展中的地震科学研究, 北京: 地震出版社 (1995 年将出版).
- [31] 王椿镛、张先康、吴庆举等, 华北盆地滑脱构造的地震学证据, 地球物理学报, 37, 613—619, 1994.
- [32] 刘国栋、邓前辉、沈铁龙, 云南思茅盆地大地电磁测深研究, 国家地震局地质研究所报告, 1994.
- [33] 宋仲和、陈国英、安昌强等, 中国大陆及海域地壳—上地幔三维速度结构, 中国科学(B 辑), 23, 180—188, 1993.
- [34] 庄真、傅竹武、吕梓龄等, 青藏高原及邻近地区地壳与上地幔剪切波三维速度结构, 地球物理学报, 35, 694—709, 1992.
- [35] 陈立华、宋仲和、安昌强等, 中国南北带地壳上地幔三维面波速度结构和各向异性, 地球物理学报, 35, 574—583, 1992.
- [36] 傅竹武、庄真、吕梓龄等, 由长周期地震面波研究华南地区地壳和上地幔三维构造, 地震学报, 15, 159—167, 1993.
- [37] 刘建华、刘福田、孙若昧等, 秦岭—大别山造山带及其南北缘地震层析成像, 地球物理学报, 38, 46—54, 1995.
- [38] 田勇、吴建春, 临汾盆地 CT 成像及微震活动的三维定位, 山西临汾地震研究与系统减灾, 北京: 地震出版社, 244—250, 1993.
- [39] 孙若昧、赵燕来、梅世蓉, 渤海及其邻区的地震层析成像, 地球物理学报, 36, 45—54, 1993.
- [40] 丁耀玉、袁志祥、黄长林等, 渭河断陷及邻近地区地壳速度图像, 中国固体地球物理学进展——庆祝曾融生教授诞辰七十周年, 北京: 海洋出版社, 55—65, 1994.
- [41] Huang, S. P., Wang, J. Y., Heat flow distribution and thermal structure of the continental area of China, in *Advances in Geoscience*(2), China, 361—372, Beijing, Ocean Press, 1992.
- [42] Wang, J. Y., Huang, S. P., Preliminary classification on types of thermal structure of lithosphere in the continental area of China, in *Advances in Geoscience*(2), China, 330—340, Beijing, Ocean Press, 1992.
- [43] 熊亮萍、胡圣标、汪集琦, 中国东南地区实测热流值, 地球物理学报, 36, 784—790, 1993.
- [44] 吴韩藩、祖金华、康雨芳, 山西断陷带地热场特征和地震活动性, 华北地震科学, 11, 14—22, 1993.
- [45] 沈显杰、李国华、汪集琦等, 青海柴达木盆地大地热流测量与统计热流计算, 地球物理学报, 37, 56—65, 1994.
- [46] 刘国栋、邓前辉主编, 电磁方法研究与勘探, 北京: 地震出版社, 1993.
- [47] 孙传文、邓前辉、刘国栋等, 电磁阵列剖面法的实施与资料处理初探, 电磁方法研究与勘探, 北京: 地震出版社, 52—59, 1993.
- [48] 邵学钟、张家茹, 塔里木盆地深部构造的地震转换波探测与研究, 地球物理学报, 37, 836, 1994.
- [49] Yuan, X. C., Zuo, Y., Zhang, C. W., Evidence for the West China craton and its evolution, in *Proceeding of the 29th International Geological Congress, Part 13. Reconstruction of the Paleo-Asian Ocean*, 39—51, VSP, 1994.
- [50] 闵祥仪、周民都、郭建康, 灵台—阿木去乎剖面地壳速度结构, 西北地震学报, 13, 增刊, 29—36, 1991.
- [51] 林中洋、胡鸿翔、张文杉等, 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究, 地震学报, 15, 427—440, 1993.
- [52] 熊绍柏、郑晔、尹周勋等, 丽江—攀枝花—香格里拉二維地壳结构及其结构意义, 地球物理学报, 36, 434—444, 1993.
- [53] 陆涌行、曾融生、郭建明等, 唐山震区深地震反射剖面分析, 地球物理学报, 31, 27—36, 1993.
- [54] 王椿镛、王贵美、林中洋等, 用深地震反射方法研究邢台地区地壳细结构, 地球物理学报, 36, 445—452, 1993.
- [55] Weng, S. J., Chen, H. S., Zhou, Z. Q., Deep Seismic reflection of continental crust in the Lower Yangtze region, eastern, eastern China, *Tectonophysics*, 173, 297—305, 1990.
- [56] 杨宝俊、董世学、刘财等, 满洲里—绥芬河地质断面的垂直反射地震测深研究, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 246, 1993.

- [57] 张先康等, 怀来—延庆盆地深地震反射剖面, 地球物理学报(待发表).
- [58] 姚伯初、曾维军、陈艺中等, 南海北部陆缘东部的地壳结构, 地球物理学报, 37, 27—35, 1994.
- [59] 刘国栋、朱 英, 中国岩石圈的非均匀性及结构的基本特征, 中国岩石圈动力学概论, 北京: 地震出版社, 76—90, 1991.
- [60] 汪一鹏, 中国大陆现代构造活动特征, 中国地震学会第五次学会大会论文摘要集, 北京: 地震出版社, 1994.
- [61] 秦国卿、陈九辉、刘大建等, 昆仑山脉和喀喇昆仑山脉地区的地壳上地幔电性结构, 地球物理学报, 37, 193—199, 1994.
- [62] 滕吉文、刘福田、全幼黎等, 中国西北造山带与沉积盆地地区的地壳和地幔的地震层析成像, 中国固体地球物理学进展——庆祝曾融生教授诞辰七十周年, 北京: 海洋出版社, 66—80, 1994.
- [63] Liu Guodong, Geodynamic processes of the eastern chinese continent since Mesozoic era. in 1994 Western Pacific Geophysical Meeting, Hing King, 55. AGU, 1994.
- [64] 刘国栋、杨主恩, 中国东部地学断面的编制与研究, 待出版.
- [65] 滕吉文、郑 晔、张中杰等, 中国东南大陆及近海地带岩石圈结构与动力学, 祝贺方俊院士九十寿辰论文集, 北京: 测绘出版社, 131—145, 1994.
- [66] 熊绍柏、赖明惠、刘宏宾, 屯溪—温州地带的岩石圈结构与速度分布, 东南大陆岩石圈结构与地质演化, 北京: 冶金工业出版社, 250—256, 1993.
- [67] 郑 晔、滕吉文, 中国东部随县—启东地带上地幔结构再研究, 地球物理学报, 37, 553—558, 1994.
- [68] 马杏垣、刘昌铨、刘国栋, 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面, 地质学报, 65, 199—215, 1991.
- [69] 徐新中、雷江锁、杨长来等, 满洲里—绥芬河地学断面东段爆破地震测深结果, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 92, 1994.
- [70] 傅维洲、梁铁成, 满洲里—绥芬河地学断面 S 波速度结构, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 95, 1994.
- [71] 程振森、陈玉新、胡祥云, 满洲里—绥芬河地学断面域岩石圈电性结构研究, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 94, 1994.
- [72] 张成科、赵金仁、任育芳等, 豫北及其外围地区地壳上地幔结构研究, 地震地质, 16, 243—253, 1994.
- [73] 陈学波等, 三峡及其邻区深部构造特征研究, 北京: 地震出版社, 1—29, 1994.
- [74] 汤永安等, 山东荣城—聊城的地壳上地幔速度结构研究, 地震地质(将发表).
- [75] 叶 茂、张世红、吴福元, 中国满洲里—绥芬河地学断面地质、地球物理、地球化学综合解释, 待出版.
- [76] 孙 洁、史书林、江 钊等, 山西临汾盆地及外围大地电磁与地壳构造活动研究, 山西临汾地震研究与系统减灾, 北京: 地震出版社, 261—274, 1993.
- [77] Lu Zaoxun, Liu Guodong, Wei Menghua, Lateral inhomogeneity of crust and upper mantle in southern Liaoning, China and its relationship with the $M=7.3$ Haicheng earthquake, *Acta Seismologica Sinica*, 4, 521—534, 1991.
- [78] 张先康、杨玉春、赵 平等, 唐山滦县震区的三维地震透射研究——中、上地壳速度层析成像, 地球物理学报, 37, 759—766, 1994.
- [79] Liu Guodong, Lu Zaoxun, The structure of the crust and upper mantle beneath the Haicheng and Tangshan earthquake areas, in Proceeding of the International School of Solid Earth Geophysics, 5th Course, Earthquake Prediction, 111—139, IL CIGNO GALILEO GALILEI EDIZIONI DI ARTE E SCIENZA.
- [80] 刘国栋、宋惠珍, 孕震层结构和物性, 大陆多震层研究(国际大陆多震层学术讨论会选集), 北京: 地震出版社, 100—109, 1992.
- [81] 刘国栋, 唐山地震震源构造及动力学过程研究, 现今地球动力学研究及其应用, 北京: 地震出版社, 70—83, 1994.
- [82] 何丽娟、熊亮萍、汪集旸, 中国大地热流图的编制及初步分析, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 185, 1994.
- [83] 汪集旸, 从我国大地热流分布看地壳、上地幔活动的不均匀性, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 134, 1993.
- [84] Shen Xianjie, Zhu Yuanqing, Shi Yaolin, Heat flow on the Qinghai—Xizang (Tibetan) plateau and modelling of the tectonic thermal evolution, *Science in China (Series B)*, 35, 340—356, 1992.

- [85] 朱仁学、胡祥云、陈玉新, 格尔木—额济纳旗地学断面电性结构的研究, 中国地球物理学会年刊, 北京: 地震出版社, 91, 1994.

THE LITHOSPHERIC STRUCTURE AND DYNAMICS OF CHINA

LIU GUO-DONG

(*Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing 100029*)

Abstract

Chinese National Committee for IUGG has entrusted author to write China National Report on the Lithospheric Structure and Dynamics of China for the XXIIth General Assembly of IUGG, Colorado, July, 1995. The report has dealt with both the main activities and achievements in research field on the lithospheric structure and dynamics and important progress in the geophysical investigations for lithospheric structures in China. In this paper the continent of China is divided into the western part and the eastern part with a dividing boundary North—South trending tectonic belt situated between 101° and 106° (from south to north) and each part is further subdivided into the different subregions or zones according to the lithospheric structures which are described in detail for the subregions and zones. The lithospheric evolution and dynamics of the eastern part of China continent are suggested in this work, however the lithospheric structure and dynamics of the Tibetan plateau are excepted because they are reported by prof. Zeng Rong—Sheng in other paper.

Key words Lithospheric structure of China, Dynamics, Global geoscience transects.

作者简介 刘国栋,男,1934年3月生,1965年中国科学院研究生毕业。现在国家地震局地质研究所任研究员,博士生导师,李四光地质科学奖获得者。长期从事地壳上地幔构造、地球动力学和大地电磁法研究,共发表著作4本,论文近100篇。