



中国岩石圈三维结构丛书之四

Series of Monographs on the Three-dimensional
Structure of Lithosphere in China



中国华北地区岩石圈 三维结构及演化

ZHONGGUO HUABEI DIQU YANSHIQUAN SANWEI JIEGOU JI YANHUA

邓晋福 魏文博 等著

3D LITHOSPHERE

地质出版社

中国岩石圈三维结构丛书之四

中国华北地区岩石圈 三维结构及演化

邓晋福 魏文博 邱瑞照 叶高峰 姚长利
于炳松 赵国春 嘉世旭 余钦范 刘翠
金胜 吴宗絮 孟小红 钟长汀 汪洋 著
许立权 朱介寿 高伟

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书为国土资源部“中国岩石圈三维结构”科技专项计划研究成果之一。本书系统总结了华北地区岩石圈三维结构特征,为划分中国岩石圈结构构造单元提供依据。主要包括:依据地质、地球物理、地球化学资料将华北地区划分为两个环状构造单元;总结了该地区岩石圈地震、电性、重磁、热能学结构;建立了该地区岩石圈构造和演化框架。

图书在版编目(CIP)数据

中国华北地区岩石圈三维结构及演化/邓晋福等著. —北京:地质出版社, 2007. 3
ISBN 978-7-116-05251-2

I. 华... II. 邓... III. ①岩石圈-岩石结构-研究-华北地区 IV. P587.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 028915 号

HUABEI DIQU YANSHIQUAN SANWEI JIEGOU JIQI YANHUA

责任编辑:祁向雷 陈军中
责任校对:关风云
出版发行:地质出版社
社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083
电 话:(010) 82324508 (邮购部)
网 址:<http://www.gph.com.cn>
电子邮箱:zbs@gph.com.cn
传 真:(010) 82310759
印 刷:北京印刷学院实习工厂
开 本:787 mm × 1092 mm ¹/₁₆
印 张:20.5
字 数:495 千字
印 数:1—1000 册
版 次:2007 年 3 月北京第 1 版·第 1 次印刷
定 价:45.00 元
书 号:ISBN 978-7-116-05251-2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

中国岩石圈三维结构丛书

编辑委员会

主任 李廷栋

副主任 袁学诚 肖庆辉 黄宗理 叶天竺

委员 (以姓氏笔画为序)

万 玲 邓晋福 白星碧 朱介寿

许惠平 肖序常 杨文采 杨宝俊

张兴洲 姜 枚 范本贤 姚伯初

姚培毅 耿树方 郝美英 高 锐

路凤香 管 烨 蔡学林 魏文博

中国岩石圈三维结构丛书

Series of Monographs on the Three-dimensional Structure
of Lithosphere in China

- 1 中国岩石圈三维结构
The three-dimensional structure of lithosphere in China
- 2 中国西部岩石圈三维结构及演化
The three-dimensional structure of lithosphere and its evolution
in western part of China
- 3 中国兴蒙-吉黑地区岩石圈三维结构及演化
The three-dimensional structure of lithosphere and its evolution
in the northeast part of China
- 4 中国华北地区岩石圈三维结构及演化
The three-dimensional structure of lithosphere and its evolution
in north China
- 5 秦岭-大别-苏鲁地区岩石圈三维化学结构特征
The three-dimensional lithospheric chemical structure
of Qinling-Dabie-Sulu area
- 6 苏鲁大别造山带地球物理与壳幔作用
Regional Geophysics and crust-Mantle interaction in Sulu-Dabie
orogenic belt
- 7 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化
The three-dimensional structure of lithosphere and its evolution in
south China and east China sea
- 8 中国南海海域岩石圈三维结构及演化
The three-dimensional structure of lithosphere and its evolution
in the South China sea
- 9 中国大陆岩石圈物质组成及演化
The composition and evolution of lithosphere in China continent

序

地球是一个由多个圈层组成的复杂球体。岩石圈是地球浅部的刚性圈层，由地壳和地幔盖层组成。

地球科学的根本任务在于研究和认识地球，并利用这种认识去保障人类所需的自然资源的供给和人类居住环境的优化。岩石圈是近年来地球科学中发展起来的一个新的研究方向和前沿性研究课题。人们在生产和科学实践中逐渐认识到，研究岩石圈，认识岩石圈，不断充实岩石圈的科学知识，对于探讨地质规律、解析矿产成因、评估地质环境质量和地质灾害形成机理，以及洞察大陆演化的动力学过程等，都具有重要的意义。

正是由于以上的原因，自 20 世纪 50 年代以来，为了从整体上研究和认识地球，国际地学组织先后实施了“国际地球物理年”等国际合作研究计划。特别是从 20 世纪 80 年代开始，为了阐明岩石圈物质组成、结构构造、演化及动力学机制，国际组织实施了“国际岩石圈动力学和演化”及“国际岩石圈—生物圈计划”等大型国际合作研究计划；美国、加拿大、欧洲一些国家也实施了大规模的岩石圈研究计划。用地质、地球物理、地球化学相结合的方法，开展了全球地学断面以及重要造山带、地质区及沉积盆地岩石圈结构构造及深部作用过程的调查研究，取得了诸多创新性研究成果，深化了对岩石圈性质、成因的认识，为建立地球系统科学的知识体系奠定了良好基础。

几十年来，我国开展了规模宏大的地质调查、地球物理探测、地球化学勘查及岩石圈地质研究工作，中、小比例尺区域地质调查和航空磁测已覆盖全国陆地及毗邻海域的部分地区；以爆破地震为主的地球物理测深剖面已完成约 50000 km，并完成了大量其他方法的地球物理探测工作。20 世纪 80 年代以来，我国参与了国际岩石圈研究计划，进行了 11 条地学断面以及碰撞造山带超高压变质作用和动力学、沉积盆地成因及全球地震活动性等的研究，并在苏北实施了深度达 5100 余米的大陆科学钻探工程。多年来的地质调查研究积累了极为丰富的数据和资料。

为了系统总结我国深部地质、地球物理调查及岩石圈研究成果，国土资源部于 2000 年制定并实施了“中国岩石圈三维结构”专项研究计划。该计划包括 3 个重点研究项目：中国岩石圈三维结构数据库、重点区段岩石圈三维结构特征、中国大陆岩石圈三维结构及其演化与动力学。研究的任务和总目标是：以现代地学理论为指导，以新技术方法为手段，对已积累的岩石圈数据、资料进行多学科综合研究，揭示中国岩石圈三维结构及演化规律，为国土资源规划、管理、保护和合理利用提供科学依据，为国家经济社会可持续发展规划提供科学基础，为创建地球系统科学理论开辟科学的突破口。

参加该专项研究和管理工作的包括来自中国地质科学院地质研究所、中国地质科学院矿产资源研究所、中国地质科学院机关、国土资源部国际合作与科技司、中国地质调查局、中国地质大学（北京）、中国地质大学（武汉）、吉林大学、成都理工大学、同济大学、中国地质调查局广州海洋地质调查局、中国石油化工集团上海石油规划设计研究院、中国地

质调查局天津地质矿产研究所、国土资源部信息中心和实物地质资料中心等 14 个单位 100 多位科研和科技管理专家。

在全体参研专家、学者们的辛勤劳作和精心研究下，圆满地完成了专项计划任务，达到了预期目标，各个项目和课题都在各自的研究领域取得了丰硕的科学成果。

“中国岩石圈三维结构数据库”是我国建立的第一个全国性的岩石圈结构数据库，它由 9 个原始数据库、3 个成果数据库和 2 个总库共 14 个子库组成。该数据库收录的数据量大，学科涵盖面广；数据库软件先进，管理系统灵活实用；并可通过互联网实现信息的国际交换与数据共享，将成为我国岩石圈探测研究成果信息化和数据共享的范例。

各重点区段课题均以地学断面资料为基础，开展了地质、地球物理、地球化学等多学科综合研究，总结了区段内造山带、盆地和克拉通等构造单元岩石圈结构特征及相互间的时空联系，初步建立了岩石圈三维结构可视化模型。通过研究深化了对中国岩石圈物质组成及结构构造的认识，在中国东部，岩石圈与软流圈之间显示分层不明显的过渡带的存在，岩石圈呈现明显的“上老下新”年龄结构。在青藏高原近南北向巨型航磁异常带部位，在岩石圈深部也发现更为明显的近南北向的构造带，显示了岩石圈表层与深部构造的极端不均一性。

在岩石圈数据库及重点区段岩石圈结构研究的基础上，围绕“中国大陆岩石圈三维结构及其演化与动力学”这一主题，开展了综合研究和成果的集成，汇集编制了表达中国岩石圈结构和演化的系列图件；划分了中国大陆及其邻近海域岩石圈构造单元和岩石圈构造类型，总结了各岩石圈构造单元基本特点；论证了中国岩石圈地球物理场及地球化学场特征；探究了中国岩石圈物质结构及化学结构；进行了岩石圈三维结构的数值模拟，探讨了中国岩石圈的演化及动力学过程。

为了充分展现专项研究的成果，为有关部门和地学界奉献尽可能多的有关中国岩石圈的信息，除提交“中国岩石圈三维结构数据库”和“中国岩石圈三维结构特征图集”外，我们根据合同书的要求，在研究报告基础上编著了《中国岩石圈三维结构丛书》。这套丛书包括一部全国性论著和 8 部区域性专著，分别论述了全国和 6 个区段的岩石圈构造单元及秦岭、大别—苏鲁两个造山带岩石圈三维结构及其演化特征。

科研实践和科学成果说明，国土资源部实施“中国岩石圈三维结构”专项研究计划是一个有远见卓识之举。

通过专项研究计划的实施，建立了具有现代科学技术水平的“中国岩石圈三维结构数据库”，对我国积累的海量地质、地球物理、地球化学调查研究资料和数据进行了系统汇集；对一些面临散失和行将毁损的珍贵资料进行了抢救性收集、整理和转存；对大部分地球物理剖面进行了资料的再处理、再解释，挖掘出了更多地质信息。

通过专项研究计划的实施，取得了一批高水平的和创新性的科学成果，缩短了岩石圈研究上与发达国家的差距。对中国岩石圈进行了地质、地球物理、地球化学相结合的综合研究，划分了中国岩石圈构造单元和类型，总结了岩石圈的若干特点和演化规律，揭示出若干新的事实和新的现象，深化了对中国岩石圈三维结构及其演化过程的认识，为解决资源、环境勘查、评价的一些重大科学问题奠定了基础。

通过专项研究计划的实施，推动了科研单位、高等院校和地质勘查单位的结合，实现了岩石圈研究的强强联合，巩固和发展了一些岩石圈研究基地和科研群体，培养出一批年

轻的岩石圈研究人才，打造出一支老中青结合的、水平较高的岩石圈研究队伍，为我国今后较大规模的岩石圈研究提供了某些方面的组织和人才保障。

通过专项研究计划的实施，不但解决或深化了一批岩石圈研究中的重大科学技术问题，而且在岩石圈物质组成及结构构造上发现若干奇异的新现象，揭露出一批有待进一步深入研究的科学问题。同时，积累了一些岩石圈研究的经验。这些科学问题和经验可供日后岩石圈研究者借鉴。

这一专项研究计划的实施和成功，是与全体科技人员的辛勤劳作和刻苦钻研分不开的，是与上级各部门的领导、关怀和指导分不开的。同时，也是与各协作单位的支持和协同分不开的。这里需要特别指出的是，国土资源部国际合作与科技司和黄宗理司长、崔岩副司长、白星碧副处长，中国地质调查局和叶天竺原局长、孟宪来局长、张洪涛副局长、彭齐鸣主任，中国地质科学院及张彦英院长、董树文副院长，中国地质科学院地质研究所及许志琴前所长、汪东波所长、耿元生副所长等，自始至终给予该专项计划极大的关注指导和鼎力支持，对计划的顺利实施发挥了重要作用。在这里向支持该专项计划的各级领导部门、各协作单位以及有关领导和专家、学者表示衷心的感谢。

这套丛书连同“中国岩石圈三维结构数据库”和“中国岩石圈三维结构特征图集”，集中反映了“中国岩石圈三维结构”专项研究计划所取得的研究成果。我们期望这些成果能够对发展岩石圈的有关理论和实际应用方面发挥较大作用，对深入研究中国岩石圈结构构造及其演化作出较大贡献。我们真心诚意地期望地学界同仁们的批评指正。

李廷栋
2005年3月

前 言

为了揭示中国岩石圈三维结构特征及其演化规律,深化对中国大陆形成、演化及大陆动力学的认识,查明岩石圈三维结构特征与矿产资源(含能源)形成、分布以及与地质灾害成因机理之间的内在联系,从而为国土资源规划与开发利用、为国民经济可持续发展提供深部地质科学依据,为地球科学的理论创新和发展做出贡献,国土资源部将“中国岩石圈三维结构”研究列入了“十五”期间的重点科技专项计划。

该专项计划由中国地质科学院地质研究所负责,中国地质大学、吉林大学、成都理工大学、广州海洋地质调查局和上海石油规划设计研究院等单位参加。专项计划包括三个项目、六个区段课题。

项目 I,建立中国岩石圈三维结构数据库。包括网络数据库、深地震反射与宽频地震数据库、大地电磁测深数据库、大地热流测量数据库等 14 个子库。由中国地质科学院地质研究所负责,吉林大学、同济大学等参加。

项目 II,六个地区(区段)的岩石圈三维结构研究。包括:

1. 青藏高原—西北盆山岩石圈三维结构研究。中国地质科学院地质研究所承担,中国地质科学院矿产资源研究所参加。
2. 兴蒙—吉黑地区岩石圈三维结构研究。吉林大学(地球科学学院)承担。
3. 华北地区岩石圈三维结构研究。中国地质大学(北京)承担。
4. 东秦岭—大别—苏鲁地区岩石圈三维结构研究。中国地质科学院地质研究所和中国地质大学(武汉)承担。
5. 华南地区(含东海)岩石圈三维结构研究。成都理工大学负责,天津地质矿产研究所和中国地质大学(北京)参加。其中东海海域岩石圈三维结构研究,由上海石油规划设计研究院承担。
6. 南海海域岩石圈三维结构研究。广州海洋地质调查局承担。

项目 III,中国大陆岩石圈三维结构及其演化和编图。由专项计划专家组负责,各项目、课题组的有关人员参加。

上述三个项目的实施计划,分别为:

项目 I,2000 年 9 月—2005 年 12 月;

项目 II,2000 年 9 月—2004 年 6 月;

项目 III,2004 年 6 月—2006 年 7 月。

为了确保上述专项计划的顺利实施,达到预期标准和实现预期目标,在国土资源部国际合作与科技司的领导下成立了专项计划专家组。专家组成员有:李廷栋(组长)、袁学诚、肖庆辉、黄宗理、叶天竺。部国际合作与科技司主管本项目专家为白星碧。由专家组负责专项计划实施过程中的全面技术指导、各阶段的计划落实与检查、组织召开各项技术业务会议和进行统一管理等工作,并直接承担项目 III 的综合研究任务。

为了加强专项计划实施过程中的项目管理,在专家组领导下,在中国地质科学院地质研究所建立了专项计划办公室,成员有:耿树方(主任)、范本贤、郝美英和姚培毅。办公室承担专项计划的日常管理工作,协助专家组制定有关的统一技术标准,草拟各项文件,筹办各项会议及编写各项总结等等,以确保专项计划的顺利实施。

本专项计划建立的“中国岩石圈三维结构数据库”,以及专项计划各项研究成果构成的“中国岩石圈三维结构系列丛书”与相关“图集”,将为实行岩石圈信息资源共享,全面了解和认识中国大陆岩石圈三维结构特征,发展和创新地球科学理论,发挥重要作用;将为国土资源规划部署,矿产资源勘查、研究,地质环境与地质灾害评估等,提供深部地质资料依据。

《中国华北地区岩石圈三维结构及演化》课题的研究目标是,查明和总结华北地区岩石圈三维结构特征,为划分中国岩石圈结构构造单元提供依据,为地质大调查和资源勘查提供依据,为创立中国大陆岩石圈形成演化理论提供突破口。主要研究内容包括:①划分岩石圈结构构造单元;②总结岩石圈地震、电性、重磁、热、岩石学—化学结构;③提供现今岩石圈结构及其形成的总体认识;④建立岩石圈构造与演化框架。

两年来,为完成华北地区岩石圈三维物性结构的研究,课题组搜集、处理了华北地区大量地球物理资料,并高质量完成了山西应县—山东商河剖面的大地电磁数据采集、处理和反演工作。具体完成的研究工作量如下。

(1) 由于缺乏研究区内地球物理实测数据,必须针对所搜集文献资料中的图件进行计算机数据分析研究,研究实用的图形数字化和网格化方法;并对不同网度网格化的结果进行对比研究,检验图形数字化和网格化结果的质量。

(2) 搜集研究区内(东经 $103^{\circ}\sim 125^{\circ}$,北纬 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$;面积约 $200\times 10^4\text{ km}^2$) 1:400万航磁、1:200万重力资料和部分地区(东经 $114^{\circ}\sim 124^{\circ}$,北纬 $31^{\circ}\sim 42^{\circ}$) 1:50万重力、1:20万航磁资料。

(3) 对搜集的速度结构断面资料(共21条剖面,近8500 km长)和局部地区的面上资料,区域重、磁资料和电性结构剖面进行数字化处理。

(4) 利用从文献中搜集的14条人工地震剖面的P波速度资料,并结合重新处理过的7条人工地震测深剖面资料研究了华北地区中部(东经 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}$,北纬 $35^{\circ}\sim 41^{\circ}$) 50 km深度以上地壳三维速度结构。

(5) 协助成都理工大学朱介寿教授,完成天然地震层析成像处理。

(6) 对研究区内重、磁资料进行各种处理解释,并结合大地电磁和地震资料对应县—商河、连云港—泗水和郑州—靖边剖面的重力资料进行反演。

(7) 完成山西应县—山东商河大地电磁测深剖面的数据采集、处理和反演、解释,剖面长达450 km。

(8) 对华北岩石圈天然地震层析成像($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)的结果进行对比、分析、检验;并编绘一系列断面和不同深度的平面速度结构图件,进行岩石圈三维速度结构研究。

(9) 完成华北地区地温场的正演模拟计算。

(10) 对原有的人工地震测深资料进行分析,选择平行构造走向或单炮接收段主要覆盖某一构造单元的数据,应用反射率法合成理论地震图与实测数据进行对比,重新计算出华北各次级块体内部的地壳细结构,进行了对比研究,提供了华北地区各构造单元地壳厚

度和平均速度结构。

两年来,在项目专家组领导和指导下,经过课题组全体成员的努力,完成了研究报告,各章编写的分工如下:第一章,邓晋福、魏文博、刘翠、钟长汀;第二章,姚长利;第三章,嘉世旭、方盛明、余钦范;第四章,魏文博、叶高峰;第五章,魏文博、孟小红、叶高峰、朱介寿;第六章,魏文博、叶高峰、金胜;第七章,汪洋;第八章,邱瑞照、吴宗絮、邓晋福;第九章,赵国春、邓晋福、钟长汀、许立权;第十章,于柄松;第十一章,邓晋福、刘翠、吴宗絮;第十二章,刘翠、邓晋福;第十三章,邓晋福、刘翠、吴宗絮。研究取得的主要成果如下。

(1) 提出华北地区在中国东部总体北东—北北东构造背景上,显示两个似环状地貌—构造单元:西部的鄂尔多斯黄土高原和克拉通,东部的大华北平原和裂谷盆地。对此的强调是因为,地表是岩石圈三维结构的顶面边界,具有与 Moho、L/A (岩石圈与软流圈边界) 同等重要的意义。

(2) 以太行山前重力梯级带为界,华北区域重力场西低东高,重力异常差值达 $120 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 这表明华北岩石圈厚度由西向东在此梯度带处突然明显变薄;但磁异常与之相应的特征不明显,这表明磁异常主要由上层地壳具有磁性的岩石构造变化引起的。重、磁场特征都反映出该区地质构造方向以北东向为主。根据区域重、磁场特征,推断了“营口—郯城—庐江”等5组北东向和“白云鄂博(北)—赤峰”等5组北西、近东西向深断裂;就断裂的规模而言,以近东西向及北东与北北东向两组断裂规模最大。

(3) 剖面重力异常密度反演建模的结果表明:

应县—商河剖面:最主要的密度界面在 35 km 深度左右,相当于莫霍面的位置,其起伏在 30 ~ 37 km 深度之间,曲阳以西较深。

连云港—泗水剖面:最主要的密度界面在 35 km 深度左右,相当于莫霍面的位置,其起伏不大,基本上与人工地震探测推断的起伏保持一致。

郑州—靖边剖面:最主要的密度界面在 40 km 深度左右,相当于莫霍面的位置,其起伏由西到东在 43 ~ 35 km 深度之间变化,基本上与人工地震探测推断的起伏一致。

(4) 选用华北地区人工地震测深剖面中平行构造走向或单炮接收段主要覆盖某一构造单元的数据,应用反射率法合成理论地震图与实测数据进行对比,重新计算出华北各次级块体内部的地壳细结构,进行了对比研究;并选择6条近垂直构造走向和1条平行构造走向的人工地震剖面,利用非均匀介质中的动力学射线追踪方法进行计算,获得7条剖面的二维速度模型。

1) 鄂尔多斯块体地壳结构:鄂尔多斯块体内部地壳为两层简单结构,基底埋深 3 ~ 5 km,上地壳厚度约 23 ~ 25 km,速度 6.0 ~ 6.3 km/s;下地壳厚约 19 km,速度 6.5 ~ 6.8 km/s,随深度加深稳定增加;地壳厚度约 41 ~ 43 km,地壳平均速度较高,约 6.3 km/s,壳内无低速层发育。简单的地壳结构和较高的地壳平均速度反映了鄂尔多斯地块内部变形的稳定构造特征。

2) 太行隆起地壳结构:基底埋深 1 ~ 2 km,速度 3.0 ~ 5.2 km/s;上地壳厚度约 24 ~ 27 km,速度 6.0 ~ 6.4 km/s;下地壳厚约 12 ~ 15 km,速度 6.4 ~ 6.8 km/s;上地壳下部(14 ~ 17 km),下地壳壳幔过渡带(33 ~ 36 km) 分别存在约 6.1 km/s 和 6.4 km/s 轻微的速度逆转层。地壳厚度约 38 ~ 42 km,平均速度 6.2 ~ 6.3 km/s。

3) 燕山块体地壳结构: 基底埋深 1~2 km, 速度 3.2~5.4 km/s; 上地壳厚度约 22~26 km, 速度 6.0~6.4 km/s; 下地壳厚约 12~15 km, 速度 6.4~6.8 km/s; 上地壳下部 (16~20 km), 下地壳壳幔过渡带 (32~40 km) 分别存在厚约 4 km、3 km, 速度约 6.1 km/s 和 6.4 km/s 的低速度层。地壳厚度约 34~40 km, 平均速度 6.2~6.3 km/s。

4) 华北盆地地壳结构可进一步分为鲁西隆起, 冀中拗陷、沧县隆起、唐山震区、河淮盆地等不同的次级块体。

- 鲁西隆起地壳结构: 基底埋深 1~2 km, 速度 3.0~5.0 km/s; 上地壳厚约 24 km, 速度 6.0~6.5 km/s, 下地壳厚约 12 km, 由速度为 6.6 km/s 的均匀层和一强速度梯度层 (6.6~7.2 km/s) 构成。地壳厚约 33~36 km, 平均速度较高, 约 6.3 km/s, 显示为稳定的构造特征。

- 沧县隆起 (包括内黄, 埕宁隆起等类似单元) 地壳结构: 基底埋深 2~4 km, 速度 1.8~5.2 km/s; 上地壳厚约 23~25 km, 由速度 6.0~6.2 km/s 和 6.3 km/s 两层介质构成, 下地壳厚约 8~10 km, 速度约 6.6 km/s。地壳厚约 32~34 km, 平均速度约 6.2 km/s; 整个地壳没有发现明显的低速层构造, 显示为速度随深度逐渐增加的稳定构造特征。

- 冀中拗陷 (包括黄骅、济阳、东明拗陷等类似单元) 地壳结构: 基底埋深 6~10 km, 速度 1.6~5.0 km/s, 结晶基底由一速度 5.6~6.2 km/s 的强速度梯度层构成; 上地幔厚度约 20~22 km, 由两层低速 (5.8 km/s, 6.2 km/s) 占主导的层位构成; 下地壳厚约 6~8 km, 速度 6.0~6.6 km/s。壳幔过渡带由一低速层和一厚约 5 km 的高低速互薄层构成。地壳厚度约 28~30 km, 平均速度甚低, 约 5.5~5.8 km/s; 显示了裂陷盆地拗陷区的地壳上隆减薄, 地表巨幅张裂下陷, 壳内低速占主导地位的破碎松散构造特征。

- 三河、唐山强震区地壳结构: 基底埋深浅, 约 1.5~2.5 km, 速度 2.0~5.0 km/s; 上地壳厚 23~24 km, 在深约 6~14 km, 17~24 km 和下地壳 27~30 km 处分别出现速度为 5.8~6.0 km/s、6.0 km/s 和 6.2 km/s 的低速度构造。地壳厚 32~33 km, 平均速度约 6.1 km/s; 显示了张渤地震带中段强震区地壳、低速度结构由下而上接近浅表层 (仅约 6 km) 的构造特点。

- 河淮盆地地壳结构: 基底埋深较浅, 约 2~4 km, 速度 2~5 km/s; 上地壳厚度 20~24 km, 速度 6.0~6.3 km/s; 下地壳厚度 10~15 km, 速度 6.5~7.0 km/s。地壳厚 33~35 km, 平均速度约 6.1 km/s; 壳内没有明显的低速度层出现, 显示了河淮地块内部较为稳定的结构特征。

5) 华北构造复杂, 各不同次级块体内部结构的不同造成了其边缘接触带物性上明显差异的超壳断裂性质。

6) 华北东部地下结晶基底: 从浅到深的总体特征是一个北北东方向的低速“菱形”盆地展布在中央, 盆地四周被高速体所包围。北边是东西走向的燕山隆起区, 西边是北东、南北向的太行隆起区, 东南边是鲁西隆起。如果 6.0 km 的深度大体对应结晶基底面的话, “菱形”的华北裂陷盆地的结晶基底深度 (最深可达 10 km) 比周围隆起区 (一般为 2~3 km) 深得多; 盆地内部结构呈复杂格局。

7) 根据北纬 33°~42°, 东经 106°~122°范围内, 深地震测深的谱 P_m 走时得到的 Mo-
ho 界面埋深, 建立华北地壳厚度构造模型: 以太行山东缘地壳厚度变化带 (对应于中国

东部重力梯级带)为界,东部华北平原地壳厚28~34 km,西部鄂尔多斯块体地壳厚40~42 km。

(5) 通过已发表的文献资料的汇总、整理获得区内东经 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}$,北纬 $35^{\circ}\sim 41^{\circ}$ 范围内,50 km深度以上地壳的P波三维速度结构。经分析取得以下主要认识。① 华北中部,地面表层P波的传播速度变化幅度大,平面结构较复杂,落在海河平原(华北平原北部)和渤海湾的低速带是研究区范围内速度最低的低速区,它沿着“满城—涞源—阳原”方向延伸,呈北西走向;② 宏观上看,大体以太行山脉为界,研究区分为东、西两部分。随着深度增大,介质的P波速度增大,但低速区的位置由东逐渐向西迁移;在大约20 km深度,山西地堑为低速区;30~35 km深处,太行山前速度梯度带特征十分明显,其西边为低速区,东边为高速区;35 km深度以下,多数地区已逐渐接近上地幔深度,而西北部地区仍为相对的低速区,其中心在“应县—繁峙”一带;③ 研究区内,莫霍面可大致划分为6个区,基本与马杏垣先生划分的“鄂尔多斯台向斜(鄂尔多斯东缘)”、“山西台背斜”、“黄淮海拗陷(华北裂谷带中北部)”、“鲁西台背斜”和“内蒙古台隆(南部)”与“燕山台褶带(南部)”对应。

山西台背斜(即山西地块)构成了研究区内近南北向的莫霍面凹陷带;内蒙古台隆(南部)和燕山台褶带(南部),莫霍面下凹,构造相对简单,其走向均近东西向;鄂尔多斯台向斜(鄂尔多斯东缘),莫霍面的构造相对复杂,呈近北西向凸凹相伴的褶皱;黄淮海拗陷区(华北裂谷带中、北部)为莫霍面隆拗区,隆拗相间排列,构造极其复杂,但从整体上看,这是全区莫霍面最浅的隆起区段;鲁西台背斜主要为莫霍面断陷区,其断陷带沿枣庄—曲阜向北西方向延伸。

(6) 根据研究区莫霍面特征,划分了区内“蔚县—曲阳—井陘—平顺—晋城(太行山前断裂)”等六组地壳深断裂带。

(7) 根据地震面波频散及波形反演的结果,华北地区的上地幔沿深度可大致划分为4个区段,即50~90 km、90~120 km、120~240 km和240~400 km深度。其特点归纳如下。① 在50~90 km深度范围内,京、津、唐、河北和宁夏、陕西等地是华北地区主要的低速区。全区速度结构复杂,波速平面梯度带较发育,绝大多数与地壳中发现的速度平面梯度带相吻合。在这深度范围内,波速随深度的增大较快;② 在90~120 km深度段,华北地区上地幔速度结构转而呈“似环状”结构;即以京、津、唐、河北、山东和河南相对低速区为中心,周围环绕着相对高速区;原为低速区的宁夏、陕西等地表现出相对高速的特点。区内地震波速度的平面梯度带数目减少,随深度的变化减缓;③ 在120~240 km深度段,华北地区上地幔大致沿东经 110° 和 120° 划分为3个波速区。 110° 到 120° 之间为相对低速区,包括内蒙古的部分地区和京、津、唐、河北、河南、安徽等地,其两侧分别为相对高速区;④ 在240~400 km深度范围内,华北地区上地幔速度结构的基本格局不变,但相对低速区的中心向西偏移到山西、河南境内,而京、津、唐、河北、山东等地转而成高速区。这些特征有可能说明,京、津、唐、河北、山东等地,上地幔深部的热量来源于西部。

(8) 波速沿经度和纬度的断面特征表明,在华北地区并没有找到前人所发现的、与通常所认定的足以反映上地幔软流层速度特性的上地幔低速层。但在大约100~300 km深度之间,波速随深度的变化较小;在东部华北裂谷盆地,上地幔为相对的低速区。在大约

250 km 深度存在一组遍布全区的速度纵向梯度带。

(9) 大地电磁探测的结果反映: ① 以曲阳为界分为东西两区; 东区华北裂谷带为低阻区, 西区太行—五台块体为高阻区; ② 太行山前断裂为岩石圈深断裂, 其产状向东倾斜, 切割深度达上地幔; ③ 太行山、恒山为高阻体, 见有明显的“山根”, 底界超出 50 km 深, 起伏大、形态复杂; ④ 沙河—应县之间存在向西缓倾的壳内高导层, 其顶面深度约 20 km, 电阻率小于 $25 \Omega \cdot \text{m}$; ⑤ 东区地壳的电性结构完全与华北裂谷系的隆、拗相对应, 冀中拗陷和黄骅拗陷区内中上地壳均为电阻率很低的低阻区, 其底界呈下凹状, 但在剖面位置上, 冀中拗陷的规模远大于黄骅拗陷; 沧县隆起、埕宁隆起为相对的高阻上隆, 其中地壳均存在高导体; ⑥ 前人的研究认为在这剖面通过的地方存在上地幔高导层, 但这次探测的结果并没发现它的痕迹。

(10) 对华北地区地温场的理论计算结果显示, 华北地区岩石圈热状态在整体上相对较热, 其中以东部华北盆地最“热”, 而其周边的燕山褶皱带、南华北和大别山地区较“冷”, 鄂尔多斯盆地岩石圈热状态也较华北盆地“冷”。因此, 从岩石圈厚度看, 华北地区类似于开口向东的倒置“簸箕”状, 即北、西、南三侧面均较深 (110 ~ 150 km), 而东半部浅 (70 ~ 80 km)。

(11) 华北地区岩石圈流变学强度的空间分布格局为: 以相对刚性的燕山—阴山造山带和南华北盆地及大别山造山带为边, 中间为软弱的新生代裂陷盆地。同时, 华北地区多数构造单元均表现出存在相对软弱的中、下地壳, 这是因为华北地区下地壳的成分较典型的克拉通中、下地壳在成分上偏中性, 而中性岩的强度低于辉长岩/辉绿岩。

(12) 基于地球物理、地球演化历史划分 3 个岩石圈类型, 建立了相应岩石学—化学结构: ① 鄂尔多斯克拉通, 地壳为 TTG (英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩), 地幔岩石圈为强亏损方辉橄榄岩; ② 华北裂谷盆地, 地壳为花岗闪长质, 微裂隙和流体发育, 地幔岩石圈为弱亏损的二辉橄榄岩; ③ 造山带 (燕山、太行山等), 地壳为花岗质, 地幔岩石圈为中等亏损的方辉橄榄岩—二辉橄榄岩。

(13) 基于地球物理和地表地质, 建立了近 EW 向的岩石圈综合模型主干剖面图, 和近 SN 向的辅助剖面图。从地质演化角度对地球物理二维平面结构进行了解释。由此获得对研究区岩石圈三维结构解释的一个综合性框架认识: ① 华北地区岩石圈结构可划分为两个一级单元, 深部的三维结构与地表的地貌—构造特征相互对应。西部为鄂尔多斯克拉通, 具大陆根, 周缘为断陷盆地 (二级单元); 东部为华北似环状裂谷盆地, 具薄的地壳和薄的岩石圈, 周缘为山岭带 (二级单元); ② 研究区岩石圈处于伸展环境, 西部鄂尔多斯周缘断陷盆地展示与鄂尔多斯块体总体隆升有关的简单剪切机制的三维图像, 东部似环状裂谷盆地则展示与软流圈物质上涌有关的纯剪切或分布剪切机制图像; ③ 鄂尔多斯块体在燕山期作为周边造山带的前陆 (式) 盆地的三维图像仍保留的比较好, 喜马拉雅期断陷盆地的正断层边界常常沿燕山期的逆冲断裂带的方向发育。可以认为, 鄂尔多斯克拉通岩石圈的三维结构主要是新太古—古元古代形成, 保持至今; ④ 太行—五台—恒山燕山期造山带是沿大同一朔州逆冲推覆于鄂尔多斯块体上面的巨型挤压收缩构造带, 鄂尔多斯地壳一直可下插到五台山下面, 这一图像仍较好地保留在陆壳内; ⑤ 华北地台 (克拉通) 的边界仍部分地保留在现今岩石圈三维结构图像中, 以磁性结构表现最为清楚, 为华北地台北缘的阴山 EW 向线状强负磁异常带和沈阳—清原 NE 向线状强负磁异常

X

带,南缘的平顶山—六安 NWW 向线状强负磁异常带和山东五连山 NE 向线状强负磁异常带;⑥ 燕山期的岩浆活动在盆地周边及其旁侧的山岭的陆壳内仍可找到记录,最典型的是在邯郸—濮阳—长治—鹤壁地段壳内的高速—正磁异常体对应闪长岩—二长岩岩浆房;⑦ 现今岩石圈三维结构图像,虽然其重要的界面(Moho、L/A,地表)是新生代以来形成的,但是其内部结构图像在不同的单元或地段内仍保留着历史演化的记录,鄂尔多斯克拉通保留了新太古—古元古代大陆根的基本结构,盆地周边的山岭较好地保留了燕山期挤压收缩构造时的基本结构,盆地内则最清晰地记录了新生代伸展构造的基本结构。亦就是说,现今岩石圈三维结构是岩石圈形成及其演化的一个综合图像,它为华北地区岩石圈构造演化、地质大调查、资源勘查和环境—灾害评估提供重要科学依据。

(14) 综合岩石圈三维结构图像,盆地沉积历史,新生代玄武岩喷发特征,提出华北地区岩石圈伸展—减薄机制及其过程,以及岩石圈—软流圈系统动力学的模型。① 关于机制,前人认为,华北地区是一个大型简单剪切机制形成的伸展构造区。本次研究提出,华北似环状盆地在古近纪为纯剪切机制、新近纪—第四纪为分布剪切机制,它们分别对应软流圈物质上涌诱发的岩石圈的极快速和快速减薄作用;鄂尔多斯周缘断陷盆地为简单剪切机制,与鄂尔多斯块体的隆升和青藏高原东北缘通过六盘山挤压带施加于鄂尔多斯块体上的 NE 向挤压力的联合作用的结果;② 关于过程,已有的认识均采用 McKenzie 的模型,认为华北裂谷盆地古近纪为裂谷断陷作用,新近纪—第四纪为后裂谷相热沉降的断陷作用。本次研究提出,古近纪与新近纪—第四纪的伸展作用是两个幕式事件(episodes)的记录,而不是同一幕的两个相(phase)的记录,初步的热模拟定量计算支持这个认识;古近纪的伸展幕还未发展演化到后裂谷相,软流圈上涌太浅以及由于区域上弱的挤压应力场的联合作用,终止了裂谷盆地的健康发展而盆地翻转,新近纪—第四纪的伸展幕已发展到同裂谷相的晚期,即裂谷作用的成熟期,至今仍为正在活动着的裂谷盆地;③ 关于动力学,基于更大区域的岩石圈三维结构图像和青藏—喜马拉雅碰撞造山事件序列的对比,提出,青藏—喜马拉雅造山带岩石圈会聚迫使软流圈物质向东流动,以及太平洋—侧俯冲洋壳诱发日本海下面的软流圈物质向东流动的联合作用,在华北地质的下面一股巨大的软流圈物质向东快速流动,拖拽上覆岩石圈向东伸展和裂开,诱发软流圈物质快速上涌、大量玄武岩喷发和裂谷盆地的形成。

(15) 对该区岩石圈结构的三个类型的成因和资源聚集的岩石圈构造背景进行了初步探讨,并提出进一步工作的建议。① 太古宙—古元古克拉通与大陆根形成的大阶段,是华北岩石圈形成的主要时期,中元古长城系和蓟县系准地台盖层发育和非造山型的基性岩墙群—斜长岩—奥长环斑花岗岩的形成,新元古开始的典型地台型沉积和真正的大陆边缘沉积等均为全球事件的一个组成部分。侏罗—白垩纪,华北地台分化、破坏和大陆活化,其东部转变为挤压造山带,西部仍保持稳定克拉通性质,在挤压环境下转变为前陆(式)盆地。新生代研究区又进入大陆岩石圈伸展构造环境。由此形成了 3 个类型的岩石圈结构,鄂尔多斯克拉通可作为研究区太古宙—古元古代岩石圈的参照,太行—燕山等山岭可作为燕山期挤压造山时期被强烈改造过的岩石圈的参照,裂谷—断陷盆地则是有一次受到了强烈改造的岩石圈;② 提出岩石圈结构类型,构造性质及其演化不仅控制岩浆作用、构造变形、盆地形成和流体运移,而且控制着成矿作用,由此提出研究区成矿作用的 3 大类型,与盆地充填作用有关的成矿,与岩浆活动有关的成矿,和与构造变形诱发的流体远

离运移有关的油气藏运储；③ 对华北地区深部资源潜力预测及进一步工作提出了具体建议：(a) 大同一朔州与阴山两个大型强负磁异常带，可能是被掩埋在逆冲岩席下面的沉积岩层的堆叠体，那里可能是被深埋的油气田；(b) 邯邢南面的太行山南段 ϵ —O 沉积层下面及其东侧平原下面可能的隐伏闪长岩—二长岩杂岩体，可能赋存隐伏的 Fe 矿。(c) 从区域尺度看，华北地区深部资源潜力很大；④ 研究区现今仍是一个活动着 (active) 伸展构造系统，处于活动裂谷作用的成熟期，预计在相当长的时间内岩石圈才会冷却，真正进入热沉降阶段。因此，裂谷—断陷盆地内及其边缘的地震仍会常常发生，现今从盆—岭—高原和水系分布的基本地貌格局（它们将控制环境变化）仍将持续相当长的时间。

本报告出版稿，地质部分由邓晋福、邱瑞照统稿，地球物理部分由魏文博、叶高峰统稿；最后由邓晋福和魏文博定稿，邱瑞照统编交付出版社。

本书的出版还得到地质过程与矿产资源国家重点实验室、地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室、地球探测与信息技术北京市重点学科 (XK104910598) 和国家自然科学基金重点项目 (40434010, 40234048) 的资助，特此致谢。

中国岩石圈三维结构专项计划

办公室与本书作者

2007 年 3 月 28 日

Foreword

The Earth is a complex multi-layered sphere, of which the lithosphere is the shallow rigid sphere made up of crust and the upper mantle.

The primary aim of geosciences is to study and recognize the earth, to guarantee the natural resources satisfy human needs and make human habitation comfort on the basis of these recognized rules. In current geosciences, the lithosphere is a newly-developed research subject. It is very important significance on the probing geological laws, analyzing mineral resource genesis, evaluating geological environment and catastrophes, apperceiving continental evolution to study lithosphere, recognize lithosphere, gradually extend the lithospheric data.

For above-mentioned reasons, since 1950s, in order to study and recognize completely the earth, the International Geoscience Organization have implemented some international cooperation research projects, such as "International Geophysical Year". Especially from 1980s on, to make out the lithospheric constitutes, texture and structure, evolution and dynamical mechanism, the International Geoscience Organization have implemented such large-scaled international cooperation research projects as "International Lithospheric Dynamic and Evolution Program" and "International Lithosphere-Biosphere Program". In addition, USA, Canada, some states In Europe have implemented some large-scaled lithospheric research projects. By using of combination of the geological, geophysical, geochemical methods, the research and survey on the lithospheric texture and structure and deep processes of the global geoscience transect, important orogenic belts, and the sedimentary basins have done, and many innovative research results have been obtained, which make the lithospheric property and genesis be deeply recognized. That becomes the good basis for establishing the systemic geosciences.

During several tens of years, in China, some magnificent geological survey, geophysical detection, geochemical prospecting, and lithospheric research have been accomplished. The mid-scaled, small-scaled regional geological survey and aeromagnetic survey have covered with the continent of all over the country and abut part sea area; about 50000 km geophysical detection sections by explosion seismic method have been finished, a great lot of geophysical detection sections by other methods been finished. Since 1980s, China have taken part in the international lithospheric research project, such as 11 global geoscience transect, ultra-high pressure metamorphism and dynamics in orogenic belts, genesis of sedimentary basin, seismic activity all over the earth have been carried out. Additionally, the 5100 m deep Continental Scientific Drilling Project has been performed. The geological survey of multi-year accumulates and enriches the documents and data about the earth.

To systemically review and summarize the deep geology, geophysical survey and lithospheric