

中国岩石圈三维结构专项研究主要进展和成果

李廷栋^{1,2}

(1. 国土资源部咨询研究中心, 北京 100035; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

提要:“中国岩石圈三维结构”专项研究取得诸多新发现和新成果:建成中国第一个“岩石圈三维结构数据库”;建立了中国岩石圈结构模型;深化了对中国东部岩石圈、软流圈性状、结构的认识,证明岩石圈与软流圈之间存在呈“层块结构”的过渡带,在东亚至西太平洋地区 70~250 km 深度发现一巨型低速异常带;揭示中国东部岩石圈呈现明显的“上老下新”的年龄结构;初步建立了中国大陆岩石圈岩石学结构模型,把中国大陆及毗邻海域岩石圈划分为 5 种类型;提出中国岩石圈构造单元划分方案,把中国大陆及毗邻海域划分为 2 个岩石圈构造域和 6 个岩石圈块体;证实青藏高原存在巨型南北向构造;在地质上获得一些新发现和新认识。

关键词:岩石圈;三维结构;进展;成果

中图分类号:P313.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657 (2006) 04-0689-11

“中国岩石圈三维结构”系国土资源部于 2000 年 9 月下达的一个专项研究计划,其主要任务是以现代地学理论为指导,以新技术方法为手段,对中国已经积累的大量岩石圈调查研究数据、资料进行多学科的综合研究,建立中国岩石圈三维结构数据库,划分中国岩石圈构造单元,揭示中国岩石圈三维结构及地质、地球物理、地球化学特征,为地质资源勘查、地质环境评价和地质灾害监测提供科学依据,为发展地球科学理论开辟道路。

该专项研究计划由相互具有密切联系的 3 个项目组成:中国岩石圈三维结构数据库、重点区段岩石圈三维结构及其演化过程、中国岩石圈三维结构及其演化和构造编图。

5 年来,在中国国土资源部国际合作与科技司和中国地质调查局科技外事部的领导、关怀和专项承担单位及各协作单位的支持下,全体从研科学家努力探索,精心研究,完成了预定的目标和任务。各个项目和课题组搜集研究了与岩石圈有关的大量地质、地球物理、地球化学数据、资料和图件,分析研究了加拿大、美国、欧洲等国及国际科学组织有关岩石圈研究计划的成果和经验;对中国已完成的主要地学断面和其他地球物理探测剖面资料进行了再处理、再解释,抢救了一批行将散失、损毁的地球物理资料;对一些关键地段和重大科学问题补做了地质、地球物理剖面探测研究,补做了少量样品分析测试。在这些工作基础上,进行了地质、地球物

理、地球化学相结合的综合研究,对几个重大科学问题开展了专题研究,取得诸多新发现、新认识,其中获得 3 项主要的实物成果:(1)中国岩石圈三维结构数据库;(2)中国岩石圈三维结构丛书,共 10 册;(3)中国岩石圈三维结构特征图集,约 100 余幅图;标志性的科学成果可初步归纳为如下 8 项。

1 建成中国第一个岩石圈三维结构数据库

该数据库由 14 个子库(其中原始数据库 9 个,成果数据库 5 个)和“总库管理系统及 GIS 平台开发应用”、“网络数据库及其管理系统”2 个总库组成(图 1)。它的建成为中国岩石圈探测研究成果信息化和数据共享奠定了良好基础。

该库在建设过程中,“探边摸底”,尽量收集了全国各部门、各个科学家掌握的地质、地球化学,特别是地球物理资料,对一些接近损毁的资料进行了复制、抢救;尽可能采用了先进的技术和方法。该库的主要特点是:

(1) 资料收录数量大:共收录地球物理剖面 140 条,约 46 000 km,数据量达 300 GB;古地磁数据 1 460 个;地球化学数据 2 000 余个;大地热流数据 1 161 个。

(2) 涵盖学科面广:包括了各种深部地球物理探测数据;深部地球化学、古地磁学及大地热流数据,以及各种有关地质成果和图件。

收稿日期:2006-03-16;改回日期:2006-06-12

基金项目:国土资源部专项计划项目(20010103)资助

作者简介:李廷栋,男,1930 年生,中国科学院院士,从事区域地质研究及地质编图。

(3) 软件先进,并应用了ARC/INFO地理信息系统。

(4) 管理系统灵活实用:采用集中式与分散式相结合模式,既可集成运行,又可分散单独维护管理。

(5) 可通过互联网实现数据共享和数据交换。

2 建立了中国岩石圈三维结构模型

朱介寿^[1]等在几个相关项目支持下,根据东亚及西太平洋地区 58 个数字地震台站约 12 000 个长周期波形记录,挑选出 4 100 条面波大圆传播路径;收集、分析了中国 13 条地学断面和 60 多条人工地震测深数据,通过高分辨率面波和体波三维速度反演,建立了中国及邻区精细的三维地球模型数据库,获得区内 1°×1°网格结点详细的地球各圈层物理参数。在此基础上,绘制出中国及邻区地壳、上地幔圈层的高分辨率三维速度结构及图像,从浅到深分 12 个层次反映了地壳、岩石圈地幔及软流圈的速度结构,绘制出它们的厚度及速度图件,建立了中国及邻区岩石圈三维结构模型。

从通过中国的 3 条纬向 S 波速度剖面图(图 2)可以看出,大致以 105~110°E 为界,中国东西两部分岩石圈和软流圈结构存在很大差异。西部岩石圈、软流圈“层状结构”较明显,岩石圈厚度大,130~200 km,软流圈薄,40~100 km,反映了印度板块与欧亚板块碰撞汇聚的效应。东部岩石圈、软流

圈呈“块体镶嵌结构”,岩石圈很薄,50~100 km;软流圈很厚且厚度变化大,一般厚度 200~300 km,反映了软流圈上涌和岩石圈伸展减薄。

3 深化了对中国东部岩石圈、软流圈性状和结构的认识

在总结已有地质、地球物理、地球化学资料基础上,对已有地球物理剖面资料进行了再处理、再解释,进行了层析成像和数值模拟,并补做了部分大地电磁测深和岩矿样品的分析测试。

研究表明,中国东部滨太平洋地区及边缘海盆地岩石圈和软流圈结构构造十分复杂,纵向及横向上的变化都很大,莫霍面和岩石圈底界面多为凸凹不平的不连续界面;地球物理资料所显示的不同形态、不同厚度的“软”、“硬”块体相互交错、叠置,垂直分层不明显,并不是像过去认为的那样呈“层状结构”,其主要特点可列举以下几例。

(1) 从 2 表可以看出,在 50~250 km 深度,高速体与低速体犬牙交错、相互镶嵌,不完全呈“层状结构”,而是呈“块体镶嵌结构”。这种结构在边缘海地区尤为明显。袁学诚把它们称为“蘑菇云”构造。

(2) 在秦岭—华北块体地震层析剖面图上(图 3),除

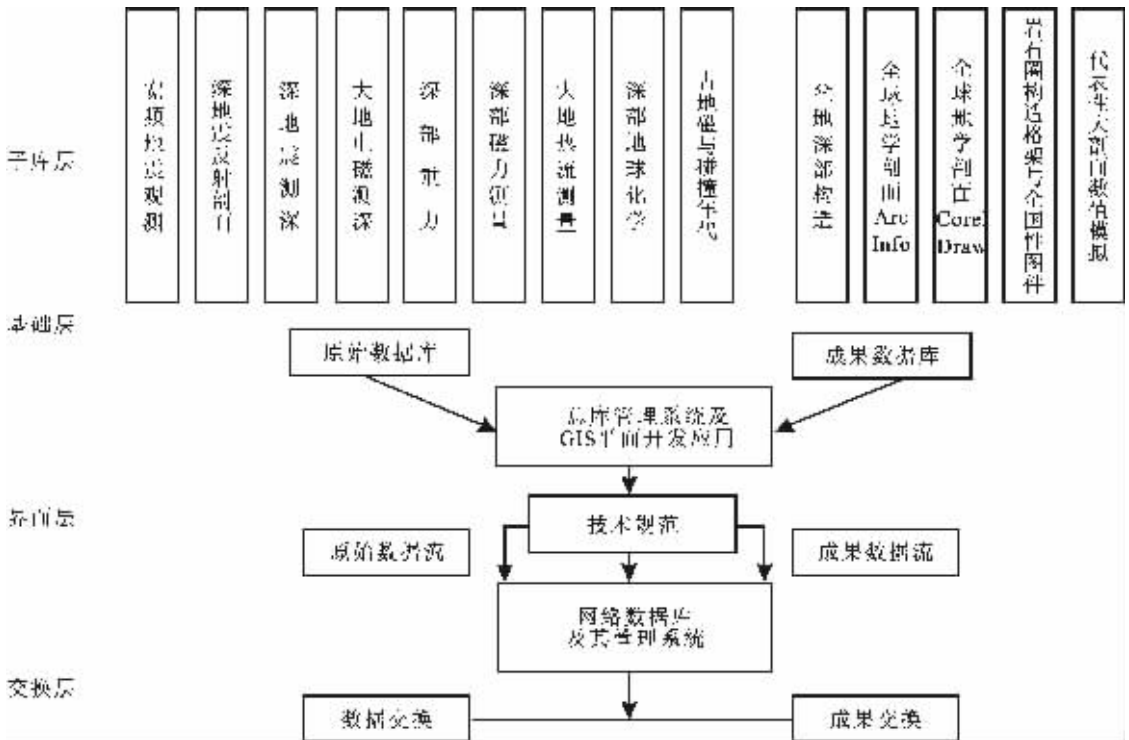


图 1 中国岩石圈三维数据库框架

Fig.1 Frame of the 3D lithospheric structure database of China

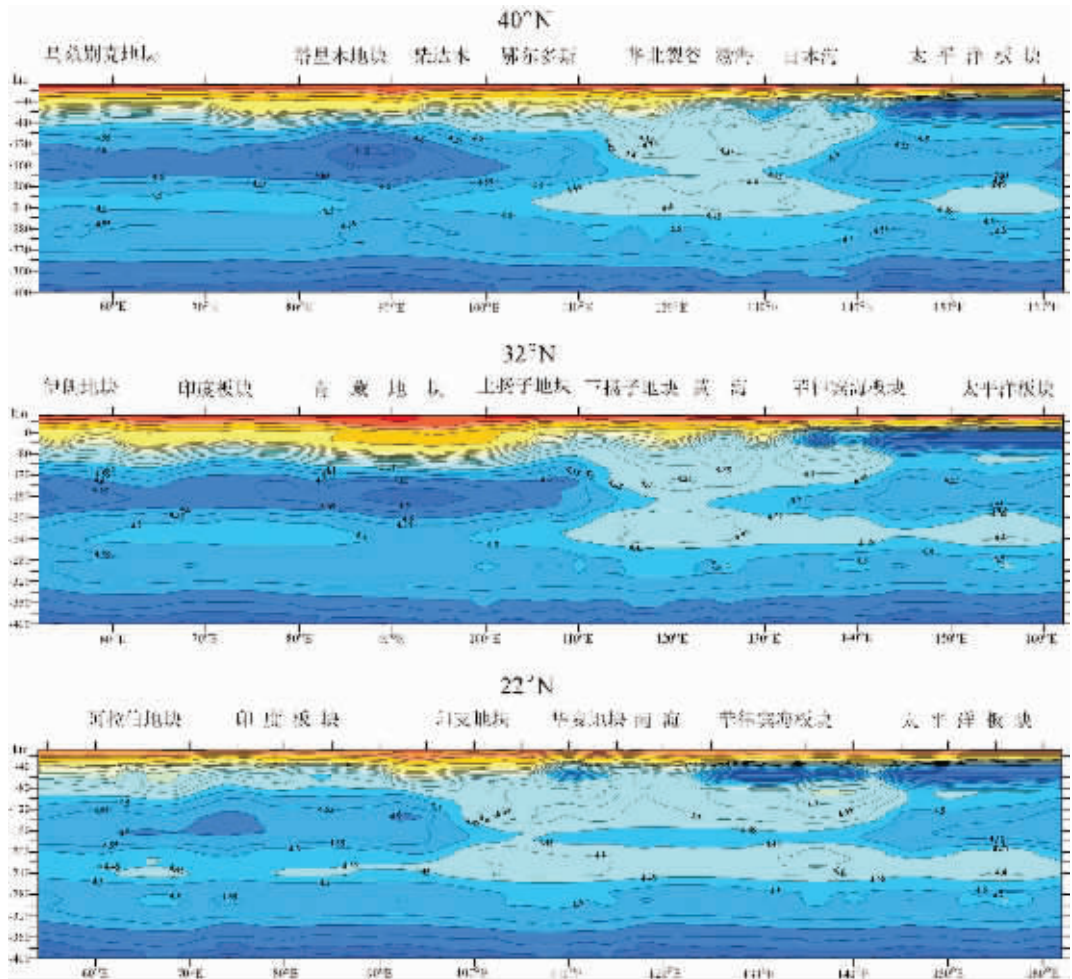


图 2 沿纬向通过中国的 3 条 S 波速度剖面图^[1]

Fig. 2 Three latitudinal S-wave velocity section traversing China^[1]

100~150 km 以低速为主外,50~100 km 和 150~400 km 都表现为高速体与低速体陡立间列。路凤香等称之为岩石圈与软流圈之间的“过渡带”。在中国东部普遍存在这种“过渡带”,其深度各地不一,东北地区 30~225 km,华北地区 100~330 km,华南地区 60~300 km。

(3) 根据地震面波层析反演结果^[23,25],在东亚至西太平洋地区深 70~250 km 区段发现一个巨型低速异常带(图 4)。该异常带宽 2 500~4 000 km,南北长 12 000 km,包括整个滨太平洋地区、边缘海、西太平洋及印支半岛、婆罗洲等地。其主要特点是:

- ① 岩石圈 V_s 速度值很低,为 4.2~4.35 km/s;
- ② 岩石圈厚度小,50~80 km;
- ③ 软流圈厚度大,300 km 左右,最厚 330~340 km 以上;
- ④ 软流圈 V_s 速度值低,4.15~4.28 km/s;
- ⑤ 软流圈内存在高速块体,规模大小不等,速度多在 4.4~4.50 km/s。

(4) 对华北岩石圈减薄动力学进行了数值模拟。从两个模拟图像(图 5)来看,华北现今基本无垂向运动;华北应力场分布有 0~100 km,100~200 km 和 200~400 km 3 个层次,反映了不同层圈的不同特性;太平洋板块俯冲对华北的影响,在 200 km 以下的深部尤为明显,

但其横向影响限于 200~300 km,对华北裂谷盆地似乎影响不大,华北裂谷之形成可能与热物质上涌有关,模拟图像与 GPS 测量结果基本一致。

4 揭示出中国东部岩石圈呈“上老下新”年龄结构

根据地壳和岩石圈地幔年龄示踪原理,利用 Nd 同位素模式年龄和橄榄岩包体的 Os 同位素测试结果,研究了东北地区岩石圈垂向化学结构,发现不仅上、下地壳,而且地壳与岩石圈地幔之间均呈现明显的“上老下新”的年龄结构。翟明国等^[26]称之为“华北克拉通中生代换底作用”,即前寒武纪下

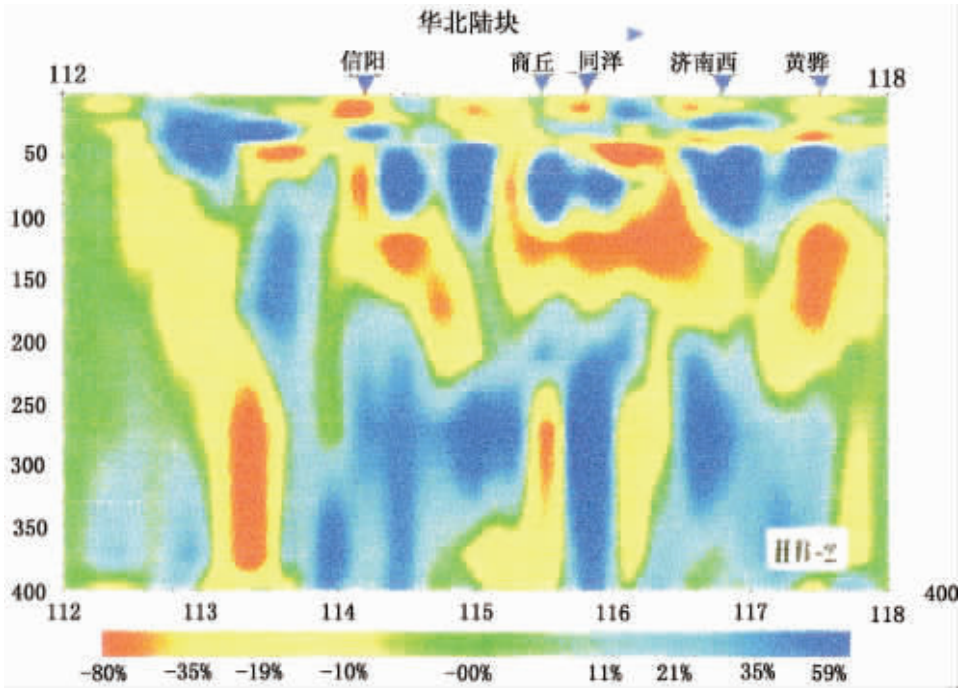


图3 秦岭—华北地区地震层析剖面

Fig.3 Seismic tomographic section of the Qinling–North China region

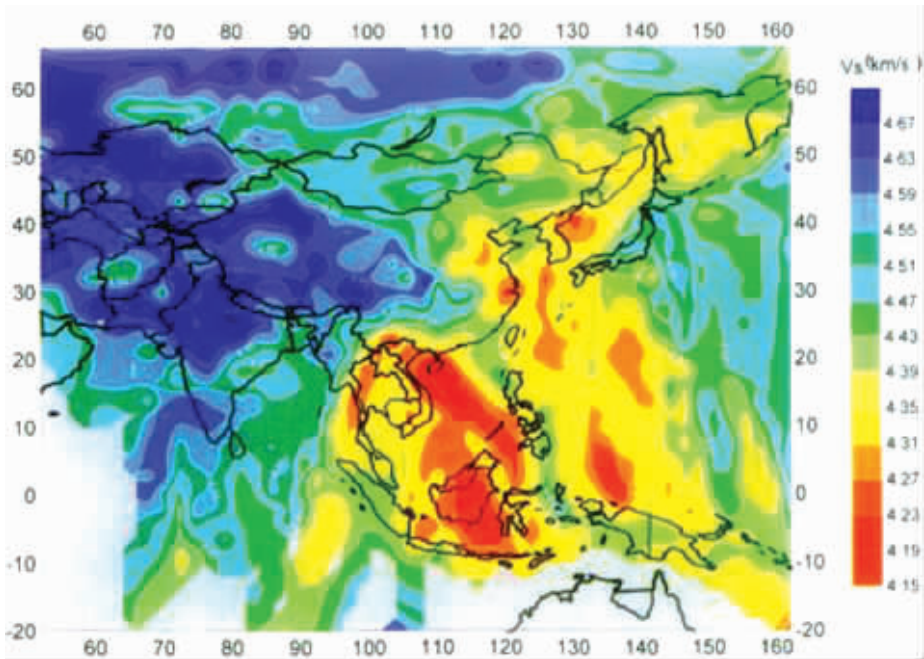


图4 亚洲大陆滨太平洋带及西太平洋上地幔巨型低速带(深度130km)^[3]

Fig.4 Giant upper mantle low-velocity belt from the peri-Pacific belt of the East Asian continent to the western Pacific region at 130 km depth^[3]

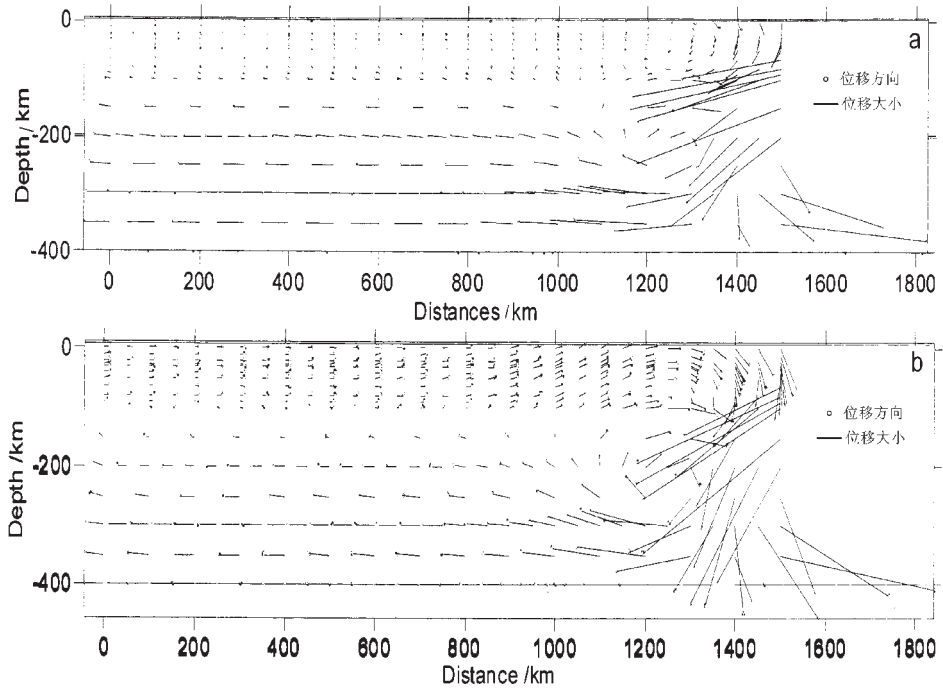


图 5 石家庄—济南—琉球群岛模型模拟^[4]
 a—x 方向固定, y 方向自由; b—x, y 方向均自由
 Fig.5 Modeling of the Shijazhuang—Jinan—Ryukyu Islands^[4].
 a—fixed x, free y; b—free x and y

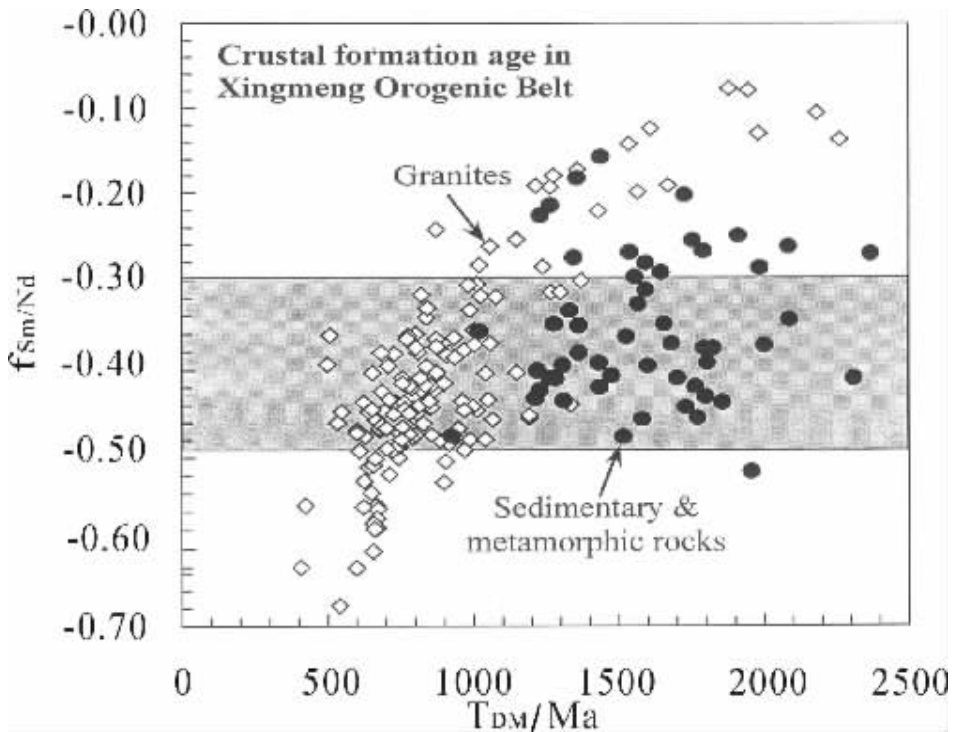


图 6 兴蒙造山带中地壳形成年龄图解
 Fig.6 Diagram for interpretation of the formation age of the crust of the Hinggan—Mongolia (Xingmeng) orogenic belt

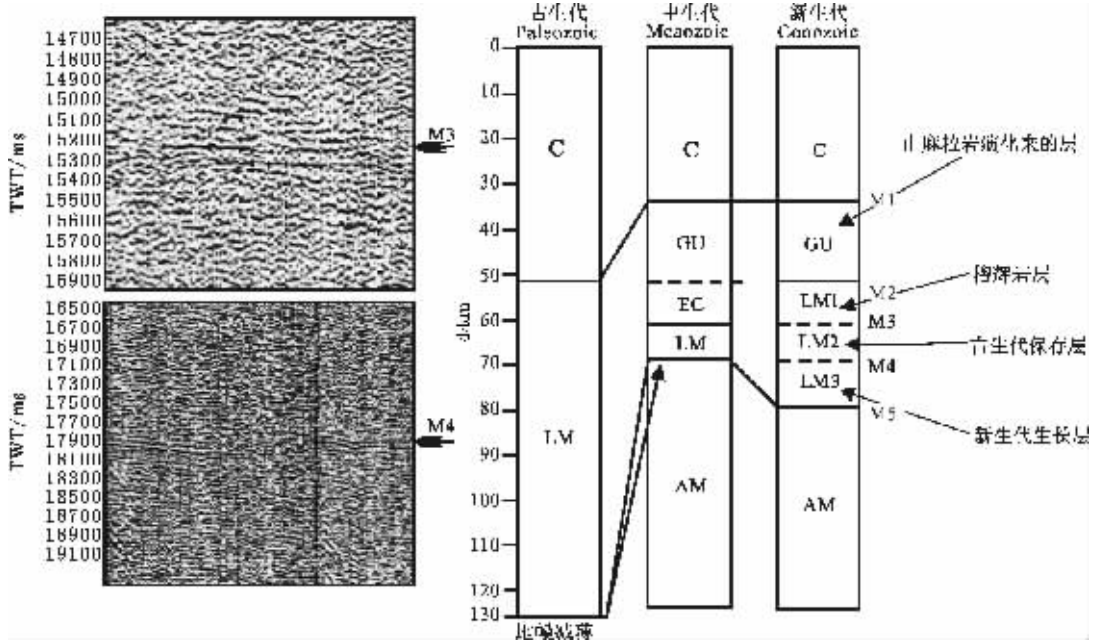


图7 苏鲁造山带岩石圈减薄过程

Fig.7 Process of lithospheric thinning in the Sulu orogenic belt

地壳被中生代下地壳所置换。图6是东北地区地壳形成年龄图解,从图上可以看出,反映下地壳形成的花岗岩Nd同位素模式年龄明显小于上地壳的沉积岩和变质岩的年龄。

东北地区汪清、双辽和华北地块龙岗,橄榄岩包体Os同位素所反映的岩石圈地幔年龄,均与年龄小于200Ma的大洋岩石圈地幔年代一致,更明显小于上覆地壳的年龄。

研究了苏鲁造山带岩石圈减薄过程,从图7可以看出,古生代时岩石圈较厚,中生代时大幅度减薄,新生代时又略有加厚。新生代岩石圈亦呈现明显的“上老下新”年龄结构。

5 初步建立了中国大陆岩石圈岩石结构模型

在丰富的地质与地球物理资料基础上,通过综合研究岩石圈深部物质组成,建立了中国大陆18个代表性地区岩石圈岩石结构柱状剖面(图8)。根据岩石圈动力学性质,把中国大陆及毗邻海域岩石圈划分为5种类型:克拉通型、造山带型、裂谷型、边缘海洋壳型和岛弧型,分别论证了各类型岩石圈基本特点(表1);构建了中国大陆及毗邻海域岩石圈岩石模型,并结合地质历史探讨了中国大陆岩石圈形成演化过程,为进一步研究中国大陆岩石圈提供了深部物质基础。

6 提出中国岩石圈构造单元划分方案

提出岩石圈构造单元划分原则,强调把地表地质与深部地质相结合,充分考虑地球物理场、地球化学场及构造应力

场特征。

(1) 具有与地壳表层地质构造的雷同性:同一个岩石圈构造单元,应具有相似的构造属性;时代和类型相似的沉积建造、岩浆活动、变质作用、构造活动及成矿作用。

(2) 具有岩石圈结构构造的相似性:同一个岩石圈构造单元应具有相似的地壳和岩石圈类型及分层特征;厚度相近或具有统一变化规律;近似的岩石圈密度及结构构造。

(3) 具有统一的地球物理场特征:同一个岩石圈构造单元应具有相近的地震波速结构、电性结构、热结构、磁性结构及重力场特征;具有相似的地壳、上地幔各向异性特征。

(4) 具有统一的构造应力场特征:即同一个岩石圈构造单元应具有相近的地壳应力活动强度、应力活动方向及类型,以及水平应力、垂直应力及剪切应力分布状态。

(5) 具有相似的地球化学场特征:即同一个岩石圈构造单元要具有相似的岩石圈物质组成、化学结构及其在纵横方向上的变化规律;具有相近的壳、幔物质活动强度。

(6) 具有明显的岩石圈边界:可以是板块缝合带、巨型断裂带或造山带。这种边界常常表现为地壳厚度、重力异常的陡变带、强地震带或构造-岩浆岩带等。

依据上述原则,以贺兰山—龙门山南北向构造带为界,把中国大陆及毗邻海域岩石圈划分为2个岩石圈构造域和6个岩石圈块体(图9)。

I 中亚岩石圈构造域(I)

① 西域岩石圈块体(I-1)

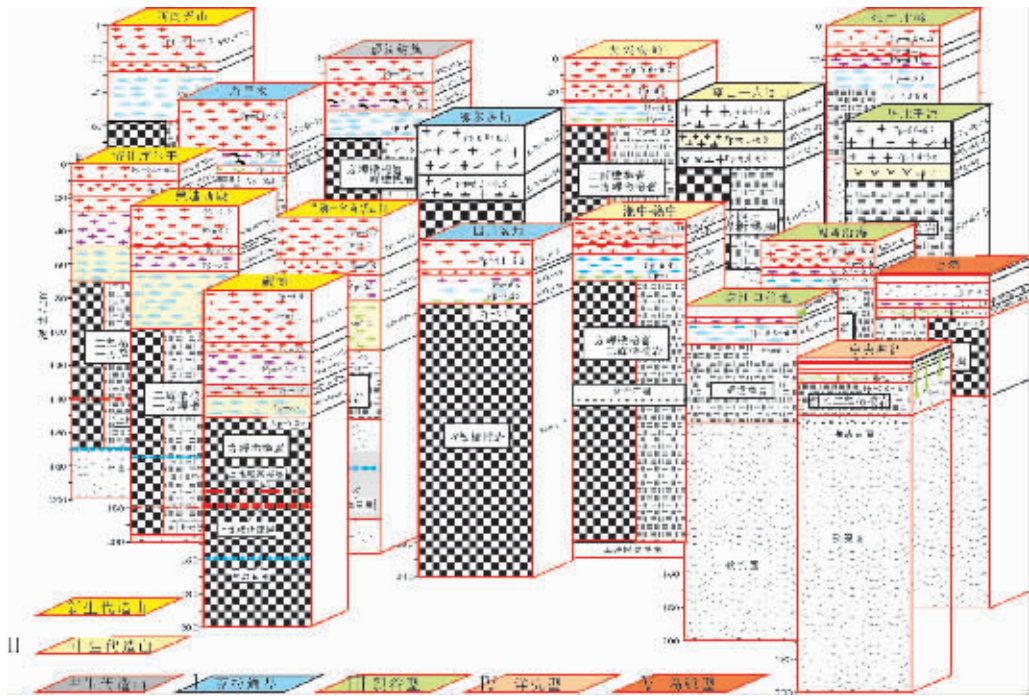


图 8 中国大陆岩石圈岩石结构图解^[8]

Fig.8 Diagram showing the petrological structure of the lithosphere below continental China^[8]

表 1 中国大陆及毗邻海域各类型岩石圈岩石组成及特点

Table 1 Composition and characteristics of various types of lithospheric rocks in continental China and its adjacent areas

岩石圈类型	代表性地区	地壳岩石组成	岩石圈地幔岩石组成	主要特点
克拉通型	塔里木、扬子、中朝等地台	TTG 岩套为主	强亏损方辉橄榄岩为主岩石	主体于 17 亿年前形成
造山带型	走廊北山、燕山—太行山、喜马拉雅山、天山等	花岗质-花岗闪长质岩石	方辉橄榄岩-二辉橄榄岩或二辉橄榄岩-方辉橄榄岩	分古生代、中生代、新生代 3 个时代
裂谷型	华北盆地、松辽盆地、闽粤沿海	花岗质岩石	二辉橄榄岩	陆壳成分各盆地有差异，华北 SiO ₂ 为 67.2%，松辽为 63.8%，闽粤沿海 65.6%
岛弧型	台湾岛弧		亏损程度较高，以方辉橄榄岩为主，少量二辉橄榄岩	深源捕虏体 ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr 较高，ε Nd(t) 值为负值
边缘海洋壳型	南中国海中央海盆	洋壳，以辉长质岩石为主	斜长二辉橄榄岩	

康西瓦断裂带—阿尔金断裂带—祁连北缘断裂带

② 青藏高原岩石圈块体(I-2)

喜马拉雅主边界断裂

印巴岩石圈块体

II 东亚岩石圈构造域(II)

③ 松辽岩石圈块体(II-1)

中朝地台北缘断裂带

④ 华北岩石圈块体(II-2)

商丹断裂带—信阳—舒城断裂带

⑤ 华南岩石圈块体(II-3)

滨海断裂带

⑥ 南海岩石圈块体(II-4)

7 证实青藏高原存在巨型南北向构造

航空磁测在青藏高原发现大型近南北向负磁异常带。航磁图像向上延拓 20 km 和 50 km, NNE 向异常更加明显(图 10), 不仅说明青藏高原确实存在巨型南北向伸展构造带, 而且显示了岩石圈深部与表层构造的不均一性。对于南北向构造成因尚有不同认识, 有待进一步研究论证。

地震层析反演的速度结构, 在 60~180 km 深度都清楚

地显示出南北向构造分带。图 11 为 130~180 km 的水平切片, 从中可以看出, 北北东向和近南北向线状构造非常发育, 而东西向构造并不明显。

8 地质上的几个新发现和新认识

(1) 研究证明, 东北地区大面积分布的花岗岩, 其时代主体为中生代, 而非古生代。岩石类型主要为 I 型和 A 型花岗岩, 不存在典型的 S 型花岗岩。花岗岩具有低的 Sr 同位素初始比值(~ 0.705)和正的 $e_{Nd}(t)$ 值, 显示与华南花岗岩完全不同的地球化学特点。

(2) 东北桦南—饶河新测大地电磁测深剖面显示: 佳木斯地块东界位于宝清一带(近直立低阻体); 其东为几个增生地体, 饶河—大和镇显示为一推覆构造。剖面说明, 东北东部可能为中生代地体拼合带, 属滨太平洋构造域, 而非“华力西褶皱带”(图 12)。

(3) 华北应县—商河大地电磁测深剖面表明, 以曲阳为界, 以东为低阻区; 以西的太行—五台—恒山块体为高阻区, 可能是一个中生代巨型推覆构造, 由南东向北西方向推覆于山西高原之上(图 13)。

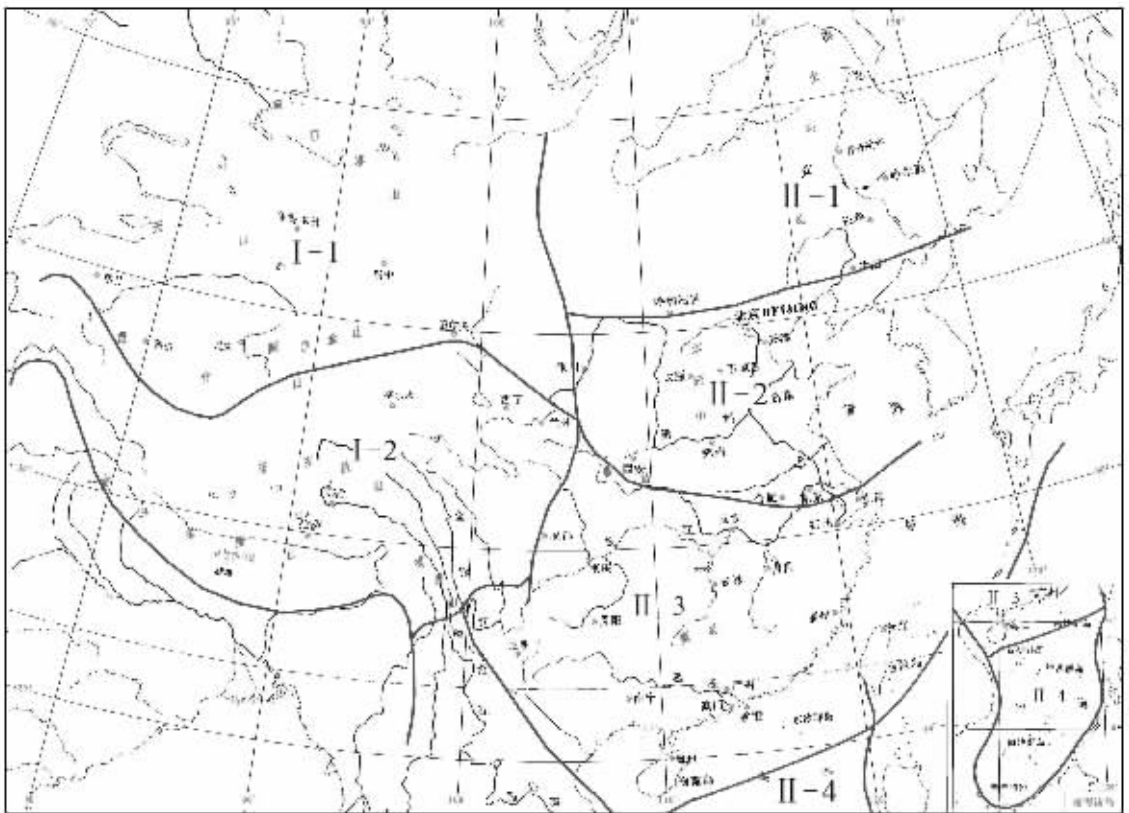


图 9 中国大陆及毗邻海域岩石圈构造单元 (有关说明见正文)

Fig.9 Lithospheric tectonic units in continental China and its adjacent areas

(see text for relevant explanation)

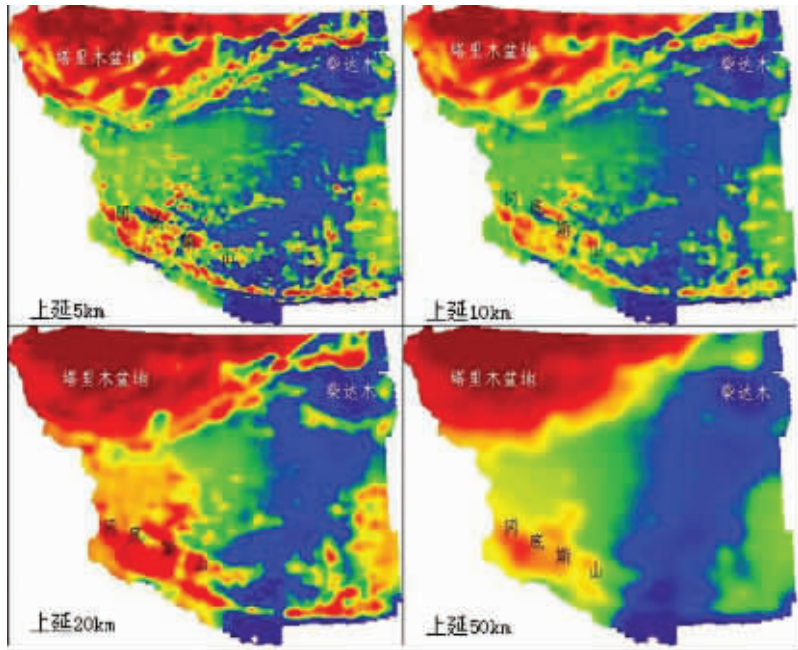


图 10 青藏高原航磁异常磁场化极上延图

Fig.10 Map of upward continuation of the aeromagnetic field on the Qinghai-Tibet Plateau

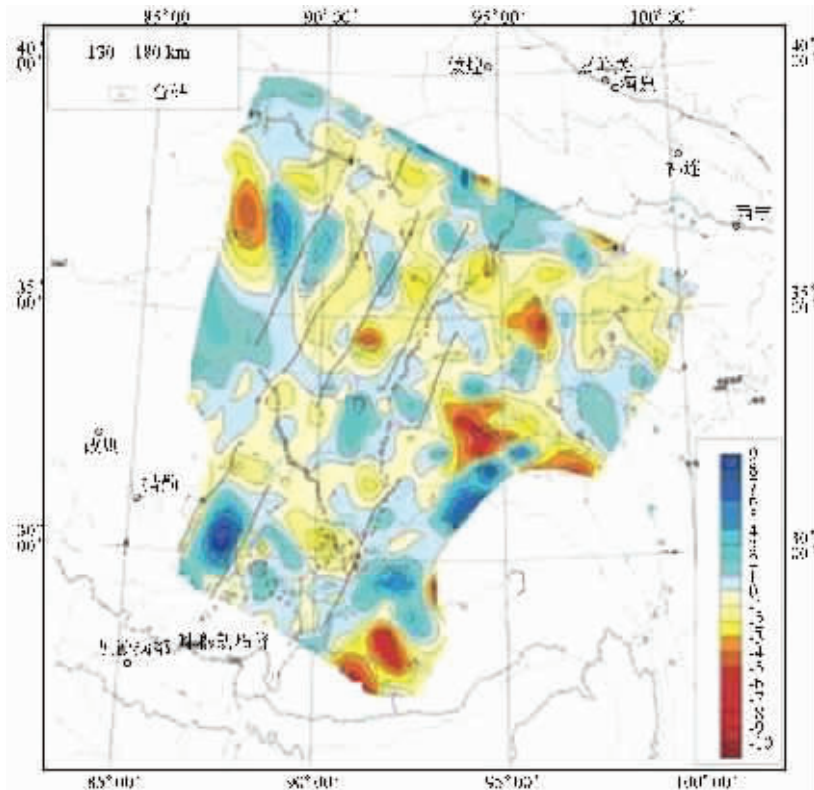


图 11 青藏高原地震层析水平切片第六层(130~180 km)

Fig.11 Sixth seismic tomographic horizontal slicing of the Qinghai-Tibet Plateau (at 130~180 km depth)

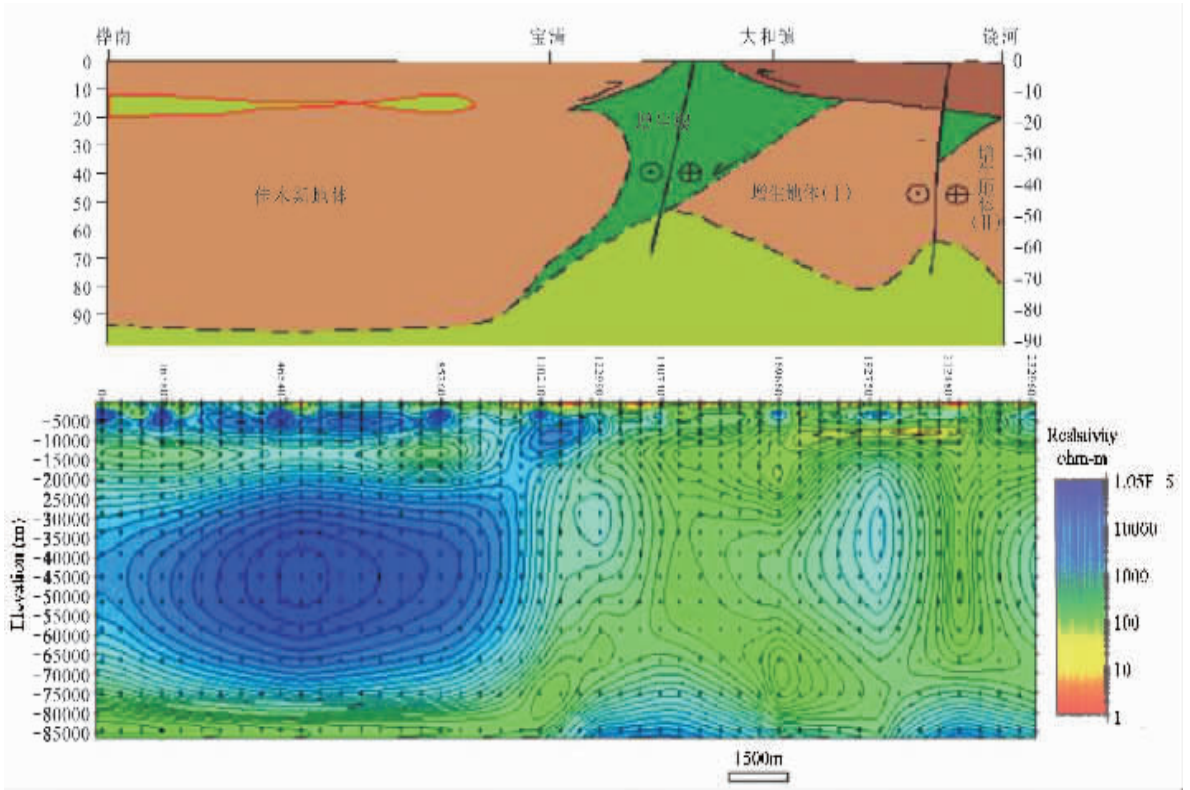


图 12 桦南—饶河 MT 剖面岩石圈结构解释图

Fig. 12 Interpretation of the lithospheric structure of the Huanan-Raohe MT section.

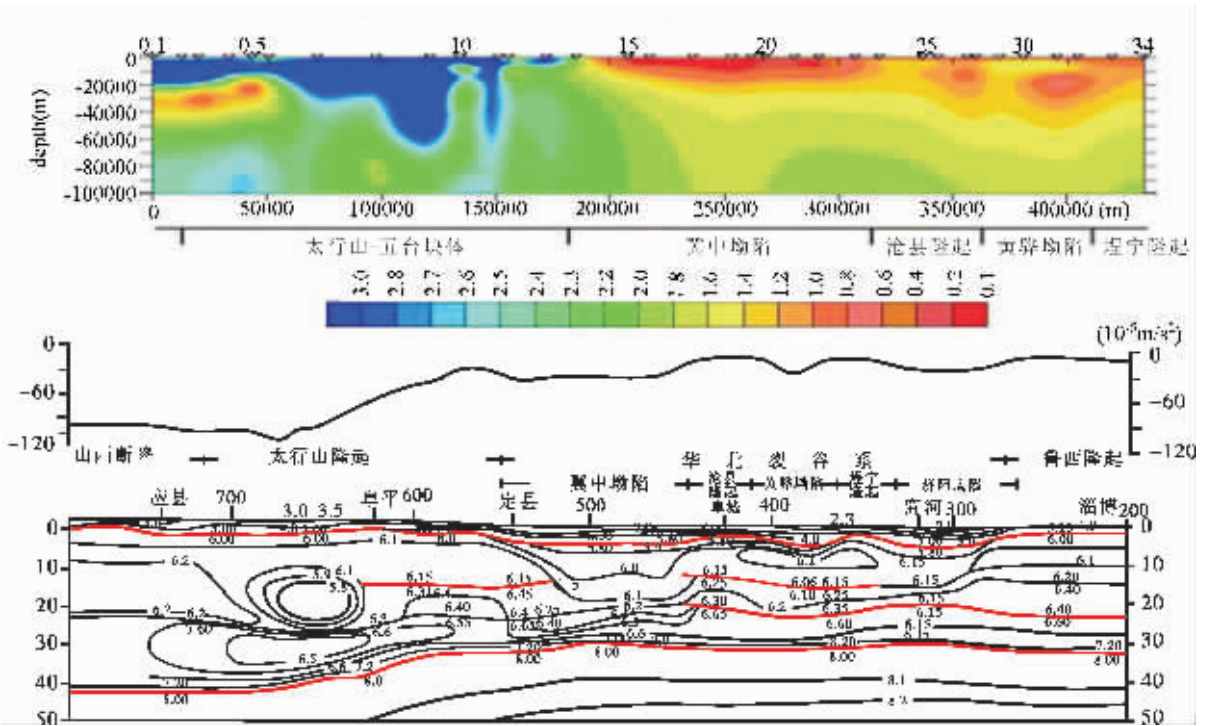


图 13 淄博—托克 DSS 剖面地壳构造图

Fig.13 Crustal structure along the Zibo-Tog DSS section

参考文献(References):

- [1] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002,45(5):646~664.
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific marginal seas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002,45(5):646~664(in Chinese with English abstract).
- [2] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋巨型裂谷体系岩石圈与软流圈结构及动力学[J]. 中国地质, 2002,29(3):234~245.
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structure and dynamics of lithosphere and asthenosphere in the gigantic East Asian west Pacific rift system [J]. Geology in China, 2002, 29 (3):234~245 (in Chinese with English abstract).
- [3] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 中国及邻近海域地球内部三维结构及动力学研究[J]. 地球科学进展, 2003,18(4):497~503.
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. Study for three-dimensional structure of earth interior and geodynamics in China and adjacent land and sea regions [J]. Advance in Earth Sciences, 2003,18(4):497~503(in Chinese with English abstract).
- [4] 刘翠. 华北地区构造岩浆活动的数值模拟[D]. 北京: 中国地质大学, 2004,39~57.
- Liu Cui. Simulation to the structure and magmatic activity of north China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2004, 39~57 (in Chinese).
- [5] 邓晋福, 肖庆辉, 邱瑞照, 等. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄的机制与过程[J]. 中国地质, 2006,33(4):751~761.
Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, et al. Lithospheric Extension of North China in Cenozoic: Mechanism and Processes [J]. Geology in China, 2006,33 (4):751~761 (in Chinese with English abstract).
- [6] Sergei Lebedev, Gunst Nolet. Upper mantle beneath Southeast Asia from S velocity tomography [J]. Journal of Geophysical Research, 2003,108(B1),21~26.
- [7] 翟明国, 樊祺诚. 华北克拉通中生代下地壳置换: 非造山过程的壳幔交换[J]. 岩石学报, 2002,18(1):1~8.
Zhai Mingguo, Fan Qicheng. Mesozoic replacement of bottom crust in North China Craton: anorogenic mantle-crust interaction [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002,18(1):1~8 (in Chinese with English abstract).
- [8] 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 等. 中国大地构造单元新格局——从岩石圈角度的思考[J]. 中国地质, 2006,33(2):401~410.
Qiu Ruizhao, Li Tingdong, Deng Jinfu, et al. A new pattern of tectonic units of China considered in light of the lithosphere [J]. Geology in China, 2006,33(2):401~410(in Chinese with English abstract).

Main advances and achievements in the special-subject study of the 3D lithospheric structure of China

LI Ting-dong^{1,2}

(1. Consulting Research Center, MLR, Beijing 100035, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Many new findings and achievements have been obtained in the special-subject study of the "3D lithospheric structure of China". They are as follows: China's first "3D lithospheric structure database" has been established; China's lithospheric structure model has been constructed; the knowledge of the behaviors and structures of the lithosphere and asthenosphere below eastern China have been deepened, it has been proved that there exists a transition zone with the "layer and block" structure between the lithosphere and asthenosphere, and a giant low-velocity anomaly belt has been found at 70~250 km depth from East Asia to the western Pacific region; an apparent age structure of being "older in the upper part and younger in the lower part" has been revealed in the lithosphere below eastern China; a petrological structure model of the lithosphere of continental China has been constructed, in which five types of lithosphere below continental China and its adjacent sea areas are distinguished; a classification scheme of lithospheric tectonic units of China is proposed, in which continental China and its adjacent areas are divided into two lithospheric domains and six lithospheric blocks; the existence of a gigantic latitudinal structure on the Qinghai-Tibet Plateau has been verified; and some new findings and knowledge have been obtained in the geological context.

Key words: lithosphere; 3D structure; progress; achievement

About the author: LI Ting-dong, male, born in 1930, academician of the Chinese Academy of Sciences, his research interests include regional geology and geological mapping.