

中国及其邻区地球三维结构 初始模型的建立^{*}

朱介寿 曹家敏 李显贵 周 兵

(成都理工学院应用地球物理系, 成都 610059)

摘 要

对人工地震测深及天然地震面波体波三维层析反演数据进行统一处理,建立了中国及其邻区地球三维结构初始模型. 此模型图像表明,中国及其邻区地球各圈层横向变化明显. 岩石圈及软流圈内速度分布主要反映这一区域自古生代以来板块及地块拼合模式. 各主要板块或地块(塔里木、扬子、中朝、青藏、哈萨克斯坦、印度、印度支那)岩石圈增厚或有很深的地幔根,板块或地块间的造山带岩石圈减薄,软流圈速度降低. 下地幔底部及核幔边界 D'' 层出现高速异常,表明古太平洋及古特提斯洋俯冲板块因重力坍塌已进入地球深层,形成亚洲超级下降地幔柱. 这一下降地幔柱引起地球表层物质向中亚、东亚地区集中,印度半岛、青藏高原、新疆、蒙古至贝加尔一带,成为全球岩石圈最大的汇聚场所.

关键词 地球三维结构, 岩石圈分块, 超级下降地幔柱, 中国.

1 引 言

20 世纪以来,大陆漂移、海底扩张、板块构造等一系列学说,主要涉及到地球表层的构造变动及演化过程. 近年来,由于全球地球物理及大地测量系统的建立及观测,特别是利用全球地震台网(WWSSN, GDSN, IRIS 及 GEOSCOPE 等)对地球内部的三维层析成像,借助高温高压实验研究地球内部的物质成分,使用超级计算机模拟地球深部的动力过程,极大地推动了地球内部各圈层的细结构及横向不均匀性的研究,这对于建立地幔对流模型,认识大陆克拉通、造山带、裂谷及盆地的深部构造背景起了很大作用.

中国大陆及其邻近区域是晚古生代(约 200—300 Ma)由多个板块或地块汇聚形成的. 在晚中生代到古新世印度次大陆与欧亚大陆碰撞,引起地壳大规模缩短及地表急剧隆升,形成了现今地球上最高的青藏及帕米尔高原和喜马拉雅、兴都库什造山带,从印度半岛至青藏高原、新疆、蒙古、贝加尔一带,成为全球岩石圈最大的汇聚场所. 中国大陆及邻近区域的岩石圈结构,是和地球深部(特别是地幔部分)结构与动力过程有密切关系. 因此,建立中国及邻近区域地球内部的三维结构图像,研究各圈层的横向变化及深部动力过程,对

^{*} 国家自然科学基金(NSFC)、国际岩石圈计划(ILP)、国际理论物理中心(ICTP)资助的课题.

本文1997年5月5日收到修改稿.

了解中国大陆形成及演化,地表构造与深部结构的关系有着重大意义.为此,我们对国内外近年来有关研究成果^[1-43]进行了整理,并按统一的数据处理及反演方法,建立了这一区域的地球三维模型数据库.

2 地球三维模型数据库建立方法

90年代国际岩石圈计划第二课题(现代动力学及深部过程)提出“地球构造圈三维模拟”专题,这一专题计划对全球主要活动构造带(阿尔卑斯—喜马拉雅带、环太平洋带)深约400km的地球三维结构进行精细填图.该任务组首先建立与中国有关的区域A(包括中国、印度、巴基斯坦、西南太平洋)的地球构造三维模型数据库,其研究并不局限于400km深度,而是向下地幔以至核幔边界延伸.

为对地球三维结构进行高分辨模拟,在建立模型时采用了以下一些特殊考虑:1)地球内部的介质是纵向及横向非均匀的;2)由于自然地表与大地水准面相差可达20km(陆地最高海拔9km,海洋最深11km),建立三维模型要从自然地表出发;3)数据库的基本单元是从自然地表到地心的棱柱体,每一棱柱体代表一个“点”模型.每一点模型是由一系列从浅到深的分层参数列表组成,将大量的点模型数据集即组成三维结构数据库.

研究区域为 20° — 54° N, 70° — 140° E.除按域内 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 网格的结点给出各个点模型外,还沿主要造山带、大断裂、海岸线、海槽、海沟等主要地形及构造边界给出若干点模型.点模型的经纬度及海拔高程(或海底深度)由地图及美国全球高程数据库ETOP05提供.每一点模型均根据地震及其他地球物理资料分别对地壳、岩石圈地幔部分、软流圈、过渡层、下地幔、外核、内核建立分层参数.下面分述点模型各部分资料来源及数据处理方法.

2.1 地壳及上地幔顶部

自70年代以来,中国大陆已经完成了约45 000 km的爆破地震剖面.主要搜集中国8条地学大断面以及国内各区域约30条爆破地震剖面^[1-7, 20-26].由爆破地震获得的中国大陆地壳一般有3—5个速度分层.根据其速度结构特征,可以归纳为上、中、下三层地壳.上地壳P波速度变化范围为4.5—6.0 km/s,中地壳为5.8—6.6 km/s,下地壳为6.4—7.4 km/s.在不少地区,中地壳或下地壳存在低速层.对它们进行统一整理,得到450多个样点的地壳分层速度数据库^[3-4],它们可以代表中国及其邻区的地壳上地幔顶部速度结构.

综合这些数据,显示出研究区内地壳结构的巨大横向变化,地壳厚度可从几公里(海域)到76km(青藏高原、帕米尔),地壳中各层速度值变化范围很大.

2.2 岩石圈盖层(LID)及软流圈

地壳以下的地幔岩石圈部分称岩石圈盖层(LID),与其下伏的软流圈的分界面不易确定,而且这些圈层的厚度及速度横向变化更大.对于这部分地球结构,目前主要用天然地震面波及体波资料进行反演,以得到P波或S波的二维或三维速度结构.本数据库主要采用以下资料:

1. 朱介寿等^[7, 9, 19]利用中国数字地震台网(CDSN)、全球数字地震台网(GDSN)、全球标准地震台网(WWSSN)的地震面波记录,分别对中国青藏高原、新疆等地区进行三维层

析成像, 先用 Tarantola-Valette 进行区域面波群速度的分布反演, 给出不同周期面波群速度在研究区域的分布, 然后用 Backus-Gilbert 方法作 S 波速度随深度的计算, 可得到深达 200 km 的三维速度分布.

2. 宋仲和等^[13-18]利用中国大陆及周边地区 75 个浅源地震面波资料, 搜集国内外面波地震记录, 采用适配滤波技术求取混合频散曲线, 经过前置反演并调整反演因子, 获得 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 分格纯频散曲线, 对每一格进行二维反演, 可得到中国各个区域分格深达 200 多公里的 S 波速度分布. 由于上述 S 波速度分布对上地幔低速带有较明显的反映, 因此在建立本数据库时, 岩石圈盖层 (LID) 及软流圈主要采用面波三维层析成像及分格纯频散反演数据.

2.3 上地幔过渡层及下地幔

对于上地幔 410 km 速度界面以下及更深的速度值, 主要利用下述两部分资料:

1. 刘福田等^[10-12]对中国大陆及周边地区的地震体波层析成像, 孙若昧等^[7,8]对四川、渤海地区的体波层析成像. 研究者将三维空间非均匀网格点进行参数化描述地下介质速度函数, 利用近震及远震 P 波走时残差反演地下 V_p 扰动值的三维分布, 可得深达 800—1000 km 的 P 波三维速度结构图像.

2. 800 km 以下至核幔边界的速度分布, 主要采用全球地震波层析成像结果^[27-43]. 目前, 利用 P 波延时、面波频散或地震波形对全球范围的地幔三维层析成像模型主要包括: 第一代模型^[27-30]的横向分辨率约为 5000 km, 第二代模型^[39-42]可达到 1000—2000 km. 由于这些模型基本上是可以对比的^[43], 本数据库中 800 km 以下深度的 P 波速度分布主要参考了深尾良夫等人^[38,40-42]及 Montagner 的结果^[32-33].

3 数据库的结构及应用

对上述反演结果及有关资料综合整理及归一化处理以后, 即形成中国及其邻区地球三维结构数据库. 数据库中的数据单元即为点模型, 它代表地球上一个小区域从地面到地心的地球物理参数柱状分层表.

每一数据单元的结构形式如下:

第一行为分层标志, 第一个值为整型值 (以 1 开始), 第二个值为整型结构值 (以 2 开始), 第三个值为整型参考值 (一般取 0), 第四个值为地壳及地幔的总分层数 (一般为 16), 第五个值为外核分层数 (一般取 5), 第六个值为内核分层数 (一般取 5), 第七、八个值为输入模数 (暂取 0 及 4).

第二行为点的坐标值, 第一个值为经度 (东经为正, 西经为负), 第二个值为纬度 (北纬为正, 南纬为负), 第三个值为海拔高程或海底深度 (以 km 为单位, 海平面以上为正, 海平面以下为负), 第四个值为真实核幔边界与标准椭球体在相应位置的高差, 第五个值为真实内外核幔边界与标准椭球体在相应位置的高差 (目前均取 0).

自第三行以下分别为各层的参数, 每一层按梯度层计算, 即分别对其上界面及下界面给出参数. 从左到右各列依次表示: 第一列为各层的上、下界面深度值, 第二列为密度值 ρ , 第三列为横波速度 V_s , 第四列为横波衰减因子 Q_s , 第五列为纵波速度 V_p , 第六列为纵波

衰减因子 Q_p , 第七列为分层标志值, 每一标志值由 8 个符号组成: 前 3 个表示该点所在板块位置 (如 EUS 表示欧亚板块, PAC 表示太平洋板块, EAR 表示地球整体), 后 3 个值表示地球分层名称 (OCE 为海洋层, SEO 为海洋沉积层, SEC 为大陆沉积层, CRU 为地壳分层, 一般分 3 层, LID 为岩石圈盖层, AST 为软流圈, SUB 为软流圈下层, TRF 为 410km 过渡层, INT 为上地幔底层, TRS 为 670km 过渡层, MAV 为下地幔 V 层, MAW 为下地幔 W 层, MAX 为下地幔 X 层, MAY 为下地幔 Y 层, MAZ 为下地幔 Z 层, COO 为外核, 又分 5 层, COI 为内核, 又分 5 层)。

附录 1 给出了中国及其邻区典型地区的地球点模型数据。由此可见, 各地区的速度结构有很大差异。

建立了一套专用的开放的软件系统, 此系统可以对数据库进行修改及增补新资料, 抽取子数据库, 形成平面速度分布, 截取剖面, 以及进行成图成像等。

该软件系统主要包括以下模块:

(1) 数据库修正模块, 对数据库各点模型的分层参数进行校正及补充, 有插值及校验功能。

(2) 平面分布截取模块, 截取并形成地球任意深度的速度 (V_p 或 V_s) 平面分布值。

(3) 形成子域数据库模块, 给定子域范围 (经、纬度的上下限), 可以抽取该范围的点模型数据以形成任意子域的数据库。

(4) 形成剖面数据库模块, 给定剖面的起始及终止经纬度, 可形成沿任意剖面并可插值加密的剖面点模型数据库。

(5) 剖面截取模块, 给定起始及终止经纬度及底界深度截取任意经度内插加密的剖面速度分布。

(6) 深度特征值模块, 抽取某些特征界面 (如莫霍界面, 岩石圈及软流圈分界面) 的深度分布。

(7) 经纬度与直角坐标转换模块。

(8) 地理位置 (有关经纬度、高程、自然地理边界、国界等) 及成图成像模块。

4 地壳上地幔三维结构图像

图版 I 中 a—f 为中国及其邻区地壳上地幔不同深度的 P 波速度 V_p 平面成像。它们显示了中国大陆及周边区域岩石圈及软流圈结构的巨大差异, 各深度的速度分布特征如下:

20 km: 琉球群岛、台湾岛、吕宋岛以东的太平洋底已进入洋壳底部或上地幔, V_p 值显示 7.0 km/s 以上的高速。其余区域均处于上或中地壳内。以 105°E 为界, 东西两侧有巨大差别。由于西部区域仍处于上地壳, 除印度次大陆与青藏高原碰撞带的 V_p 值较高 (6.1 km/s) 外, 其余地区的 V_p 值都较低 (5.3—5.7 km/s)。而东部区域已进入中地壳, 扬子地块、中朝地块、日本海的 V_p 值均较高 (5.9—6.7 km/s), 仅东海大陆架部分为低速分布。

50 km: 105°E 以东区域已进入上地幔, 以西区域仍处于中、下地壳中。 V_p 值明显分为二个区域, 东部 V_p 值 7.3—8.1 km/s, 为高速分布区。西部青藏高原至新疆兴都库什、帕米尔一带 V_p 值 6.5—6.9 km/s, 为低速分布区。由于塔里木地块及准噶尔地块已进入上地幔

顶部, V_p 值显示为高速. 位于西部的印度次大陆及孟加拉湾亦进入上地幔顶部, V_p 值达到 7.9—8.1 km/s. 位于北部的哈萨克斯坦及西北利亚板块, V_p 值也达到 7.9—8.1 km/s. 沿萨哈林岛、日本列岛、琉球群岛、台湾岛的西太平洋岛弧区, V_p 值较低 (7.1—7.5 km/s). 值得指出的是, 沿大兴安岭—太行山—武陵山有一条呈北东向的速度梯级带, 它与中国著名的东部重力梯级带基本吻合. 此外, 沿秦岭—大别山直至东海, 还有一条北西向低速异常 (V_p 值为 7.1—7.3 km/s) 将扬子地块及中朝地块分开.

100 km: 研究区域内所有地区均进入上地幔. 西部区域全部进入岩石圈盖层 (LID), 印度次大陆、青藏高原、新疆及帕米尔、兴都库什地区, 均为高速异常 (V_p 值为 8.15—8.35 km/s). 东部区域已全部进入软流圈, 中朝地块、蒙古至贝加尔地区, 东南沿海以及渤海湾、萨哈林群岛、日本列岛、东海、南海等海域及岛弧区, V_p 值降低到 7.5—7.8 km/s. 扬子地块及鄂尔多斯地块有很厚的岩石圈根, 显示为高速异常 (7.9—8.1 km/s). 上地幔中的低速异常带主要出现在沿 100°—110°E 的南北向构造带、北西向中蒙边境褶皱带以及秦岭—大别山—东海带.

200 km: 在这一深度, 研究区域大部分已进入软流圈, 但东部与西部的速度分布仍有明显的差异. 西部地区总体上为高速分布, 高速异常分别分布在哈萨克斯坦板块、塔里木地块及青藏高原至印度板块三部分. 青藏高原虽已进入软流圈, 但其速度仍然较高 (8.0 km/s 以上), 它和上覆岩石圈盖层的速度 (8.2 km/s) 相差不大, 说明岩石圈下的低速层 (软流圈) 不明显 (或不发育), 与东部软流圈 (速度降低到 7.4—7.8 km/s) 相比, 二者性质显然是不同的. 青藏高原与印度次大陆速度分布已趋一致. 东部地区 (包括海域及岛弧) 总体上为低速分布, 其中海域及岛弧区速度最低, V_p 值为 7.4—7.5 km/s. 南北构造带, 中朝地块、蒙古至贝加尔地区, 向西进入天山为低速异常 (7.4—7.6 km/s). 塔里木、扬子地块有巨厚岩石圈根 (直至 200 km 深度仍未发现低速层), V_p 值呈显著高速分布 (8.2—8.6 km/s). 印度支那半岛出现高速异常 (8.0 km/s 以上).

400 km: 这一深度在上地幔 410 km 间断面附近, 速度异常主体呈南北向分布. 以位于 100°—110°E 之间的南北构造带显示为高速异常 (V_p 达 8.9—9.4 km/s). 青藏高原北部, 塔里木地块, 印度支那半岛, 中朝地块及扬子地块均显示高速异常 (8.9—9.6 km/s). 西藏东南部, 三江带至印度东北部出现低速异常 (8.5—8.7 km/s).

600 km: 上地幔底部, 105°—110°E 之间的南北带 V_p 为高速分布 (10.3—10.7 km/s), 日本列岛及海域也为高速度分布, 其余地区速度分布较低 (9.5—10.1 km/s).

图版 II 左部为截取若干沿纬线方向的大圆路径的上地幔 V_p 速度扰动断面图.

沿 26°N 附近大圆路径断面: 分布在缅甸—三江褶皱带 (100°—110°E) 两侧岩石圈结构有巨大变化. 西部印度次大陆岩石圈厚度达 250 km 以上, 东部除扬子地块岩石圈厚度达 200 km 以上, 其余地区如大陆架及海域岩石圈厚度仅为 80—100 km. 东部海域及大陆架以及扬子地块西沿、缅甸—三江褶皱带, 400 km 深度以下都出现高速异常, 它们和现代或古大洋板块俯冲到上地幔有关.

沿 32°N 附近大圆路径断面: 位于 100°—110°E 之间的南北带岩石圈减薄, 仅 80—100 km, 软流圈厚度加大. 兴都库什地区岩石圈较厚, 软流圈发育. 青藏地块岩石圈厚度达 120—150 km, 但软流圈速度仍然很高. 秦岭大别山及东海大陆架岩石圈减薄到 100 km

以下. 在 400 km 深度以下, 海域、大陆架以及南北构造带, 都出现高速异常.

沿 38°N 附近大圆路径断面: 塔里木有巨厚岩石圈根, 到 300 km 深尚未发现软流圈. 南北构造带以东地区, 包括华北平原—渤海、日本海等, 岩石圈仅 80—100 km 厚, 软流圈的速度低. 在 400 km 深度以下, 位于海域及大陆架, 以及南北构造带下, 同样都出现高速异常.

沿 42°N 附近大圆路径断面: 西部天山山脉岩石圈较厚软流圈不明显. 蒙古高原岩石圈较薄但有巨厚的软流圈. 东部其余地区岩石圈厚度小于 100 km.

沿 48°N 附近大圆路径断面: 哈萨克斯坦板块有较厚的岩石圈根. 贝加尔、大兴安岭及外兴安岭岩石圈减薄软流圈发育.

图 1 为东亚及中亚地区板块及地块划分示意图, 图 2 为研究区域地壳厚度及岩石圈厚度图. 对比这些图件可见, 中国大陆及相邻海域的岩石圈及软流圈的速度结构, 基本上反映了这一拼合大陆各块体深部结构的巨大差异.

自晚古生代以来, 拼合的各个块体(哈萨克斯坦板块、塔里木板块、中朝板块、扬子板块、印度板块、印度支那地块以及青藏地块)的岩石圈的速度分布均有独立的显示. 一般

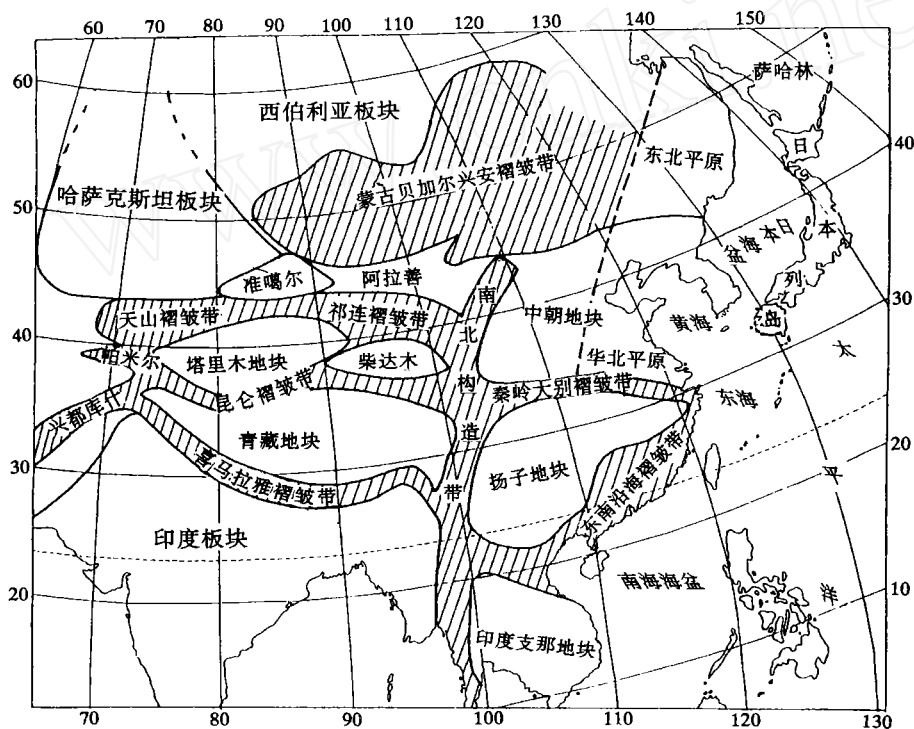


图 1 中国及邻区板块及地块划分示意图

来说, 塔里木、中朝、扬子、印度、印度支那等地台或地盾区, 岩石圈呈高速分布, 青藏地块除地壳部分速度异常低外, 其岩石圈盖层也呈高速显示. 各块体的拼接缝合带, 如沿贺兰山、六盘山、龙门山到三江褶皱带的南北向构造带, 沿昆仑、秦岭、大别山的東西向构造带,

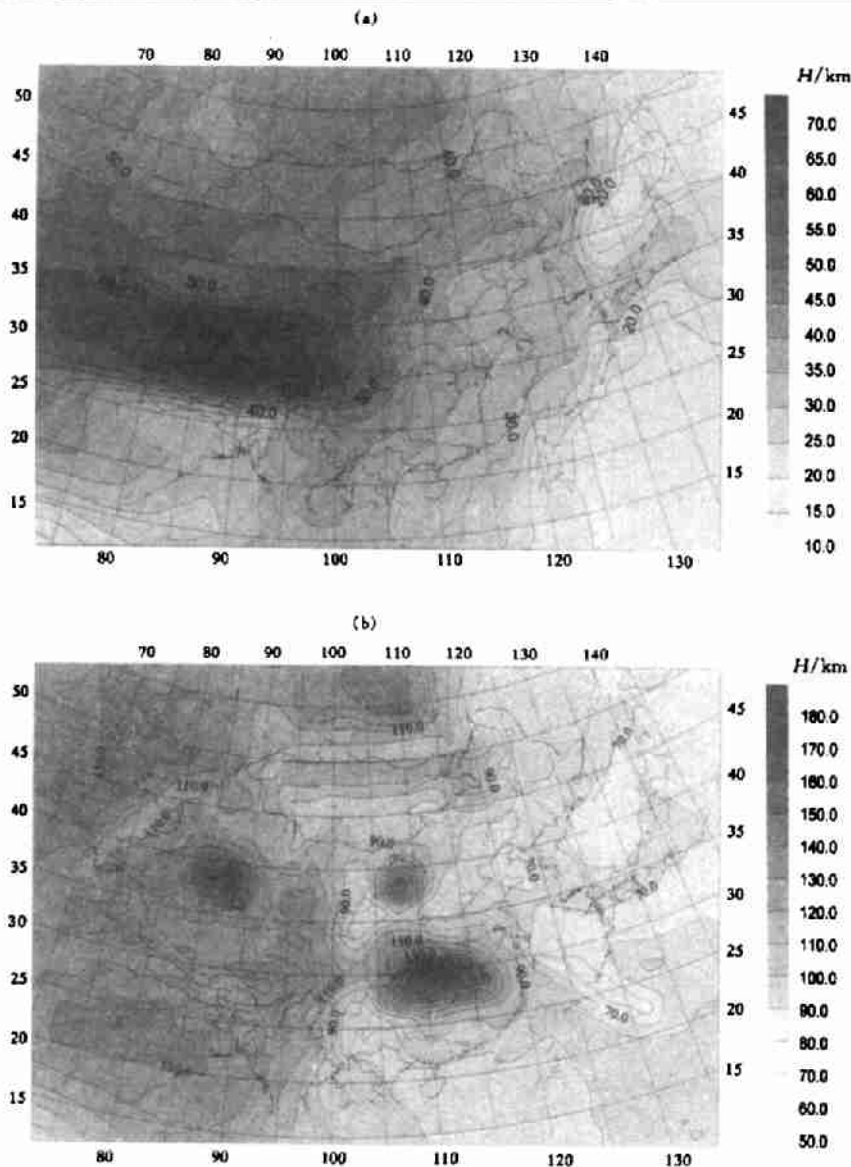


图2 中国及邻区地壳厚度及岩石圈厚度图

(a) 地壳厚度图; (b) 岩石圈厚度图。

均显示较低的速度分布。

各块体的岩石圈厚度及速度值差异很大,增厚的岩石圈(厚度达 200 km 以上)主要分布在塔里木地块、扬子地块、印度支那地块等区域,鄂尔多斯地块岩石圈厚度亦达到 140 km。这些增厚的岩石圈一般具有高速分布,其下层的软流圈不发育或不存在,它们是大陆上的克拉通区(地台或地盾)。减薄的岩石圈主要出现在大陆裂谷或地堑系(如松辽及华北沉降带,汾渭地堑及银川地堑,东南沿海褶皱带),以及造山带(南北向构造带、秦岭、大别山、蒙古、外贝加尔造山带),边缘海(东海、黄海、日本海)等。岩石圈厚度 70—100 km。

扬子、塔里木、印度、印度支那等克拉通陆块有很厚的岩石圈,高速的地幔根可以延伸到 200 km 甚至 300 km 的深度,一般大陆克拉通(北美加拿大地盾、南美东部、澳大利亚西部、北亚、西非)具有 300—400 km 的高速地幔根,这一地幔根相对于周围的软流圈是较冷且呈刚性的,称为构造圈.按照构造圈的定义,认为稳定的大陆克拉通是一种独特的构造地区,是从前寒武纪以来长期存在的巨厚的大陆刚性块体,具有异常地幔根的圈层,它和板块构造不同,不强调岩石圈与软流圈的分层.

由速度成像可知,从印度次大陆到西藏的中南部以及塔里木、扬子地块等都具有巨厚地幔根,都是自寒武纪以来固结的克拉通地块,是地球上现存的构造圈部分,但其规模较北美、西伯利亚、澳大利亚等克拉通要小得多.在研究区域的东部,包括东北,华北平原及东南沿海褶皱带,以及日本海、东海、南海等弧后盆地,岩石圈仅厚 70—100 km,具有明显的低速软流圈,它们与西太平洋边缘弧后盆地的浅部(深度小于 400 km)地幔上升热柱有关,这些热柱可能是太平洋板块俯冲下插,由板块磨擦生热形成的上升热流引起^[41].

5 下地幔三维结构图像

对 800 km 至核幔边界 2900 km 深的下地幔三维结构图像,可由纵波速度 V_p 在不同深度的平面分布表示,见图版 I 中 g—l.

800 km: 下地幔顶部, 100° — 110° E 之间的南北带为高速异常, V_p 值为 10.8—11.1 km/s. 新疆至青藏为低速异常区. 东部海域及大陆架为高速异常区.

1200 km: 下地幔中上部, 速度变化较小(相对为 1%—2%), 表明这一深度横向结构较为均匀. 100° — 110° E 之间的南北带仍有异常显示. 东南部海域及哈萨克斯坦出现高速异常.

1600 km: 下地幔中部, 速度相对变化仍较小, 表明横向结构仍较均匀. 在 80° — 90° E 之间出现微弱南北向高速度异常.

2000 km: 下地幔中下部, 速度变化仍然较小. 在 80° — 90° E 之间南北向高速度异常明显. 从东部海域向西部扩展, 出现一大片高速异常.

2400 km: 下地幔下部, 从东部海域向西部扩展的大片高速异常更加明显.

2800 km: 核幔边界附近 D' 层, 由东部向西部延伸的高速度异常已扩展到印度、青藏高原, 新疆至哈萨克斯坦一带.

为了进一步对下地幔的结构进行研究, 分别截取若干沿纬度方向的大圆路径 V_p 速度扰动断面图, 如图版 II 右半部.

沿 26° N 附近大圆路径断面: 太平洋板块西沿海域及扬子地块以西的缅甸—三江褶皱带, 从上地幔到下地幔顶部出现高速异常. 印度板块 (80° — 90° E 范围) 下地幔中部显示一条高速异常. 从下地幔下部到核幔边界, 由西向东有一大片高速异常.

沿 32° N 附近大圆路径断面: 太平洋板块西沿海域, 秦岭大别山、南北构造带, 从上地幔到下地幔顶部仍出现高速异常. 位于兴都库什地区及西藏地块 (80° — 90° E 范围) 下地幔中部显示两个高速异常. 从下地幔下部到核幔边界, 由西向东仍有一大片高速异常, 其

中,位于南北带的高速异常突出,直接出现在下地幔的顶部。

沿 38°N 附近大圆路径断面:日本海及南北构造带,从上地幔到下地幔顶部高速异常十分明显。位于帕米尔高原及塔里木地块下地幔中部仍然显示两个高速异常。从下地幔到核幔边界,由西向东的大片高速异常更加向西发展,位于南北带下的高速异常更为突出。

沿 42°N 附近大圆路径断面:除下地幔到核幔边界由西向东的大片高速异常外,天山山脉、蒙古高原、日本海下地幔中上部高速异常带明显。

沿 48°N 附近大圆路径断面:哈萨克斯坦、阿尔泰山下地幔中上部高速异常带明显,下地幔到核幔边界由西向东的大片高速异常仍然发育。

由上述可以看出,中国及相邻区域的下地幔仍存在着速度差异,这种差异形成的异常带主要呈南北向分布。地幔深部的速度异常特点主要可以归纳为:

(1) 从上地幔下部到下地幔顶部(400—800 km),太平洋板块西缘海域及南北构造带等地区,高速异常十分明显,它是古大洋板块或现代大洋板块俯冲带在地幔中的反映。

(2) 下地幔上部(800—1200 km), 100° — 110°E 范围内的南北带有一高速异常,它反映中国大陆东西两部分岩石圈块体相拼接区域在下地幔出现的异常带。它可能反映了古生代下沉的较冷较重的刚性板块由于重力坍塌形成的痕迹,这说明位于中国中部的南北向构造带可能是古板块俯冲带。

(3) 在下地幔中部(1600—2000 km), 80° — 90°E 范围内的一条高速异常,它可能是另一个较冷较重的下沉板块的遗迹。

(4) 在下地幔下部及核幔边界的 D'' 层中,显示中亚及东亚地区的一大片高速异常,反映这一区域存在较重的冷凝物质,是俯冲板块长期的累积,在重力作用下坍塌到核幔边界 D'' 的反映。

根据丸山茂德及 Montagner^[41,32]等人的研究,全球规模的地幔对流,特别是源自核幔边界 D'' 层的地幔对流基本可分为两个超级上升柱(分别位于南太平洋及非洲西部),而超级下降地幔柱主要分布在中亚及东亚,另一个在南美但规模较小。

发生在亚洲的超级下降冷柱,是古生代以来太平洋板块向西俯冲,特提斯板块向北俯冲,多个板块或地块拼合过程中的产物。由于经历了数亿年的板块俯冲过程,冷而重的物质在地幔中愈积累愈多,它们大量聚集在上地幔底部(670 km 深度),最后在重力作用下而沉降到核幔边界,成为地毯状宽广的下降冷柱。这一下降冷柱形成的时间可能在上古生代末至中生代。

东亚及中亚的超级下地幔冷柱,在下沉过程中必然在地表引起一个下降涡柱,地球表层物质(漂浮的岩石圈)都向这一区域(印度次大陆、青藏高原至新疆、兴都库什、帕米尔)汇聚,促使中亚及东亚地区岩石圈增厚及挤压的山链和高原形成。据估计,在近 1.5 亿年的时期,特提斯洋板块向下俯冲的总长度约为 6500 km,而太平洋板块向下俯冲的总长度达 10000 km^[42]。这样巨大的板块物质在下沉坍塌过程中必定在下地幔中形成异常物质。位于下地幔顶部的南北带高速异常带,下地幔中部的西部高速异常带,核幔边界 D'' 层的大片高速异常都是冷凝俯冲板块下沉的反映。

6 结 论

6.1 利用中国及全球地震台网记录的地震体波及面波进行三维层析反演, 可以获得从地表到核幔边界的三维速度分布. 综合这些反演结果及已有的地壳测深资料, 建立了中国及邻近区域 (20° — 54° N, 70° — 140° E) 地球三维结构模型数据库. 数据库由一系列点结构分层参数组成. 使用专门的软件包对数据库进行调用及成图成像.

由地壳上层到核幔边界各深度的平面图像及剖面图像表明, 中国及邻近区域地球各圈层横向变化明显, 反映了这一区域复杂的板块拼合及地幔流动力学模式.

6.2 在地震波速度层析图像上, 每一岩石圈块体 (如哈萨克斯坦、塔里木、扬子、中朝、印度支那) 都有独立的速度显示, 各稳定块体的岩石圈厚度都在 100 km 以上. 塔里木、扬子克拉通有高速的地幔根, 一直到 200—300 km 均未发现软流圈. 各块体之间的缝合带 (一般为褶皱造山带), 如南北向构造带, 昆仑、天山、秦岭、大别山构造带, 蒙古贝加尔褶皱带, 东南沿海褶皱带, 岩石圈较薄 (70—100 km), 且速度较低.

6.3 位于中国中部 100° — 110° E 之间的南北向构造带是中国几个主要块体的缝合带 (青藏地块与扬子地块, 塔里木与中朝地块). 这一构造带不仅岩石圈较薄 (70—80 km), 而且在下地幔顶部 (800—1000 km 深) 有一南北向高速体. 对其一种可能的解释是, 中国大陆几个块体在拼合过程中, 南北带是一个古板块俯冲带. 在晚古生代至中生代, 冷而刚性的俯冲板块物质由于长时间的积累下沉到下地幔, 形成下地幔中的高速异常.

6.4 中国东部的东北平原、华北平原以及渤海、东海、黄海等大陆架, 岩石圈厚度均减到 70—100 km, 这可能是由于太平洋板块俯冲, 因摩擦引起较浅的上升地幔热柱 (深度不超过 400 km), 使软流圈速度降低, 岩石圈减薄. 这一上升地幔柱也导致日本海、南中国海等弧后盆地的形成及扩张.

6.5 位于亚洲的超级地幔下降冷柱, 是古生代以来古太平洋板块及古特提斯板块向亚洲大陆的多次俯冲, 在板块俯冲过程中冷而刚性的物质在上下地幔边界处大量积累, 引起重力坍塌沉入下地幔而形成较宽广的下降冷柱.

亚洲超级下降冷柱必然引起地表岩石圈板块的汇聚. 在东亚及中亚地区, 特别是从印度次大陆至青藏高原、新疆、蒙古、贝加尔一带, 已成为地球上岩石圈最大的汇聚场所. 在这一地区地壳及岩石圈增厚, 地壳中存在高压应力并有分散的地震活动, 地球物理场显示负的重力异常和低的大地水准面, 以及低的大地热流值. 所有这些特征, 都是地球表层物质汇聚拼合, 地幔物质向下流动, 冷而重的物质在核幔边界形成堆积的反映.

参 考 文 献

- [1] 朱介寿, 我国大陆岩石圈的地震学研究, 见: 中国地质科学院主编, 岩石圈研究基本问题和方法, 318—327, 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [2] 朱介寿, 我国大陆地壳及上地幔分块结构特征, 成都地质学院学报, 13, 75—94, 1986.
- [3] 朱介寿、严忠琼、徐思聪, 上、中、下地壳及上地幔顶面地震波速度图, 见: 袁学诚主编, 中国地球物理图集, 北京: 地质出版社, 170—173, 1996.
- [4] 朱介寿、严忠琼、姚宇峰, 莫霍界面深度图, 见: 袁学诚主编, 中国地球物理图集, 北京: 地质出版社, 176—177,

1996.

- [5] 冯 锐、朱介寿、丁韞玉等, 利用地震面波研究中国地壳结构, *地震学报*, **3**, 335—350, 1981.
- [6] 朱介寿、严忠琼、徐思聪, 上地幔低速层顶界面深度图, 见: 袁学诚主编, 中国地球物理图集, 北京: 地质出版社, 178—179, 1996.
- [7] 孙若昧、刘福田、刘建华, 四川地区的地震层析成像, *地球物理学报*, **34**, 708—716, 1991.
- [8] 孙若昧、赵燕来、梅世容, 渤海及其临近地区的地震层析成像, *地球物理学报*, **36**, 44—54, 1993.
- [9] 周 兵、朱介寿、秦建业, 青藏高原及邻近区域 S 波三维速度结构, *地球物理学报*, **34**, 426—441, 1991.
- [10] 刘福田、曲克信、吴 华等, 中国大陆及其邻近地区的地震层析成像, *地球物理学报*, **32**, 281—291, 1989.
- [11] 刘福田、刘建华, 体波地震层析成像, 见: 袁学诚主编, 中国地球物理图集, 北京: 地质出版社, 174—175, 1996.
- [12] 刘福田、李强、刘建华等, 日本及其毗邻地区的地震层析成像, *地球物理学报* 编辑委员会, 八十年代中国地球物理学进展, 北京: 学术出版社, 1989.
- [13] 宋仲和、安昌强、陈国英等, 中国西部三维速度结构及其各向异性, *地球物理学报*, **34**, 694—707, 1991.
- [14] 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.
- [15] 安昌强、宋仲和、陈国英等, 中国西北地区剪切波三维速度结构, *地球物理学报*, **36**, 317—325, 1993.
- [16] 宋仲和、陈国英、安昌强等, 中国大陆及其海域地壳—上地幔三维速度结构, *中国科学(B)*, **23**, 180—188, 1993.
- [17] 宋仲和、陈国英、安昌强等, 中国东部及其相邻海域 S 波三维速度结构, *地球物理学报*, **35**, 316—329, 1992.
- [18] 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.
- [19] 曾融生、朱介寿、周 兵等, 青藏高原及其东部邻区的三维地震波速度结构与大陆碰撞模型, *地震学报*, **14** (增刊), 523—533, 1992.
- [20] 国家地震局科技监测司编, 中国大陆深部构造的研究与进展, 北京: 地质出版社, 1988.
- [21] 国家地震局“深部探测成果”编写组, 中国地壳上地幔地球物理探测成果, 北京: 地震出版社, 1986.
- [22] 郑 晔、滕吉文, 随县—马鞍山地带地壳与上地幔结构及庐构造南段的某些特征, *地球物理学报*, **32**, 648—659, 1989.
- [23] 汤永安主编, 华北平原南部地区深部地球物理综合探测方法与成果, 北京: 海洋出版社, 1989.
- [24] 丁原章、李 坪、时振梁等编, 海南岛北部地震研究文集, 北京: 地震出版社, 1988.
- [25] 胡鸿翔、陆涵行、王椿镛等, 滇西地区地壳结构的爆破地震研究, *地球物理学报*, **29**, 133—143, 1986.
- [26] 崔作舟、卢德源等, 攀西地区的深部地壳结构与构造, *地球物理学报*, **30**, 566—579, 1987.
- [27] Dziewonski, A. M., Mapping the lower mantle: Determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6, *J. Geophys. Res.*, **89**, 5929—5952, 1984.
- [28] Dziewonski, A. M., Woodhouse, J., Global images of the Earth's interior, *Science*, **236**, 37—48, 1987.
- [29] Nataf, H. C., Nakanish, I., Anderson, D. L., Measurements of mantle wave velocities and inversion for lateral heterogeneities and anisotropy: III, Inversion, *J. Geophys. Res.*, **91**, 7261—7308, 1986.
- [30] Woodhouse, J. H., Dziewonski, A. M., Mapping the upper mantle: Three dimensional modeling of earth structure by inversion of seismic waveforms, *J. Geophys. Res.*, **89**, 5953—5986, 1984.
- [31] Tanimoto, T., Structure of the Earth and its dynamics, *Science(Japan)*, **59**, 88—95, 1989.
- [32] Montagner, J. P., Can seismology tell us anything about convection in the mantle?, *Rev. of Geophys.*, **32**, 115—137, 1994.
- [33] Montagner, J. P., Tanimoto, T., Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies, *J. Geophys. Res.*, **96**, 20337—20351, 1991.
- [34] Nataf, H. C., Mantle convection, plates, and hotspots, *Tectonophysics*, **187**, 361—371, 1991.
- [35] Davies, G. F., Richards, M. A., Mantle convection, *J. Geol.*, **100**, 151—206, 1992.
- [36] Hager, B. H., Richards, M. A. Long-wavelength variation in Earth's geoid: physical models and dynamical implications, *Trans. Royal. Soc. Lond.*, **A328**, 309—327, 1989.

- [37] Hager, B. H., Clayton, R. W., Richards, R. W., et al., Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and geoid, *Nature*, **313**, 541—545, 1985.
- [38] Inoue, H., Fukao, Y., Tanabe, K., Ogata, Y., Whole mantle P-wave travel time tomography, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **59**, 294—328, 1990.
- [39] Zhang, Y., Tanimoto, T., High-resolution global upper mantle structure, plate tectonics, *J. Geophys. Res.*, **98**, 9793—9823, 1993.
- [40] Fukao, Y., Maruyama, S., Obayashi, M., et al., Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography, *J. Geol. Soc. Japan*, **100**, 4—23, 1994.
- [41] Maruyama, S., Plume tectonics, *J. Geol. Soc. Japan*, **100**, 24—29, 1994.
- [42] Fukao, Y., Seismic tomogram of the Earth's mantle: Geodynamic implications, *Science(Japan)*, **258**, 625—630, 1992.
- [43] Ritzwoller, M. H., Lavelle, E. M., Three-Dimensional seismic Models of the Earth's mantle, *Rev. of Geophys.*, **33**, 1, 1—66, 1995.

附录 1 中国及其邻区地球三维结构初始模型典型数据

(数据库的结构说明见正文)

鄂尔多斯地台 (ORDOS PLATFORM)

| 1 | 2 | 0 | 16 | 5 | 5 | 0 | 4 | |
|----------|--------|---|---------|---|---------|---|--------|--------------------|
| +108.0 | +38.00 | | +1.3870 | | 0.000 | | 0.000 | |
| 0.000 | 2.000 | | 2.800 | | 100.000 | | 3.640 | 225.000 EUSSEC01 |
| 2.000 | 2.600 | | 3.000 | | 130.000 | | 4.500 | 292.500 EUSCRU01+ |
| | 2.769 | | 3.200 | | 150.000 | | 5.552 | 337.500 |
| 6.000 | 2.769 | | 3.400 | | 200.000 | | 5.899 | 450.000 EUSCRU02+ |
| | 2.964 | | 3.700 | | 200.000 | | 6.420 | 450.000 |
| 17.000 | 2.964 | | 3.800 | | 200.000 | | 6.593 | 450.000 EUSCRU03+ |
| | 3.401 | | 4.000 | | 250.000 | | 6.940 | 562.500 |
| 47.000 | 3.401 | | 4.200 | | 450.000 | | 7.687 | 1012.500 EUSLID01+ |
| | 3.521 | | 4.500 | | 500.000 | | 8.097 | 1125.000 |
| 160.000 | 3.521 | | 4.374 | | 90.000 | | 8.089 | 202.500 EUSAST01+ |
| | 3.598 | | 4.284 | | 90.000 | | 7.932 | 202.500 |
| 210.000 | 3.628 | | 4.273 | | 100.000 | | 7.813 | 202.500 EUSSUB01+ |
| | 3.681 | | 4.941 | | 450.000 | | 8.573 | 1012.500 |
| 296.000 | 3.731 | | 4.941 | | 450.000 | | 8.573 | 1012.500 EUSSUB02+ |
| | 3.744 | | 5.448 | | 450.000 | | 9.453 | 1012.500 |
| 410.000 | 3.917 | | 5.477 | | 450.000 | | 9.503 | 1012.500 EUSTRF01+ |
| | 4.300 | | 5.832 | | 450.000 | | 10.119 | 1012.500 |
| 450.000 | 4.300 | | 5.881 | | 450.000 | | 10.204 | 1012.500 EUSINT01+ |
| | 4.400 | | 6.054 | | 450.000 | | 10.504 | 1012.500 |
| 670.000 | 4.450 | | 6.054 | | 500.000 | | 10.504 | 1125.000 EUSTRS01+ |
| | 4.700 | | 6.167 | | 500.000 | | 10.700 | 1125.000 |
| 760.000 | 4.715 | | 6.398 | | 550.000 | | 11.100 | 1237.500 EUSMAV01+ |
| | 4.960 | | 6.757 | | 700.000 | | 11.723 | 1575.000 |
| 1250.000 | 4.962 | | 6.793 | | 700.000 | | 11.786 | 1575.000 EUSMAW01+ |

(续表)

| | | | | | | |
|----------|--------|-------|----------|--------|-----------|-----------|
| | 5.140 | 6.814 | 1690.000 | 12.393 | 3802.500 | |
| 1740.000 | 5.140 | 6.888 | 1690.000 | 12.520 | 3802.500 | EUSMAX01+ |
| | 5.385 | 7.034 | 2680.000 | 13.104 | 6030.000 | |
| 2230.000 | 5.385 | 7.034 | 2680.000 | 13.104 | 6030.000 | EUSMAY01+ |
| | 5.625 | 7.236 | 3650.000 | 13.754 | 8212.500 | |
| 2710.000 | 5.625 | 7.236 | 3650.000 | 13.754 | 8212.500 | EUSMAZ01+ |
| | 5.720 | 7.188 | 3650.000 | 13.872 | 8212.500 | |
| 2888.094 | 9.903 | 0.000 | 0.000 | 8.065 | 57823.000 | EARCOO01+ |
| | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | |
| 3339.379 | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | EARCOO02+ |
| | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | |
| 3790.665 | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | EARCOO03+ |
| | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | |
| 4241.950 | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | EARCOO04+ |
| | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | |
| 4693.235 | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | EARCOO05+ |
| | 12.166 | 0.000 | 0.000 | 10.356 | 57823.000 | |
| 5144.521 | 12.764 | 3.504 | 84.600 | 11.028 | 428.780 | EARCOI01+ |
| | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | |
| 5388.596 | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | EARCOI02+ |
| | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | |
| 5632.672 | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | EARCOI03+ |
| | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | |
| 5876.747 | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | EARCOI04+ |
| | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | |
| 6120.823 | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | EARCOI05+ |
| 6364.898 | 13.088 | 3.668 | 84.600 | 11.262 | 428.780 | |

华北平原 (NORTH CHINA PLAIN)

| | | | | | | |
|---------|--------|---------|---------|-------|----------|-----------|
| 1 | 2 0 | 16 5 | 5 0 | 4 | | |
| +118.0 | +36.00 | +0.1830 | 0.000 | 0.000 | | |
| 0.000 | 2.000 | 2.800 | 100.000 | 3.640 | 225.000 | EUSSEC01 |
| 2.000 | 2.600 | 3.000 | 130.000 | 4.500 | 292.500 | EUSCRU01+ |
| | 2.785 | 3.100 | 150.000 | 5.378 | 337.500 | |
| 7.000 | 2.785 | 3.200 | 200.000 | 5.552 | 450.000 | EUSCRU02+ |
| | 3.004 | 3.500 | 200.000 | 6.073 | 450.000 | |
| 20.000 | 3.004 | 3.700 | 200.000 | 6.420 | 450.000 | EUSCRU03+ |
| | 3.236 | 4.000 | 250.000 | 6.940 | 562.500 | |
| 32.000 | 3.236 | 4.300 | 450.000 | 7.461 | 1012.500 | EUSLID01+ |
| | 3.356 | 4.400 | 500.000 | 7.634 | 1125.000 | |
| 72.000 | 3.356 | 4.300 | 90.000 | 7.761 | 212.500 | EUSAST01+ |
| | 3.599 | 4.237 | 90.000 | 7.652 | 212.500 | |
| 210.000 | 3.629 | 4.476 | 450.000 | 8.166 | 1012.500 | EUSSUB01+ |
| | 3.683 | 5.205 | 450.000 | 9.030 | 1012.500 | |

(续表)

| | | | | | | |
|----------|--------|-------|----------|--------|-----------|-----------|
| 296.000 | 3.733 | 5.205 | 450.000 | 9.030 | 1012.500 | EUSSUB02+ |
| | 3.746 | 5.643 | 450.000 | 9.790 | 1012.500 | |
| 410.000 | 3.919 | 5.643 | 450.000 | 9.790 | 1012.500 | EUSTRF01+ |
| | 4.300 | 5.695 | 450.000 | 9.880 | 1012.500 | |
| 450.000 | 4.300 | 5.695 | 450.000 | 9.880 | 1012.500 | EUSINT01+ |
| | 4.400 | 5.904 | 450.000 | 10.243 | 1012.500 | |
| 670.000 | 4.450 | 5.904 | 500.000 | 10.243 | 1125.000 | EUSTRS01+ |
| | 4.700 | 6.167 | 500.000 | 10.700 | 1125.000 | |
| 760.000 | 4.715 | 6.269 | 550.000 | 10.877 | 1237.500 | EUSMAV01+ |
| | 4.960 | 6.753 | 700.000 | 11.717 | 1575.000 | |
| 1250.000 | 4.962 | 6.792 | 700.000 | 11.784 | 1575.000 | EUSMAW01+ |
| | 5.140 | 6.812 | 1690.000 | 12.389 | 3802.500 | |
| 1740.000 | 5.140 | 6.888 | 1690.000 | 12.520 | 3802.500 | EUSMAX01+ |
| | 5.385 | 7.035 | 2680.000 | 13.106 | 6030.000 | |
| 2230.000 | 5.385 | 7.035 | 2680.000 | 13.106 | 6030.000 | EUSMAY01+ |
| | 5.625 | 7.236 | 3650.000 | 13.754 | 8212.500 | |
| 2710.000 | 5.625 | 7.236 | 3650.000 | 13.754 | 8212.500 | EUSMAZ01+ |
| | 5.720 | 7.188 | 3650.000 | 13.872 | 8212.500 | |
| 2888.094 | 9.903 | 0.000 | 0.000 | 8.065 | 57823.000 | EARCOO01+ |
| | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | |
| 3339.379 | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | EARCOO02+ |
| | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | |
| 3790.665 | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | EARCOO03+ |
| | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | |
| 4241.950 | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | EARCOO04+ |
| | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | |
| 4693.235 | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | EARCOO05+ |
| | 12.166 | 0.000 | 0.000 | 10.356 | 57823.000 | |
| 5144.521 | 12.764 | 3.504 | 84.600 | 11.028 | 428.780 | EARCOI01+ |
| | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | |
| 5388.596 | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | EARCOI02+ |
| | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | |
| 5632.672 | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | EARCOI03+ |
| | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | |
| 5876.747 | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | EARCOI04+ |
| | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | |
| 6120.823 | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | EARCOI05+ |
| 6364.898 | 13.088 | 3.668 | 84.600 | 11.262 | 428.780 | |

青藏高原 (QINGHAI-TIBET PLATEAU)

| | | | | | | | | |
|--------|--------|---|---------|---|---------|---|-------|-------------------|
| 1 | 2 | 0 | 16 | 5 | 5 | 0 | 4 | |
| +88.00 | +34.00 | | +5.1810 | | 0.000 | | 0.000 | |
| 0.000 | 2.001 | | 2.800 | | 100.000 | | 3.640 | 225.000 EUSSEC01 |
| 3.000 | 2.600 | | 3.100 | | 130.000 | | 4.650 | 292.500 EUSCRU01+ |

(续表)

| | | | | | | |
|----------|--------|-------|----------|--------|-----------|-----------|
| | 2.909 | 3.500 | 150.000 | 6.073 | 337.500 | |
| 15.000 | 2.909 | 3.500 | 200.000 | 6.073 | 450.000 | EUSCRU02+ |
| | 3.295 | 3.700 | 200.000 | 6.420 | 450.000 | |
| 44.000 | 3.295 | 3.800 | 200.000 | 6.593 | 450.000 | EUSCRU03+ |
| | 3.612 | 4.100 | 250.000 | 7.114 | 562.500 | |
| 70.000 | 3.612 | 4.400 | 450.000 | 8.034 | 1012.500 | EUSLID01+ |
| | 3.732 | 4.650 | 500.000 | 8.468 | 1125.000 | |
| 120.000 | 3.732 | 4.630 | 90.000 | 8.333 | 202.500 | EUSAST01+ |
| | 3.812 | 4.425 | 90.000 | 7.977 | 202.500 | |
| 210.000 | 3.842 | 4.665 | 450.000 | 8.493 | 1012.500 | EUSSUB01+ |
| | 3.922 | 4.773 | 450.000 | 8.682 | 1012.500 | |
| 296.000 | 3.972 | 5.110 | 450.000 | 8.866 | 1012.500 | EUSSUB02+ |
| | 3.972 | 5.704 | 450.000 | 9.897 | 1012.500 | |
| 410.000 | 3.972 | 5.704 | 450.000 | 9.897 | 1012.500 | EUSTRF01+ |
| | 4.300 | 5.712 | 450.000 | 9.910 | 1012.500 | |
| 450.000 | 4.300 | 5.712 | 450.000 | 9.910 | 1012.500 | EUSINT01+ |
| | 4.400 | 5.921 | 450.000 | 10.273 | 1012.500 | |
| 670.000 | 4.450 | 5.921 | 500.000 | 10.273 | 1125.000 | EUSTRS01+ |
| | 4.700 | 6.167 | 500.000 | 10.700 | 1125.000 | |
| 760.000 | 4.715 | 6.168 | 550.000 | 10.702 | 1237.500 | EUSMAV01+ |
| | 4.960 | 6.759 | 700.000 | 11.727 | 1575.000 | |
| 1250.000 | 4.962 | 6.797 | 700.000 | 11.792 | 1575.000 | EUSMAW01+ |
| | 5.140 | 6.885 | 1690.000 | 12.516 | 3802.500 | |
| 1740.000 | 5.140 | 7.009 | 1690.000 | 12.731 | 3802.500 | EUSMAX01+ |
| | 5.385 | 7.009 | 2680.000 | 13.061 | 6030.000 | |
| 2230.000 | 5.385 | 7.013 | 2680.000 | 13.067 | 6030.000 | EUSMAY01+ |
| | 5.625 | 7.199 | 3650.000 | 13.690 | 8212.500 | |
| 2710.000 | 5.625 | 7.199 | 3650.000 | 13.690 | 8212.500 | EUSMAZ01+ |
| | 5.720 | 7.173 | 3650.000 | 13.846 | 8212.500 | |
| 2888.094 | 9.903 | 0.000 | 0.000 | 8.065 | 57823.000 | EARCOO01+ |
| | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | |
| 3339.379 | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | EARCOO02+ |
| | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | |
| 3790.665 | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | EARCOO03+ |
| | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | |
| 4241.950 | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | EARCOO04+ |
| | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | |
| 4693.235 | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | EARCOO05+ |
| | 12.166 | 0.000 | 0.000 | 10.356 | 57823.000 | |
| 5144.521 | 12.764 | 3.504 | 84.600 | 11.028 | 428.780 | EARCOI01+ |
| | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | |
| 5388.596 | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | EARCOI02+ |
| | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | |
| 5632.672 | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | EARCOI03+ |

(续表)

| | | | | | | |
|----------|--------|-------|--------|--------|---------|-----------|
| | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | |
| 5876.747 | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | EARCOI04+ |
| | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | |
| 6120.823 | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | EARCOI05+ |
| 6364.898 | 13.088 | 3.668 | 84.600 | 11.262 | 428.780 | |

塔里木盆地 (TARIM BASIN)

| 1 | 2 0 | 16 5 | 5 | 0 4 | | |
|----------|--------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| +84.00 | +40.00 | +0.9140 | 0.000 | - 0.000 | | |
| 0.000 | 2.000 | 2.800 | 100.000 | 3.640 | 225.000 | EUSSEC01 |
| 3.000 | 2.600 | 3.100 | 130.000 | 4.650 | 292.500 | EUSCRU01+ |
| | 2.865 | 3.200 | 150.000 | 5.552 | 337.500 | |
| 12.000 | 2.865 | 3.300 | 200.000 | 5.726 | 450.000 | EUSCRU02+ |
| | 3.084 | 3.400 | 200.000 | 5.899 | 450.000 | |
| 26.000 | 3.084 | 3.500 | 200.000 | 6.073 | 450.000 | EUSCRU03+ |
| | 3.431 | 3.900 | 250.000 | 6.766 | 562.500 | |
| 50.000 | 3.431 | 4.400 | 450.000 | 8.034 | 1012.500 | EUSLID01+ |
| | 3.510 | 4.700 | 500.000 | 8.355 | 1125.000 | |
| 130.000 | 3.510 | 4.700 | 400.000 | 8.455 | 1125.000 | EUSAST01+ |
| | 3.598 | 4.793 | 450.000 | 8.615 | 1012.500 | |
| 210.000 | 3.628 | 4.781 | 450.000 | 8.695 | 1012.500 | EUSSUB01+ |
| | 3.682 | 5.083 | 450.000 | 8.819 | 1012.500 | |
| 296.000 | 3.732 | 5.083 | 450.000 | 8.819 | 1012.500 | EUSSUB02+ |
| | 3.745 | 5.280 | 450.000 | 9.160 | 1012.500 | |
| 410.000 | 3.918 | 5.280 | 450.000 | 9.160 | 1012.500 | EUSTRF01+ |
| | 4.300 | 5.453 | 450.000 | 9.461 | 1012.500 | |
| 450.000 | 4.300 | 5.453 | 450.000 | 9.461 | 1012.500 | EUSINT01+ |
| | 4.400 | 5.662 | 450.000 | 9.823 | 1012.500 | |
| 670.000 | 4.450 | 5.725 | 500.000 | 9.933 | 1125.000 | EUSTRS01+ |
| | 4.700 | 6.063 | 500.000 | 10.519 | 1125.000 | |
| 760.000 | 4.715 | 6.230 | 550.000 | 10.809 | 1237.500 | EUSMAV01+ |
| | 4.960 | 6.749 | 700.000 | 11.709 | 1575.000 | |
| 1250.000 | 4.962 | 6.833 | 700.000 | 11.855 | 1575.000 | EUSMAW01+ |
| | 5.140 | 6.971 | 1690.000 | 12.664 | 3802.500 | |
| 1740.000 | 5.140 | 6.971 | 1690.000 | 12.664 | 3802.500 | EUSMAX01+ |
| | 5.385 | 7.010 | 2680.000 | 13.062 | 6030.000 | |
| 2230.000 | 5.385 | 7.012 | 2680.000 | 13.066 | 6030.000 | EUSMAY01+ |
| | 5.625 | 7.199 | 3650.000 | 13.690 | 8212.500 | |
| 2710.000 | 5.625 | 7.199 | 3650.000 | 13.690 | 8212.500 | EARMAZ01+ |
| | 5.720 | 7.173 | 3650.000 | 13.846 | 8212.500 | |
| 2888.094 | 9.903 | 0.000 | 0.000 | 8.065 | 57823.000 | EARCOO01+ |
| | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | |
| 3339.379 | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | EARCOO02+ |
| | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | |

(续表)

| | | | | | | |
|----------|--------|-------|--------|--------|-----------|-----------|
| 3790.665 | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | EARCOO03+ |
| | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | |
| 4241.950 | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | EARCOO04+ |
| | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | |
| 4693.235 | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | EARCOO05+ |
| | 12.166 | 0.000 | 0.000 | 10.356 | 57823.000 | |
| 5144.521 | 12.764 | 3.504 | 84.600 | 11.028 | 428.780 | EARCOI01+ |
| | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | |
| 5388.596 | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | EARCOI02+ |
| | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | |
| 5632.672 | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | EARCOI03+ |
| | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | |
| 5876.747 | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | EARCOI04+ |
| | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | |
| 6120.823 | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | EARCOI05+ |
| 6364.898 | 13.088 | 3.668 | 84.600 | 11.262 | 428.780 | |

扬子地块 (YANGZE BLOCK)

| 1 | 2 | 0 | 16 | 5 | 5 | 0 | 4 | |
|---------|--------|---|---------|---|---------|--------|----------|-----------|
| +112.0 | +28.00 | | +0.2440 | | 0.000 | | 0.000 | |
| 0.000 | 2.000 | | 2.800 | | 100.000 | 3.640 | 225.000 | EUSSEC01 |
| 2.000 | 2.600 | | 3.100 | | 130.000 | 4.650 | 292.500 | EUSCRU01+ |
| | 2.784 | | 3.300 | | 150.000 | 5.726 | 337.500 | |
| 7.000 | 2.784 | | 3.750 | | 200.000 | 6.506 | 450.000 | EUSCRU02+ |
| | 3.005 | | 3.850 | | 200.000 | 6.680 | 450.000 | |
| 20.000 | 3.005 | | 3.900 | | 200.000 | 6.766 | 450.000 | EUSCRU03+ |
| | 3.283 | | 4.000 | | 250.000 | 6.940 | 562.500 | |
| 36.000 | 3.283 | | 4.400 | | 450.000 | 8.034 | 1012.500 | EUSLID01+ |
| | 3.398 | | 4.600 | | 500.000 | 8.381 | 1125.000 | |
| 150.000 | 3.398 | | 4.680 | | 400.000 | 8.536 | 1012.500 | EUSAST01+ |
| | 3.602 | | 4.680 | | 450.000 | 8.536 | 1012.500 | |
| 210.000 | 3.632 | | 4.781 | | 450.000 | 8.695 | 1012.500 | EUSSUB01+ |
| | 3.686 | | 5.023 | | 450.000 | 8.715 | 1012.500 | |
| 296.000 | 3.736 | | 5.023 | | 450.000 | 8.715 | 1012.500 | EUSSUB02+ |
| | 3.748 | | 5.300 | | 450.000 | 9.196 | 1012.500 | |
| 410.000 | 3.920 | | 5.300 | | 450.000 | 9.196 | 1012.500 | EUSTRF01+ |
| | 4.300 | | 5.624 | | 450.000 | 9.757 | 1012.500 | |
| 450.000 | 4.300 | | 5.624 | | 450.000 | 9.757 | 1012.500 | EUSINT01+ |
| | 4.400 | | 5.833 | | 450.000 | 10.120 | 1012.500 | |
| 670.000 | 4.450 | | 5.833 | | 500.000 | 10.120 | 1125.000 | EUSTRS01+ |
| | 4.700 | | 6.138 | | 500.000 | 10.649 | 1125.000 | |
| 760.000 | 4.715 | | 6.240 | | 550.000 | 10.827 | 1237.500 | EUSMAV01+ |
| | 4.960 | | 6.749 | | 700.000 | 11.709 | 1575.000 | |

(续表)

| | | | | | | |
|----------|--------|-------|----------|--------|-----------|-----------|
| 1250.000 | 4.962 | 6.791 | 700.000 | 11.782 | 1575.000 | EUSMAW01+ |
| | 5.140 | 6.809 | 1690.000 | 12.383 | 3802.500 | |
| 1740.000 | 5.140 | 6.888 | 1690.000 | 12.520 | 3802.500 | EUSMAX01+ |
| | 5.385 | 7.029 | 2680.000 | 13.095 | 6030.000 | |
| 2230.000 | 5.385 | 7.029 | 2680.000 | 13.095 | 6030.000 | EUSMAY01+ |
| | 5.625 | 7.224 | 3650.000 | 13.733 | 8212.500 | |
| 2710.000 | 5.625 | 7.224 | 3650.000 | 13.733 | 8212.500 | EUSMAZ01+ |
| | 5.720 | 7.185 | 3650.000 | 13.866 | 8212.500 | |
| 2888.094 | 9.903 | 0.000 | 0.000 | 8.065 | 57823.000 | EARCOO01+ |
| | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | |
| 3339.379 | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | EARCOO02+ |
| | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | |
| 3790.665 | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | EARCOO03+ |
| | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | |
| 4241.950 | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | EARCOO04+ |
| | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | |
| 4693.235 | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | EARCOO05+ |
| | 12.166 | 0.000 | 0.000 | 10.356 | 57823.000 | |
| 5144.521 | 12.764 | 3.504 | 84.600 | 11.028 | 428.780 | EARCOI01+ |
| | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | |
| 5388.596 | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | EARCOI02+ |
| | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | |
| 5632.672 | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | EARCOI03+ |
| | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | |
| 5876.747 | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | EARCOI04+ |
| | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | |
| 6120.823 | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | EARCOI05+ |
| 6364.898 | 13.088 | 3.668 | 84.600 | 11.262 | 428.780 | |

日本海盆 (JAPAN SEA BASIN)

| | | | | | | | | |
|---------|--------|-------|----------|-----------|-------|----------|-------|-----------|
| 1 | 2 | 1 | 15 | 5 | 5 | 0 | 4 | |
| +132.0 | +40.00 | | - 2.9850 | | 0.000 | | 0.000 | |
| - 2.985 | 1.020 | 0.000 | | 99999.992 | 1.520 | 0.000 | | EUSOCE01 |
| 0.000 | 2.000 | 2.900 | | 130.000 | 4.350 | 292.500 | | EUSCRU01+ |
| | 2.800 | 3.000 | | 150.000 | 5.205 | 337.500 | | |
| 4.000 | 2.800 | 3.200 | | 200.000 | 5.552 | 450.000 | | EUSCRU02+ |
| | 2.948 | 3.600 | | 200.000 | 6.246 | 450.000 | | |
| 9.000 | 2.948 | 3.700 | | 200.000 | 6.420 | 450.000 | | EUSCRU03+ |
| | 3.211 | 3.850 | | 250.000 | 6.680 | 562.500 | | |
| 16.000 | 3.211 | 3.920 | | 450.000 | 6.801 | 1012.500 | | EUSLID01+ |
| | 3.331 | 4.500 | | 500.000 | 7.807 | 1125.000 | | |
| 65.000 | 3.331 | 4.450 | | 90.000 | 8.021 | 1012.500 | | EUSAST01+ |
| | 3.595 | 4.135 | | 90.000 | 7.475 | 202.500 | | |

(续表)

| | | | | | | |
|----------|--------|-------|----------|--------|-----------|-----------|
| 210.000 | 3.625 | 4.171 | 100.000 | 7.636 | 202.500 | EUSSUB01+ |
| | 3.678 | 4.959 | 450.000 | 8.604 | 1012.500 | |
| 296.000 | 3.728 | 4.959 | 450.000 | 8.604 | 1012.500 | EUSSUB02+ |
| | 3.742 | 5.262 | 450.000 | 9.129 | 1012.500 | |
| 410.000 | 3.915 | 5.377 | 450.000 | 9.329 | 1012.500 | EUSTRF01+ |
| | 4.300 | 5.746 | 450.000 | 9.969 | 1012.500 | |
| 450.000 | 4.300 | 5.839 | 450.000 | 10.130 | 1012.500 | EUSINT01+ |
| | 4.400 | 6.057 | 450.000 | 10.509 | 1012.500 | |
| 670.000 | 4.450 | 6.057 | 500.000 | 10.509 | 1125.000 | EUSTRS01+ |
| | 4.700 | 6.167 | 500.000 | 10.700 | 1125.000 | |
| 760.000 | 4.715 | 6.346 | 550.000 | 11.010 | 1237.500 | EUSMAV01+ |
| | 4.960 | 6.749 | 700.000 | 11.710 | 1575.000 | |
| 1250.000 | 4.962 | 6.787 | 700.000 | 11.776 | 1575.000 | EUSMAW01+ |
| | 5.140 | 6.852 | 1690.000 | 12.458 | 3802.500 | |
| 1740.000 | 5.140 | 6.946 | 1690.000 | 12.622 | 3802.500 | EUSMAX01+ |
| | 5.385 | 7.043 | 2680.000 | 13.120 | 6030.000 | |
| 2230.000 | 5.385 | 7.043 | 2680.000 | 13.120 | 6030.000 | EUSMAY01+ |
| | 5.625 | 7.201 | 3650.000 | 13.693 | 8212.500 | |
| 2710.000 | 5.625 | 7.201 | 3650.000 | 13.693 | 8212.500 | EUSMAZ01+ |
| | 5.720 | 7.206 | 3650.000 | 13.903 | 8212.500 | |
| 2888.094 | 9.903 | 0.000 | 0.000 | 8.065 | 57823.000 | EARCOO01+ |
| | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | |
| 3339.379 | 10.564 | 0.000 | 0.000 | 8.757 | 57823.000 | EARCOO02+ |
| | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | |
| 3790.665 | 11.109 | 0.000 | 0.000 | 9.304 | 57823.000 | EARCOO03+ |
| | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | |
| 4241.950 | 11.550 | 0.000 | 0.000 | 9.733 | 57823.000 | EARCOO04+ |
| | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | |
| 4693.235 | 11.898 | 0.000 | 0.000 | 10.074 | 57823.000 | EARCOO05+ |
| | 12.166 | 0.000 | 0.000 | 10.356 | 57823.000 | |
| 5144.521 | 12.764 | 3.504 | 84.600 | 11.028 | 428.780 | EARCOI01+ |
| | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | |
| 5388.596 | 12.881 | 3.563 | 84.600 | 11.112 | 428.780 | EARCOI02+ |
| | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | |
| 5632.672 | 12.972 | 3.609 | 84.600 | 11.178 | 428.780 | EARCOI03+ |
| | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | |
| 5876.747 | 13.037 | 3.642 | 84.600 | 11.225 | 428.780 | EARCOI04+ |
| | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | |
| 6120.823 | 13.076 | 3.661 | 84.600 | 11.253 | 428.780 | EARCOI05+ |
| 6364.898 | 13.088 | 3.668 | 84.600 | 11.262 | 428.780 | |

附录 2 本文用到的反演方法概述

1. 面波三维层析成像

对地球岩石圈及软流圈, 主要利用面波进行三维层析反演, 以获得 S 波速度分布. 本文所述的三维速度模型采用非网络化的两步反演法, 即先用 Tarantola-Valette 进行区域群速度分布反演, 然后用 Backus-Gilbert 方法作 S 波三维速度反演.

群慢度分布反演按照 Tarantola-Valette 反演理论可导出

$$\Delta n(r, T) = \sum_i W_i \int_R C_{n0}(r, r', T) ds, \quad (1)$$

式中 $\Delta n(r, T)$ 为群慢度扰动量, $C_{n0}(r, r', T)$ 为模型估计的先验协方差函数.

根据 Backus-Gilbert 反演理论, 认为某一深度 z_0 的 S 波速度扰动值可以近似地等于分辨区域 Ω_0 内的群速度扰动 $\delta \tilde{U}(\Omega_0)$ 的加权平均

$$\langle \delta \beta(z_0, \Omega_0) \rangle = \tilde{\alpha}_0(z_0) \delta \tilde{U}(\Omega_0), \quad (2)$$

其中

$$\tilde{\alpha}_0(z_0) = \frac{(S + \lambda C_U)^{-1} U}{U^T (S + \lambda C_U)^{-1} U},$$

$$S_{ij} = \int_0^1 \left\{ 12(z, z_0)^2 \left(\frac{\partial U}{\partial \beta} \right)_{T_i} \left(\frac{\partial U}{\partial \beta} \right)_{T_j} + \left(\frac{\partial U}{\partial \rho} \right)_{T_i} \left(\frac{\partial U}{\partial \rho} \right)_{T_j} + \left(\frac{\partial U}{\partial \alpha} \right)_{T_i} \left(\frac{\partial U}{\partial \alpha} \right)_{T_j} \right\} dx,$$

$$(U)_i = \int_0^1 \left(\frac{\partial U}{\partial \beta} \right)_{T_i} dx,$$

λ 为平衡因子; C_U 为群速度数据协方差矩阵; β, α, ρ 分别为介质的横波速度、纵波速度和密度.

2. 体波三维层析成像

对于区域性体波走时层析成像, 一般是将地下分为柱状体, 用三维空间中的网格点的速度值描述介质速度分布. 对区内近震及远震的 P 波到时进行统一处理, 理论走时的计算公式为

$$T_{ij} = \int_{L_{ij}} \frac{ds}{v}, \quad (3)$$

式中 T_{ij} 为震源 i 到接收点 j 的走时, L_{ij} 为射线路径, v 为地球内速度分布.

设地球初始(参数)模型为 V_0 , 计算观测走时与理论走时残差. 将上式写为

$$\delta T_{ij} = T_{ij}^o - T_{ij}^c = \int_{L_{ij}} \delta \left(\frac{1}{v} \right) ds + e_{ij}, \quad (4)$$

式中 T_{ij}^o 为观测走时, T_{ij}^c 为理论走时, 右端第一项为地球介质速度扰动引起的走时变化, e_{ij} 为震源定位不准引起的误差及观测误差项. 将此方程线性化, 用最小二乘法(如 SVD 或 LSQR 法)解反演问题, 可以获得地下三维分布的 V_p 扰动值.

全球体波走时三维层析成像基本公式为

$$\delta t = \int_S^R G(S) \delta v(r) ds(r), \quad (5)$$

式中 δt 为走时残差, R 及 S 分别为台站及震源, $ds(r)$ 为沿体波传播路径的微分弧长, $G(S)$ 是由参数地球速度模型导出的微分核函数, δt_i 为沿射线路径 i 的走时残差, r 为矢径函数. 三维速度扰动 $\delta v(r, \theta, \varphi)$ 可用

球谐函数表示水平变化, 勒让德多项式表示径向变化

$$\delta v(r, \theta, \varphi) / v = \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M f_k(r) p_l^m(\theta) ({}_k A_l^m \cos m\varphi + {}_k B_l^m \sin m\varphi), \quad (6)$$

式中 p_l^m 为正则化缔合勒让德多项式.

将(6)式代入(5)式, 对从第 i 号震源到第 j 号接收点的地震波沿射线路径积分, 则走时残差 δt 可以表示为

$$\delta t_{ij} = \sum_k \sum_l \sum_m (\alpha_{lm}^{(ij)} {}_k A_l^m + \beta_{lm}^{(ij)} {}_k B_l^m), \quad (7)$$

式中 α, β 为沿射线路径积分求得的常数. 利用非线性反演理论进行叠代求走时残差极小, 可以逐步逼近真实模型.

THE RECONSTRUCTION OF PRELIMINARY THREE-DIMENSIONAL EARTH'S MODEL AND ITS IMPLICATIONS IN CHINA AND ADJACENT REGIONS

ZHU JIE-SHOU CAO JIA-MIN LI XIAN-GUI ZHOU BIN

(Dept. of Applied Geophysics, Chengdu Institute of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract

The continent of China and its adjacent regions formed by a series of plates and blocks convergence rapidly in the late Paleozoic (about 200—300 Ma). The Indian subcontinent collided with Eurasian continent causing the crust shorted and uplifted in the late Mesozoic to Paleocene epoch forming the highest plateau of Qinghai-Tibet and Pamir, and orogens of Himalayan and Hindu Kush. Based on the Global Geosciences Transects(GGT) and the results of tomographic inversion by seismic body wave and surface wave data, the three dimensional velocity structure from upper crust to Core-Mantle Boundary (CMB) have been reconstructed in China and its adjacent regions. It shows the great lateral various for each spherical layers in lithosphere / asthenosphere system (depth from 0 to about 400 km).

Alpine-Himalayan belt throughout the Northern Pakistan (Hindu Kush and Pamir), Qinghai-Tibet plateau including Tarim basin and Tian-Shan mountain chain characterized by the continent-continent collision zone with thick crust and lithosphere. The eastern part is influenced by the motion of Pacific plate and with the thin crust and lithosphere. The average thickness of lithosphere in the region is about 100 km, several paleonuclei and paleolands, such as Tarim, Yangtze, Ordos and Indian shield are represented by great thickness of lithosphere. The fold belts, such as Altai, Qinlin belt, North-South tectonic belt, southeast continental margin, South China sea, East

China sea, Ryukyu trench represented by thin lithosphere.

In the lower mantle (depth in 700—1200 km) the velocity distribution shows the north-south trend. The high velocity regions are presented in the Japan sea and East China sea, and also appear in the N-S tectonic belt through out central China. In the depth 2200—2800 km close the CMB region a huge high velocity anomaly is distributed from east to west, this could be explained as a super cold downwelling plume in the east and central Asia.

The super downwelling plume underneath Asia is the dominant pattern of vertical mantle flow in the modern Earth. This huge cold plume is formed by the multi-subduction of oceanic plates of paleo Tethys and Pacific, the cold slabs was supplied by plates at trench and down to lower part of upper mantle (670 km in depth), where they were accumulated, and after a geologically significant time the stagnant mass of cold slabs gravitationally collapsed onto the CMB. Once it is formed in lower mantle, the mantle convection patterns in the upper mantle tends to be strongly controlled by a sole downwelling superplume in the lower mantle. Thus all continents tend to be swallowed into the cold superplume until they are collision and amalgamation to form a super-continent.

The central Asia, from Indian subcontinent to Tibet, Xijiang, Mongolia and Baikal regions are the present largest convergence place in the world. there are thicken crust and lithosphere, showing high compressional stress in the crust, low heat flow and broad distributed earthquakes, and negative gravity anomaly, lowest geoid, all of these characteristics indicate the mantle materials fall down to the CMB and continents converged in this region.

Key words Three-dimensional structure of earth, Blocks dividing in lithospheres, Downwelling superplume of lower mantle, China.

作者简介 朱介寿,男,1937年出生.1957年毕业于北京地质学院地球物理勘探系.现任成都理工大学教授,博士生导师.发表论文60余篇及专著5部.主要从事应用地球物理学及地震学、地球内部物理学的研究工作.

