

基于深地震测深的深部动力学研究方法和应用

宋向辉^{1,2)}, 田晓峰²⁾, 刘少峰¹⁾, 王帅军²⁾, 杨宇东²⁾

1) 中国地质大学(北京), 北京, 100083; 2) 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州, 450002

内容提要: 深地震测深是探测壳幔岩石圈精细速度结构、探讨岩石圈变形和演化过程的一种有效方法, 在青藏高原隆升、克拉通裂解等大陆动力学研究中已发挥了重要的作用。然而, 地震测深方法与深部动力学研究的结合尚处于现象描述为主的状态。因此, 本文对前人利用深地震测深资料进行深部动力学研究的相关方法进行了回顾与总结; 宽角反射/折射地震震相特征具有明显的动力学响应, 是进行动力学研究的基础; 通过速度结构对比可以确定不同地壳速度结构模型所对应的构造单元及其演化过程, 地壳厚度和泊松比等参数可以用于地壳变形模式的讨论, 壳内高速和低速异常体反映了不同动力学过程对地壳的改造; 人工地震 S 波资料与 Pn 波速度可以用于壳幔各向异性的研究, 为动力学演化过程研究提供独立的观测证据; 运用现代构造解析方法可以构建不同的地壳结构—动力学型式, 进而通过壳幔结构的解构恢复岩石圈演化过程; 此外, 地震测深资料可以约束地壳成分结构, 为动力学数值模拟提供岩石流变参数等资料。本文对于充分挖掘深地震测深资料在动力学研究中的应用价值至关重要, 对于加强地震测深同其他学科的交叉研究也具有重要意义。

关键词: 深地震测深; 震相分析; 地壳速度结构; 地震各向异性; 构造解析; 地壳成分; 大陆动力学

大陆动力学是根据已有的地质构造和地球模型, 研究地球内部物质运动的力学机制和动力学过程的一门学科, 而对地球内部深层过程和动力学响应的研究, 尤其是壳、幔结构的精细刻划更是地球动力学研究的核心所在(滕吉文等, 2012)。深地震测深(DSS: Deep Seismic Sounding)是利用人工激发的地震波来研究地壳与上地幔岩石圈结构的探测方法, 又称为地震宽角反射/折射方法(Seismic wide angle reflection/refraction experiment), 该方法精度高, 震源位置、爆破时间等参数准确可靠, 能够获得地壳界面的形态与埋深以及地壳速度的横向变化, 因此在壳幔岩石圈结构与动力学过程的研究中占据了重要的地位。

前苏联科学院 Gamburtsev 院士最早在 1948~1955 年间提出了深地震测深的概念, 主要采用低频体波(陆地 2~12 Hz, 海洋 4~6 Hz)来研究地壳上地幔速度结构。该方法的目标是构建一维和二维速度结构, 其中一维处理方法包括 Wichert—Herglotz 反演方法(Herglotz, 1907; Wiechert, 1910)、 X^2-T^2 方法(Giese, 1968)、PLUCH 方法(Michel and Hirn, 1980)、时间项方法(陈颙和陈运泰, 1974)、一维走

时拟合方法(Shearer, 1999)等, 二维处理主要基于地震射线理论(Cerveny, 1972), 通过有限差分反演方法、理论地震图方法(Fuchs and Müller, 1971)以及走时正演(Luertgert, 1988; Thybo and Luetgert, 1990)或者反演(Zelt and Smith, 1992)的方法等, 构建二维壳幔速度结构模型。由于深地震测深促进了地质模型在地球物理研究中的应用, 使得地质学家和地球物理学家可以更好地交流合作, 因此该方法在世界范围内快速发展并在地球动力学研究中得到了广泛的应用(Mooney et al., 1987; Drummond et al., 2000; Chandrakala et al., 2010)。基于深地震测深方法和资料, 前人得出了层状地壳结构(Frank, 1961)、壳幔过渡带(Braile and Chiang, 1986)、典型构造单元地壳结构特征(Christensen and Mooney, 1995)、地壳结构的横向非均匀性(Fuchs, 1979)与各向异性(Raitt, 1963)等诸多的动力学认识; 并构建了区域(Li Songlin et al., 2006; Zhang Zhongjie et al., 2011a, b)以及全球的地壳结构模型(Mooney et al., 1998), 为更进一步的动力学研究提供了基础模型。目前, 深地震测深已经成为研究 100 km 深度以内大陆地壳上地幔以及 15~25 km 以内海洋壳幔

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41774071)的成果。

收稿日期: 2020-03-04; 改回日期: 2020-08-10; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.016

作者简介: 宋向辉, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事人工地震测深资料的处理与动力学解释; Email: songxh@gec.ac.cn。

精细结构的重要方法(Kosminskaya, 2012)。

我国从 20 世纪 50 年代末在青海柴达木盆地开展人工地震测深研究(曾融生等,1960)开始,至今已积累了丰富的深地震测深成果,国内学者利用这些成果对许多动力学问题进行了讨论。许志琴等(1996,1999)基于地震测深等结果讨论了青藏高原周缘造山带的造山机制;Li Songlin 等(2006)总结了中国大陆东西部的壳幔速度结构模型,并指出了两者经历的不同演化过程;Teng Jiwen 等(2013)利用覆盖中国大陆主要区域的 114 条 DSS 测线的成果构建了中国大陆地区的莫霍面深度分布,并研究了地壳整体结构对地震活动性和流变性的控制作用。基于深地震测深结果,国内学者还提出了龙门山造山带和秦岭造山带的“楔入造山”模型(蔡学林等,1996;袁学诚,1997)、天山隆升的“层间插入消减”的动力学模型(赵俊猛等,2001)以及燕山“三明治”地壳结构所反映的整体挤压缩短和造山后伸展等动力学过程(李秋生等,2008)。但是前人对于利用深地震测深资料进行动力学研究的方法缺少系统的总结,使得该方法以及相应的成果未充分发挥相应的价值。

杨文采(2014a,2020a, b)和杨文采等(2020a)指出了利用固体地球物理资料进行板块大地构造研究的路线,在此基础上,本文对前人利用人工地震测深成果进行地球动力学研究的方法进行了总结,期望能够充分挖掘深地震测深资料的价值,加强壳幔深部结构特征与地质构造及其演化历史的研究,将地壳上地幔岩石圈速度结构同动力学演化过程更为紧密地联系起来。

1 震相分析

震相的识别与分析是深地震测深资料处理的基础与关键,直接决定了后续速度模型建立的正确与

否。深地震测深中常规震相一般有:基底折射震相 Pg、莫霍面反射震相 PmP/Pm 与折射震相 Pn 以及壳内反射震相 PcP/Pc 等(图 1)。Pg 震相主要反映基底形态与上地壳速度梯度,受盆地沉积或基岩出露等影响,Pg 震相常表现出走时的滞后或超前;PmP/Pm 震相主要反映莫霍界面的起伏形态和下地壳的强梯度速度结构,Pn 震相主要反应上地幔顶部的速度梯度和壳幔分界的介质结构,PcP/Pc 震相反映壳内速度的横向变化,同时也能够反映深大断裂在地壳深部的伸展情况(嘉世旭等,1995)。

PmP/Pm 震相作为反映壳幔边界形态与性质的重要震相,是壳幔相互作用的重要动力学响应。赵俊猛等(1999,2001)指出不同构造环境下的壳幔过渡带结构存在着明显的差异,天山造山带复杂的壳幔过渡带是挤压环境下壳内熔融物质迁移导致的,而辽河盆地复杂的壳幔过渡带则是伸展环境下岩浆上涌底侵作用造成的。赖晓玲等(2004)对张北地震区的 Pm 波形资料进行了分析,指出该区域壳幔过渡带具有复杂的分层结构,推测其与深部的岩浆活动以及底侵作用密切相关。滕吉文(2006)利用全球大量的人工地震资料对壳幔边界特征进行了总结,指出 PmP/Pm 震相的能量和波组特征具有明显的动力学响应,可以反映壳幔边界的精细结构和属性(一级间断面、速度梯度层或高、低速相间的薄层)。一般情况下,稳定的克拉通地块(例如鄂尔多斯地块),其壳幔边界表现为一级间断面的形式,PmP/Pm 震相尖锐,而造山带和伸展盆地由于构造活动强烈,壳幔边界经过构造作用的改造,往往表现为复杂的过渡带形式,其 PmP/Pm 震相以波组的形式出现(图 1)。

此外,壳内反射震相 PcP/Pc 对于揭示低速体等特殊构造具有重要意义。壳内低速体具有特殊的震相特征,包括 Pg 波震相走时的中断、低速层顶底

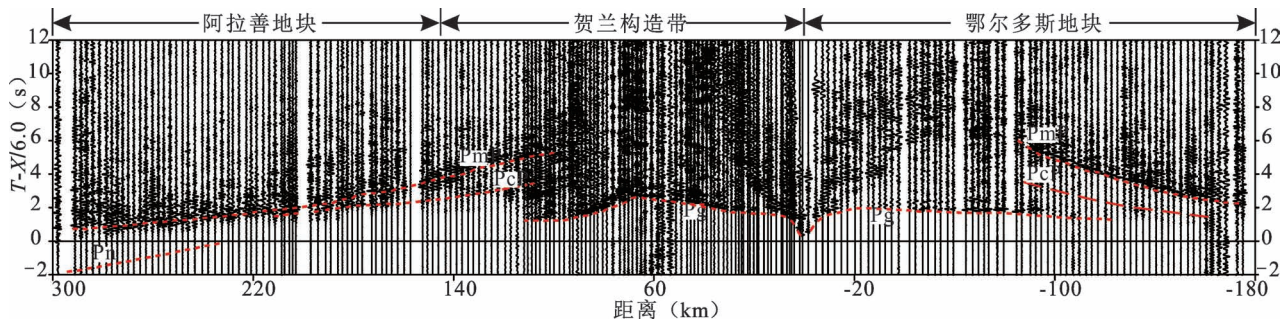


图 1 鄂尔多斯及西缘构造带震相特征
Fig. 1 Characteristics of seismic phases in the Ordos Block and its western margin

界面近平行的反射震相等,低速层还会引起地震波振幅发生强烈的变化,明显的极性反转也可作为低速层存在的重要依据(周小鹏等,2015)。

2 地壳速度结构分析

深地震测深成果通常以二维地壳上地幔速度结构的形式展示,将地壳岩石圈划分为上、中、下地壳的三层结构或者上、下地壳的两层结构。通过对地壳各层的速度和厚度等参数进行统计、分析,可以对地壳变形及演化等动力学过程进行探讨(郑圻森等,2003)。

2.1 壳幔速度结构的对比

利用深地震测深资料揭示地壳的速度结构和各种构造单元的空间分布与规模,通过与同类型“标准”壳幔结构的对比,可以确定研究区域岩石圈的类型与改造过程,为大陆动力学研究提供深部科学依据。因此,壳幔结构的全球对比就成为揭示大陆岩石圈演化规律的关键所在(杨文采,2014b)。

一方面,通过壳幔结构对比可以确定研究对象的构造单元属性(杨文采和于常青,2015)。Christensen 和 Mooney (1995)对全球大陆地震测深结果进行了总结,根据 5 种基本的大陆地质单元:造山带、地盾和地台、大陆弧、裂谷及伸展区,指出不同构造单元具有不同的地壳结构特征,并构建了全球平均地壳速度结构模型。该模型指出大陆平均地壳厚度为 41.1 km 左右,伸展区地壳平均厚度为 30.5 km,而造山带平均地壳厚度则达到 46.3 km,大陆地

壳平均速度为 6.45 km/s,上地幔顶部 Pn 速度为 8.09 km/s。一些学者分别对中国大陆区域不同构造单元的地壳结构特征进行了总结(赵俊猛等,2001;朱介寿等,2003;张中杰等,2005,2010;Li Songlin et al.,2006;卢占武等,2006;刘明军等,2008;邓阳凡等,2011;王椿镛等,2016),确定了不同块体的地壳速度结构参数,然后与全球壳幔速度结构模型进行对比,讨论其大地构造属性。以中国东部盆地和鄂尔多斯周缘临汾、渭河盆地为例,虽然两者都属于新生代断陷盆地,但是从其地壳结构对比来看,两者具有显著的差别:华北与东北的盆地地壳厚度较小,在 30 km 左右,与全球伸展区地壳厚度基本一致;而汾渭裂谷地壳厚度则较大,达到 35 km 左右,与全球裂谷平均地壳厚度一致(图 2)。梁光河(2019)指出临汾和渭河盆地是在巨大的左旋走滑运动的影响下,在坚硬的鄂尔多斯块体边缘的岩石圈拉张而形成的大陆裂谷,这一结论与地壳结构对比显示的临汾、渭河盆地属于裂谷性质的认识相一致。

另一方面,根据壳幔速度结构的差异与大地构造作用发生的时代,把它们按照演化阶段排序,还可以讨论不同地质作用对地壳结构的改造(杨文采等,2014a~d;杨文采,2014c,2015)。Durrheim 和 Mooney(1991)指出相对于较薄的太古代地壳(~35 km),元古代地壳往往具有较厚的地壳厚度(~45 km)和下地壳高速层(>7.0 km/s),反映了元古代地壳经历了广泛的底侵作用。嘉世旭等(2006)对

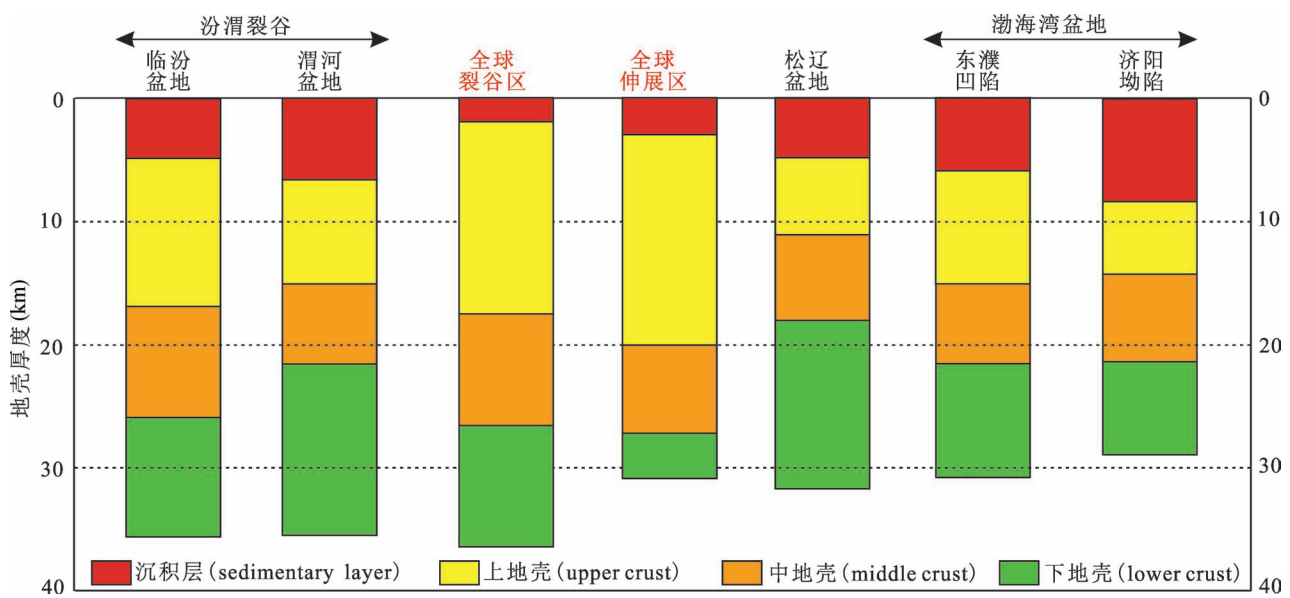


图 2 中国东部不同盆地地壳速度结构模型对比

Fig. 2 Crustal velocity models contrast of different basins in eastern China

比了雷琼拗陷与华南地块其他地区的壳幔速度结构,发现海南岛下地壳减薄了 5 km 以上,现今下地壳的速度与华南块体中地壳的平均速度一致,推测海南岛下地壳经历了新生代岩浆作用导致的下地壳分异变形。Abbott 等(2013)对比了大量中太古代与古太古代克拉通的地壳结构差异,指出中太古代克拉通地壳厚度往往较薄,缺少下地壳高速层,可能经历了拆沉作用。滕吉文等(2014)对鄂尔多斯与四川盆地的结构进行了对比,指出鄂尔多斯地块平均地壳速度更高,下地壳整体速度梯度较弱,而四川盆地地壳则呈现为较强的正速度梯度,显示了华北和扬子克拉通不同的地壳结构特征。杨文采和宋海滨(2014a)利用地壳上地幔速度结构对比结果,对洋陆转换作用的阶段性演化过程进行了讨论,指出了洋壳向陆壳转换会引起地壳岩石圈结构的变化,并对不同演化阶段的地壳增厚与变形方式进行了讨论。

壳幔速度结构对比,类似于地质学中的地层对比,是利用深地震测深结果讨论岩石圈演化过程的重要方法,也是将地球物理资料同地质作用过程联系起来的纽带。由于深地震测深方法的研究目标往往就是研究同一测线所覆盖的不同块体的深部结构特征与相互作用关系,因此在解释中更要加强不同块体结构横向差异的对比,深化理解不同地质作用对地壳结构的改造过程。随着深地震测深工作的开展与成果的累积,除了对单一测线不同构造单元的结构对比之外,还应当加强不同区域相同构造属性单元壳幔结构的对比,例如对不同地质年代的克拉通壳幔结构进行对比,讨论克拉通的演化与破坏(杨文采等,2014b~d,2017a),或对不同类型造山带结构进行对比,讨论造山带演化阶段和陆内造山机制等(杨文采等,2017b)。Christensen 和 Mooney (1995)总结了全球 5 种基本构造单元的平均壳幔结构,但是并没有考虑这些构造单元形成的地质年代与所处演化阶段的差异;在此基础上,Mooney 等(1998)提出了更为细分的全球 14 种平均地壳结构模型,考虑了太古代到显生宙地壳结构的差异,为壳幔结构对比提供了更为可靠的依据。在考虑构造单元属性的同时,对其地质年代和演化阶段进行考虑,能够为速度模型对比选择更合适的参照“标准”。

2.2 地壳厚度与地壳变形

地壳厚度与地壳变形之间有着密切的联系,通过考虑地壳变形对其厚度造成的变化进行计算,可以对地壳伸展减薄或者挤压增厚的变形模式进行分

析讨论。

伸展构造中,通常采用伸展系数 β 来研究地壳变形。 β 是指岩石圈伸展前与伸展后地壳厚度的比值,是反映盆地地壳伸展程度、揭示盆地成因的重要动力学参数。纯剪变形中,壳幔岩石圈伸展系数是一致的,岩石圈均匀拉伸减薄;而单剪变形模式中,伸展系数则随深度的不同而变化。因此,盆地的地壳伸展系数可以作为判断岩石圈伸展变形模式的重要依据。人工地震测深结果可以用来计算全地壳伸展系数,计算时要注意现今的盆地地壳厚度应当减去伸展期间盆地所接受的沉积厚度,而初始的地壳厚度则应当选择盆地周边稳定块体的地壳厚度,并在此基础上加上其隆升所剥蚀的厚度(包汉勇等,2013)。上地壳的伸展系数一般通过深反射地震获得的断层几何形态,以及基底断裂极性、倾角、断距等参数计算得出。张中杰等(2010)利用人工地震获得的地壳分层模型,计算了琼东南盆地的上地壳与全地壳伸展因子,结果显示两者存在着明显的差异,伸展因子具有明显的随深度变化的非均一性,反映了该区域受单剪作用控制的动力学伸展模式。

挤压构造中,地壳厚度也可以用于地壳变形模式的研究。例如挤压缩短造山模式就强调地壳作为刚性块体,在挤压作用下整体缩短并导致地壳增厚,据此可以根据地壳变形前后厚度的变化求取地壳缩短量。Tian Xiaobo 等(2014)总结了青藏高原东北缘地区的人工地震测深地壳厚度数据,结合接收函数结果,对东北缘地区的地壳缩短量进行了估算,指出该区域地壳变形以上地壳增厚为主。

此外,地震测深结果通常能够较好地获得地壳的上、下或者上、中、下的层状模型,通过对地壳分层和地壳不同层位厚度的变化进行讨论,可以对地壳变形模式进行更深入的研究。玛沁—兰州—靖边地震测深剖面(李松林等,2002)清晰地揭示了青藏高原东北缘地壳厚度由东北向西南逐渐增厚的变化趋势,但是上地壳厚度并未发生明显的横向变化,地壳增厚主要发生在下地壳,结合增厚下地壳内的低速体,推测该地区可能存在局部的下地壳流。而贺兰山构造带的地壳厚度变化主要表现为上地壳的增厚,造山带下地壳的厚度与周围鄂尔多斯和阿拉善块体厚度一致(王帅军等,2017),反映了贺兰山地区地壳增厚由上地壳挤压推覆造成,或者是造山垮塌伸展阶段发生了由造山带向周缘的下地壳横向流动,使造山增厚的下地壳减薄。燕山造山带地壳厚度特征则表现为上地壳的上隆增厚与下地壳的下凹

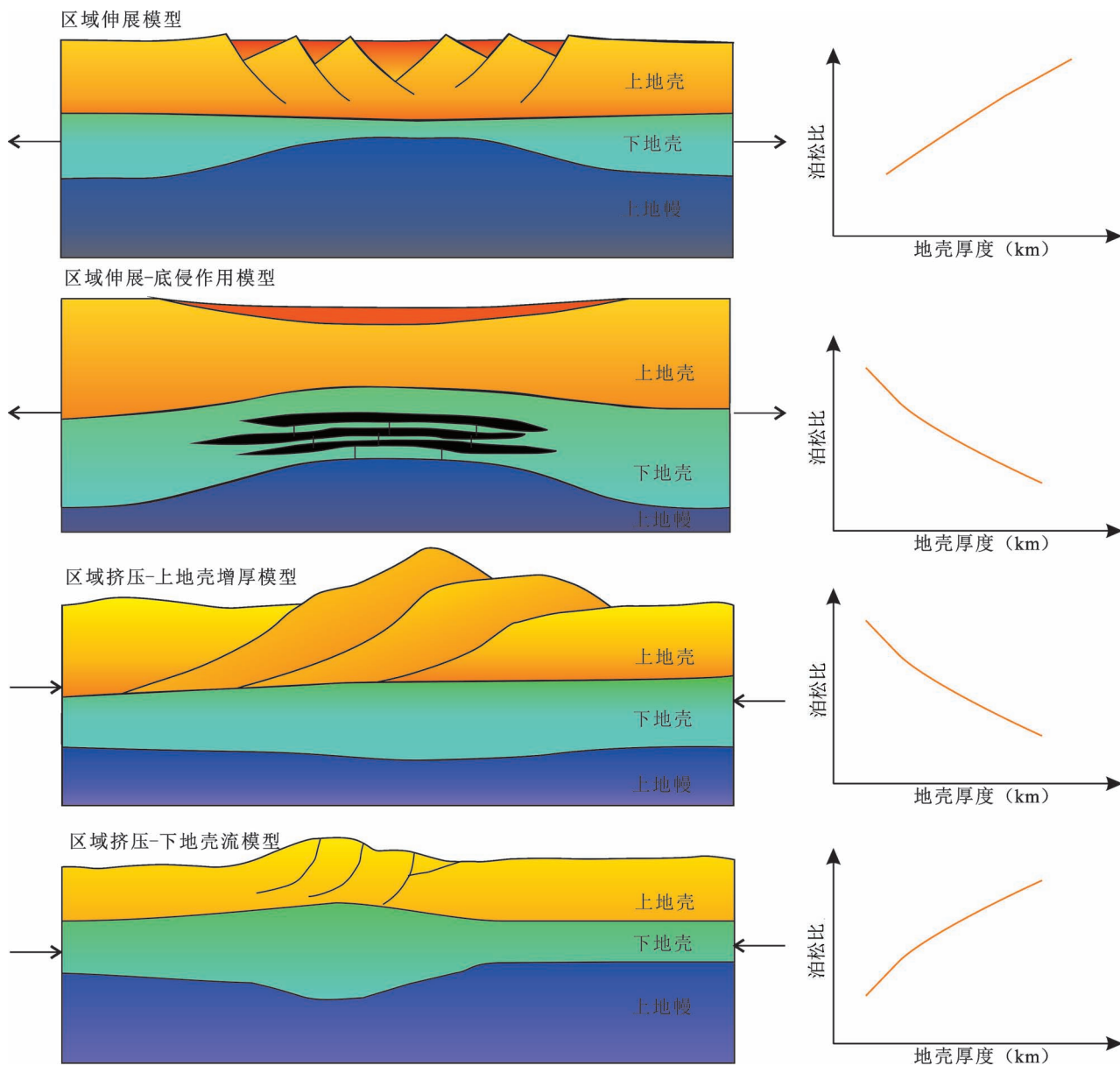


图 3 不同构造模式下地壳厚度与泊松比对应关系示意图(据嵇少丞等,2009 改)
Fig. 3 Correlation diagrams between crustal thickness and Poisson's ratio for different tectonic models
(modified after Ji Shaocheng et al. , 2009&)

增厚,具有典型的全地壳挤压缩短增厚的变形特征(李秋生等,2008)。

除了分析地壳厚度和分层结构讨论变形模式,地壳厚度与泊松比的对应关系也可以反映地壳岩石圈减薄或增厚的变形机制(嵇少丞等,2009)。大陆上地壳通常以低泊松比值的长英质岩石为主,而下地壳则以高泊松比值的镁铁质岩石为主。伸展构造中,地壳的减薄多发生在下地壳,所以随着地壳厚度的减小,泊松比也会相应地减小;但是如果发生底侵作用(金振民等,1996),部分熔融的幔源物质进入

下地壳底部,地壳整体泊松比则会随着地壳厚度的减小而增大。挤压构造中,如果地壳增厚发生在上地壳,那么泊松比则随着地壳厚度的增加而减小,而如果地壳增厚发生在下地壳(例如下地壳流;杨文采等,2017c),那么泊松比则会随着地壳厚度的增加而增大(图 3)。因此,利用地壳厚度与泊松比的对应关系,也可以推断地壳构造的变形模式。但是目前主要利用接收函方法获得的地壳厚度与泊松比结果进行动力学研究,例如 Pan Suzhen 等(2011)利用青藏高原东北缘的接收函数结果讨论了地壳增厚的

模式,认为该地区以下地壳增厚的变形模式为主。而人工地震测深方法由于 S 波不发育,震相识别较为困难,构建 S 波速度结构模型与泊松比的结果较少,因此利用地壳厚度与泊松比结果进行动力学的研究则较为少见。地壳厚度作为深地震测深的重要结果,对于揭示地壳变形模式具有重要帮助。相对于接收函数与层析成像方法,地震测深方法得到的地壳厚度具有更高的精度,但是地震测深剖面大多以单一测线的方式进行布设,只能得到二维的地壳厚度,不能满足三维动力学的研究。因此,在深入研究测深剖面中地壳厚度变化揭示的地壳变形规律的同时,还应当发展三维深地震测深方法,或者利用以往的研究结果构建三维地壳结构模型,讨论区域地壳厚度与地壳变形的关系,使地壳厚度数据更好地应用于动力学研究。

2.3 壳内速度异常体

深地震测深方法除了能够给出地壳厚度、壳内界面起伏等信息,还能够给出精细的壳内速度分布,壳内速度异常体(高速体和低速体)包含了丰富的深部动力学信息,通过对地壳速度特征进行分析,可以深化区域的深部动力学认识。

深地震测深方法基于分层地壳的假设,将地壳结构划分为不同的圈层,地壳层内的速度变化以速度梯度来表示,速度梯度的大小反映了速度随深度变化的程度。一般而言,稳定的克拉通地块地壳速度梯度为正且幅度较小,东部断陷盆地以及造山带下方则经常出现速度的倒转,存在壳内的低速体,地壳局部速度梯度为负。部分下地壳下部存在速度强梯度层,这种情况对应于高、低速相间的壳幔过渡带模型,与基性—超基性岩石的互层结构密切相关(朱金芳等,2005)。

壳内低速体常发育于地质构造活动剧烈的地区,华北块体、南北地震带以及青藏高原及周缘地区的深地震测深剖面中大多存在壳内的低速体,但不同地区低速体的分布状态又明显不同,反应了壳内低速体的分布主要受控于深部构造背景(杨晓松等,2003)。壳内低速体的成因,目前的认识主要包括含流体的裂隙、壳内局部熔融、岩石矿物脱水等,不同深度分布的壳内低速体具有不同的成因解释,浅层低速体可能源于含流体的裂隙带,中地壳的低速体可能源于壳内熔融,也可能是上下地壳解耦而导致的地壳速度降低,而下地壳的低速体则可能与软流圈上涌以及深部流体等密切相关(Song Xianghui et al., 2019a)。

壳内低速体在地壳变形中发挥着重要的作用,是地壳变形模式的关键因素。青藏高原东缘中下地壳连续分布的低速体为下地壳流模型提供了地球物理观测的支撑,并导致了青藏高原东缘与东北缘产生不同的变形模式(孙玉军等,2013)。Dyksterhuis (2007)、Allken 等(2012)等发现伸展裂谷演化的初始模型中,壳内低速体为单一的、局部分布的形态时,会产生狭窄的对称裂谷,而包含区域的、离散分布的壳内低速体的初始模型则会产生较宽的裂谷形式。Rey 等(2009)指出,碰撞造山后期伸展垮塌过程中产生熔融低速体的比例不同,会导致变质核杂岩发育模式的不同;Jamieson 等(2011)指出壳内熔融产生之前,造山带的生长以垂向增厚为主,而一旦壳内物质发生熔融形成低速体,造山带则开始横向扩展。因此,在对地壳变形以及岩石圈演化进行分析时,应当分析低速体可能的成因以及形成的时间,充分考虑壳内低速体对变形的影响甚至控制作用。

壳内高速异常体主要分布于高压超高压变质岩区以及大火成岩省等。深地震测深揭示了鲁西地区存在壳内近于直立的高速体,可能是幔源岩浆向上地壳运移的通道,反映了鲁西地区壳幔物质交换以及地壳增生的动力学过程(王光杰等,2007)。峨眉山大火成岩省在地震测深速度剖面上表现为高速异常的内带、上地壳低速异常的中带以及正常速度结构的外带,反映了地幔岩浆的底侵与地壳增生(徐涛等,2015)。秦岭、大别造山带的地壳速度结构表现为核部的高速穹隆异常以及翼部的壳内低速体层(刘福田等,2003),可能对应了大别造山带变质核杂岩的隆升与伸展拆离。因此,地震测深剖面速度结构中的高速异常体,大多与岩浆作用相关,反映了幔源岩浆向浅层地表运移的动力学过程,对地壳速度结构中的高速异常体进行解释时,应当重点联系区域的火山与岩浆活动等动力学作用。

穿过大地震震源区域的深地震测深剖面显示,地震往往发生在壳内高、低速异常的转换带、并靠近于高速体的一侧,壳内速度的异常变化易于发生应力的集中,为地震的孕育提供深部构造环境。可见,壳内速度异常体对于揭示岩石圈演化、岩浆活动以及地震孕育等动力学过程,都具有重要的意义。因此在深地震测深资料的处理和解释中,应当着重加强对速度异常体的分析,根据切实可信的地震资料和速度异常证据,划定异常体的范围,并对异常体的成因及其对地壳变形的影响等进行分析,深化对区域动力学过程的理解。

3 地震各向异性

地震各向异性描述了地震波沿不同方向传播时的速度差异,对于了解岩石圈构造变形史、研究地球内部动力学过程具有非常重要的意义(黄周传, 2011)。目前利用地震测深资料研究壳幔岩石圈地震各向异性的手段主要有观测 P 波速度随方位的变化和剪切波分裂。

P 波速度的方位变化是最早观测到的各向异性现象。Raitt (1963) 首次利用人工折射地震资料发现 Pn 波传播速度随方位改变而变化的现象,在垂直洋中脊方向上 (8.3 km/s) 快于平行洋中脊方向 (8.0 km/s), Hess (1964) 将其解释为上地幔橄榄岩引起的地震波速各向异性。Bamford (1977) 和 Bamford 等 (1979) 利用大量的人工地震资料对各大陆的 Pn 速度各向异性进行了研究,指出了利用人工地震测线的 P 波资料研究大陆岩石圈各向异性的可行性。Meissner 等 (2002) 根据年轻造山带上地幔 Pn 各向异性的方向往往平行于造山带、而与挤压作用的应力方向垂直的现象,提出了扩展至地幔岩石圈的构造逃逸造山动力学模型。但是 Pn 波速度随方位变化的方法要求射线覆盖范围非常好,否则不能区分走时异常是由速度各向异性还是由各向同性非均匀介质引起的,因此国内利用深地震测深数据研究 Pn 波速度方位各向异性的结果较为少见,这可能是由于该方法对地震测线的数量和平面方位分布要求较高,使得满足条件的研究区域较少。Song Xianghui 等 (2019b) 对鄂尔多斯地区深地震测深资料的 Pn 波速度方位各向异性进行了初步研究,得到的近 E—W 向的上地幔岩石圈各向异性方向与前人研究结果一致。

剪切波分裂被认为是地球内部存在各向异性的直接证据,目前被认为是识别各向异性最可靠、分解性最小的研究工具,因此前人利用人工地震 S 波资料进行了各向异性相关研究。王椿镛等 (1997) 发现大别造山带深地震测深水平分量地震记录中,存在着明显的近似相互垂直、有一定到时差的两种偏振运动,表明 S 波在大别造山带下方传播时存在分裂现象。刘志和张先康等 (2000) 对泰安—忻州剖面的 S 波分裂参数 (快波方向和快慢波延迟) 进行了计算,对介质的各向异性进行了讨论。但是由于人工地震爆破数据中 S 波地震记录震相识别较为困难,限制了人工地震资料在各向异性研究中的应用。

4 构造解析与壳幔结构解构

深地震测深资料的构造解析是根据地壳厚度与速度结构模型、地壳变形结构样式、地壳地质结构与构造演化、地壳运动学与动力学等四方面标志,确定不同构造单元的地质作用模式。蔡学林等 (2007) 利用构造解析的方法,结合其他学科结果对大量的深部探测结果进行了构造解释,将中国大陆岩石圈地壳划分为 3 种类型的地壳结构—动力学型式,包括克拉通型、增厚型与减薄型 (图 4)。

克拉通型包括挤压构造形成的褶推式结构以及伸展构造所形成的地垒结构,前者主要特征为类似于塔里木盆地的前陆盆地,而后者则以鄂尔多斯高原与周缘断陷盆地为特征。其地壳结构特点表现为克拉通块体地壳结构简单,壳内低速体不发育,而克拉通边缘则受挤压或伸展作用影响活动剧烈,壳内广泛发育低速体。李英康等 (2019) 对扬子板块与两侧龙门山和雪峰山的接触关系进行了地质与地球物理的研究,发现两侧造山带推覆于扬子板块之上,其构造样式与挤压克拉通的动力型式一致。

增厚型主要指板块俯冲所形成的造山带结构,包括陆陆碰撞所形成的扇形高原型结构 (青藏高原) 以及洋陆俯冲增生所形成的造山带楔状结构 (天山、大别山、台湾造山带等)。其中,楔状地壳结构是俯冲造山带中上地壳的典型地震反射特征 (Quinlan et al., 1993), 在天山、大别山等地区的人工地震测深和深反射剖面中都有体现,是洋壳向陆壳的俯冲过程中,伴随俯冲的逆冲断层形成的反射楔形体,此外其显著特点是发育高角度的拆离断层 (蔡学林等, 2004)。苏鲁造山带地壳结构特征也与俯冲造山动力型式类似,反映了扬子板块向华北板块俯冲而导致的造山作用 (Zhao Weina et al., 2019)。而陆陆碰撞通常形成类似于青藏高原的造山高原,其地壳结构特点为上地壳呈扇形向外逆冲推覆,中地壳广泛发育低速体,并以低角度拆离断层的形式导致了上下地壳变形的解耦。

减薄型地壳结构—动力学型式又可细分为华北类型的块体伸展所形成的盆岭结构以及华南类型的整体伸展所形成的铲状地壳结构。华北地区盆地下方莫霍面上隆,形成镜像对称的地壳结构样式,而华南地区则以区域伸展的单剪变形为特征,中地壳存在广泛发育而连续的壳内低速体,为该区域的构造拆离提供了条件 (蔡学林等, 2003, 2007)。

实际上,这些不同的地壳结构—动力学型式之

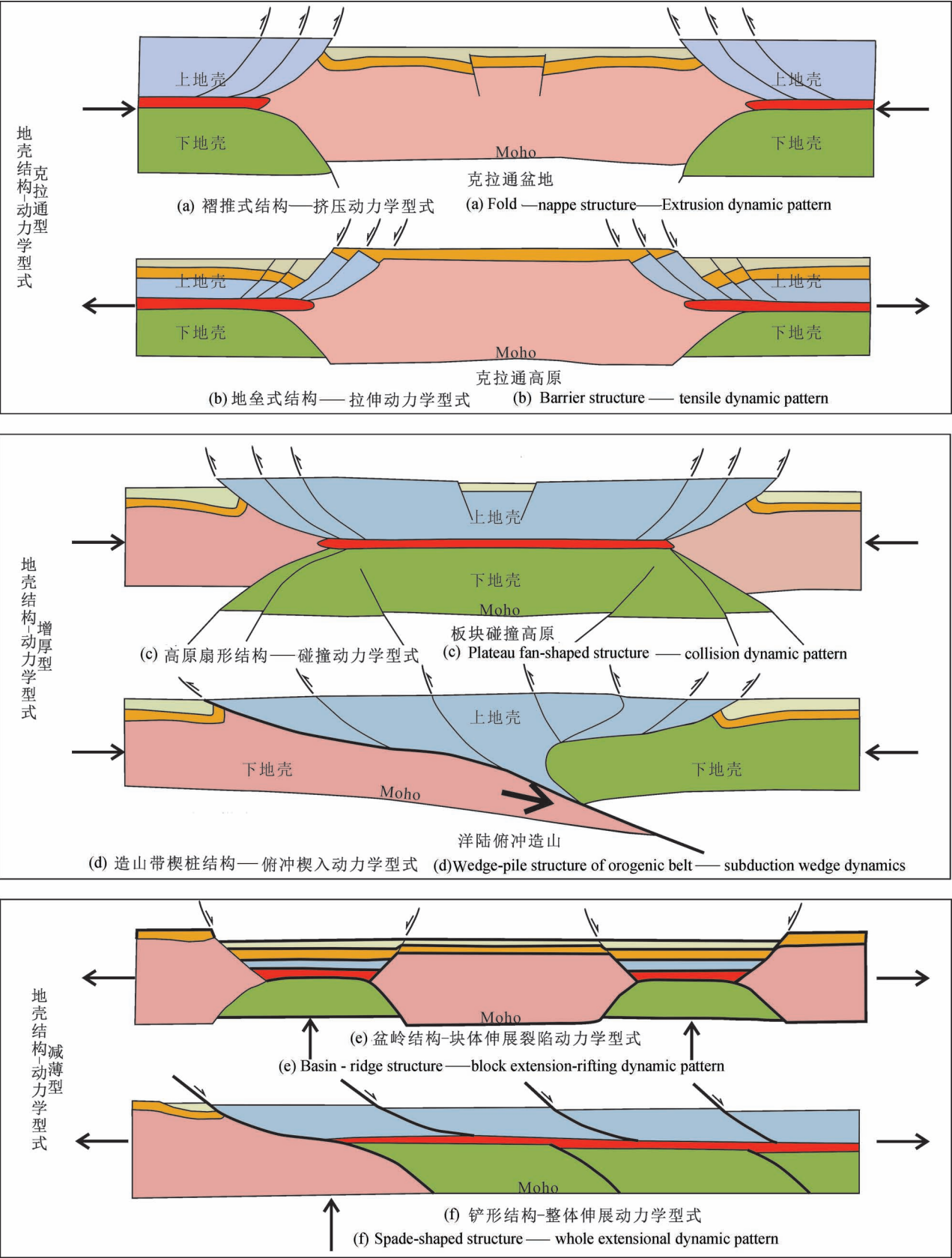


图 4 中国大陆地壳三维结构—动力学型式(据蔡学林等,2007)

Fig. 4 Three dimensional structure and dynamic types of continental crustal in China (modified after Cai Xuelin et al. , 2007&)

间又存在一定的联系,反映了不同的构造演化阶段。例如,前人研究指出完整的造山带演化一般经历造山楔、造山高原、造山后垮塌伸展和盆岭省 4 个旋回,相应发育高角度、低角度拆离断层与低角度、高角度伸展断层(张进江等,1996),这些不同的阶段可能就分别对应了增厚型与减薄型的不同地壳结构—动力型式。

地震测深剖面的构造解析,强调从研究区域的地壳速度结构入手,运用地球层块构造、比较构造学与解析构造学的理论和方法,分析地壳结构的几何构造样式,并结合区域地质构造研究结果,采用不同的动力学模式对地壳变形进行解释。但是由于构造变形历史复杂,多期构造叠加,不同期次的构造变形痕迹都保存在岩石圈内而被记录下来,使得现今的地球物理剖面上既包含了新生代的构造痕迹,也包含了中生代甚至古生代的构造变形特征,呈现出极为复杂的构造样式,影响了对区域动力学型式及演化过程的解释。因此,对人工地震测深结果的解释还需要对壳幔结构进行解构,结合区域大地构造演化历史,按照反时序将壳幔结构中不同期次的构造痕迹依次抹除,从而获得某一期大地构造作用之前的壳幔结构,据此逐步地恢复该区域的岩石圈演化过程。杨文采(2014a)利用苏鲁超高压变质带岩石圈的壳幔结构与大地构造研究结果,对区域壳幔结构的解构方法进行了详细的说明,该方法可以为地震测深资料的深部动力学研究提供良好的借鉴与指导。

通过人工地震测深资料的构造解析,构建地壳构造模型,可以为地壳构造的演化过程研究提供构造变形方面的约束,进而确定岩石圈演化的动力学过程,即原始壳幔是在什么应力背景下,受什么作用控制,在什么时间,以怎样的变形模式,形成了现今的壳幔结构。利用壳幔结构解构重建壳幔岩石圈演化过程的方法,虽然不是定量地恢复动力学过程,但是该方法综合了多学科的研究结果对演化模型进行约束,能够对深部过程(底侵、拆沉作用等)给出合理的解释(杨文采,2014c,2019),同时还能为下一步计算机数值模拟方法验证岩石圈的演化模式提供参考模型,因此是地球动力学研究从定性到定量研究的重要发展方向。

5 地壳成分与动力学数值模拟

地壳成分影响着地球的物质平衡与热结构,了解地壳成分组成及其变化对于理解地壳演化过程具有重要意义。深地震测深方法获得的地壳速度结

构,可以通过与岩石物理实验结果进行对比而推测地壳成分,为动力学研究提供依据(Rudnick and Fountain, 1995)。

Christensen 和 Mooney(1995)搜集了全球的深地震测深资料,并根据高温高压岩石物理实验结果,建立了地震波观测速度与地壳岩石的对应关系。但是根据地震 P 波速度与岩石高温高压实验结果对比来判定岩性的方法具有较强的非唯一性,而利用 V_p/V_s 和地震 P 波速度则可以较好地约束不同深度的岩性(Musacchio et al., 1997)。如图 5 所示,大陆上地壳一般以长英质岩石(例如花岗岩)为主,具有低的 P 波速度($<6.7 \text{ km/s}$)和波速比值(<1.78);中地壳则以混合岩化为主的角闪岩相(例如辉石,角闪石等)为主,具有较低的 P 波速度($6.6 \sim 7.1 \text{ km/s}$)和高的波速比值(>1.85);下地壳则以镁铁质岩石(麻粒岩等)为主,通常具有高的 P 波速度($>6.7 \text{ km/s}$)和高的波速比值(>1.86);而如果发生底侵作用,幔源岩浆进入地壳,一般会造成下地壳底部的高速特征($>6.9 \text{ km/s}$),泊松比也会相应地增大(≥ 0.28)。此外,拉梅阻抗方法以及综合多参数的链式约束法可以有效地降低地壳岩石结构构建的非唯一性(张晰,2007),地震各向异性作为岩石的主要特征之一,也能够较好地对不同岩性进行区分(Rudnick and Fountain, 1995)。

地壳成分的构建对于讨论地壳演化过程具有重要意义。高山等(1999)基于深地震测深资料,认识到中国东部下地壳成分特征与基性下地壳明显不同,可能存在下地壳的拆沉,反映了中国东部地壳可能具有更高的演化程度。此外,地壳成分还可以为地球动力学数值模拟提供重要的参数支撑。动力学数值模拟是目前研究大陆动力学的重要手段之一,是对岩石圈地质演化模式的验证,其基础是岩石圈温度结构与流变结构(石耀林等,2011)。由于地震测深对构建流变结构所需的地壳温度和流体含量等参数不够敏感,因此不能像大地电磁测深方法一样直接为动力学数值模拟提供关键参数的支撑(Unsworth, 2003)。但是人工地震测深获得的速度结构在岩石圈流变结构的计算中发挥着重要的基础作用,主要的应用包括两方面内容:①通过热流反演的方法可以将壳幔岩石圈速度结构转化为温度结构,从而为岩石圈热结构提供有效约束(安美建等,2007);②根据人工地震测深速度推测的地壳成分,选择代表性岩石对应的地壳流变参数。在温度结构与岩石流变参数的基础上,通过分层流变学等方法

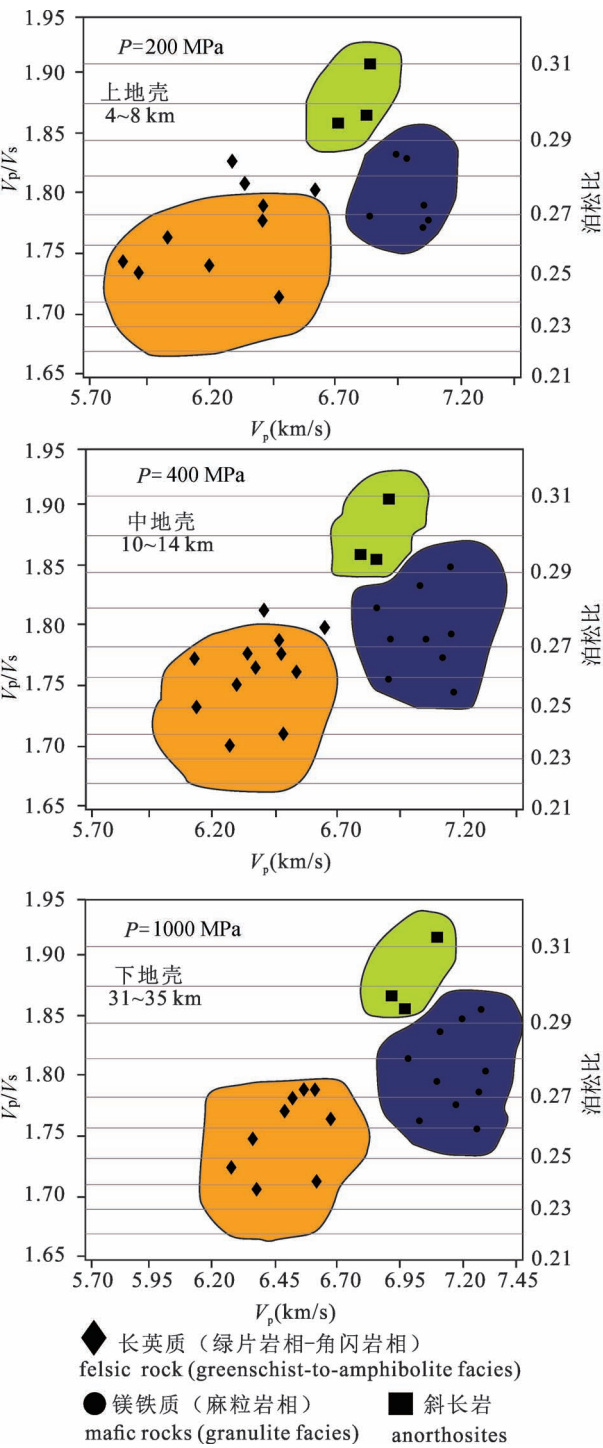


图 5 地震 P 波速度、泊松比与地壳成分对应图
(据 Musacchio et al., 1997)

Fig. 5 Correlation diagram of seismic V_p , Poisson's ratio and crustal composition (modified after Musacchio et al., 1997)

可以计算得到包括岩石强度、粘滞系数等参数的地壳流变结构(周永胜等,2003;马辉等,2011)。

深地震测深作为探测壳幔岩石圈精细结构的重

要方法,能够有效地揭示地壳结构的横向非均匀性与地震各向异性,还可以对地壳成分进行推测进而对地壳演化的动力学过程进行讨论。目前利用人工地震测深速度模型构建地壳成分结构的方法已经较为成熟,经过大量岩石物理实验以及多参数的综合约束,地壳成分模型的可靠性得到了提高,为揭示地壳演化过程提供了依据。随着地壳流变学在动力学研究中的重要性日益凸显,通过地壳成分与岩石流变参数之间的联系,人工地震测深资料在动力学研究中也发挥着更为重要的作用。深地震测深结果不仅为动力学模拟初始模型厚度与分层结构的设置提供了依据,还与模拟所需的温度结构和地壳岩石流变参数等密切相关,为地壳流变结构的计算提供了基础。以后在利用深地震测深资料进行动力学研究时,除了对震相和地壳速度结构进行分析,对地震各向异性、地壳深部构造以及地壳岩性等进行研究讨论壳幔岩石圈演化过程,还应当加强同地壳流变的联系,通过动力学模拟研究流变结构对岩石圈变形的控制作用。

6 结论

深地震测深是探测地壳上地幔岩石圈精细结构的重要手段,其获得的壳幔速度结构在动力学研究中发挥着重要的作用,具体的应用主要体现在以下几方面:

- (1)震相是深部动力学响应最为直接的体现,震相走时的截距、震相曲线的斜率以及波组的振幅和走时变化等,都反映了地壳结构的特征。
- (2)地壳速度结构分析是目前广泛应用的动力学研究方法。通过壳幔速度结构的对比,可以讨论不同构造单元的性质与演化过程;利用壳幔速度、地壳厚度以及泊松比等参数的对应关系,可以对地壳变形的模式进行讨论;地壳速度结构包含的速度变化,形成壳内的高速体或低速体,分析异常体的分布、成因及其对地壳变形的影响和控制作用,可以深化对区域动力学过程的认识。
- (3)深地震测深资料的各向异性研究发现了 P_n 地震各向异性和 S 波分裂等现象,但是受地震测线数量不足、分布不均匀、人工地震 S 波不发育等客观条件的限制,目前利用地震测深资料进行各向异性研究的成果相对较少。
- (4)现代构造解析方法是从地壳结构样式出发,将地壳结构与动力学过程联系起来,建立地壳构造动力学模型。目前的研究结果将中国大陆岩石圈

结构与动力型式分为克拉通型、增厚型与减薄型三大类,具体的每一类又可以细分为挤压与伸展、碰撞与增生、纯剪伸展与单剪拉伸。此外,通过对壳幔结构中历史构造变形痕迹的解构,还可以重建岩石圈的动力学演化过程。深地震测深结果的构造解析和解构,给出了壳幔岩石圈变形动力学的常见模式和动力学演化过程,对于后续资料的解释以及数值模拟等具有重要的参考价值。

(5)深地震测深速度结构与岩石物理实验结果可以对地壳组成成份进行约束,进而对地壳演化过程进行讨论。动力学数值模拟是验证岩石圈演化模式的重要手段,深地震测深数据在其中发挥着重要的作用,虽然不能直接提供模拟相关的参数,但是通过地壳组成成份与岩石流变参数的联系,可以利用地壳速度结构间接地计算地壳流变结构,为动力学数值模拟提供基础模型。

致谢:感谢中国地震局物探中心刘宝峰高级工程师的有益探讨,马策军工程师提供的原始数据。感谢审稿专家及编辑老师为本文的认真付出。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

安美建, 石耀霖. 2007. 中国大陆地壳和上地幔三维温度场. 中国科学(D 辑:地球科学), 37(6): 736~745.

包汉勇, 郭战峰, 张罗磊, 黄亚平. 2013. 盆地伸展系数求取方法与评价——以苏北盆地为例. 石油实验地质, 35(3): 331~346.

蔡学林, 魏显贵, 刘援朝, 曹家敏. 1996. 论楔入造山作用——以龙门山造山带为例. 四川地质报, 16(2): 97~102.

蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 刘顺, 郑圻森. 2003. 华南地区岩石圈三维结构类型与演化动力学. 大地构造与成矿学, 27(4): 301~312.

蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 袁学诚. 2004. 四川黑水—台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(5): 441~451.

蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 程先琼. 2007. 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构与动力学型式. 中国地质, 34(4): 543~557.

陈颢, 陈运泰. 1974. 晋中南地区地壳结构的初步研究. 地球物理学报, 17(3): 186~199.

邓阳凡, 李守林, 范蔚茗, 刘佳. 2011. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义. 地球物理学报, 54(10): 2560~2574.

高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹, Hartmut K. 1999. 中国东部地壳的结构和组成. 中国科学(D 辑:地球科学), 8(3): 204~213.

黄周传. 2011. 利用天然地震研究地球内部结构与动力学. 导师:王良书, 赵大鹏. 南京: 南京大学博士学位论文: 1~275.

嵇少丞, 王茜, 杨文采. 2009. 华北克拉通泊松比与地壳厚度的关系及其大地构造意义. 地质学报, 83(3): 324~330.

嘉世旭, 刘昌铨. 1995. 华北地区人工地震测深震相与地壳结构研

究. 地震地质, 17(2): 97~105.

嘉世旭, 李志雄, 徐朝繁, 沈繁鑫, 赵文俊, 杨卓欣, 杨键, 雷宛. 2006. 雷琼拗陷地壳结构特征. 地球物理学报, 49(5): 1385~1394.

金振民, 高山. 1996. 底侵作用(underplating)及其壳—幔演化动力学意义. 地质科技情报, 15(2): 1~7.

赖晓玲, 张先康, 成双喜, 方盛明. 2004. 张家口—渤海断裂带西缘壳幔过渡带研究. 地球物理学报, 47(5): 798~804.

李英康, 高建伟, 韩健, 杨予鄂. 2019. 扬子块体两侧造山带地壳推覆的地球物理证据及其地质意义. 中国科学(地球科学), 49(4): 687~705.

廖杰, 周蒂, 赵中贤, 张云帆, 徐子英. 2011. 伸展盆地构造演化的数值模拟——以南海北部白云凹陷为例. 地质通报, 30(1): 75~85.

梁光河. 2019. 贝加尔湖和汾渭裂谷成因之谜[OL]. [2020-02-10] <http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=1074480&do=blog&id=1197907>.

李秋生, 高锐, 张成科, 赵金仁, 管烨, 张季生. 2008. 残余壳根与“三明治”结构——燕山造山带中段地壳结构的主要特征. 地球学报, 29(2): 129~136.

李松林, 张先康, 张成科, 赵金仁, 成双喜. 2002. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究. 地球物理学报, 45(2): 210~217.

刘福田, 徐佩芬, 刘劲松, 尹周勋, 秦建业, 张先康, 张成科, 赵金仁. 2003. 大陆深俯冲带的地壳速度结构——东大别造山带深地震震角反射/折射研究. 地球物理学报, 46(3): 366~372.

刘明军, 李松林, 方盛明, 樊计昌, 赵丽. 2008. 利用地震波速研究青藏高原东北缘地壳组成及其动力学. 地球物理学报, 51(2): 412~430.

刘志, 张先康. 2000. 泰安—忻州剖面 S 波分裂计算及介质各向异性与深部构造相关性探讨. 地球物理学进展, 15(3): 61~69.

卢占武, 高锐, 李秋生, 管烨, 张季生, 贺日政, 黄立言. 2006. 中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究(1958~2004). 地球物理学报, 49(3): 753~770.

施小斌, 周蒂, 张毅祥, 丘学林. 2002. 南海西沙海槽岩石圈的密度结构与热—流变结构. 热带海洋学报, 21(2): 23~31.

石耀霖, 周元泽, 张怀, 王红才. 2011. 岩石圈三维结构与动力学数值模拟. 地球学报, 32(增刊 1): 125~135.

孙玉军, 董树文, 范桃园, 张怀, 石耀霖. 2013. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构. 地球物理学报, 56(9): 2936~2946.

滕吉文, 曾融生, 闫雅芬, 张慧. 2002. 东亚大陆及周边海域 Moho 界面深度分布和基本构造格局. 中国科学(D 辑), 32(2): 89~100.

滕吉文. 2006. 地球深部壳—幔边界的层束精细结构与物理属性研究. 吉林大学学报(地球科学版), 36(1): 1~23.

滕吉文, 皮娇龙, 杨辉, 刘少华. 2012. 中国大陆动力学研究内涵与轨迹的思考. 地球物理学报, 55(3): 131~142.

滕吉文, 李松岭, 张永谦, 王夫运, 皮娇龙, 赵金仁, 张成科, 乔勇虎, 胡国泽, 闫亚芬. 2014. 秦岭造山带与邻域华北克拉通和扬子克拉通的壳—幔精细速度结构与深层过程. 地球物理学报, 57(10): 3154~3175.

彭聪, 邓晋福, 邱瑞照. 2004. 地壳上地幔地震波速度结构和岩石学解释综述. 矿床地质, 23(增刊 1): 13~18.

王椿镛, 陈学波. 1997. 大别造山带地壳 S 波分裂和介质各向异性. 科学通报, 42(23): 2539~2542.

王椿镛, 李永华, 楼海. 2016. 与青藏高原东北部地球动力学相关的深部构造问题. 科学通报, 61(20): 2239~2263.

王光杰, 滕吉文, 张先康. 2007. 鲁西地区的地壳结构及壳内近直

立高速异常体的发现. 地球物理学报, 50(5): 1480~1487.

王帅军, 刘保金, 嘉世旭, 邓晓果, 宋向辉, 李怡青. 2017. 利用人工地震测深剖面研究银川盆地及两侧区域的 S 波速度结构. 地球物理学进展, 32(5): 1936~1943.

王欣欣, 赵亮, 杨建锋, 王坤, 吕刚. 2017. 利用动力学数值模拟实验探讨上地幔地震波速度结构图像的时效性. 中国科学: 地球科学, 47(9): 1110~1124.

徐涛, 张忠杰, 刘宝峰, 陈赓, 张明辉, 田小波, 徐义刚, 滕吉文. 2015. 峨眉山大火成岩省地壳速度结构与古地幔柱活动遗迹: 来自丽江—清镇宽角地震资料的约束. 中国科学(地球科学), 45(5): 561~576.

许志琴, 姜枚, 杨经绥. 1996. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用—以“格尔木—唐古拉山”地质及地球物理综合剖面为例. 地质学报, 70(3): 3~14.

许志琴, 杨经绥, 姜枚, 李海兵. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起. 地学前缘, 6(3): 139~148.

杨文采. 2014a. 固体地球物理学与板块大地构造学的交汇. 地学前缘, 21(1): 89~99.

杨文采. 2014b. 探测大陆岩石圈的属性、相态与物质运动: 固体地球物理学的新使命. 地质论评, 60(6): 1181~1198.

杨文采. 2014c. 从地壳上地幔构造看大陆岩石圈伸展与裂解. 地质论评, 60(5): 945~961.

杨文采, 宋海斌. 2014a. 从地壳上地幔构造看洋陆转换作用. 地质论评, 60(1): 1~21.

杨文采, 于常青. 2014b. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞作用(上). 地质论评, 60(2): 237~259.

杨文采, 于常青. 2014c. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞作用(下). 地质论评, 60(3): 486~502.

杨文采, 于常青. 2014d. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞带岩石圈的克拉通化. 地质论评, 60(4): 721~740.

杨文采, 于常青. 2015. 根据形成地质作用对中国大陆岩石圈作构造分区. 地质论评, 61(4): 709~716.

杨文采. 2015. 从扩充的威尔逊循环看中国大陆演化轨迹. 地质论评, 61(2): 237~244.

杨文采, 瞿辰, 侯遵泽, 颜苹, 于常青. 2017a. 中国大陆克拉通地体地壳密度结构特征. 地质论评, 63(4): 843~853.

杨文采, 瞿辰, 侯遵泽, 颜苹, 于常青. 2017b. 中国大陆造山带地壳密度结构特征. 地质论评, 63(3): 539~548.

杨文采, 侯遵泽, 徐义贤, 颜萍. 2017c. 青藏高原下地壳热变形和管道流研究. 地质论评, 63(5): 1141~1152.

杨文采. 2019. 岩石圈—软流圈物质循环促进大陆增生的新方式. 地质论评, 65(5): 1039~1053.

杨文采. 2020a. 浅地幔系统的组成和属性相态. 地质论评, 66(2): 263~275.

杨文采. 2020b. 浅地幔系统的动力学作用. 地质论评, 66(3): 521~532.

杨文采, 曾祥芝. 2020. 认知地球物质运动的大陆动力学方法. 地质论评, 66(1): 1~12.

袁学诚. 1997. 秦岭造山带地壳构造与楔入成山. 地质学报, 71(3): 37~45.

曾融生, 阚荣举, 何传大, 李彭年. 1960. 柴达木盆地低频地震探测结晶基底的工作方法. 地球物理学报, 9(2): 155~168.

张进江, 郑亚东. 1996. 造山带伸展构造机制综述. 地质科技情报, 15(3): 27~35.

张晰. 2007. 大陆地壳岩石结构重建: 方法与实例. 导师: 张中杰. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所博士学位论文: 1~86.

张永谦, 滕吉文, 王夫运, 赵文智, 李明, 王谦身. 2011. 阴山造山带及鄂尔多斯盆地北部地区上地壳的地震波属性结构及岩性推断. 地球物理学报, 54(1): 87~97.

张中杰, 白志明, 王椿镛, 吕庆田, 滕吉文, 李继亮, 孙善学, 王新征. 2005. 冈瓦纳型和扬子型地块地壳结构: 以滇西孟连—马龙宽角反射剖面为例. 中国科学(D 辑: 地球科学), 35(5): 387~392.

张中杰, 刘一峰, 张素芳, 范蔚茗, 陈林. 2010. 琼东南盆地地壳伸展深度依赖性及其动力学意义. 地球物理学报, 53(1): 57~66.

赵俊猛, 张先康, 赵国泽. 1999. 不同构造环境下的壳—幔过渡带结构. 地学前缘, 6(3): 165~172.

赵俊猛, 刘国栋, 赵国泽, 卢造勋, 张先康. 2001. 天山造山带与准噶尔盆地壳幔过渡带及其动力学含义. 中国科学(D 辑), 31(4): 272~282.

郑圻森, 朱介寿, 宣瑞卿, 蔡学林. 2003. 华南地区地壳速度结构分析. 沉积与特提斯地质, 23(4): 9~13.

周小鹏, 王晓, 张新彦, 白志明, 滕吉文. 2015. 探测壳内低速层的深地震测深方法及应用. 地质科学, 50(4): 1244~1260.

周永胜, 何昌荣. 2003. 地壳主要岩石流变参数及华北地壳流变性质研究. 地震地质, 25(01): 110~123.

朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 严忠琼. 2003. 中国及邻近陆域海域地球内部三维结构及动力学研究. 地球科学进展, 18(4): 497~503.

朱金芳, 徐锡伟, 张先康, 黄宗林, 陈祥熊, 方盛明, 刘保金, 郑荣章. 2005. 福州盆地及邻区地壳精细结构的深地震反射与高分辨率折射及宽角反射/折射联合探测研究. 中国科学(地球科学), 35(8): 738~749.

朱涛, 马宗晋, 冯锐. 2006. 三维地震波速结构约束下的变黏度地幔对流及其动力学意义. 地球物理学报, 49(5): 1347~1358.

Abbott D H, Mooney W D, Vantongeren J A. 2013. The character of the Moho and lower crust within archean cratons and the tectonic implications. Tectonophysics, 609: 690~705

Allken V, Huisman R S, Thieulot C. 2012. Factors controlling the mode of rift interaction in brittle—ductile coupled systems: A 3D numerical study. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 13: Q05010.

An Meijian, Shi Yaolin. 2007#. Three-dimensional thermal structure of the Chinese continental crust and upper mantle. Science China Earth Sciences, 37(6): 736~745.

Bamford D. 1977. Pn velocity anisotropy in a continental upper mantle. Geophysical Journal International, 49(1): 29~48.

Bamford D, Jentsch M, Prodehl C. 1979. Pn anisotropy studies in northern Britain and the eastern and western United States. Geophysical Journal International, 57(2): 397~429.

Bao Hanyong, Guo Zhanfeng, Zhang Luolei, Huang Yaping. 2013#. Calculating methods and assessment of stretching factor: A case study of Northern Jiangsu Basin. Petroleum Geology & Experiment, 35(3): 331~346.

Braile L W, Chiang C S. 1986. The continental Mohorovicic discontinuity: Results from near-vertical and wide-angle seismic refraction studies. Reflection Seismology: A Global Perspective, 13: 257~272.

Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B6): 9761~9788.

Cai Xuelin, Wei Xiangui, Liu Yuanchao, Cao Jiamin. 1996#. On wedge-in orogeny—On the example of the Longmenshan orogenic belt. Acta Geologica Sichuan, 16(2): 97~102.

Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Liu Shun, Zheng Qisen. 2003#.

- Three-dimensional tectonic types and evolutional dynamics of lithosphere of South China region. *Geotectonic et Metallogenia*, 27(4): 301~312.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Yuan Xuecheng. 2004&. Structures of lithosphere and asthenosphere in Heishi of Sichuan—Hualian of Taiwan profile. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(5): 441~451.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cheng Xianqiong. 2007&. 3D structure and dynamic types of the lithospheric crust in continental China and its adjacent regions. *Geology in China*, 34(4): 543~557.
- Cerveny V. 1972. Seismic rays and ray intensities in inhomogeneous anisotropic media. *Geophysical Journal International*, 29(1): 1~13.
- Chen Rong, Chen Yuntai. 1974&. Preliminary results of the investigation of the crustal structure of the south—central part of Shanxi Province. *Chinese J. Geophys.*, 17(3): 186~199.
- Chandrakala K, Pandey O P, Mall D M, Sarkar D. 2010. Seismic signatures of a proterozoic thermal plume below southwestern part of the Cuddapah Basin, Dharwar craton. *Journal of the Geological Society of India*, 76(6), 565~572.
- Durrheim R J, Mooney W D. 1991. Archean and Proterozoic crustal evolution: Evidence from crustal seismology. *Geology*, 19(6): 606~609.
- Deng Yangfan, Li Shoulin, Fan Weiming, Liu Jia. 2011&. Crustal structure beneath South China revealed by deep seismic soundings and its dynamics implications. *Chinese J. Geophys.*, 54(10): 2560~2574.
- Deng Yangfan, Chen Lin, Xu Tao, Wu Jing, Romanelli Fabio, Panza Giuliano Francesco. 2017. Lateral variation in seismic velocities and rheology beneath the Qinling—Dabie orogen. *Science China Earth Sciences*, 60(3): 576~588.
- Drummond B J, Goleby B, Swager C P. 2000. Crustal signature of Late Archaean tectonic episodes in the Yilgarn Craton, Western Australia: Evidence from deep seismic sounding. *Tectonophysics*, 329(1~4): 193~221.
- Dyksterhuis S, Rey P, Muller R D, Moresi L. 2007. Effects of initial weakness on rift architecture. *Geological Society London Special Publications*, 282(1): 443~455.
- Frank P. 1961. The earth's crust and upper mantle. *Science*, 133: 1455~1463.
- Fuchs K, Müller G. 1971. Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations. *Geophysical Journal International*, 23(4): 417~433.
- Fuchs K. 1979. Structure, physical properties and lateral heterogeneities of the subcrustal lithosphere from long-range deep seismic sounding observations on continents. *Tectonophysics*, 56(1~2): 1~15.
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, Zhang Hongfei, Han Yinwen, Zhao Zhidan, Kern H. 1999#. Crust structure and composition of Eastern China. *Science China Earth Sciences*, 8(3): 204~213.
- Giese P. 1968. Versuch einer Gliederung der Erdkruste im nördlichen Alpenvorland, in den Ostalpen und in Teilen der Westalpen mit Hilfe charakteristischer Refraktions-Laufzeit-Kurven sowie eine geologische Deutung. *Geophys. Abh.*, 1(2): 202.
- Goes S, Govers R, Vacher A P. 2000. Shallow mantle temperatures under Europe from P and S wave tomography. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 105(B5): 11153~11169.
- Hess H H. 1964. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans. *Nature*, 203: 629~631.
- Herglotz G. 1907. Über das Benndorf'sche Problem der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenstrahlen. *Physikal. Zeitschr.*, 8: 145~147.
- Huang Zhouchuan. 2011&. A seismological study of structure and dynamics in the Earth: Mainland China and Northeast Japan as examples. Supervisor: Wang Liangshu, Zhao Dapeng. Nanjing University Ph. D. Dissertation: 1~275.
- Jamieson R A, Unsworth M J, Harris N B, Rosenberg C. 2011. Crustal melting and the flow of mountains. *Elements*, 7(4): 253~260.
- Jia Shixu, Liu Changquan. 1995&. Study of the seismic phase of DSS in North China. *Seismology and Geology*, 17(2): 97~105.
- Jia Shixu, Li Zhixiong, Xu Zhaofan, Shen Fanluan, Zhao Wenjun, Yang Zhuoxin, Yang Jian, Lei Wan. 2006&. Crustal structure features of the Leiqiong depression in Hainan Province. *Chinese J. Geophys.*, 49(5): 1385~1394.
- Ji Shaocheng, Wang Qian, Yang Wencai. 2009&. Correlation between crustal thickness and Poisson's ratio in the North China craton and its implication for lithospheric thinning. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 324~330.
- Jin Zhenmin, Gaoshan. 1996&. Underplating and its geodynamical significances for the evolution of crust—mantle boundary. *Geological Science and Technology Information*, 15(2): 1~7.
- Kaila K L, Chowdhury K R, Reddy P R, Krishna V G, Narain H, Subbotin S I, Sollogub V B, Chekunov A V, Lazarenko M A, Ilchenko T V. 1979. Crustal structure along Kavali—Udipi profile in the Indian peninsular shield from deep seismic sounding. *J. Geol. Soc. India*, 20(7): 307~333.
- Kosminskaya I P. 2012. Deep seismic sounding of the Earth's crust and upper mantle. Springer Science & Business Media: 1~184.
- Lai Xiaoling, Zhang Xiankang, Cheng Shuangxi, Fang Shengming. 2004&. Study on crust—mantle transitional zone in west margin of Zhangjiakou—Bohai fault belt. *Chinese J. Geophys.*, 47(5): 798~804.
- Luetgert J H. 1988. User's manual for ray84/r83plt — interactive two dimensional ray tracing/synthetic seismogram package: U. S. Geological Survey Open-File Report, 238.
- Li Qiusheng, Gao Rui, Zhang Chengke, Zhao Jinren, Guan Ye, Zhang Jisheng. 2008&. Remainder crustal root and decoupling—Main characteristics of crust structure beneath the Yanshan intracontinent orogen. *Acta Geosciences Sinica*, 29(2): 129~136.
- Li Songlin, Mooney W D, Fan Jichang. 2006. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data. *Tectonophysics*, 420(1~2): 239~252.
- Li Songlin, Zhang Xiankang, Zhang Chengke, Zhao Jinren, Cheng Shuangxi. 2002&. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin—Lanzhou—Jingbian by means of deep seismic sounding profile. *Chinese J. Geophys.*, 45(2): 210~217.
- Li Yingkang, Gao Jianwei, Han Jian, Yang Yu'e. 2019#. Geomaterials geophysical evidence for thrusting of crustal materials from orogenic belts over both sides of the Yangtze Block and its geological significance. *Science China: Earth Sciences*, 49(4): 687~705.
- Liao Jie, Zhou Di, Zhao Zhongxian, Zhang Yunfan, Xu Ziyang. 2011&. Numerical modeling of the tectonic evolution of extensional basin: Take Baiyun sag of northern South China Sea for example. *Geological Bulletin of China*, 30(1): 71~81.
- Liang Guanghe. 2019#. The formation mystery of the Baikal Lake and Fenwei rift [OL]. [2020-02-10] <http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=1074480&do=blog&id=1197907>.
- Lin Jiyan, Mooney W D, Wang Fuyun, Duan Yonghong, Tian Xiaofeng,

- Xu Tao, Deng Youguo. 2019. Crustal P wave velocity structure beneath the SE margin of the Tibetan Plateau from deep seismic sounding results. *Tectonophysics*, 755: 109~126.
- Liu Futian, Xu Peifen, Liu Jinsong, Yin Zhouxun, Qin Jianye, Zhang Xiankang, Zhang Chengke, Zhao Jinren. 2003&. The crustal velocity structure of the continental deep subduction belt; Study on the eastern Dabie orogen by seismic wide-angle reflection/refraction. *Chinese J. Geophys.*, 46(3): 366~372.
- Liu Zhi, Zhang Xiankang. 2000&. S-wave splitting calculation and discussion about the correlativity between medium anisotropy and deep structure from the Tai'an—Xinzhou DSS profile. *Chinese J. Geophys.*, 15(3): 61~69.
- Liu Zhi, Wang Fuyun, Yang Jian. 2007&. A method for automatically identifying and calculating the uncertainty in phase picking. *Progress in geophysics*, 22(3): 924~928.
- Liu Mingjun, Li Songlin, Fang Shengming, Fan Jichang, Zhao Li. 2008&. Study on crustal composition and geodynamics using seismic velocities in the northeastern margin of the Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.*, 51(2): 412~430.
- Lu Zhanwu, Gao Rui, Li Qiusheng, Guan Ye, Zhang Jisheng, He Rizheng, Huang Liyan. 2006&. Deep geophysical probe and geodynamic study on the Qinghai Tibet Plateau (1958~2004). *Chinese J. Geophys.*, 49(3): 753~770.
- Ma Hui, Xu Hehua, Shi Xiaobin, Chen Aihua, Liu Tangwei. 2011&. Lithospheric thermal-rheological structure of Nansha through foreland basin in South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(5): 157~166.
- Meissner R, Mooney W D, Artemieva I M. 2002. Seismic anisotropy and mantle creep in young orogens. *Geophysical Journal International*, 149(1): 1~14.
- Michel B, Hirn A. 1980. Velocity—depth estimation from wide angle seismic reflection arrivals. *Annals de Geophysique*, 36(1): 107~118.
- Mooney W D, Brocher T M. 1987. Coincident seismic reflection/refraction studies of the continental lithosphere: A global review. *Review of Geophysics*, 25, 723~742.
- Mooney W D, Laske G, Masters T G. 1998. Crust 5. 1: A global crustal model at $5^{\circ} \times 5^{\circ}$. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B1): 727~747.
- Musacchio G, Mooney W D, Luetgert J H, Christensen, N I. 1997. Composition of the crust in the grenville and appalachian provinces of north America inferred from V_p/V_s ratios. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102(B7): 15225~15241.
- Pan Suzhen, Niu Fenglin. 2011. Large contrasts in crustal structure and composition between the Ordos plateau and the NE Tibetan plateau from receiver function analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3~4): 291~298.
- Peng Cong, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao. 2004&. Seismic wave velocity structure of crust and upper mantle and petrological interpretation. *Mineral Deposits*, 23(Supp. 1): 13~18.
- Quinlan G, Beaumont C, Hall J. 1993. Tectonic model for crustal seismic reflectivity patterns in compressional orogens. *Geology*, 21(7): 663~666.
- Raitt R W. 1963. Seismic refraction studies of the Mendocino fracture zone. *Int. Assoc. Phys. Oceanogr.*, 13th General Assembly, Berkeley, 6: 71.
- Rey P F, Teyssier C, Whitney D L. 2009. The role of partial melting and extensional strain rates in the development of metamorphic core complexes. *Tectonophysics*, 477(3): 135~144.
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267.
- Shearer P M. 1999. *Introduction to Seismology*. Cambridge: Cambridge University Press: 1~260.
- Shi Xiaobin, Zhou Di, Zhang Yixiang, Qiu Xuelin. 2002 &. Density, thermal and rheological structures of Xisha trough, South China sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2): 23~31.
- Shi Yaolin, Zhou Yuanze, Zhanghuai, Wang Hongcai. 2011&. Three-dimensional structure of the lithosphere and dynamic numerical simulation. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(Supp. 1): 125~135.
- Song Xianghui, Wang Shuaijun, Wang Fuyun, Liu Baofeng, Gao Zhanyong, Yang Yudong, Ma Cejun. 2019a. Crustal low velocity zone beneath the Northeastern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 93(Supp. 2): 207~208.
- Song Xianghui, Wang Shuaijun, Wang Fuyun, Ma Cejun. 2019b. Refraction-based study of Pn velocity anisotropy beneath the Ordos Block. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 93(Supp. 2): 205~206.
- Sun Yujun, Dong Shuwen, Fan Taoyuan, Zhang Huai, Shi Yaolin. 2013&. 3D rheological structure of the continental beneath China and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.*, 56(9): 2936~2946.
- Teng Jiwen, Zeng Rongsheng, Yan Yafen, Zhang Hui. 2002#. Moho depth distribution and basic tectonic pattern of East Asia and its adjacent seas. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 32(2): 89~100.
- Teng Jiwen. 2006&. Research on layer bundle fine structure and physical attributes of crust mantle boundary in deep earth, *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(1): 1~23.
- Teng Jiwen, Pi Jialong, Yang Hui, Liu Shaohua. 2012&. The ponder for study the intension and locus of continental dynamics in China. *Chinese J. Geophys.*, 55(3): 131~142.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Zhang Xiankang, Wang Chunyong, Gao Rui, Yang Baojun, Qiao Yonghu, Deng Yangfan. 2013. Investigation of the Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles. *Tectonophysics*, 609: 202~216.
- Teng Jiwen, Li Songling, Zhang Yongqian, Wang Fuyun, Pi Jialong, Zhao Jinren, Zhang Chengke, Qiao Yonghu, Hu Guoze, Yan Yafen. 2014&. Fine velocity structures and deep processes in crust and mantle of the Qinling orogenic belt and the adjacent North China craton and Yangtze craton. *Chinese J. Geophys.*, 57(10): 3154~3175.
- Thybo H, Luetgert J. 1990. Ray84PC: Two-dimensional ray tracing and synthetic seismogram calculation on personal computers. Open file report, Institute of Geology, Copenhagen: 1~41.
- Tian Xiaobo, Liu Zhen, Si Shaokun, Zhang Zhongjie. 2014. The crustal thickness of NE Tibet and its implication for crustal shortening. *Tectonophysics*, 634: 198~207.
- Unsworth M. 2003. Studying continental dynamics with magnetotelluric exploration. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 25~38.
- Wang Chunyong, Chen Xuebo. 1997#. S wave split and material anisotropy of the crust in Dabieshan orogenic belt. *Chinese Science Bulletin*, 42(23): 2539~2542.
- Wang Chunyong, Li Yonghua, Lou Hai. 2016&. Issues on crustal and upper-mantle structures associated with geodynamics in the northeastern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 61(20): 2239~2263.
- Wang Guangjie, Teng Jiwen, Zhang Xiankang. 2007&. The crustal structure of western Shandong and the high-velocity body in the crust. *Chinese J. Geophys.*, 50(5): 1480~1487.

- Wang Shuaijun, Liu Baojin, Jia Shixu, Deng Xiaoguo, Song Xianghui, Li Yiqing. 2017#. Study on S-wave velocity structure difference of Yinchuan basin and blocks on both sides using artificial seismic sounding profiles. *Progress in Geophysics*, 32(5): 1936~1943.
- Wang Xinxin, Zhao Liang, Yang Jianfeng, Wang Kun, Lü Gang. 2017#. Discuss the seismic velocity structure time-varying of the upper mantle through dynamic simulation experiment. *Science China: Earth Sciences*, 47(9): 1110~1124.
- Wiechert E. 1910. Bestimmung des Weges von Erdbebenwellen I. *Theoretisches, Phys. Z.*, 11: 294~304.
- Xu Tao, Zhang Zhongjie, Liu Baofeng, Chen Bin, Zhang Minghui, Tian Xiaobo, Xu Yigang, Teng Jiwen. 2015#. Crustal velocity structure in the Emeishan large igneous province and evidence of the Permian mantle plume activity. *Science China: Earth Sciences*, 45(5): 561~576.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, Li Haibing. 1999#. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai—Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 139~148.
- Xu Zhiqin, Jiangmei, Yang Jingsui. 1996#. Tectonophysical process at depth for the uplift of the Northern part of the Qinghai—Tibet Plateau: Illustrated by the geological and geophysical comprehensive profile from Golmud to the Tanggula Mountains, Qinghai Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 3~14.
- Yang Wencai. 2014a#. Solid earth geophysics mingles with plate tectonics. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 89~99.
- Yang Wencai. 2014b#. Exploring lithospheric attribute, phases and mass motion: New mission to the solid earth geophysics. *Geological Review*, 60(6): 1181~1198.
- Yang Wencai. 2014c#. Continental extension and rifting reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. *Geological Review*, 60(5): 945~961.
- Yang Wencai, Song Haibin. 2014a#. Ocean—Continent transition process revealed by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. *Geological Review*, 60(1): 1~21.
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2014b#. Reflection seismology, theory, data processing and interpretation. Waltham: Elsevier. Continental collision process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (I). *Geological Review*, 60(2): 237~259.
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2014c#. Continental collision process reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (II). *Geological Review*, 60(3): 486~502.
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2014d#. Cratonization processes of continental collision belts; reveled by worldwide comparison of crust and upper mantle structures. *Geological Review*, 60(4): 721~740.
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2015#. Tectonic divisions of the Chinese continental lithosphere based on forming tectonic processes. *Geological Review*, 61(4): 709~716.
- Yang Wencai. 2015#. Evolutional trajectory of the Chinese continental lithosphere reveled by the expanded Wilson cycle. *Geological Review*, 61(2): 237~244.
- Yang Wencai, Qu Chen, Hou Zunze, Yan Ping, Yu Changqing. 2017a#. Crustal density structures of Craton terrains in continent of China. *Geological Review*, 63(4): 843~853.
- Yang Wencai, Qu Chen, Hou Zunze, Yan Ping, Yu Changqing. 2017b#. Crustal density structures beneath Orogenic Belts of Chinese continent. *Geological Review*, 63(3): 539~548.
- Yang Wencai, Hou Zunze, Xu Yixian, Yan Ping. 2017c#. A study on thermal deformation and lower crust channel flows in Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. *Geological Review*, 63(5): 1141~1152.
- Yang Wencai. 2019#. A new mode for continental accretion induced by interaction between the lithosphere and asthenosphere. *Geological Review*, 65(5): 1039~1053.
- Yang Wencai. 2020a#. On composition, attributes and phases of the shallow- mantle system. *Geological Review*, 66(2): 263~275.
- Yang Wencai. 2020b#. On dynamic processes of the shallow- mantle system. *Geological Review*, 66(3): 521~532.
- Yang Wencai, Zeng Xiangzhi. 2020#. Continental dynamics with cognition of Earth matter movement. *Geological Review*, 66(1): 1~12.
- Yang Xiaosong, Ma Jin, Zhang Xianjin. 2003#. Summarization of genesis of low-velocity layer in continental crust. *Geological Science and Technology Information*, 22(2): 35~41.
- Yuan Xuecheng. 1997#. The crustal structure of the Qinling Orogen and wedging mountain building. *Acta Geologica Sinica*, 71(3): 37~45.
- Zelt C A, Smith R B. 1992. Seismic travel time inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophysical Journal International*, 108(1): 16~34.
- Zeng Rongsheng, Kan Rongju, He Chuanda, Li Pengnian. 1960#. A study of the crystalline basement in Chaidamu Basin by low frequency refraction seismic method. *Chinese J. Geophys.*, 9(2): 155~168.
- Zhao Junmeng, Zhang Xiankang, Zhao Guoze. 1999#. Structure of crust—mantle transitional zone in different tectonic environments. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 165~172.
- Zhao Junmeng, Liu Guodong, Zhao Guoze, Lu Zaoxun, Zhang Xiankang. 2001#. Crust—mantle transitional zone of Tianshan orogenic belt and Junggar Basin and its geodynamic implication. *Science China: Earth Sciences*, 31(4): 272~282.
- Zhao Weina, Wang Huigang, Shi Hongcai, Xie Hui, Wu Zhiqiang, Chen Shanshan, Zhang Xunhua, Hao Tianyao, Zheng Yanpeng. 2019. Crustal structure from onshore—offshore wide-angle seismic data; Application to Northern Sulu Orogen and its adjacent area. *Tectonophysics*, 770: 228220.
- Zhang Jinjiang, Zheng Yadong. 1996#. Review on the mechanisms of orogenic extension. *Geological Science and Technology Information*, 15(3): 27~35.
- Zhang Xi. 2007#. Reconstructing crustal lithological structure: methods and examples. Supervisor: Zhang Zhongjie. Beijing: Chinese Academy of Sciences Institute of Geology and Geophysics, Ph. D. Dissertation; 1~86.
- Zhang Xi, Tsang L H, Wang Yanghua, Zhao Bing. 2009. Petrologic composition model of the upper crust in Bohai Bay basin, China, based on lamé impedances. *Applied Geophysics*, 6(4): 327~336.
- Zhang Yongqian, Teng Jiwen, Wang Fuyun, Zhao Wenzhi, Li Ming, Wang Qianshen. 2011#. Structure of the seismic wave property and lithology deduction of the upper crust beneath the Yinshan orogenic belt and the northern Ordos block. *Chinese J. Geophys.*, 54(1): 87~97.
- Zhang Zhongjie, Bai Zhiming, Wang Chunyong, Lü Qingtian, Teng Jiwen, Li Jiliang, Sun Shanxue, Wang Xinzhen. 2005#. Crustal structure of Gondwana- and Yangtze-typed blocks: An example by wide-angle seismic profile from Menglian to Malong in western Yunnan. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 35(5): 387~392.
- Zhang Zhongjie, Liu Yifeng, Zhang Sufang, Fan Weiming, Chen Lin. 2010#. The depth-dependence of crustal extension beneath Qiongdongnan basin area and its tectonic implications. *Chinese J.*

Geophys. , 53(1) : 57~66.

Zhang Zhongjie, Deng Yangfan, Teng Jiwen, Wang Chunyong, Gao Rui, Chen Yun, Fan Weiming. 2011. An overview of the crustal structure of the Tibetan plateau after 35 years of deep seismic soundings. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4) : 977~989.

Zhang Zhongjie, Yang, Liqiang, Teng Jiwen, Badal Jose. 2011. An overview of the earth crust under China. *Earth Science Reviews*, 104(1~3) : 143~166.

Zheng Qisen, Zhu Jieshou, Xuan Ruiqing, Cai Xuelin. 2003&. An approach to the crustal velocities in southern China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23(4) : 9~13.

Zhou Xiaopeng, Wang Xiao, Zhang Xinyan, Bai Zhiming, Teng Jiwen. 2015&. Exploration methods for crustal low velocity layer in deep seismic sounding. *Chinese Journal of Geology*, 50(4) : 1244 ~ 1260.

Zhou Yongsheng, He Changrong. 2003&. Rheological parameters of crustal rocks and crustal rheology of Norht China. *Seismology and Geology*, 25(1) : 110~123.

Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, Yan Zhongqiong. 2003&. Study for three-dimensional structure of earth interior and geodynamics in China and adjacent land and sea regions. *Advance in Earth Sciences*, 18(4) : 497~503.

Zhu Jinfang, Xu Xiwei, Zhang Xiankang, Huang Zonglin, Chen Xiangxiong, Fang Shengming, Liu Baojin, Zheng Rongzhang. 2005#. Fine crust structure of the Fuzhou basin and adjacent region with deep seismic reflection and high resolution wide angle reflection / refraction sounding method. *Science China Earth Sciences*, 35(8) : 738~749.

Zhu Tao, Ma Zongjin, Feng Rui. 2006&. 3-D lateral variable viscosity mantle convection constrained by seismic wave velocity and its geodynamic implications. *Chinese J. Geophys.*, 49(5) : 1347 ~ 1358.

Deep dynamic research method and its application based on the deep seismic sounding

SONG Xianghui^{1, 2)}, TIAN Xiaofeng²⁾, LIU Shaofeng¹⁾, WANG Shuaijun²⁾, YANG Yudong²⁾

1) *China University of Geosciences, Beijing*, 100083;

2) *China Earthquake Administration, Geophysical Exploration Center, Zhengzhou*, 450002

Abstract: Deep seismic sounding (DSS) played crucial role in the crustal and mantle velocity structure detection, crustal deformation analysis and dynamics research of plateau uplift and craton destruction. However, the deep dynamic research with DSS data is still limited at the results description stage. For this reason, this paper summarizes the continental dynamic research methods based on the deep seismic sounding data. Results show significant and dramatic application of DSS data in the dynamic research. Wide angle reflection and refraction seismic phases are notable respond to dynamic process and lay the foundation of dynamic research. Crustal velocity contrast and analysis is important to verify the tectonic units and its evolution. Crustal factors, including thickness, Poisson’s ratio, velocity, especially the abnormal velocity zones, can provide insight to the crustal growth and deformation. Moreover, the phenomenon of S-wave split and Pn velocity versus azimuth are identified as seismic anisotropy indication and provide independent evidence for the dynamic research. With modern structure analytical methods, crustal structures models can be divided into three types of crustal-dynamical styles, and then the lithosphere evolution could be inferred from deconstruction of the models. Furthermore, DSS data provide constraints on the reconstructing petrologic composition modeland supply key factors of temperature and rheological properties for the dynamic simulation. This paper is essential to excavate the potential value of DSS data in dynamic research, as well as to link the DSS a close association with other geosciences disciplines.

Keywords: deep seismic sounding; seismic phases analysis; crustal velocity structure; seismic anisotropy; tectonic analysis; crust composition; continental dynamic

Acknowledgements: This study was supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41774071)

First author: SONG Xianghui, male, born in 1988, Ph. D. candidate, majoring in deep seismic sounding data processing and geodynamic interpretation; Email: songxh@ gec. ac. cn

Manuscript received on; 2020-03-04; Accepted on; 2020-08-10; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 01. 016