

中国地震层析成像的研究

Research on Earthquake Seismic Tomography

刘建华 吴华

(中国科学院地球物理研究所)

提 要 本文简要评述地震层析成像的定义、发展历史和研究现状,以及我国在此领域内取得的主要成果,着重描述大尺度和区域尺度三维速度图象重建的主要成果。这里,没有涉及反射、衍射等层析成像方法及结果。

地震波的传播携带地球内部结构的许多重要信息。研究地球内部结构以及地球介质的横向不均匀性一直为地球科学家所瞩目。这是因为其研究成果对于探索地球奥密(诸如地球的形成、演化规律等)的基础研究,了解地球内部矿产资源的生成规律和勘探等生产建设,以及对地震成因、地震预报等减灾的实际需要都有重大意义。

本世纪初,地震学家将地球近似分成性质不同的同心壳层,这种地球内部以径向为主的非均匀性结构曾成功地解释了大量地球物理观测。然而,随着科学的不断发展,研究工作的日益深入,发现地球内部绝大多数地区存在横向不均匀性。近年来,在全球范围内建立起世界标准地震台网(WWSSN),各个国家和地区相继架设地震台网和一些密集的台阵,积累了大量的观测精度较高的地震数据,以及高速大内存量计算机设备的使用,这都促进了地球内部横向不均匀性研究的飞速发展。地震层析成像技术则是近年来发展起来的研究地球内部构造的一种最新最有效的工具,其研究成果使国内外科学家受到鼓舞,一些人甚至认为这可能意味着地球科学革命的到来。

“层析成像”一词来自医学,它是用X射线得到人体内不同剖面的清晰图象,再将一组这样的剖面迭加构成其三维图象,以诊断出人体内的肿瘤或其它病变。医学上称之为计算机辅助层面成像(Computerized Tomography,简称CT)。随之,CT技术便应用于许多其它科学和技术领域。在地球物理学中,类似医学CT的研究大约开始于本世纪初。从那时起,地球科学家们相继利用地震观测得到了地球内部一维、二维,乃至三维的速度图

象。在这类问题中,就表征地质特征而言,利用地震波得到地球内部复杂的不均匀性图象。这种技术称之为地震层析成像(Seismic Tomography,简称ST)。

实际上,“层析成像”一词是指一种反投影方法,它将射线反向追踪至震源,并将观测信号,如走时或振幅的偏差通过数学反演过程沿射线路径分配开,得到该路径上的介质信息,大量密集交叉覆盖射线的叠加,即可重建介质的图象。广义地说,任何由实验数据的反演而得到物体图象的技术都可以定义为层析成像。不过,我们通常所指的地震层析成像,是通过地震波的反演而得到地球内部二维和三维的速度图象或地震波衰减图象。

地震层析成像与医学层面成像有很强的相似性,二者都来自多源的大量交叉射线从不同方向穿透物体,并被一组接收器所接收。就目前的技术发展水平,地震层析成像是用波速的变化来产生物体的图象,而医学层面成像(CT)则是由X射线衰减的变化得到物体的图象。另外,地震层析成像使用的源大多是天然地震源,其位置不可能非常准确,而且一般也无法控制接收器(地震台站)的分布以期得到理想的射线分布;同时成像物体以外的射线路径亦很复杂,有时呈非线性。因此,它远比医学CT复杂得多。但是从积极的角度来考虑,在地震层析成像中可以综合使用多种类型的波,使其能够对数百米乃至数百公里,甚至更大尺度的构造成像。

本文着重描述我国地震层析成像研究的进展及已取得的主要成果。这里只限于大尺度和区域

尺度的三维速度层析成像技术及结果,而不涉及反射和衍射及波形层析成像等技术。

研究现状

地震层析成像的研究自70年代后期得到极大的发展,基本分为体波方法和面波方法两大类,主要过程大致包括三个基本部分:数据采集,图象重建,图象显示。体波方法是利用地震波观测走时与初始模型的理论走时之差(走时残差)进行三维地震模拟反演。走时残差是由地球结构的横向和纵向不均匀性所引起,这种差异存在于沿射线路径的任何地方,如震源区、台站附近,以及源—台之间的射线路径上。根据复杂介质中地震波传播理论,通过数学反演,得到地球内部三维速度图象。面波方法是根据勒夫波和瑞利波的频散曲线反演地球内部三维S波速度图象。由于两类面波——勒夫波和瑞利波对不同偏振方向的剪切波敏感程度不同,分别对勒夫波和瑞利波进行反演,比较用两种面波得到的剪切波速度的差异,这种差异在某种程度上反映了地球介质的各向异性。被地球科学家称为第一张地球内部的彩色照片是于1984年Dziewonski和Anderson利用5 000个远震约50万条P波走时残差首次给出的全球不同深度地幔的地震波速度横向变化的图象重建。它使地球科学家受到极大的鼓舞。

80年代后期,地震层析成像技术不断加速发展。到目前为止,已发表了一百多个不同尺度的地震层析成像结果。人们可以利用这些结果推断全球构造运动过程,大陆与海洋构造差异起源,以及研究地震断层、火山带和其它各种地质环境中复杂的结构现象。可以预计,地震层析成像必将成为地震学研究中异常活跃的领域,它将给地球科学带来活力。

ST技术在中国的应用大致始于80年代初,利用国内条件解释我国地震观测资料的有代表性的工作是科学院地球物理所刘福田和国家地震局地球物理所宋仲和两个研究集体作的。他们根据国内现有条件,利用我国地震台网现有的观测资料,提出各自的速度图象重建的层析成像法,分别利用体波走时和面波频散研究了中国大陆及邻区一些重要构造区的三维速度图象和地球内部介质的各向异性。尽管台站和地震分布并不十分完美,从已获得的结果来看,充分利用我国地震台网现有的观测资料,其方法是有效的。此外,中国科技大学地球与空间科学系徐果明等发展一种球面Radon变换方法用于面波研究,他们从21个台站的2000张记录中选出107条瑞利波数据反演了中国东部的结构;国家地震局地球物理研究所冯锐等

将层析成像技术应用于新丰江台网记录到的地震资料,反演出该区的速度图象,分析出小尺度的速度结构变化与该区复杂的地质条件的关系;国家地震局地球物理研究所王椿镛、张先康和成都地质学院朱介寿等的研究结果有待发表。下面着重介绍所取得的主要成果。

主要成果

利用中国地震台网和世界标准台网部分台站记录到的P波走时数据和全国数字化台网记录到的面波数据重建了中国大陆及其邻近地区、日本海及毗邻地区、一些重要构造区的三维速度图象,并且得到了地球内部部分地区介质各向异性图象。揭示出我国深部一些鲜为人知的重要成果。

1. 地球内部的横向不均匀性

中国大陆及其邻近地区、日本海及其毗邻地区、华北、南北带、华南及其海域、青藏高原等的速度图象揭示出这些区域的地壳上地幔速度普遍存在显著的横向不均匀性,直到下地幔还依然明显。这种不均匀性不仅出现在海洋与大陆不同构造之间,而且也出现在各构造单元之内。不均匀性的形态因地区各异,并且随着深度的增加,不均匀性程度减弱。

2. 速度图象与地表地质特征的相关性

地壳上部的速度图象与地表已知的地质特征明显相关。例如,四川地区上地壳的速度异常对应于该区的断块结构,四川台拗处的速度图象为瞩目的低速区,而龙门山一带的速度值比周围高5%,强烈对比的速度特征反应了山盆地形地貌的悬殊差异,速度高低值的分界则勾划出呈北东近45°的龙门山断裂带的轮廓。华北的上地壳在平原和盆地为低速,在山地为高速(见封三彩图1)。华南地区的速度异常多为北东向条带状分布,与地貌和多种地球物理场的形态一致。

层析成像结果不仅揭示出不同地块间的速度差异,还清晰地分辨出各主要大地构造单元间的焊接边界。例如,南北带的120km深度处的速度图象表明,扬子准地台自秦岭以南以龙门一大巴台缘褶带和盐源—丽江台缘褶带为界,同青藏地块固结;西南以哀劳山褶皱带为界;东南则以右江褶皱带内的南盘江为界(见封三彩图2)。该区地壳上地幔S波的三维速度图象也表明,其速度分布与大地构造单元有密切关系,直到140km深度的S波横向变化都清晰地反应出不同大地构造单元的轮廓。

3. 地壳厚度

中国大陆的地壳厚度可以102.5°E附近为界分为两部分:东部地壳薄,地壳厚度都小于45km;

西部有一条自若尔盖至松潘(34°N , 102.5°E 附近)向西北沿 38°N 往西至塔里木盆地南缘的分界线,其南部除滇西南之外,整个青藏高原的地壳厚度都大于45km;其北部除天山山脉之外,地壳厚度一般不大于45km(见封三彩图3)。中国东北、日本列岛的地壳厚度都在35km左右,具有典型的大陆型地壳厚度。海洋地区明显高速,地壳迅速减薄,其分界与已知的结论一致。

4. 岩石层厚度

中国大陆岩石层厚度明显变化,其特点表现为稳定地台区的岩石层厚度大于构造上较为活动的褶皱区。例如,扬子准地台和塔里木地台比松潘甘孜褶皱系和华南褶皱系具有较厚的岩石层。大陆地区的岩石层厚度大于海洋地区。日本海及其毗邻地区的地震层析成像表明,中国东北的岩石层厚度大于110km,70~110km深度的速度为8.2~8.4km/s,比大陆平均值高约4%;220km深度的速度值明显低于110km深度,表现为上地幔低速层,速度在8.1~8.2km/s之间。日本海的岩石层基本上可分为两部分:靠岛弧一侧的厚度不大于70km,靠大陆一侧的厚度不大于110km。菲律宾海则比较复杂,四国海盆地的岩石层厚度不小于70km,九州—帛琉海岭是其构造分界,它东西两侧的结构差异显著,分界本身在结构上表现出的过渡特征直到400km深度仍很明显。

5. 软流层

中国大陆相当多的地区上地幔软流层有明显的显示,埋藏深浅不等。华南及其海域的速度图象表明,软流层埋深在陆区较深,海区较浅。软流层分布起伏形态与地热流值明显相关(见封三彩图4)。

6. 俯冲带

俯冲带被认为是全球构造的重要部位,下插板片对驱动岩石层板块起着主要作用。另外,它们还包含着沿板块边界安山岩火山爆发的起因和破坏性地震发生之信息。日本海及其毗邻地区的地震层析成像很好地揭示出日本下方俯冲带的速度比它周围的地幔平均高约5%~8%。在日本海沟俯冲的太平洋板块先以小倾角平缓下插至靠洋一侧的陆坡,再以 30° 左右的倾角俯冲到本州以下,至软流层时倾角减小至 25° 左右,然后就以这样的小角度平缓穿过上地幔的过渡带。此俯冲带长约1400km(见封三彩图5)。平行于海沟轴的俯冲带在海沟会合处要严重变形甚至被撕裂。在千岛的堪察加与日本海沟的会合处(40.0°N ~ 42.5°N , 141.5°E ~ 143.0°E 附近)俯冲的太平洋板块被撕裂成两片,它们之间的裂隙为周围的低速物质所充填。在日本与伊豆—小笠原海沟,俯冲带以大于日本海沟处的倾角下插至110km深度处,

220~400km深度只有近于俯冲带周围的地幔介质速度的低速区,未发现相应于俯冲带的高速异常,直到535km深度才出现与俯冲板片相应的高速带,这同现有的观测事实相一致,因为这里在150~300km深度几乎没有地震发生。

7. 地球内部介质的各向异性

面波层析成像的研究结果表明,岩石介质具有各向异性,各向异性程度与大地构造分区有一定的联系,而且随深度的增加SV—SH负值增大。详细的研究解释工作在进行中。

8. 速度图象与地震分布的关系

研究表明,地震活动与速度结构关系密切。强震震中在上地壳的投影都分布在高速块体和低速块体的交界处,成条带分布(见封三彩图6)。而在地幔最上部的投影则几乎都分布在低速区及其边缘。速度结构与地震分布的这种关系可能对研究地震成因、未来强震预测和烈度区划有意义。

前 景

地震层析成像技术是近年来在我国蓬勃发展起来的研究地球内部的新技术。其应用前景可包括以下几方面:

1. 研究中国大地构造单元的划分、形成、演化、基本特征,以及与深部过程的关系,根据地球深部信息解决有关地学的一些基本理论问题。例如,根据地震波速度图象绘制速度异常图可以确定地幔内冷区和热区的位置,因而也是确定与热物质上涌有关的上升流和与冷物质有关的下降流位置的最好方式,而剪切波各向异性图则可确定地幔流动图象,可望澄清地幔对流研究中的一些争论。

2. 通过三维速度图象的研究,确定地壳、岩石层、软流层的厚度和形态,与岩石的实验室数据的比较,有可能给出地幔物质的组成。在此基础上,研究地下矿产的生成规律,划定找矿远景区。例如,研究与深部地质过程密切相关的金刚石矿的生成机制,油气生成和运移的深部背景等。

3. 研究强地震孕育的深部背景和介质特征,可为研究地震成因,未来强震预测和烈度区划提供依据。

可以相信,随着观测资料的不断增加,观测质量的不断改善,大内存量高运算速度计算机的应用,地震层析成像技术在理论和实践两个方面都将会有很大的改进,例如,利用多种震相的走时和振幅信息,重建出更为详细的速度图象和地震波在地球介质中的衰减图象,以及多种地球物理场的联合反演,可使地震层析成像结果推广到地学的各个领域。

(责任编辑 宋义荣)