

综合评述

浅析中国地区体波走时层析 成像研究进展

雷建设

(中国科学技术大学研究生院, 北京 100039)

摘要: 将中国地区划分为东西两部分详细地讨论了中国地区体波走时层析成像研究现状. 总结了 中国地区三维速度结构的一些特征: 地震波速度存在明显的横向不均匀性, 甚至在 100 km 左右深处还保留了这一特点, 浅部层面地震波速度图像与地表已知的地质特征有较好的相关性, 速度图像与地震活动性有一定的对应关系, 岩石层厚度及地壳厚度的起伏状况等; 最后分析了目前中国地区体波走时层析成像研究工作的特点并提出了一种可能的发展趋势.

主题词: 中国; 地震层析成像; 体波; 走时

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)04-0471-05

0 引言

随着计算机技术的迅速发展, 地震波层析成像已成为研究地球内部结构的一种重要手段. 国内外有不少学者先后利用该项技术研究了不同地区地壳上地幔三维速度结构, 并取得了一些很有价值的成果. 本文拟对中国地区体波走时层析成像研究成果进行归纳和总结, 为今后从事该项工作提供参考. 文献 [1] 和 [2] 曾对中国地区体波走时的研究进展进行过总结, 但不够详细. 由于中国东部和西部在地质构造上有较大的差别, 因此本文以 120.5°E 左右为界将中国地区分为东西两部分, 对中国地区体波走时层析成像研究现状进行详细讨论并对两部分速度结构的特点进行归纳和总结, 同时增加了 1996 年以后的最新研究成果, 最后对目前中国地区体波走时层析成像工作的特点及其可能发展趋势进行了分析.

1 中国东部地区体波走时层析成像研究现状及速度结构特征

中国东部地区体波走时层析成像研究始于 1980 年. 金安蜀等首次利用 P 波走时资料, 采用奇异值分解法直接解大型超定方程组 $Gm = t$, 对北京地区地壳上地幔的三维速度结构进行了研究^[3]. 1986 年刘福田等采用正交投影法重建了华北地区地壳上地幔三维速度结构^[4], 1989 年刘福田等发展了一种新的层析成像方法^[5], 并利用该方法研究了中国大陆及邻区的三维速度结构^[6]. 朱露培等和孙若昧等先后利用频谱参数化方法和刘福田等人的方法^[5]对京津唐张地区地壳上地幔三维速度结构进行了研究^[7~9]. 孙若昧等还利用 S 波到时资料研究了该地区的 S 波速度结构^[9]. 刘建华等利用刘福田等人的方法^[5]研究了中国华南(包括台湾省)及

其海域的三维速度结构与岩石层结构特征^[10]. 赖晓玲等用快速三维射线追踪和最小二乘反演方法重建了唐山震区莫霍面三维构造形态^[11]. 1999 年丁志峰根据华北遥测台网近震直达 P 波和莫霍面 Pn 波到时资料用 ACH 方法进行反演, 得到了华北地区岩石层三维速度结构^①.

此外, 朱天飞等发展了一种利用远震和近震 P 波资料反演岩石层三维速度结构的新模型和新方法^[12].

根据上述研究结果, 可以将中国东部地区地壳上地幔速度结构特征归纳如下:

(1) 地壳上地幔地震波速度存在明显的横向不均匀性^[3 4 6 7 8 10], 这种不均匀性甚至在下地幔 1 100 km 深处还依然存在^[6]. 在北京地区东南部为相对低速区, 西北部为相对高速区, 中部是正常区^[6]. 在京津唐张地区 100 km 左右深度内燕山隆起区为高速区, 凹陷区为低速区^[7]. 华南及其海域地壳上地幔显著的横向不均匀性^[8] 不仅表现在海域和陆地不同的构造之间, 同时也出现在陆地不同的构造单元之间及其内部. 在地壳上部海域为低速区, 陆地大部分为高速区.

(2) 浅部层面速度图像与地表已知的地质特征有较好的对应关系, 即凹陷、断裂或断陷对应低速度区, 而隆起区对应高速区^[4 7 8]. 京津唐张地区在 50 km 深度以上燕山隆起区为高速异常区, 凹陷区为低速异常区^[7]. 在整个华北地区, 在深度为 14 km 处, 平原、盆地为低速区, 高山为高速区; 75 km 深度处的层面图像显示 3 个明显的低速区分别对应于郯庐断裂、太行山前断裂和山西断陷带^[4]. 丁志峰的研究结果也证明了这样的对应关系, 即在上地壳的太行山隆起区速度相对较高, 华北断陷盆地速度相对较低. 在华南及其海域的长乐-南澳断裂带恰好对应于陆地高速与海域低速块体分界处, 陆地的一些主要断裂带几乎都位于速度梯度带上^[10].

(3) 地震活动性与速度图像具有一定的对应关系. 多数强震发生在地震波低速块体和高速块过渡带上或略有偏移. 在京津唐地区^[8, 9], S 波的速度图像显示出大多强震震中分布于低速块体内或低速块体与高速块体相交地带偏低速块体的一侧; P 波的速度图像显示出大多数强震震中分布于高速块体内或高速块体与低速块体相交地带偏高速块体的一侧. 唐山地震震源下方的波速比 v_P/v_S 呈现高值, 而在非震源下方的黄骅拗陷中心区的上地壳呈现低值^[9].

(4) 陆地地台区岩石层厚度大于 110 km, 而在海域褶皱系岩石层厚度一般小于 110 km, 甚至在褶皱系内部岩石层厚度也不十分相同^[10]. 文献[6]指出中国东部莫霍面的深度较浅, 一般都小于 45 km, 例如唐山震区莫霍面深度大约为 31~32 km^[11].

2 中国西部地区体波走时层析成像研究现状及速度结构特征

中国西部地区体波走时层析成像研究较多. 刘建华等和陈培善等利用刘福田等人的方法^[5] 分别对南北地震带和云南地区的地壳上地幔三维速度图像进行了研究^[13 14]. 孙若昧等人对四川地区的地壳上地幔速度结构进行了研究^[15]. 刘瑞丰等利用正交投影方法对云南及邻区进行了研究^[16]. 李强等重建了新疆及其毗邻地区地壳上地幔三维速度图像^[17]. 王春镛等采用震源参数与介质结构参数相分离方法和三维近似射线追踪方法, 利用昆明台网的 P 波走时资料确定了昆明地震台网下方的三维速度结构^[18]. 刘建华等采用刘福田等人的方法^[5] 重建了秦岭一大别造山带及毗邻地区地壳上地幔速度图像^[19]. 吕庆田等利用 ACH 方法对青藏高原南部进行了走时反演^[20]. 薛广盈等利用重叠球迭代重建层析成像技术并结合两点快速射线追

① 丁志峰. 近震层析成像的理论及应用[J]. 1999 年博士论文, 58~100.

踪对渭河断陷盆地的地壳速度进行了层析成像^[21]。丁志峰等采用改进了的三维射线追踪方法确定了青藏高原东部及边缘地区地壳上地幔三维速度结构^[22]。黄金莉等采用伪弯曲方法对川滇地区进行了研究^[23]。

综合分析上述研究成果发现, 中国西部地区地震波速度结构具有以下特征:

(1) 地壳上地幔地震波速度同样存在明显的横向不均匀性^[13, 16, 19, 21, 23], 这种不均匀性可深达 450 km, 甚至在下地幔 1 100 km 深度还依然存在^[9]。新疆及其毗邻地区地壳上地幔的这种不均匀性不仅出现在不同的构造单元之间, 也出现在各构造单元之内^[17]。在渭河断陷盆地^[21]内位于泾阳以北的铜川、耀县一带存在近南北方向伸展的高速区, 铜川附近速度值最高; 在商县、兰田的西南方向, 存在一低速带; 秦岭南缘的东西两部分速度横向不均匀明显。

(2) 浅部层面速度图像与地表已知的地质特征有较好的对应关系: 盆地拗陷区显著低速, 地轴造山带隆起区显著高速。新疆及毗邻地区盆地是上地幔隆起区, 褶皱系是上地幔拗陷区^[17]。四川盆地显著低速, 康滇地轴显著高速^[13~16, 23], 红河断裂带对应了低速层^[16], 龙门山断裂带、鲜水河断裂带与显著的速度对比边界对应^[15], 秦岭一大别造山带隆起区显著高速, 盆地及拗陷区明显低速, 中地壳的速度图像表明, 造山带内部的一些低速区对应了一些大型推覆构造^[20]。

(3) 多数强震发生在高低速过渡带上^[13, 15, 16, 23]。在南北地震带上 7 级以上的强震震中几乎都分布在低速带及其边界上^[13]; 在云南地区 5 级以上的地震多数发生在速度梯度较大的地区, 特别是高速和低速过渡区^[16], 在四川地区中、小地震常散布在块体内, 但中、强地震多分布在块体的边侧, 强震多集中在块体的边角上^[15]。川滇地区发生在非大断裂附近的强震几乎都集中在速度过渡带上^[23]。

(4) 中国西部地区存在许多速度异常区。例如, 滇中地区在 45 km 深度上有明显高速区^[18], 南北地震带上中地壳在很大范围内存在低速层, 其最低速度达 5.6 km/s; 在 25°~38°N 和 100°~103.2°E 的范围内, 上地幔顶部出现低速异常, 异常速度值约为 7.49 km/s^[13], 青藏高原的东南部上地壳内约 30 km 深度有一低速异常区, 羌塘地块下地壳、上地幔速度更低, 雅鲁藏布江以北至当雄为低速地壳, 雅鲁藏布江以南上地幔存在高速带^[20, 22]。

(5) 岩石层厚度和莫霍面深度变化较大。准噶尔盆地岩石层厚度为 110 km, 塔里木盆地可达 220 km^[17]。地壳厚度起伏较大, 为 40~80 km^[15, 16, 17, 19, 22]。秦岭一大别造山带, 大致以 107°E 为界, 以东地区的地壳厚度小于 40 km, 以西地区的地壳厚度大于 40 km, 且呈现出向西地壳逐渐加厚的趋势^[19]。云南地区地壳厚度的大致轮廓是西边厚东边薄, 四川地区莫霍面起伏也明显, 但这 2 个地区及塔里木盆地、准噶尔盆地地壳厚度一般在 50 km 以内^[15~17]。天山山脉地壳厚度为 50 km 左右^[17], 青藏高原地壳厚度为 50~70 km^[6, 22], 而西昆仑褶皱系以及克什米尔等地地壳厚度起伏更大, 为 50~80 km^[17]。

3 讨论

通过上述分析可以发现中国东部地区和西部地区地壳上地幔速度结构具有许多共同点, 如都存在明显的横向不均匀性; 浅部层面速度图像与地表已知的地质特征有较好的对应关系; 地震活动性与速度图像间具有一定的联系; 岩石层厚度有变化及莫霍面深度具有一定的起伏等, 但也有一定的差异, 如东部地壳薄(102.5°E 为界), 厚度一般小于 45 km, 西部地区地壳厚度一般大于 45 km; 110 km 深度的图像显示, 西部地台如扬子准地台和塔里木地台对应于高速区, 东部地台如中朝准地台则大都表现为低速异常; 东部褶皱系如华南褶皱系为低速区, 西

部褶皱系如青藏地块南缘喜马拉雅和冈底斯念—青唐古拉褶皱系表现为高速区; 400 km 深度的图像显示 102.5°E 以东的低速带走向为 NNE 和 EW, 以西的低速带走向为 NNW 和 EW; 600 km 深度处的速度图像显示, 102.5°E 以东为高速区, 以西为低速区。

另外, 国外学者利用体波资料也对中国地区进行了层析研究, 见文献[24 ~ 27]。

近 20 年来, 中外地震工作者对中国地区体波层析成像做了大量的工作, 在理论方法方面也有了许多改进^[5, 12, 28, 29]。这些为实现地震预报、认识地球动力学过程和各种矿床形成的深部构造条件以及促进其它相关科学的发展奠定了一定的基础, 但是由于所做的工作多数是局部的或小区域的, 而且研究深度也较浅(地壳上地幔), 只有文献[6]研究最深, 但也只有 1 100 km 的深度。国外学者从大尺度范围对全球进行了层析成像研究, 同时也包含了对中国地区的研究, 深度达到核幔边界, 但由于他们是从大尺度范围研究的, 因而研究精度不够, 比较粗^[27, 30]。如果要对地幔对流和地核结构等深部地球物理现象进行进一步认识, 那么必须对地表至核幔边界的三维速度结构进行详细研究。随着数字化台网的迅速发展, 地震资料质量的不断提高, 数量的不断增加, 使得对于中国地区地壳上地幔特殊构造区, 乃至核幔边界体波走时层析成像的研究成为可能, 也成为一种发展趋势。

[参考文献]

- [1] 刘福田. 三维速度结构的研究现状和展望[J]. 地球物理学报, 1991, 34(6): 788—796.
- [2] 王椿镛. 中国岩石层结构研究的回顾与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 82—109.
- [3] 金安蜀, 刘福田, 孙永智. 北京地区地壳和上地幔的三维 P 波速度结构[J]. 地球物理学报, 1980, 23(2): 172—182.
- [4] 刘福田, 曲克信, 吴华, 等. 华北地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1986, 29(5): 442—448.
- [5] 刘福田, 李强, 吴华, 等. 用于速度图像重建的层析成像法[J]. 地球物理学报, 1989, 32(1): 46—60.
- [6] 刘福田, 曲克信, 吴华, 等. 中国大陆及其邻区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1989, 32(3): 281—291.
- [7] 朱露培, 曾融生, 刘福田. 京津唐地区地壳上地幔三维 P 波速度结构[J]. 地球物理学报, 1990, 33(3): 267—277.
- [8] 孙若昧, 刘福田. 京津唐地区地壳结构与强震的发生——I. P 波速度结构[J]. 地球物理学报, 1995, 38(5): 599—607.
- [9] 孙若昧, 赵燕来, 吴丹. 京津唐地区地壳结构与强震的发生——II. S 波速度结构[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 348—355.
- [10] 刘建华, 吴华, 刘福田. 华南及其海域三维速度分布特征与岩石层结构[J]. 地球物理学报, 1996, 39(4): 483—492.
- [11] 赖晓玲, 张先康, 郑需要. 利用三维弯曲界面的反演方法重建唐山震区莫霍界面三维构造形态[J]. 地震学报, 1997, 19(5): 506—516.
- [12] 朱天飞, 刘福田. 用地震资料测定岩石层的三维速度结构[J]. 地球物理学报, 1982, 25(6): 500—508.
- [13] 刘建华, 刘福田, 吴华, 等. 中国南北带地壳和上地幔的三维速度图像[J]. 地球物理学报, 1989, 32(2): 143—151.
- [14] 陈培善, 刘福田, 李强, 等. 云南地区速度结构的横向不均匀[J]. 中国科学, 1990, B 辑(4): 431—438.
- [15] 孙若昧, 刘福田, 刘建华. 四川地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1991, 34(6): 708—716.
- [16] 刘瑞丰, 陈培善, 李强. 云南及其邻近地区三维速度图像[J]. 地震学报, 1993, 15(1): 61—67.
- [17] 李强, 刘瑞丰, 杜安陆, 等. 新疆及毗邻地区地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1994, 37(3): 311—320.
- [18] 王春镛, 王溪莉, 颜其中. 昆明地震台网下方的三维速度结构[J]. 地震学报, 1994, 16(2): 167—175.
- [19] 刘建华, 刘福田, 孙若昧, 等. 秦岭—大别造山带及其南北缘地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1995, 38(1): 46—54.
- [20] 吕庆田, 姜枚, 马开义, 等. 三维走时反演与青藏高原南部深部构造[J]. 地震学报, 1996, 18(4): 451—459.
- [21] 薛广盈, 丁锡玉, 袁志祥. 渭河断陷盆地地壳速度的层析成像研究[J]. 地震学报, 1997, 19(3): 283—290.
- [22] 丁志峰, 何正勤, 孙为国, 等. 青藏高原东部及其边缘地区的地壳上地幔三维速度结构[J]. 地球物理学报, 1999, 42(2): 197—205.
- [23] 黄金莉, 郑新华, 赵大鹏. 川滇活动构造区三维 P 波速度结构与强震活动的关系研究[J]. 中国地球物理学会年刊, 1999, 317—317.
- [24] Vasco D W, Johnson L R. Whole earth structure estimated from seismic arrival times[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B2): 2633—2671.

- [25] McNamara D E, Walter W R, Owens T J, Ammon C J. Upper mantle velocity Structure beneath the Tibetan Plateau from Pn travel time tomography[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B1): 493—505.
- [26] Sujoy Ghose, Michael W Hamburger. Three-dimensional velocity structure and earthquake locations beneath the northern Tien Shan of Kyrgyzstan, central Asian[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B2): 2725—2748.
- [27] Sri Widiyantoro, Rob van der Hilst. Mantle structure beneath Indonesia inferred from high-resolution tomographic imaging [J]. *Geophys. J. Int.*, 1997, 130: 167—182.
- [28] 郑需要, 张先康. 地壳和上地幔三维速度与界面结构层析成像——理论部分[J]. *地震学报*, 1998, 20(5): 473—480.
- [29] 张元生, 李清河, 徐果明. 联合利用走时与波形反演技术研究地壳三维速度结构(1)——理论与方法[J]. *西北地震学报*, 1998, 20(2): 8—15.
- [30] Ham en Bijwaard, Wim Spakman, E Robert Engdahl. Closing the gap between regional and global travel time tomography[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 103(B12): 30055—30078.

BRIEF ANALYSIS ON STUDY DEVELOPMENT FOR THE TRAVEL TIME TOMOGRAPHY OF BODY WAVE IN CHINA REGION

LEI Jian-she

(*Graduate School at Beijing, University of Science and Technology of China,
CAS, Beijing 100039, China*)

Abstract: The author has discussed the present situation of travel time tomography of body wave in China region in details by dividing the region into the east and west parts. Some features of the three-dimension velocity structure in China have been summarized; the velocity image displays clearly the lateral heterogeneity in the crust and upper mantle, which persists down to 1 100 km deep; there is a correlation between the velocity image of the shallow part and the known geological features; there is also a correlation between the velocity image and seismicity; the lithosphere thickness and the crust thickness change, and so on. Finally, the features of tomography in the present researches in China and its possible development tendencies have been analyzed.

Key words: China; Seismic tomography; Body wave; Travel time

(上接 470 页)

DEFORMATION CHARACTERISTIC OF SEISMIC SUBSIDENCE AND ITS FORMATION MECHANISM OF LOESS OF THE YONGDENG EARTHQUAKE IN 1995

CHEN Yong-ming¹, SHI Yu-cheng², XU Hui-ping², LIU Hong-mei²

(*1. Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Firstly, the loess site of seismic subsidence of the Yongdeng earthquake in 1995 is investigated, and based on the PGA and the loess's thickness of the site, the value of loess seismic subsidence is calculated by using the relationship of σ_d versus ϵ_p of the earthquake site. Secondly, the formation mechanism of loessial seismic subsidence is studied by comparing the microtexture of undisturbed loess with the seismic subsided one. The result shows that the value of loessial seismic subsidence calculated using the test curve is smaller than the value of seismic subsidence caused by the earthquake. When exposed to dynamic stress, the void structure of loess will be destroyed by shear stress and become denser under the gravity force. This is the mechanism of loessial seismic subsidence.

Key words: Loess; Subsidence; Micro structure; Yongdeng earthquake