



的粒度并经历了同震摩擦升温等作用的影响。因此,同震机械破碎与间震期强烈的水-岩相互作用改变并控制着断层带的物质组成与结构演化。

渗透率是控制断层带流体活动及水-岩相互作用的重要参数,并且关系到高压流体积累等关键问题。本文首先采用不同测量介质(气体和水)对断层岩的渗透性展开了对比研究。结果显示,断层岩气体渗透率存在明显的 Klinkenberg 效应,并且断层岩的气体渗透率经 Klinkenberg 效应校正后不能近似为液体渗透率。采用水作为测量流体对金河磷矿断层带的传输性质实验研究显示,映秀—北川断层带金河磷矿剖面主要由极低渗的断层核部,高渗的破碎带和相对完整且低渗的围岩所组成。在 165 MPa 有效压力下,围岩与断层核部的渗透率介于 $10^{-20} \sim 10^{-22} \text{ m}^2$ 之间,破碎带渗透率介于 $10^{-17} \sim 10^{-20} \text{ m}^2$ 之间。横跨断层带,渗透性整体呈现为“通道/障碍体”的二元结构。流体活动主要集中在断层核部与破碎带内,而且更倾向于向平行断层面方向迁移。跨断层的渗透性结构与断层带的成分与粒度分布具有一致性。

断层核部较高的孔隙度和较低的渗透性为积累高压流体提供了物质与物理基础。基于传输性质实验结果,讨论了汶川地震同震热压作用。结果表明,在深度 1.8 km 以下,汶川地震断层主滑动带具备热压作用发生的条件。显微结构观察也显示,黄绿色和黑色断层泥中存在指示热压作用的 CCAs 构造及断层泥高压注入到裂隙中的结构,这些结构特征表明,断层核部经历了高压流体的作用过程。因此,热压作用可能是汶川地震滑动弱化的重要机制。

关键词 龙门山断裂带;汶川地震;水-岩相互作用;断层岩;粘土矿物;渗透率;断层弱化;高压流体;热压作用

(作者电子信箱,段庆宝:duan_qingbao@126.com)

龙门山断裂带浅层精细结构的地震 环境噪声成像研究

赵盼盼

(中国地震局地质研究所,北京 100029)

中图分类号: P315.2; 文献标识码: A; doi: 10.3969/j.issn.0235-4975.2016.08.011

2008 年 5 月 12 日,四川龙门山断裂带发生 $M_w 7.9$ 地震,造成巨大伤亡与损失。震后地表地质考察、余震序列精确重定位等方面显示,汶川地震是迄今为止在高角度逆冲断裂上发生的一次逆冲兼右旋走滑型破裂。汶川地震发生于青藏高原东缘与扬子块体交界的龙门山断裂带上,并具有特殊的发震构造,对龙门山断裂带深部精细速度结构和孕震构造环境的详细研究,不仅是理解汶川地震发生的构造背景和动力过程的迫切需求,同时也将推进关于青藏高原东缘动力学研究的认识,对大陆动力学和地震动力学研究具有重要的意义。

汶川地震发生后,国内外科学家针对汶川地震区和邻近地区的地壳上地幔速度结构、区域孕震条件、区域应力场特征等展开了大量工作,并已经取得了丰富的研究成果。采用接收函数反演、地震环境噪声和走时层析成像等方法,利用区域地震台网数据和横跨四川盆地、



龙门山和松潘—甘孜地块以及川滇块体的密集流动地震台阵探测结果表明,松潘—甘孜地块中下地壳具有广泛分布的 S 波低速体,龙门山断裂带中上地壳具有高波速异常。松潘—甘孜地块中下地壳的低速物质向东运动,在四川盆地刚性地壳的阻挡作用下向上抬升,由此造成龙门山断裂带上的破裂,可能是汶川地震发生的深层动力过程。松潘—甘孜地块上中地壳的结构差异及其与扬子块体的相互作用可能是汶川地震孕震的主控因素。龙门山断裂带中上地壳的精细结构则是确认汶川地震发生机理的关键证据。然而,这些工作的空间分辨率一般都在 25 km 以上,尚难以给出宽度约 30 km 的龙门山断裂带的精细结构。不同学者利用双差层析成像方法和汶川地震的余震走时数据,给出了汶川地震区和龙门山断裂带的上地壳 5~10 km 分辨率的精细速度结构。他们的结果给出了龙门山断裂上盘的高速异常和断层深部延伸特征,但是,由于所用地震均分布于约 22 km 以上深度,研究结果并未给出上地壳高速异常体的底边界。

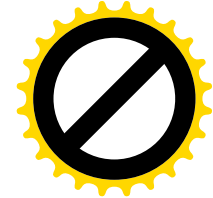
2003 年以来,地震环境噪声成像方法的出现为地震波成像方法提供了新的手段。该方法利用连续记录的地震环境噪声资料,提取台站间的面波格林函数,采用成熟的双台面波成像技术获得地壳上地幔速度结构。地震环境噪声成像方法已经在川西地区地壳上地幔速度结构和汶川地震同震地壳速度变化研究中取得了广泛应用。由于环境噪声层析成像方法的空间分辨率主要依赖台站分布,近年来,短周期环境噪声面波成像被越来越多地用于断层浅部速度结构的高分辨率密集台阵成像,取得了良好的成像结果。

汶川地震发生后,中国地震局地质研究所地震动力学实验室横跨龙门山断裂带布设了由 40 台宽频带流动数字地震仪组成的密集地震台阵。该台阵与 973 项目资助的川西流动地震台阵相结合,覆盖了汶川地震发震断裂龙门山断裂带从南端雅安到北端青川的整个区域,台站间距从十几千米到近 300 km。台阵自 2008 年 9 月开始进行连续观测,观测周期为 13 个月。

本文使用了该台阵的 57 个台站自 2008 年 11 月~2009 年 11 月为期一年的垂直分量连续观测数据。利用短周期地震环境噪声成像方法,研究龙门山断裂带区域中上地壳精细速度结构。主要步骤包括:噪声数据预处理、相关函数计算与叠加、面波频散曲线测量、面波层析成像、S 波速度反演。在预处理中,我们使用了一种短时时间窗方法代替了传统的时间域正则化处理,例如 1 bit,提高了互相关函数的信噪比。计算相关函数后,采用时频分析方法测量了 1~25 s 的瑞利面波群速度,进而反演得到了周期 2~20 s 的群速度分布。通过检测板测试,我们的横向分辨率约为 10 km。最后,基于各节点的瑞利面波群速度结构,我们反演出 S 波速度结构。

需要注意的是,龙门山断裂带地区位于青藏高原东缘松潘块体和稳定的四川盆地的陡变构造边界带,在部分段落断裂带两侧地表高程差异接近 5 km。在龙门山断裂带这样的极端地貌地区,研究地壳结构,特别是,浅层地壳结构时,地形高程的影响是不可忽略的因素。而常规环境噪声成像方法采用的 S 波速度结构反演仍然基于一维平层假定,并未考虑地形校正和三维波场问题。

为此,我们提出了一种通过三维正演模拟迭代修正的方法来克服地形高程对速度结构成像研究带来的不利影响。整个修正过程是对 S 波反演时的输入群速度曲线的微调,通过三维正演模拟估算进而修正地形高程影响,使得第 n 次模拟修正后反演的速度结构 $v_{\text{sm}(n)}$,作为下一次正演模拟的输入速度结构,在添加了内部速度 $v_{\text{sm}(n)}$ 与水平面速度相等的地形高程情况下,通过第 $n+1$ 次模拟后的数据再次修正高程影响,反演得到的速度结构 $v_{\text{sm}(n+1)}$ 与



$v_{\min(n)}$ 尽可能接近。这也意味着我们最终修正后的反演结果带有高程部分的速度结构。通过使用不同理论模型测试,证明了这种方法的有效性。

将地形高程影响修正方法应用于龙门山断裂带速度结构的研究中,我们最终得到了龙门山断裂带中北段地壳 25 km 深度范围的 S 波精细速度结构。由本文研究结果可以得到以下主要认识:

(1) 利用平均间距 10~300 km 的流动地震观测数据和 2~20 s 周期的地震环境噪声群速度反演方法,我们获得了横向分辨率达到 10 km,垂向分辨率约为 2~5 km 的中上地壳 S 波速度图像。这一结果已经达到或超过了利用数千个余震到时数据和相近台站密度的体波层析成像方法的分辨率,显示出密集台阵和短周期环境噪声面波方法在地壳浅部精细速度结构和断层探测研究中的巨大潜力。

(2) S 波速度结构显示,龙门山断裂带周边区域 10 km 以上的速度结构与地表断裂的分布形态具有良好的一致性,速度结构控制了龙门山主要断层的深部延展特征;在 15 km 及以下深度,S 波速度结构呈现沿龙门山和沿岷山隆起走向的交叉构造格局,由此造成的速度结构差异可能影响了汶川地震的破裂过程。

(3) 速度结构随深度的分布特征为龙门山断裂带主要断层的深部延伸形态给出了良好的约束,结果进一步确认了龙门山断裂中段的高角度铲型断裂构造特征。

(4) 我们在本文研究区的南端发现了龙门山断裂下方 20 km 以下深度具有与松潘地块中地壳低速层相关的低速结构的迹象。这可能是汶川地震破裂带南段 22 km 左右深度存在脆韧转换带的一个证据。由于台站分布的原因,我们的成像结果无法给出汶川地震起始破裂段的中上地壳速度结构,这无疑是一个缺憾。

本研究采用短周期地震环境噪声成像方法对地壳浅部精细速度结构进行研究,并对复杂地表地形进行校正,是对地壳浅层结构探测研究的一个新尝试。本研究将对强震孕震构造背景研究和断层深部结构探测起到重要推动作用。

关键词 汶川地震;龙门山断裂带;速度结构;地震环境噪声

(作者电子信箱,赵盼盼:panpanzhao@live.cn)

基于高分辨率 SAR 数据的子带干涉测量技术 及其在地震同震形变场中的应用研究

庾 露

(中国地震局地质研究所,北京 100029)

中图分类号: P315.61; 文献标识码: A; doi: 10.3969/j.issn.0235-4975.2016.08.012

目前常规合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR)在地形测绘和形变监测方面的发展已经非常成熟,其成功应用的关键取决于数据处