

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2015.04.001

口泉断裂及其邻近地区的地壳速度结构

王 霞^{1,2)} 宋美琴^{1,2)}* 王 亮³⁾ 李宏伟¹⁾ 吴昊昱¹⁾ 罗 勇¹⁾

1) 山西省地震局, 太原 030021

2) 中国科学院测量与地球物理研究所, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077

3) 辽宁省地震局, 沈阳 110034

摘 要 利用震源位置和速度结构联合反演方法, 对 1981—2013 年山西北部地区的地震进行了重定位, 反演得到了三维速度结构, 并重点对口泉断裂进行了分析。重定位结果显示, 口泉断裂中北段地震集中, 其南北两端地震分布较少, 表明该断裂中北段活动强而南北两端弱; 速度结构显示口泉断裂地震集中段位于高速体内的相对低速区域, 其南段显示持续的低速异常。从垂直口泉断裂的速度结构剖面上可以识别出口泉断裂附近的速度呈现明显下凹的梯度带, 初步推测这可能是口泉断裂(或基底拆离带)存在的深部证据; 平行口泉断裂的速度(波速比)剖面显示其中北段地震丛位于高、低速(高低波速比)陡变带之间。

关键词 速度结构 联合反演 口泉断裂

中图分类号: P315.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2015)04-0939-14

0 引言

从 20 世纪 80 年代开始, 国内外众多学者对地震层析成像的理论、方法进行了研究, 并利用它研究地球内部的速度结构, 得到了许多地区的结构图像, 再结合震例探讨了孕震特点和孕震环境(Thurber *et al.*, 1993; 孙若昧等, 1995; Zhao *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2002; 周龙泉等, 2007; Lei *et al.*, 2008, 2009; 周民都等, 2012; Andri *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2013), 这已成为近 30a 来地震学发展的最重要的成果。已有的研究结果发现, 很多地区的大地震多发生在高速块体内或高、低速度带边界上或高速与低速相交地带偏高速体的一侧; 通过上部地壳中的横向速度变化, 可将地表断层外推到深部, 通常断裂被成像为倾斜舌状低速带或变化强烈的横向速度梯度带(Lutter *et al.*, 1994, 1999; Eberhart *et al.*, 1995; Thurber *et al.*, 1997)。

口泉断裂是山西断陷系大同盆地西侧的边界断裂, 在该断裂附近历史上有 2 次 6½ 级地震, 分别发生在 1022 年与 1305 年; M7 专项工作组(2012)认为, 山西北部大同盆地未来 10a 具有发生大地震的中、长期危险性, 其中口泉断裂的危险程度最高; 探槽开挖等相关地震地质研究结果表明口泉断裂曾发生多次地表破裂型的古地震事件, 单次事件的平均同震垂直位移至少为 1.6~1.9m, 对应的事件震级应在 M7 或更大(邓起东等, 1995; 谢新生等, 2003; 徐伟等,

[收稿日期] 2015-01-21 收稿, 2015-10-26 改回。

[基金项目] 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED201444E)、中国地震局星火计划(Xh15007)和 2014 年度震情跟踪专项工作任务(2014020111)共同资助。

* 通讯作者: 宋美琴, 女, 1968 年生, 研究员, E-mail: smq28@126.com。

2011a); 因此其未来的地震危险性备受关注。

在山西地区已有一些学者开展了深部结构和强震及构造关系的研究, 取得了一些有意义的研究成果, 其中部分成果是采用不同的方法获取了大同-阳高震区地壳或上地幔速度结构, 并侧重分析大同-阳高地震序列与速度结构的关系(徐扬等, 1997; 张成科等, 1998; 靳玉科等, 2010), 涉及口泉断裂的分析甚少; 部分成果是利用宽角反射/折射地震测深剖面获取并研究山西局部地区(如山西高原北部、五台山地区、临汾震区、山西中南部等)的壳幔结构(祝治平等, 1994, 1999; 张建狮等, 1997; 赵金仁等, 2006; 李自红等, 2014); 张学民等(2003)采用 S 波理论波形拟合的方法获得了山西省 6 个台站下方的剪切波速度结构, 并探讨其与地震的关系; 唐有彩等(2010)通过接收函数方法对山西断陷带太原盆地和临汾盆地的地壳结构进行研究, 但其对地壳的结构分辨率较低; 李鹏等(2010)利用天然地震面波层析成像方法得到了鄂尔多斯块体及周缘断陷盆地的瑞利波相速度结构和三维剪切波速度结构, 但其横向分辨率在 100km 以上, 无法给出山西断陷带较为细致的结构构造特征; 宋美琴等(2013)则是应用面波相速度分布图像揭示了山西地区壳幔速度结构, 区域尺度相对大, 对地壳上部的速度结构分辨率较低; 虽然上述研究结果加深了我们对山西地区壳幔速度结构的认识, 但对口泉断裂的速度结构研究程度较弱。因此, 本文将采用震源和速度结构联合反演的的方法获取山西北部地区三维速度结构, 并重点对口泉断裂附近的地震分布及其速度结构特征进行分析讨论。

1 研究方法

虽然地震层析成像的方法和应用有了很多发展, 不同应用的模型和数据亦不同, 但在理论上通常具体可由如下步骤组成:

(1) 模型参数化。地震层析成像过程中, 首先要对研究区的地壳结构模型参数化。由于在地震层析成像中需要计算的参数较多, 主要应用的是模型离散化的方法, 主要可分为块体法和网格法。本文采用的 Simulps14 软件(Thurber, 1983; Kissling *et al.*, 1994)为了得到更准确的结果, 将地球考虑成 1 个椭球, 在研究具体区域时进行了直角坐标与椭球坐标的转化。模型参数化则采用网格法。

(2) 计算正问题(射线追踪)。目前用体波进行层析成像主要应用的正演算法是射线追踪法。基本上可分为 2 类, 一类是试射法, 另一类是弯曲法。

本文所运用的联合反演程序 Simulps14(Thurber, 1983; Kissling *et al.*, 1994)提供的是 ART_PB 方法(近似射线追踪+伪弯曲)。主要由 2 步构成: 1) 近似射线追踪, 通过连接震源与接收台站 2 点, 选取不同曲率半径的圆弧作为射线, 与不同入射面角度相互叠加, 得到 1 个初始的射线路径; 2) 伪弯曲法, 通过第 1 步得到的初始射线路径, 应用 Snell 定律, 并依据沿路径每段射线走时最小的原则扰动射线, 得到最后的射线路径。

由于不只对 P 波进行层析成像, 同时也可对波速比和 S 波进行层析成像分析, 本文应用的 Simulps14 软件也获得了波速比和 S 波的结果(Thurber, 1983; Kissling *et al.*, 1994)。

(3) 地震层析成像反演方法。反演方法可分为 2 类, 第 1 类是基于算法的线性或拟线性反演方法; 第 2 类是基于模型的完全非线性反演方法。阻尼最小二乘法属于线性反演方法, 该方法最早由 Aki 等在最小二乘法基础上列入了阻尼系数来压制解的奇异性, 并提出了阻尼最小二乘法。阻尼最小二乘法的缺点是计算费时, 计算需要的内存大。因此, 这种方法只用于数据

量和未知数少于几千个这种情况的问题。引入参数分离技术后, 阻尼最小二乘法得到了改进。本文应用的 Simulps14 软件选用的就是阻尼最小二乘法 (Thurber, 1983; Kissling *et al.*, 1994)。

(4) 解的可靠性评价。地球内部成像结果反映的不仅是真实速度结构的非均匀性, 而且还有数据误差、有限的地震射线采样、模型参数化、线性化以及实施算法等因素带来的影响。这些异常不能轻易被分离出来, 因而经常导致最终图像的虚假异常。因此, 反演后需要对解进行评价, 解的评价主要为解的分辨率分析。联合反演方法中分辨率可以用网格内射线数、分辨率对角元素 (RDE)、偏导权重总数值 (DWS) 和展布函数来分析。Simulps14 软件同时给出了分辨率对角元素值 RDE 和 DWS 值。分辨率对角元素 (RDE) 显示了 1 个模型参数的解的独立性, DWS 被用来定量分析对每个节点有影响的相对射线密度, 利用射线距离模型节点的距离来衡量该射线长短的重要程度。关于 Simulps14 的研究中, 前人给出了 DWS 值最低为 50 左右, 而分辨率矩阵在 0.4 以上可以反映该区的结果是相对可靠的。本文主要采用 DWS 来分析解的可靠性。

本文讨论的震源位置和速度结构的联合反演, 就是在地震层析成像过程中加入震源项, 同时确定三维速度结构和地震震源参数。联合反演结果精度较高, 但参数较多, 运算量也增大。

具体的原理和方法可参见文献 (王亮, 2012; 王亮等, 2014), 本文不再赘述。

2 震源位置和速度结构的联合反演

2.1 地震数据整理

本文的研究区域为山西北部地区 ($38.5^{\circ} \sim 41.5^{\circ}N$, $111^{\circ} \sim 115.5^{\circ}E$), 使用 1981—2013 年山西、内蒙古和河北的模拟地震台网、数字地震台网记录的地震震相观测报告, 通过和达法逐次地震判断 (假定发震时间差 $< 30s$ 的 2 个台网记录事件为同一事件), 将三省的地震震相观测报告合并。另外, 为了增强反演结果的可靠性, 使穿过研究区的地震射线尽可能增多, 本文扩大了记录台站的区域 ($36.5^{\circ} \sim 42.5^{\circ}N$, $110^{\circ} \sim 116.5^{\circ}E$), 参与反演计算的台站总数达 91 个 (图 1)。选取山西北部地区 4 个以上台站记录的地震震相报告, 共 7 870 个地震; 并使用和达曲线进行数据检验, 以确保数据真实可靠 (图 2)。

2.2 初始速度模型

用网格法对速度模型进行参数化, 平面向上将研究区划分成 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$ 的均匀网格, 垂直方向上划分如表 1 所示。本文查阅了该地区多年来发表的地壳速度结构研究成果 (张建狮等, 1997; 张成科等, 1998), 选定研究区的一维参考速度模型如表 1 所示。

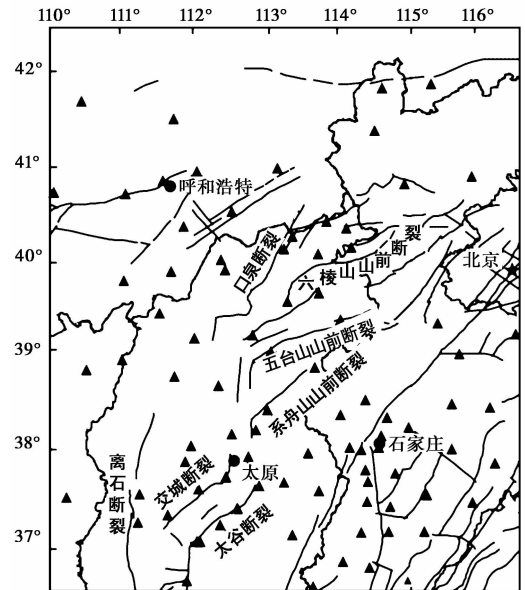


图 1 本文使用的地震台站

Fig. 1 The seismic stations used in the study.

2.3 解的可靠性评价

反演结果的可靠性主要依靠解的评价, 本文主要采用偏导权重总数(DWS)对解的可靠性进行评价, 一般认为 DWS 的极限值不低于 50, 反演结果较好。由于联合反演方法的特性, 本次反演仅得到 P 波和波速比的解的评价结果, 从本次研究 0km、3km、15km、24km 深度的 DWS 分布情况来看(以 P 波为例, 图 3), P 波和波速比的分布结果相类似, 分析认为研究区 24km 深度以浅的三维 P 波和波速比反演结果是比较可靠的, 下文简称“24km 以浅”。同时, 根据数据的质量情况, P 波和 S 波的射线数基本相同, S 波的 DWS 分布应与 P 波的分布类似, 因此认为研究区 24km 深度以浅的 S 波的结果也是较可靠的。

2.4 精定位结果

利用震源位置和速度结构联合反演的 simulp14 软件包对研究区地震重新定位, 经过 3 次迭代反演后, 6 879 次地震得到了重新

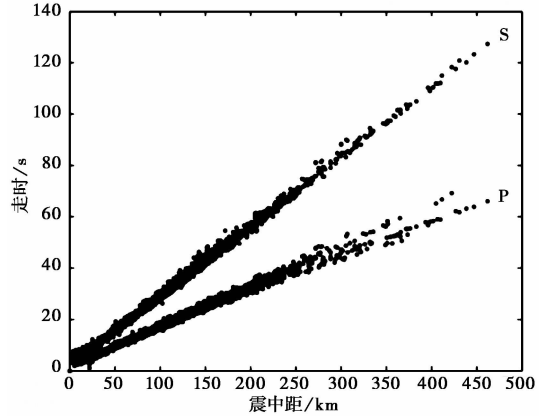


图 2 本文用于反演的 P 波和 S 波走时
Fig. 2 The P- and S-wave travel time curves used in the inversion.

表 1 一维参考速度模型

Table 1 1D initial P wave velocity model

深度/km	0	3	15	24	33	42
速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	2.56	5.50	6.15	6.30	6.50	8.00

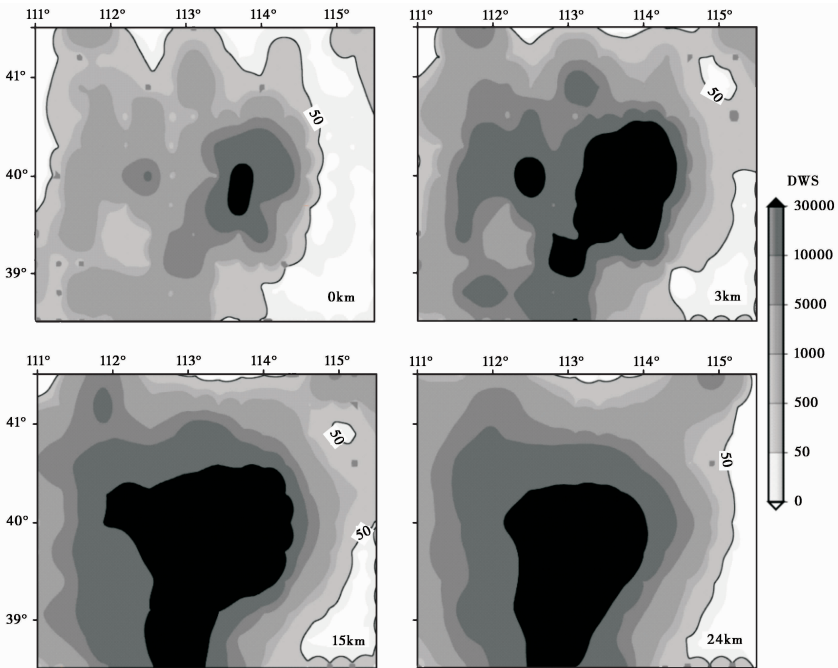


图 3 P 波解的评价(不同深度的 DWS 分布)

Fig. 3 The result of evaluation of P-wave solutions(DWS distribution of different depths).

定位后的震源参数(图 4), 其中震源深度 $>0\text{km}$ 的有 6 615 次; 反演后 P 波走时的均方根残差(RMS)为 0.66s。重点分析口泉断裂附近的地震, 显示其分布不均匀, 39.9°N 以北地震集中分布, 39.9°N 以南地震稀疏(图 4); 而近年来的地质调查结果显示口泉断裂分段活动性总体呈现出中北段强、南北两端弱的态势(徐伟等, 2011b; 李煜航等, 2013), 口泉断裂中段(圣水沟至鹅毛口)是口泉断裂活动最强的地段(王贞海, 2008), 且怀仁沉降中心也位于此段(最大沉积厚度达到 1.8km), 地震分布同样表明口泉断裂该段活动强烈。

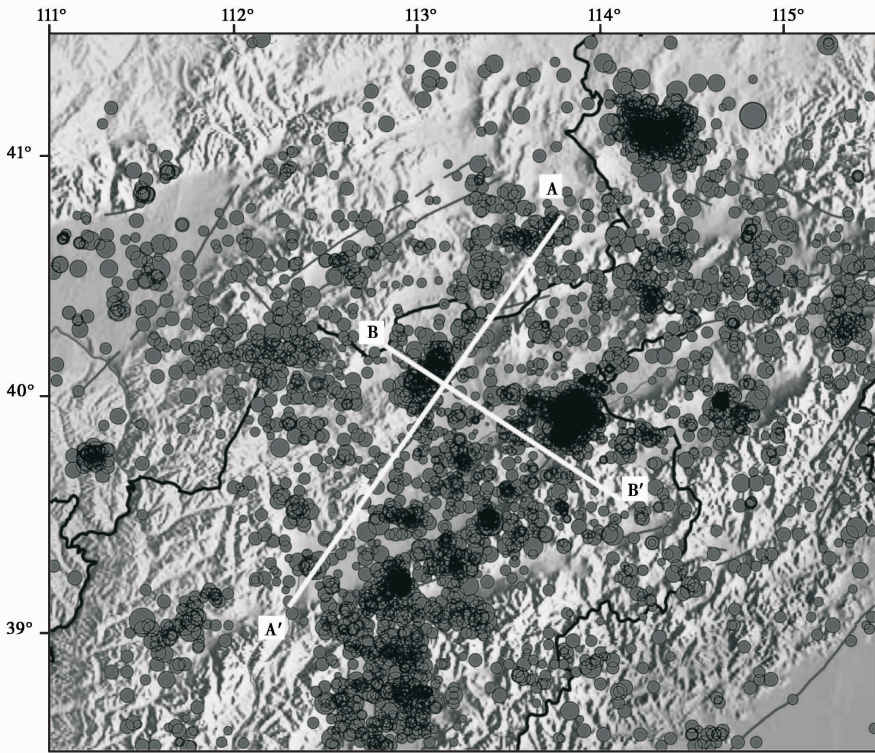


图 4 研究区精定位后的震中分布图和速度剖面位置图

Fig. 4 The epicenter distribution of the relocated earthquakes and the profile location in the study area.

2.5 反演获得的速度结构

研究区深度为 3km、7km、11km 和 15km 的速度结构结果显示(图 5), 山西北部地区的地震主要分布在高速体区域内; 而深度为 19km 和 23km 的速度结构显示(图 5), 该区的地震主要分布在高速、低速过渡带区域。已有的面波和体波层析成像研究表明, 大地震多发生在高速和低速体过渡的梯度带上, 通常速度变化强烈的部位是介质非均匀性、物性变化大的区域, 这些相对脆弱的部位在构造应力作用下易于积累应变能而发生地震(金安蜀等, 1980; 朱露培等, 1990; Huang *et al.*, 2002; 齐诚等, 2006; 周龙泉等, 2009; 宋美琴等, 2013)。因此, 研究区深度 15km 以浅的高速体一般认为与上地壳较脆、较强的岩体有关, 而 19km 以深的地震分布与中上地壳速度结构的变化有直接关系。

深度 3km、7km 速度结构显示口泉断裂以 39.9°N 为界, 北段呈现高速异常, 南段为低速异常; 深度 11km、15km、19km 和 23km 速度结构有所不同, 结果显示口泉断裂 39.4°N 以北为

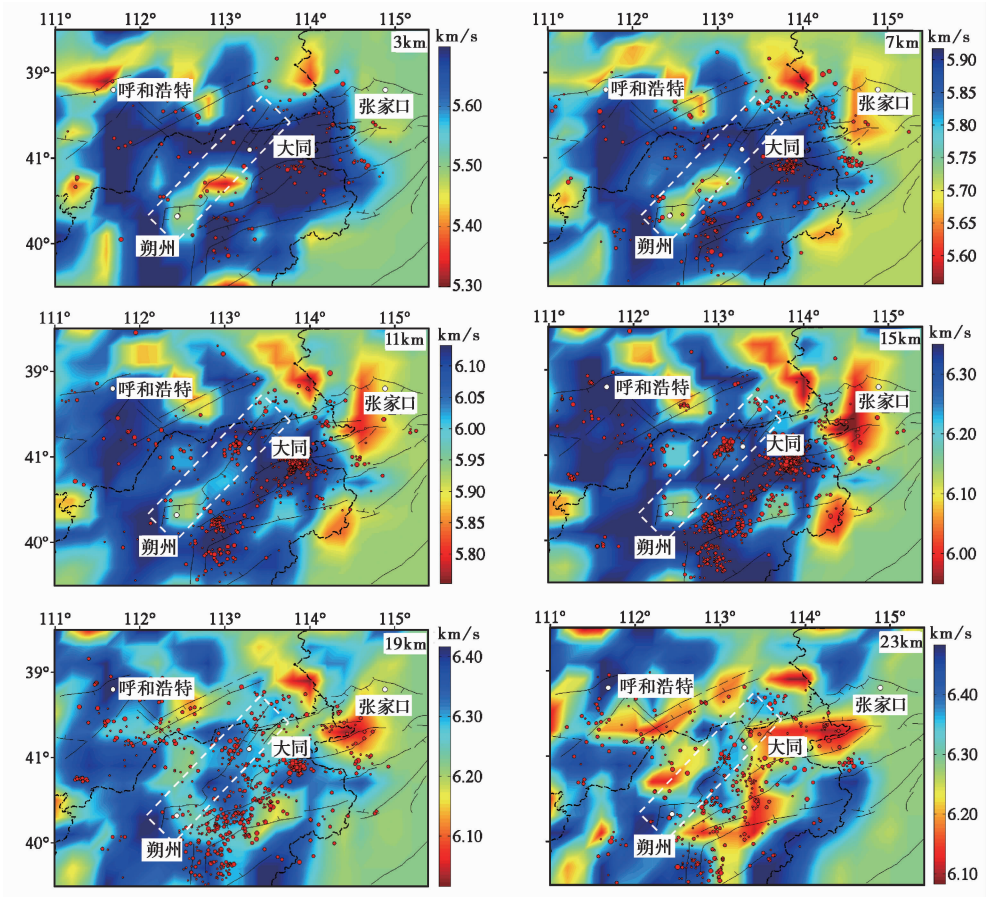


图5 山西北部地区不同深度P波速度及相应地震分布(指定深度上下2km的地震分布)

Fig. 5 P wave velocity structures and earthquakes distribution of different depths(0~23km) in the north of Shanxi (the distribution of earthquakes at a depth interval of 4km).

高速体异常, 39.9°N~40.2°N 则是高速体内相对低速的区域, 39.4°N 以南则呈现出低速的特点(图5)。从对应深度范围内的地震分布来看, 多集中在 39.9°N~40.2°N 这一相对低速区内, 其他区域地震稀少。根据已有的研究结果发现(Thurber *et al.*, 1993; 孙若昧等, 1995; Zhao *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2002; 周龙泉等, 2007; Lei *et al.*, 2008, 2009; 周民都等, 2012; Andri *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2013), 大地震多发生在高速块体内或高、低速度带边界上或高速与低速相交地带偏高速体的一侧, 但对于微震还没有太多的认识, 从口泉断裂附近速度结构与微震关系来看, 高速体内的相对低速区是易于释放能量的区域。

为了深入了解口泉断裂及其附近区域的地下速度结构情况, 平行和垂直口泉断裂各给出1条P波速度和小震深度二维纵剖面图(图6)。垂直口泉断裂的速度结构剖面图显示口泉断裂下方存在1个较大范围的高速体(地下20~30km), 地震主要发生在这一高速体的上方。平行口泉断裂的速度结构剖面图显示沿断裂方向浅层速度变化比较平稳, 但在15~30km深度可见明显的高、低速相间带, 这可能与研究区大同盆地内部坳隆相邻、次级盆山相间的构造有关,

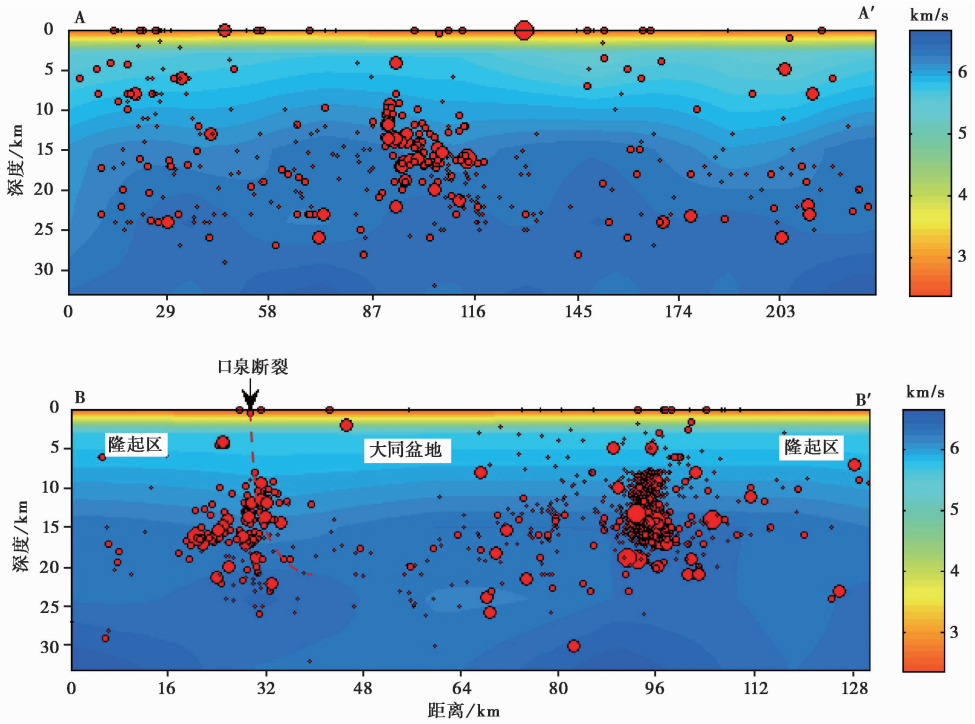


图 6 平行、垂直口泉断裂深度剖面的 P 波速度结构图像

Fig. 6 The parallel and vertical P wave velocity profiles along the Kouquan Fault.

AA' 平行口泉断裂, BB' 垂直口泉断裂

而地震丛就位于高、低速陡变带附近。

本文也给出了平行、垂直口泉断裂的 S 波的速度结构剖面(与 P 波速度剖面位置相同)。由于 S 波对于横向变化较 P 波敏感,垂直口泉断裂的速度结构剖面(图 7)清晰地显示出速度呈现向下凹的梯度带,这与已有的地质调查结果给出的地表口泉断裂位置相吻合,初步推测此速度梯度带可能是口泉断裂存在的深部证据;而六棱山山前断裂附近地震的震源深度相比口泉断裂附近的地震深度浅,这与大同盆地呈西侧深陡、东侧浅缓的不对称箕状断陷特征相吻合;同时,速度呈现向下凹的梯度带也是盆地西侧深部存在基底拆离带的间接证据,东侧的六棱山断裂为基底拆离带上方的反倾正断层,要比西侧的口泉断裂的埋深浅很多,在本剖面上难以刻画,还需开展更高分辨率的浅部速度结构工作来进一步佐证。

同样与 P 波速度剖面一致的是口泉断裂下方也存在 1 个较大范围的高速体异常(地下 20~30km 深度)(图 7),地震主要发生在这一高速异常体的上方,但是上文给出研究区 24km 以浅的反演结果是较可靠的,因此这个高速体异常仅是初步结果,有待于今后获得更深部速度资料的证实。平行口泉断裂的速度剖面更明显地显示了 15km 深度以下的高、低速相间带,地震丛就位于高、低速陡变带附近;研究表明,速度变化急剧的地段往往是介质极不稳定容易诱发地震的主要构造部位(Cervený, 1979; 刘国栋等, 1984; Wang *et al.*, 2003; 赖院根等, 2006; 胥颐等, 2006; 王帅军等, 2007, 2013; Zheng *et al.*, 2008)。

同时,垂直口泉断裂的波速比剖面(图 8)清晰地显示出口泉断裂地震集中的中北段位于

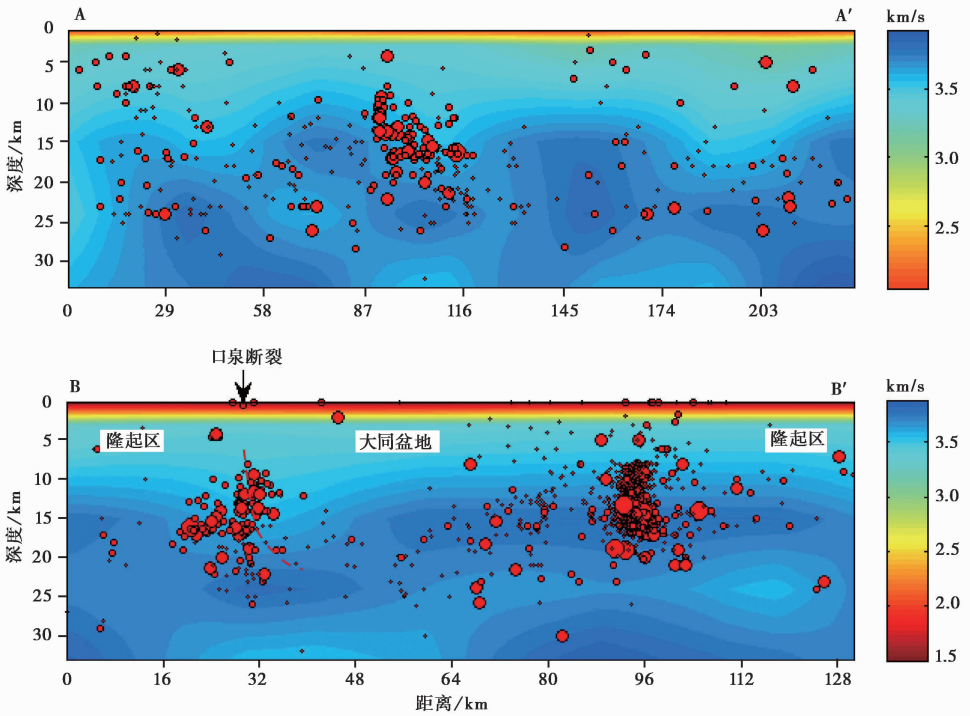


图 7 平行、垂直口泉断裂深度剖面的 S 波速度结构图像

Fig. 7 The parallel and vertical S wave velocity profiles along the Kouquan Fault.

AA' 平行口泉断裂, BB' 垂直口泉断裂

相对高波速比区域,明显被周围低波速比地区包围;六棱山山前断裂附近的地震主要位于低波速比区域。平行口泉断裂的波速比剖面(图 8)也明显地显示 15km 以下的高、低波速比相间带,地震丛就位于高低波速比陡变带附近,这与 P、S 波速度剖面结果类似。

值得一提的是,沿口泉断裂走向的剖面呈现出 3 个高低速陡变带,而只有中部发生了很多微震,其他区域只有零星分布。由于没有收集到断裂附近深部地层岩性或介质性质资料,这 3 个梯度陡变带是否由于岩性或介质不同导致,有待于深入开展进一步的研究。

3 结论

本文应用震源位置和速度结构联合反演方法对山西北部地区进行了联合反演计算,得到了研究区的精定位结果和三维速度结构。精定位结果显示口泉断裂中北段地震集中,其南北两端地震分布较少,这与地质调查结果相一致,且怀仁沉降中心也与地震集中段相吻合,均表明口泉断裂中北段活动强而南北两端弱;结合平面速度结构结果,口泉断裂地震集中段位于高速体内相对低速区域,其南段 3km 以深的速度结构呈现持续的低速异常,表明中上地壳的高速体通常具有较高的强度,可积累较强的孕震能量,而低速体难以积累能量。

垂直口泉断裂的 P、S 波速度结构剖面图显示口泉断裂附近的速度的呈现明显向下凹的梯度带,初步推测这可能是口泉断裂(或基底拆离带)存在的深部证据;在口泉断裂地震集中段下方存在 1 个较大范围的高速体异常(地下 20~30km),还需要今后获得更深部速度资料的证

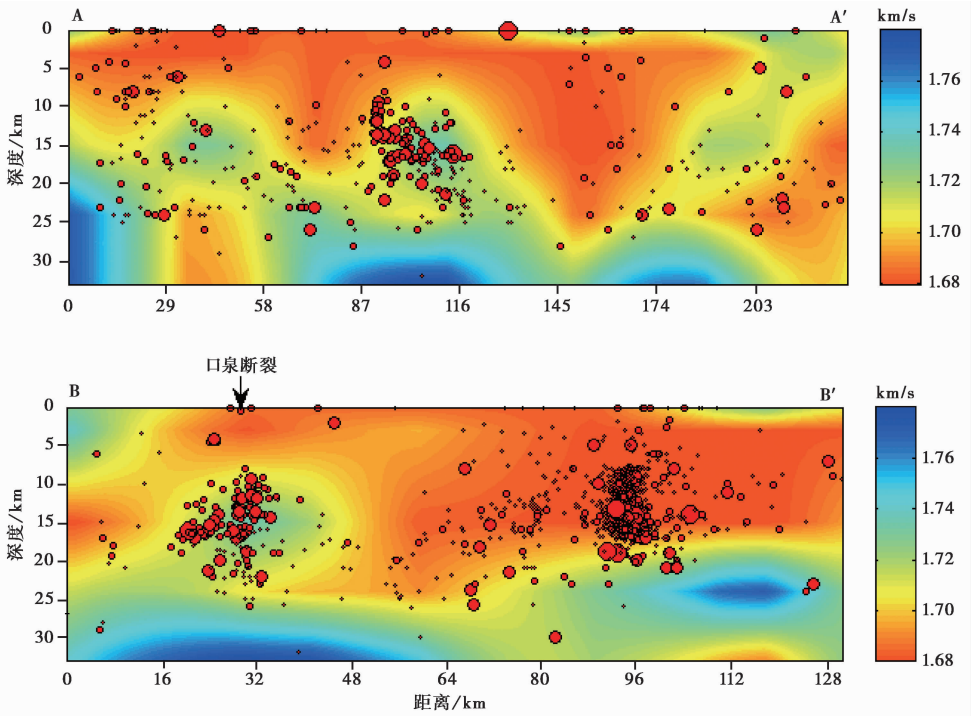


图 8 平行、垂直口泉断裂深度剖面的波速比图像

Fig. 8 The parallel and vertical P/S wave velocity ratio profiles along the Kouquan Fault.

AA' 平行口泉断裂, BB' 垂直口泉断裂

实。平行口泉断裂的速度结构(波速比)剖面图显示沿断裂方向浅层速度变化比较平稳,但在 15km 以深出现明显的高、低速(高低波速比)相间带,这可能与研究区大同盆地内部坳隆相邻、次级盆山相间的构造相关,而地震丛位于高、低速(高低波速比)陡变带之间。

致谢 感谢郑勇研究员在数据准备和程序调试中给予了热心帮助,感谢审稿专家对本文提出的建设性修改意见。

参 考 文 献

- 邓起东, 徐锡伟. 1995. 山西断陷盆地的活动断裂和分段性研究 [A]. 见: 国家地震局地质研究所编. 现代地壳运动研究(6). 北京: 地震出版社. 225—242.
- DENG Qi-dong, XU Xi-wei. 1995. Segmentation study of active faults in the Shanxi fault-depression basin belt [A]. In: Institute of Geology, State Seismology Bureau (ed). Recent Crustal Movement (6). Seismological Press, Beijing. 225—242 (in Chinese).
- 金安蜀, 刘福田, 孙永智. 1980. 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, 23(2): 172—182.
- JIN An-shu, LIU Fu-tian, SUN Yong-zhi. 1980. Three-dimensional P-wave velocity structure of the crust and upper mantle under Beijing region [J]. Chinese Journal of Geophysics, 23(2): 172—182 (in Chinese).
- 靳玉科, 梁向军, 靳玉贞, 等. 2010. 大同震区地震序列震源位置及震源区速度结构初探 [J]. 山西地震, 3:

1—6.

- JIN Yu-ke, LIANG Xiang-jun, JIN Yu-zhen, *et al.* 2010. Study on earthquake sequence location and velocity structure in Datong hypocenter area [J]. *Earthquake Research in Shanxi*, 3: 1—6(in Chinese).
- 赖院根, 刘启元, 陈九辉, 等. 2006. 首都圈地区横波分裂与地壳应力场特征 [J]. *地球物理学报*, 49(1): 189—196.
- LAI Yuan-gen, LIU Qi-yuan, CHEN Jiu-hui, *et al.* 2006. Shear wave splitting and the features of the crustal stress field in the Capital Circle [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(1): 189—196(in Chinese).
- 李鹏, 周仕勇, 陈永顺, 等. 2010. 利用双平面波干涉面波层析成像方法研究山西断陷盆地及鄂尔多斯地台三维速度结构 [J]. *CT理论与应用研究*, 19(3): 47—60.
- LI Peng, ZHOU Shi-yong, CHEN Yong-shun, *et al.* 2010. 3D velocity structure in Shanxi graben and Ordos from two plane waves method [J]. *CT Theory and Applications*, 19(3): 47—60(in Chinese).
- 李煜航, 王庆良, 崔笃信, 等. 2013. 大同盆地口泉断裂的活动性及分段特征的数值模拟 [J]. *大地测量与地球动力学*, 33(4): 9—12.
- LI Yu-hang, WANG Qing-liang, CUI Du-xin, *et al.* 2013. Research on fault motion and segmentation characteristic of Kouquan Fault in Datong Basin by numerical simulation [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 33(4): 9—12(in Chinese).
- 李自红, 刘保金, 袁洪克, 等. 2014. 临汾盆地地壳精细结构和构造-地震反射剖面结果 [J]. *地球物理学报*, 57(5): 1487—1497.
- LI Zi-hong, LIU Bao-jin, YUAN Hong-ke, *et al.* 2014. Fine crustal structure and tectonics of Linfen Basin from the results of seismic reflection profile [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(5): 1487—1497(in Chinese).
- 刘国栋, 史书林, 王宝均. 1984. 华北地区高导层及其地壳构造活动性的关系 [J]. *中国科学(B辑)*, (9): 839—848.
- LIU Guo-dong, SHI Shu-lin, WANG Bao-jun. 1984. Relationship between crustal high-conductivity layers and crustal tectonic activities [J]. *Science in China(Ser B)*, (9): 839—848(in Chinese).
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究 [M]. 北京: 地震出版社. 159—172.
- Working Group of M7. 2012. Study on the Mid-to Long-term Potential of Large Earthquakes on the Chinese Continent [M]. *Seismological Press, Beijing*. 159—172(in Chinese).
- 齐诚, 赵大鹏, 陈颢, 等. 2006. 首都圈地区地壳 P 波和 S 波三维速度结构及其与大地震的关系 [J]. *地球物理学报*, 49(3): 805—815.
- QI Cheng, ZHAO Da-peng, CHEN Yong, *et al.* 2006. 3-D P and S wave velocity structures and their relationship to strong earthquakes in the Chinese capital region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(3): 805—815(in Chinese).
- 宋美琴, 何正勤, 郑勇, 等. 2013. 山西地区面波相速度分布图像 [J]. *地球物理学进展*, 28(4): 1836—1848.
- SONG Mei-qin, HE Zheng-qin, ZHENG Yong, *et al.* 2013. Rayleigh-wave phase velocity distribution in Shanxi region [J]. *Progress in Geophysics*, 28(4): 1836—1848(in Chinese).
- 孙若昧, 刘福田. 1995. 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*, 38(5): 599—607.
- SUN Ruo-mei, LIU Fu-tian. 1995. Crust structure and strong earthquake in Beijing, Tianjin, Tangshan area: I. P-wave velocity structure [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 38(5): 599—607(in Chinese).
- 唐有彩, 冯永革, 陈永顺, 等. 2010. 山西断陷带地壳结构的接收函数研究 [J]. *地球物理学报*, 53(9): 2102—2109.
- TANG You-cai, FENG Yong-ge, CHEN Yong-shun, *et al.* 2010. Receiver function analysis at Shanxi Rift [J].

Chinese Journal of Geophysics, 53(9): 2102—2109(in Chinese).

- 王亮. 2012. 紫坪铺水库地区震源位置和速度结构的联合反演研究 [D]: [学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学. 1—57.
- WANG Liang. 2012. Simultaneous inversion for earthquake hypocenters and velocity structure in Zipingpu area [D]. Dissertation for master's degree. University of Science and Technology of China, Hefei. 1—57(in Chinese).
- 王亮, 周龙泉, 焦明若, 等. 2014. 海城盖州地区速度结构和震源位置的联合反演研究 [J]. 地震, 34(3): 13—26.
- WANG Liang, ZHOU Long-quan, JIAO Ming-ruo, *et al.* 2014. Simultaneous inversion for earthquake hypocenters and velocity structure in the Haicheng and Gaizhou area, Liaoning Province [J]. Earthquake, 34(3): 13—26(in Chinese).
- 王帅军, 王夫运, 张建狮, 等. 2013. 渤海湾西南缘及其邻近地区地壳结构特征 [J]. 地震地质, 35(2): 278—289.
- WANG Shuai-jun, WANG Fu-yun, ZHANG Jian-shi, *et al.* 2013. Crustal structure and its features in the southwest margin of Bohai Bay and adjacent areas [J]. Seismology and Geology, 35(2): 278—289(in Chinese).
- 王帅军, 张先康, 张成科, 等. 2007. 武清—北京—赤诚二维地壳结构和构造 [J]. 地球物理学报, 50(6): 1769—1777.
- WANG Shuai-jun, ZHANG Xian-kang, ZHANG Cheng-ke, *et al.* 2007. 2-D crustal structures along Wuqing-Beijing-Chicheng deep seismic sounding profile [J]. Chinese Journal of Geophysics, 50(6): 1769—1777(in Chinese).
- 王贞海. 2008. 口泉断裂带中段断裂组合特征及活动性研究 [J]. 山西建筑, 34(35): 124—125.
- WANG Zhen-hai. 2008. On the fracture assemblages features in the central segment of Kouquan faults zone and its activity study [J]. Shanxi Architecture, 34(35): 124—125(in Chinese).
- 谢新生, 江娃利, 王瑞, 等. 2003. 山西大同盆地口泉断裂全新世古地震活动 [J]. 地震地质, 25(3): 359—374.
- XIE Xin-sheng, JIANG Wa-li, WANG Rui, *et al.* 2003. Holocene paleo-seismic activities on the Kouquan fault zone, Datong Basin, Shanxi Province [J]. Seismology and Geology, 25(3): 359—374(in Chinese).
- 徐伟, 刘旭东, 张世民. 2011a. 口泉断裂中段晚第四纪最新活动研究 [J]. 中国地震, 27(4): 386—395.
- XU Wei, LIU Xu-dong, ZHANG Shi-min. 2011a. Research of recent late Quaternary activity in the middle part of Kouquan Fault [J]. Earthquake Research in China, 27(4): 386—395(in Chinese).
- 徐伟, 刘旭东, 张世民. 2011b. 口泉断裂中段晚第四纪以来断错地貌及滑动速率确定 [J]. 地震地质, 33(2): 335—346. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2011.02.007.
- XU Wei, LIU Xu-dong, ZHANG Shi-min. 2011b. Late Quaternary faulted landforms and determination of slip rates of the middle part of Kouquan Fault [J]. Seismology and Geology, 33(2): 335—346(in Chinese).
- 徐扬, 田勇, 啜永清, 等. 1997. 大同—阳高 6.1 级震群震源区及其附近地区地壳三维 P 波速度结构反演 [J]. 山西地震, 1—2: 25—29.
- XU Yang, TIAN Yong, CHUO Yong-qing, *et al.* 1997. Inversion of 3D P-wave velocity structure of the source region of the Datong-Yanggao $M_s 6.1$ seismic swarm and its adjacent area [J]. Earthquake Research in Shanxi, 1—2: 25—29(in Chinese).
- 胥颐, 刘建华, 郝天珧, 等. 2006. 中国东部海域及邻区岩石圈地幔的 P 波速度结构与构造分析 [J]. 地球物理学报, 49(4): 1053—1061.
- XU Yi, LIU Jian-hua, HAO Tian-yao, *et al.* 2006. P wave velocity structure and tectonics analysis of lithospheric mantle in eastern China seas and adjacent regions [J]. Chinese J Geophys, 49(4): 1053—1061(in Chinese).
- 周龙泉, 刘杰, 陈晓非, 等. 2009. 2003 年大姚 6.2、6.1 级地震序列震源位置及震源区速度结构的联合反演

[J]. 地震, 29(2): 12—24.

ZHOU Long-guan, LIU Jie, CHEN Xiao-fei, *et al.* 2009. Simultaneous inversion for the 2003 Dayao *M*6.2 and *M*6.1 earthquakes sequence locations and velocity structure in the hypocentral area [J]. *Earthquake*, 29(2): 12—24 (in Chinese).

周龙泉, 刘杰, 张晓东. 2007. 2003年大姚 6.2、6.1级地震前三维波速结构的演化 [J]. *地震学报*, 29(1): 20—30.

ZHOU Long-guan, LIU Jie, ZHANG Xiao-dong. 2007. Evolution of 3D velocity structure before Dayao *M*6.2 and *M*6.1 earthquakes in 2003 [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 29(1): 20—30(in Chinese).

周民都, 王椿镛, 曾融生. 2012. 青藏高原东北缘地壳上地幔速度结构的地震层析成像研究 [J]. *西北地震学报*, 34(3): 224—233.

ZHOU Min-du, WANG Chun-yong, ZENG Rong-sheng. 2012. Seismic tomography of the velocity structure of the crust and upper mantle in northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 34(3): 224—233(in Chinese).

张成科, 张先康, 盖玉杰, 等. 1998. 大同-阳高震区及其邻区壳幔速度结构与深部构造 [J]. *地震地质*, 20(4): 391—398.

ZHANG Cheng-ke, ZHANG Xian-kang, GAI Yu-jie, *et al.* 1998. The crust-mantle velocity structure and deep tectonics in the Datong-Yanggao seismic region and its adjacent area [J]. *Seismology and Geology*, 20(4): 391—398(in Chinese).

张建狮, 祝治平, 张先康, 等. 1997. 山西高原北部地壳上地幔地震波速结构与深部构造 [J]. *地震地质*, 19(3): 220—226.

ZHANG Jian-shi, ZHU Zhi-ping, ZHANG Xian-kang, *et al.* 1997. The seismic velocity structure of crust and upper mantle and deep structure feature in north Shanxi plateau [J]. *Seismology and Geology*, 19(3): 220—226(in Chinese).

张学民, 束沛镒, 刁桂苓. 2003. 山西省部分台站下方 S 波速度结构研究及与地震关系探讨 [J]. *地震学报*, 25(4): 341—350.

ZHANG Xue-min, SHU Pei-yi, DIAO Gui-ling. 2003. Study on S wave velocity structure under part stations in Shanxi Province [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 25(4): 341—350(in Chinese).

赵金仁, 张先康, 张成科, 等. 2006. 山西五台山地区地壳深部结构特征研究 [J]. *地球物理学报*, 49(1): 123—129.

ZHAO Jin-ren, ZHANG Xian-kang, ZHANG Cheng-ke, *et al.* 2006. Features of deep crustal structure beneath the Wutai mountain area of Shanxi Province [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(1): 123—129(in Chinese).

朱露培, 曾融生, 刘福田. 1990. 京津唐张地区地壳上地幔三维 P 波速度结构 [J]. *地球物理学报*, 33(3): 267—277.

ZHU Lu-pei, ZENG Rong-sheng, LIU Fu-tian. 1990. Three-dimensional P-wave velocity structure under the Beijing network area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 33(3): 267—277(in Chinese).

祝治平, 张建狮, 张成科, 等. 1999. 山西中南部壳幔结构的研究 [J]. *地震学报*, 21(1): 42—49.

ZHU Zhi-ping, ZHANG Jian-shi, ZHANG Cheng-ke, *et al.* 1999. Study on crust and mantle structure beneath the central and southern Shanxi [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 21(1): 42—49(in Chinese).

祝治平, 张建狮, 周雪松, 等. 1994. 山西临汾震区地区上地幔构造的研究 [J]. *华北地震科学*, 12(1): 77—84.

ZHU Zhi-ping, ZHANG Jian-shi, ZHOU Xue-song, *et al.* 1994. Study on the structure of the crust and upper mantle in Linfen earthquake region in Shanxi [J]. *North China Earthquake Sciences*, 12(1): 77—84(in Chinese).

- Andri D N, Shiro O, Jim M, *et al.* 2012. High resolution seismic velocity structure around the Yamasaki fault zone of southwest Japan as revealed from travel-time tomography [J]. *Earth Planets Space*. doi: 10.5047.
- Cerveny V. 1979. Ray theoretical seismograms for laterally inhomogeneous structure [J]. *J Geophys Res*, 46: 335—342.
- Eberhart-Phillips D, Stanley W, Rodriguez B, *et al.* 1995. Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting [J]. *J Geophys Res*, 10: 12919—12936.
- Huang J, Zhao D, Zheng S. 2002. Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic activity in southwest China [J]. *J Geophys Res*, 107(B10). doi: 10.1029/2000JB000137.
- Kissling E, Ellsworth W L, Eberhard-Phillips D, *et al.* 1994. Initial reference models in local earthquake tomography [J]. *J Geophys Res*, 99: 19635—19646.
- Lei J S, Xie F R, Lan C X, *et al.* 2008. Seismic images under the Beijing region inferred from P and PmP data [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168: 134—146.
- Lei J S, Zhao D P, Su Y J. 2009. Insight into the origin of the Tengchong intraplate volcano and seismotectonics in southwest China from local and teleseismic data [J]. *J Geophys Res*, 114: B05302. doi: 10.1029/2008JB005881.
- Lin Guoqing. 2013. Three-dimensional seismic velocity structure and precise earthquake relocations in the Salton Trough, Southern California [J]. *Bull Seism Soc Am*, 103:2694—2708.
- Lutter W J, Fuis G S, Thurber C H, *et al.* 1999. Tomographic images of the upper crust from the Los Angeles Basin to the Mojave Desert, California; Results from the Los Angeles Region seismic experiment [J]. *J Geophys Res*, 104: 25543—25565.
- Lutter W J, Jarchow C M, Catchings R D. 1994. An image of the Columbia Plateau from inversion of high-resolution seismic data [J]. *Geophysics*, 59: 1278—1289.
- Thurber C H. 1983. Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California [J]. *J Geophys Res*, 88: 8226—8236.
- Thurber C H, Atre S R. 1993. Three-dimensional v_P/v_S variations along the Loma Prieta rupture zone [J]. *Bull Seism Soc Am*, 83: 717—736.
- Thurber C H, Roecker S W, Ellsworth W L, *et al.* 1997. Two-dimensional seismic image of the San Andreas Fault in the northern Gabilan Range, central California; Evidence for fluids in the fault zone [J]. *Geophys Res Lett*, 24: 1591—1594.
- Wang S Y, Xu Z H, Pei S P. 2003. Velocity structure of uppermost mantle beneath North China from Pn tomography and geological structure [J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 33(Suppl): 91—98(in Chinese).
- Zhao D, Mishra O, Sanda R. 2002. Influence of fluids and magma on earthquakes; Seismological evidence [J]. *Phys Earth Planet Int*, 102: 249—267.
- Zheng T, Zhao L, Zhu R X. 2008. Insight into the geodynamics of cratonic reactivation from seismic analysis of the crust-mantle boundary [J]. *Geophys Res Lett*, 35: 108303.

STUDY ON CRUSTAL VELOCITY STRUCTURE BENEATH KOUQUAN FAULT AND ADJACENT AREA

WANG Xia^{1,2)} SONG Mei-qin^{1,2)}* WANG Liang³⁾

LI Hong-wei¹⁾ WU Hao-yu¹⁾ LUO Yong¹⁾

1) *Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China*

2) *State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*

3) *Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110034, China*

Abstract

Through simultaneous inversion of earthquake hypocenters and velocity structure, we obtained the precise locations of earthquakes occurring from 1981 to 2013 in northern Shanxi and the 3D velocity structure, and analyzed emphatically the Kouquan Fault. The result of earthquake relocation shows that earthquakes are concentrated in the central-north segment of Kouquan Fault and the distribution is sparse towards both south and north end of the fault, which indicates that the strong activity is in the central-north segment of Kouquan Fault and the seismicity becomes weaker towards both ends. The result of velocity structure shows that the earthquake concentrated segment of Kouquan Fault is on the side of relative low-velocity area in the high-velocity body, and the south segment of Kouquan Fault is the continuous low velocity. We can recognize the velocity gradient zone from the obvious depression near the Kouquan Fault, which, as we preliminarily speculate, may be the evidence of the presence of Kouquan Fault (or basement detachment) at the deep part. The parallel velocity profile (velocity ratio profile) to Kouquan Fault shows that the earthquake cluster in the central-north segment of Kouquan Fault is located in the abrupt change zone from high to low velocity (from high to low velocity ratio).

Key words velocity structure, simultaneous inversion, Kouquan Fault

[作者简介] 王霞, 女, 1987年生, 2012年毕业于中国地质大学(北京)矿产普查与勘探专业, 获硕士学位, 工程师, 主要从事地震综合预测等研究, 电话: 0350-5610572, E-mail: 365372858@qq.com。