渤海海域郯庐断裂带的地震层析成像特征

胥颐^{①*}, 汪晟^{①②}, 孟晓春^③

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院油气资源研究重点实验室, 北京 100029;

② 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;

③ 防灾科技学院, 北京 101601

* 联系人, E-mail: xuyi@mail.iggcas.ac.cn

2015-09-01 收稿, 2015-10-07 修回, 2015-10-10 接受, 2016-01-18 网络版发表

中国地质调查局项目(GZH201200504, GZH200900504)资助

摘要 渤海是连接郯庐断裂带辽宁段和山东段的重要区域, 利用地震层析成像方法重建三维P波速度模型, 展示了渤海海域地壳和上地幔结构的变化, 揭示出郯庐断裂带的深部构造特征以及与构造活动的关系. 分析表明, 渤海海域的地壳结构存在明显的横向非均匀性: 在辽东湾及渤海中部, 郯庐断裂带附近的地壳具有双层结构, 浅部为低速沉积层, 地壳中、下部速度偏高, 未见壳内低速层, 显示了相对稳定的地壳结构特征, 与现今较弱的地震活动相吻合. 在渤海南部及莱州湾, 郯庐断裂带受张家口-蓬莱断裂带的影响较大, 全新世以来的构造活动使得这一地区的地壳结构极为复杂, 成为地震活动频繁发生的重要原因之一. 此外, 渤海海域地壳中、下部和上地幔平均速度偏低, 推测与华北克拉通破坏及地幔上涌存在一定的联系. 地幔热流物质有可能沿郯庐断裂带形成的通道向上侵入, 在地壳底部冷却后形成高速薄层, 对于强化壳幔边界、减缓断裂带的构造活动起到了一定作用.

关键词 渤海, 郯庐断裂带, 地震层析成像, 地壳和上地幔, 速度结构

郯庐断裂带是中国东部一条规模巨大的构造带, 它由南向北经安徽、江苏、山东穿过渤海进入辽宁, 长度超过3000 km. 该断裂带形成于印支期华北与华南大陆块体的碰撞, 自中生代以来经历了走滑、伸展、挤压等构造变形和岩浆活动, 被认为是穿透地壳进入上地幔的深断裂^[1,2]. 渤海是连接郯庐断裂带山东段和辽宁段的关键地区(图1), 其断裂的延伸和属性特征一直受到地学研究的关注. 渤海海域地壳浅部被新生代沉积覆盖, 沿郯庐断裂带发育一系列基底断裂, 部分陡倾的断裂可能延伸至地壳深部; 第四纪以来断裂北部的活动时代较早, 为新近纪至晚更新世, 断裂南部的活动时代较晚, 以全新世较为突出^[3-7]. 在渤海南部, 郯庐断裂带与北西走向的张家口-蓬莱断裂带相交, 不同方向的分支断裂相互交错

组成复杂的构造体系^[8,9]. 这一地区小震活动十分密集, 中、强地震时有发生, 郯庐断裂带与张家口-蓬莱断裂的交汇处曾于1969年发生7.4级地震^[10,11]. 相比之下, 渤海北部辽东湾一带地震活动较少, 几乎没有发生过中、强地震.

地球物理特征表明, 大致以郯庐断裂带为界, 渤海东部为布格重力负异常, 渤海西部为布格重力正异常, 辽东湾的磁场背景上叠加了一个北北东方向的高磁异常带, 它由北向南逐渐变宽, 磁场走向也转为北西方向^[12,13]. 大地热流分布也反映出浅层构造体系的基本特征^[14], 表明基底断裂对热流活动的控制作用. 近些年来, 环渤海地区开展了不同尺度的地震层析成像研究^[15,16], 渤海南部有2条海-陆地震联合观测剖面^[17,18], 莱州湾有3条大地电磁测深剖面^[19],

引用格式: 胥颐, 汪晟, 孟晓春. 渤海海域郯庐断裂带的地震层析成像特征. 科学通报, 2016, 61: 891-900

Xu Y, Wang S, Meng X C. Tomographic evidence of the Tan-Lu fault zone in the Bohai Sea of eastern China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 891-900, doi: 10.1360/N972015-00828

图1 渤海海域的断裂体系分布图

Figure 1 Sketch map of fault systems in the Bohai Sea

上述工作为研究渤海海域及郯庐断裂带的深部构造特征提供了依据。然而，由于地震层析成像的分辨尺度较大，难以展示渤海海域的地壳结构细节，而海-陆地震联合观测和大地电磁测深受剖面位置的限制，无法反映郯庐断裂带深部结构的整体变化。经历了多期次的构造变动后，渤海海域及郯庐断裂带的地壳结构究竟发生了怎样的变化？浅层构造体系与深部结构之间存在何种联系？郯庐断裂带与张家口-蓬莱断裂带的关系如何？海域地震活动的不均一性是否与地壳结构的变化有关？这些问题都需要从深部结构研究中获取信息。鉴于近年来环渤海地区的地震台站数量有所增加，本文利用体波层析成像方法反演了渤海地区的三维P波速度结构，期望通过地壳和上地幔结构了解渤海海域及郯庐断裂带的深部构造状况。

1 数据

反演使用的数据来自渤海周边河北、山东、辽宁三省地震台网的286个台站(图2)。鉴于海域内部缺少观测台站，为了获取足够的地震数据对渤海海域的地壳结构形成覆盖，反演区域被扩大至 $35^{\circ}\sim 41.5^{\circ}\text{N}$ ， $117^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ ，收集了上述区域内1978年以来的地震数据，主要为直达波Pg和莫霍面折射波Pn的台站到时。要求地震的震中位于反演区域之内，每个地震至少具备6个以上的台站到时。

图2 渤海及周边地区的地震台站分布

Figure 2 Seismic stations in the Bohai Sea and surrounding area

数据构成分为几个部分：1978~1997年的P波到时来自早期地震台站的观测报告，经过历次使用已经去除了误差较大的数据，大部分数据能够满足残差要求，其中包括2637个地震和25768个P波到时，单个地震的最大记录数为39个台站。1999~2003年的数据来自中国地震台网的年报，共获得120个地震和1912个P波到时，单个地震的最大记录数为35个台站，大部分数据也能够满足残差要求。新增加的河北台网数据包括2000~2013年的地震资料，经过初步处理发现2000~2008年的数据走时平均残差较大，而2009~2013年的数据走时平均残差较小。由于不清楚是何原因导致两个阶段的数据产生如此大的偏差，故反演时仅采用了2009~2013年的数据，共有2235个地震和22905个P波到时。新增加的山东台网数据为2010~2014年的地震资料，经过挑选获得了1070个地震和13138个P波到时，这一部分数据的走时平均残差较小，可以直接使用。新增加的辽宁台网数据为2009~2014年的地震资料，挑选后获得了5656个地震和113651个P波到时。与河北台网2000~2008年的数据类似，这一部分数据的走时平均残差大大超出了可接受的范围，由于原因不明，未能用于层析成像反演。

反演区域内的地震分布很不均匀，华北地区的地震主要集中在1976年唐山7.8级地震的震中附近以及京津塘一带，辽宁地区的地震则集中在1975年海

图3 去丛集化后的地震震中分布

Figure 3 Epicenter distribution of the earthquakes after declustering

城7.3级地震的震中周围, 海域的地震大多分布在渤海南部, 辽东湾内很少有地震发生, 其余地区的地震分布相对稀疏. 为了避免震源过于集中导致射线传播路径重复, 反演前对所有地震进行了去丛集化处理: 给定三维球体的半径, 将位于该球体空间内的全部地震视为一个震群, 从该震群中挑选出一个台站到该震群中心最近的地震, 舍弃其余台站到该震群中心较远的地震, 规定各震源球体的空间距离不小于球体半径, 依次对每个地震为中心的震群球体进行类似的计算. 经过多次对比测试, 最终确定的震群球体半径为8 km, 一共挑选出892个地震和12094个P波到时. 经过去丛集化处理后(图3), 反演区域内的震中分布得到了优化, 射线分布更加趋于合理.

2 方法

2.1 初始模型

初始模型涵盖了地壳和上地幔(图4). 地壳分为5层, 界面深度和速度值参考了环渤海地区的地震测深结果, 特别是穿过渤海海域的海-陆地震联合观测剖面^[17,18]. 利用3 km深度的界面反映地壳浅部和中、新生代沉积层的速度变化, 13 km深度的界面反映结晶基底附近的速度变化, 22 km深度的界面位于地壳中部, 相当于上、下地壳的分界, 32 km深度的界面代表渤海海域的莫霍面平均深度, 另外在32 km之上增

图4 初始速度模型. 虚线为反演前的初始模型, 实线为优化后的最终模型

Figure 4 Initial velocity models. The dashed line is the initial model before the inversion and the solid line is the final model after optimization

加了一个28 km深度的界面, 以便约束地壳底部的速度变化. 上地幔分为3层, 界面深度和速度值参考了各向同性地球模型AK135^[20], 其中50和77.5 km深度的界面用于反映上地幔顶部的速度结构, 120 km为初始模型的底界面.

由于利用初始模型计算的理论走时与观测走时之间存在一定的偏差, 为了逼近真实的地球内部结构, 需要调整初始模型中的界面速度, 提高理论走时和观测走时的拟合程度. 这一过程可以在迭代反演中逐步实现. 先利用给定的初始模型进行反演, 检查走时残差是否收敛, 然后根据输出结果统计各层界面的速度平均值, 重新构建新的一维速度模型, 并将其作为下一次反演的输入模型. 经过若干次迭代反演, 待观测走时与理论走时趋于一致时, 可将最后一次反演的输入模型视为最优速度模型(图4). 处理结果表明, 优化后的速度模型走时残差明显减小, 并且分布比较合理(图5), 因此将其作为最终的反演初始模型.

图5 反演前(a)和反演后(b)的走时残差分布

Figure 5 Travel-time residuals before (a) and after (b) the inversion

2.2 正反演计算

走时计算采用三维射线追踪^[21,22]. 初始模型进行离散化时, 水平方向沿着经度和纬度采用等间距网格划分, 垂直方向以水平层状界面作为网格面, 各网格节点赋予初始模型中相应深度的界面速度值, 通过三维线性插值计算网格空间内任一点的速度值. 除了台站高程校正之外, 走时计算还考虑了莫霍面深度的变化, 资料来自中国海陆1:5000000莫霍面深度分布图^[23]. 其中黄海海域的莫霍面平均深度为30 km, 渤海海域的莫霍面平均深度为31 km, 总体上反演区域内莫霍面深度的变化较为平缓, 向西北方向逐渐增大.

反演采用线性化的阻尼最小二乘法^[24]. 原则上选取均方根误差较小、速度分布与典型构造比较相符的解作为最终解. 反演时利用不同的计算参数进行对比测试, 如残差大小、去丛集化的震源球体半径、阻尼因子、平滑因子等. 结果表明, 经过数次迭代均方根误差很快减小, 其中第2次迭代减小最快; 在之后的迭代过程中, 虽然均方根误差也在减小, 但减小的幅度越来越小. 经过5次迭代后, 均方根误差不再发生明显的变化, 反演后的速度分布也趋于稳定. 最后选取了P波走时残差小于3 s、去丛集化的震源球体半径为8 km、阻尼因子为20、平滑因子为10、第5次迭代的解作为最终结果.

2.3 分辨估计

分辨估计采用Checkerboard方法, 先将一维初始模型中的网格节点赋予正负相间、幅度为 $\pm 5\%$ 速度扰动量, 添加与实际数据相近的高斯噪音作为输入模型; 然后根据实际的震源分布和台站位置计算P波走时, 生成供分辨测试的“理论观测数据”. 其次采用与

反演相同的方法求解, 比较输出模型与初始模型的相似程度, 分析现有数据的分辨能力和反演结果的可靠性. 该方法可以通过LSQR方法求解, 计算简捷, 能够检验不同尺度的理论模型, 便于选择合理的网格划分. 为此先后对比了不同尺度的Checkerboard模型(如 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 等), 最终采用了 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格划分. 图6表明, 基于现有数据的反演结果在大部分网格节点都取得了较好的分辨, 其中包括渤海海域以及周边的辽东半岛、华北盆地及山东半岛. 此外, 由于大量使用Pn波到时, 上地幔顶部50 km深度也获得了较好的分辨. 随着深度的增加, 进入上地幔深部的射线数量逐渐较少, 分辨有所降低.

3 分析与讨论

图7为水平方向的P波速度分布图. 在地壳浅部(3 km), 辽东湾和渤海中部多为低速区, 莱州湾主要为高速区, 这一深度上郯庐断裂带的构造特征不是很清晰. 进入地壳深部后, 郯庐断裂带附近的速度明显偏高, 高速区的分布随着深度略有变化: 在13 km深度上, 辽东湾东部和渤海西部为高速区, 辽东湾西部、渤海东部以及莱州湾为低速区; 在22 km深度上, 郯庐断裂带附近均为高速区, 至渤海南部时高速区的延伸方向在发生扭曲; 在28 km深度上, 郯庐断裂带附近仍为高速区并向渤海西部扩展, 郯庐断裂带东侧则为低速区; 在32 km深度上, 郯庐断裂带附近以高速区为主, 两侧多为低速区; 在50 km深度上, 沿着郯庐断裂带出现低速区, 东、西两侧为相互平行的高速区.

图8为穿过渤海海域的层析成像剖面, 其中剖面A~D横穿郯庐断裂带, 剖面F沿着郯庐断裂带的走向, 剖面E和G横穿张家口-蓬莱断裂带. 可以看出, 辽东湾海域的郯庐断裂带地壳中、下部速度偏高, 地壳底部和莫霍面附近存在高速薄层, 上地幔顶部为低速区, 向南接近张家口-蓬莱断裂带时, 地壳中、下部的高速层逐渐减薄. 相比之下, 张家口-蓬莱断裂带附近的低速特征十分明显, 特别是地壳中、下部尤为突出, 壳幔边界比较狭窄, 上地幔顶部低速区不十分明显.

渤海海域地壳深部的速度结构变化与浅层构造体系之间存在一定的对应关系, 与重力、磁场以及大地热流分布也较为相似^[12-14]. 根据速度分布特征推测, 郯庐断裂带应该具有较大的深度. 在50 km深度上, 该断裂的低速特征十分清晰, 表明它穿透地壳进入了上地幔顶部, 这一推测与海-陆地震联合观测和

图6 网格尺度为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的Checkerboard模型恢复图像. 左上角的数字为该层深度

Figure 6 Recovered checkerboard models for a $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ grid spacing. The depth is shown at the top left of each panel

图7 3~50 km深度的水平方向速度分布图. 黑色实线为主要断裂, 左上角的数字为深度

Figure 7 Velocity variations at 3–50 km depths. Black lines are fault traces and the depth is shown at the top left of each panel

图8 (a)~(g) 穿过渤海海域的层析成像速度剖面(A~G)。白色圆点为剖面附近的地震, 黑色虚线为莫霍面; TLFZ, 郯庐断裂带; ZPFZ, 张家口-蓬莱断裂带; (h) 各剖面的位置

Figure 8 (a)~(g) Tomographic velocity profiles (A~G) across the Bohai Sea. White circles are earthquake locations near the profiles; the black dashed line is the Moho depth. TLFZ, the Tan-Lu fault zone; ZPFZ, the Zhangjiakou-Penglai fault zone. (h) Locations of the profiles are shown in the map

大地电磁测深取得的认识基本相同^[17-19]。在渤海南部, 由于受到张家口-蓬莱断裂左旋平移的影响, 郯庐断裂带地壳中、上部的速度分布发生扭曲, 而地壳下部和上地幔顶部的速度分布依然与断裂带的走向保持一致。由此可见, 作为渤海海域的主要断裂, 郯庐断裂带和张家口-蓬莱断裂带不仅控制了浅层结构

和基底断裂的格局, 也影响到地壳深部的构造变动。前者形成时代较早, 穿透深度较大, 后者全新世以来的活动性较强, 对渤海南部地壳结构的影响非常显著。

郯庐断裂带北段和南段的速度结构存在差异, 而且与断裂活动时代以及地震活动密切相关。在辽东湾和渤海中部, 郯庐断裂带附近的地壳具有双层

结构,浅部为低速的沉积层,地壳中、下部速度偏高而且厚度较大,沿断裂带走向速度变化很小,没有壳内低速层。在渤海南部及莱州湾一带,郯庐断裂带附近地壳结构相对复杂,不仅横向变化较大,而且壳内发育有低速层。研究资料表明,郯庐断裂带北段的最新活动时期为新近纪至晚更新世,南段的最新活动时期为全新世早期^[4,7]。辽东湾现今地震活动较弱,少有中、强地震发生,可能与地壳结构相对简单以及岩浆侵入导致郯庐断裂带部分愈合有关^[1],地壳中、下部的高速结构以及沿断裂带分布的高磁异常表明存在这种可能性。相比之下,渤海南部和莱州湾一带地震活动频繁,1969年渤海7.4级地震发生在郯庐断裂带与张家口-蓬莱断裂带的交汇处^[10,11]。这一区域既有北北东方向的断裂,也有其他方向的断裂^[8,9],全新世以来构造活动十分强烈,地壳结构极为复杂,成为渤海南部频繁发生地震的重要原因之一。

郯庐断裂带地壳底部的高速薄层具有特殊意义。在穿过渤海南部的海-陆地震联合观测剖面上,郯庐断裂带下方也存在类似的高速体,它们被认为是大陆碰撞过程中扬子地壳的残留体或者侵入地壳的高密度幔源物质^[17,18]。渤海海域白垩-早第三纪构造活动强烈,郯庐断裂带附近广泛分布富含幔源包体的岩浆岩,它们与中国东部及鲁西地区白垩-早第三纪火山岩的地球化学特征一致^[25],而鲁西地区的岩浆岩主要来源于富集型地幔与扬子克拉通俯冲下沉的沉积岩混染交代后的部分熔融^[26]。虽然新生代以来郯庐断裂带也经历过较强的岩浆活动,但是这一时期该断裂在渤海海域的右旋位移量远小于中生代的左旋位移量^[6]。据此推断,这些高速薄层应该是早第三纪渤海海域岩石圈大规模伸展减薄、地幔物质伴随岩浆活动侵入地壳后冷却所致。

张家口-蓬莱断裂带下方的低速特征十分明显,地壳底部未发现高速薄层,渤海南部海-陆地震联合观测剖面上也存在类似的现象^[17,18],这可能与该断裂带形成时代较晚、新生代以来的构造活动较强有关^[11,27]。相关研究表明,该断裂向东进入渤海穿过郯庐断裂带和渤海海峡,向西可延伸至华北盆地边缘^[28],不仅地壳中、下部速度偏低,而且壳幔过渡带

厚度较大^[29],表明莫霍面附近存在热流活动和物质交换。

华北地区受“克拉通破坏”影响,地幔上涌导致岩石圈减薄^[30],这一动力学作用是否波及到渤海海域受到密切关注^[31]。图4表明,渤海海域地壳深部和上地幔的平均速度低于初始模型中的参考值,特别是上地幔顶部沿着郯庐断裂带分布的低速区非常突出(图7)。根据环渤海地区的层析成像结果,渤海海域从80 km深度开始出现低速异常,至120 km深度与华北地区的低速异常连为一体^[15,16],这些现象表明渤海海域很可能与华北盆地一样受到克拉通破坏暨地幔上涌的影响。鲁西地区的地震测深资料证实^[32,33],郯庐断裂带下方莫霍面发生断错、岩石圈厚度减薄,软流圈上隆。作为一条规模巨大的断裂带,郯庐断裂带上地幔顶部的低速异常应该是深部热流物质沿断裂通道向上侵入的痕迹。

4 结论

利用地震层析成像方法重建渤海海域的三维P波速度模型,展示了郯庐断裂带及邻近地区的地壳和上地幔结构,为分析区域构造运动产生的深部效应提供了依据。

渤海海域的地壳结构具有明显的横向非均匀性,速度变化与郯庐断裂带和张家口-蓬莱断裂带的构造活动密切相关。郯庐断裂带北段(辽东湾和渤海中部)地壳具有双层结构,浅部为低速沉积层,地壳中、下部速度偏高,显示出相对稳定的地壳结构特征,与现今较弱的地震活动相吻合。渤海南部地壳结构变化较大,由于张家口-蓬莱断裂带与郯庐断裂带在此相交,全新世以来构造活动使得这一地区的地壳结构极为复杂,成为地震频繁发生的重要原因之一。

受华北克拉通破坏及地幔上涌的影响,渤海海域地壳深部和上地幔平均速度偏低,地幔深部的热流物质有可能沿郯庐断裂带向上侵入,在地壳底部冷却后形成高速薄层,对于强化壳幔边界、减缓断裂带的地震活动起到了一定作用。张家口-蓬莱断裂带具有较强的构造活动性,应引起高度重视。

致谢 感谢河北、山东、辽宁地震台网提供的地震数据以及两位审稿人的建设性意见,感谢Steve W. Roecker教授的英文审核。

参考文献

- 1 Wan T F, Zhu H, Zhao L, et al. Formation and devolution of Tancheng-Lujiang fault zone: A review (in Chinese). *Geosci J Graduate School China Univ Geosci*, 1996, 10: 159–168 [万天丰, 朱鸿, 赵磊, 等. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述. 现代地质, 1996, 10: 159–168]
- 2 Wang X F, Li Z J, Chen B L, et al. On Tan-Lu Fault Zone (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2000. 1–374 [王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郯庐断裂带. 北京: 地质出版社, 2000. 1–374]
- 3 Yu Z, Wu S, Zhou D, et al. Seismic profiles across the middle Tan-Lu fault zone in Laizhou Bay, Bohai Sea, eastern China. *J Asian Earth Sci*, 2008, 33, 383–394
- 4 Li X S, Zhao Y X, Liu B H, et al. Structural deformation and fault activity of the Tan-Lu Fault zone in the Bohai Sea since the late Pleistocene. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1908–1916 [李西双, 赵月霞, 刘保华, 等. 郯庐断裂带渤海段晚更新世以来的浅层构造变形和活性. 科学通报, 2010, 55: 684–692]
- 5 Tang L J, Chen X Y, Zhou X H, et al. Structure analysis of Tan-Lu fault zone in the Bohai Sea (in Chinese). *J Southwest Petrol Univ (Sci Techn Ed)*, 2011, 33: 170–176 [汤良杰, 陈绪云, 周心怀, 等. 渤海海域郯庐断裂带构造解析. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33: 170–176]
- 6 Huang L, Liu C Y, Kusky T M. Cenozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone (East China): Constraints from seismic data. *Gondwana Res*, 2015, 28: 1079–1095
- 7 Zhu G, Hu W, Song L, et al. Quaternary activity along the Tan-Lu fault zone in the Bohai Bay, East China: Evidence from seismic profiles. *J Asian Earth Sci*, 2015, 114: 5–7
- 8 Qi J, Zhou X, Deng R, et al. Structural characteristics of the Tan-Lu fault zone in Cenozoic basins offshore the Bohai Sea. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2008, 51(Suppl 2): 20–31 [漆家福, 邓荣敬, 周心怀, 等. 渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(增刊 I): 19–29]
- 9 Qi J, Yang Q. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China. *Mar Petrol Geol*, 2010, 27: 757–771
- 10 Xu J, Gao Z W, Sun J B, et al. Analysis of structures in 1969 Bohai Sea Ms 7.4 earthquake area and discussion about the causative structure (in Chinese). *Earthq Res China*, 2001, 17: 121–133 [徐杰, 高战武, 孙建宝, 等. 1969 年渤海 7.4 级地震区地质构造和发震构造的初步研究. 中国地震, 2001, 17: 121–133]
- 11 Fu Z, Liu J, Liu G. On the long-term seismic hazard analysis in the Zhangjiakou-Penglai seismotectonic zone, China. *Tectonophysics*, 2004, 390: 75–83
- 12 Qi J F, Zhou X H, Wang Q S. Structural model and Cenozoic kinematics of Tan-Lu deep fracture zone in Bohai Sea area (in Chinese). *Geol China*, 2010, 37: 1231–1242 [漆家福, 周心怀, 王谦身. 渤海海域中郯庐深断裂带的结构模型及新生代运动学. 中国地质, 2010, 37: 1231–1242]
- 13 Jiang D D, Jiang W W, Hu W J. Study of crustal structure and geodynamic characteristics around the Bohai Sea area (in Chinese). *Prog Geophys*, 2013, 28: 1729–1738 [姜迪迪, 江为为, 胡卫剑. 环渤海地区地壳结构及其动力学特征研究. 地球物理学进展, 2013, 28: 1729–1738]
- 14 Qiu N S, Wei G, Li C C, et al. Distribution features of current geothermal field in the Bohai Sea waters (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2009, 30: 412–419 [邱楠生, 魏刚, 李翠翠, 等. 渤海海域现今地温场分布特征. 石油与天然气地质, 2009, 30: 412–419]
- 15 Li Z W, Xu Y, Hao T Y, et al. Seismic tomography and velocity structure in the crust and upper mantle around Bohai Sea area (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2006, 49: 797–804 [李志伟, 胥颐, 郝天珧, 等. 环渤海地区的地震层析成像与地壳上地幔结构. 地球物理学报, 2006, 49: 797–804]
- 16 Zhang L, Liu J S, Hao T Y, et al. Seismic tomography of the crust and upper mantle in the Bohai Bay Basin and its adjacent regions. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2007, 50: 1810–1822 [张岭, 刘劲松, 郝天珧, 等. 渤海湾盆地及其邻域地区地壳与上地幔层析成像. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 1444–1455]
- 17 Hao T, You Q, Liu L, et al. Joint land-sea seismic survey and research on the deep structures of the Bohai Sea areas. *Acta Oceanol Sin*, 2013, 32: 13–24
- 18 Liu L, Hao T, Lü C, et al. Crustal structure of Bohai Sea and adjacent area (North China) from two onshore-offshore wide-angle seismic survey lines. *J Asian Earth Sci*, 2015, 98: 457–469
- 19 Hu W, Zhu G, Yan L J, et al. Analysis of relationship between seismic activity and crust electrical textures for the central segment of the Tan-Lu fault zone (in Chinese). *Geol Rev*, 2014, 60: 80–90 [胡惟, 朱光, 严乐佳, 等. 郯庐断裂带中段地震活动性与深部地壳电性结构关系的探讨. 地质评论, 2014, 60: 80–90]

- 20 Kennett B L N, Engdahl E R, Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophys J Int*, 1995, 122: 108–124
- 21 Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J Geophys Res*, 1992, 97: 19909–19928
- 22 Koketsu K, Sekine S. Pseudo-bending method for three-dimensional seismic ray tracing in a spherical earth with discontinuities. *Geophys J Int*, 1998, 132: 339–346
- 23 Hao T Y, Hu W J, Xin J, et al. The Moho depth map (1:5000000) in the land and sea of China and adjacent areas and its geological implications (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2014, 57: 3869–3883 [郝天珧, 胡为剑, 邢健, 等. 中国海陆 1:500 万莫霍面深度图及其所反映的地质内涵. *地球物理学报*, 2014, 57: 3869–3883]
- 24 Paige C C, Saunders M A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM T Math Software*, 1982, 8: 43–71
- 25 Hou G T, Qian X L, Cai D S. Cretaceous–Paleogene rifting in the Bohai Sea and western Shandong: Geochemical evidence from volcanic rocks (in Chinese). *Chin J Geol*, 2003, 38: 13–21 [侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海-鲁西地区白垩-早第三纪裂谷活动—火山岩的地球化学证据. *地质科学*, 2003, 38: 13–21]
- 26 Liu S, Feng C, Hu R. Zircon U-Pb geochronological, geochemical, and Sr-Nd isotope data for Early Cretaceous mafic dykes in the Tancheng-Lujiang Fault area of the Shandong Province, China: Constraints on the timing of magmatism and magma genesis. *J Asian Earth Sci*, 2015, 98: 247–260
- 27 Xu J, Zhou B G, Ji F J, et al. A primary study on the neotectonic pattern of the Bohai area in China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2011, 32: 442–449 [徐杰, 周本钢, 计凤桔, 等. 渤海地区新构造格局. *石油学报*, 2011, 32: 442–449]
- 28 Nie W Y, Zhu Z P, Zhang X K, et al. The crustal-mantle tectonics and its velocity structure revealed by the refraction profile passing through the west edge of the Zhangjiakou-Bohai seismic belt (in Chinese). *J Seismol Res*, 1998, 21: 94–102 [聂文英, 祝治平, 张先康, 等. 穿过张家口-渤海地震带西缘的折射剖面所揭示的地壳上地幔构造与速度结构. *地震研究*, 1998, 21: 94–102]
- 29 Lai X L, Zhang X K, Cheng S X, et al. Study on crust mantle transitional zone in west margin of Zhangjiakou-Bohai fault belt (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2004, 47: 798–804 [赖晓玲, 张先康, 成双喜, 等. 张家口-渤海断裂带西缘壳幔过渡带研究. *地球物理学报*, 2004, 47: 798–804]
- 30 Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. Destruction of the North China Craton. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 1565–1587 [朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 1135–1159]
- 31 Hou G, Hari K R. Mesozoic–Cenozoic extension of the Bohai Sea: Contribution to the destruction of North China Craton. *Front Earth Sci*, 2014, 8: 202–215
- 32 Jia S, Wang F, Tian X, et al. Crustal structure and tectonic study of North China Craton from a long deep seismic sounding profile. *Tectonophysics*, 2014, 627: 48–56
- 33 Chen L, Zheng T, Xu W. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. *J Geophys Res*, 2006, 111: B09312, doi: 10.1029/2005JB003974

Tomographic evidence of the Tan-Lu fault zone in the Bohai Sea of eastern China

XU Yi¹, WANG Sheng^{1,2} & MENG XiaoChun³

¹ Institute of Geology and Geophysics, Key Laboratory of Petroleum Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China

The Tan-Lu fault zone is a huge tectonic belt in eastern China. It extends over 3000 km long and passes through the Bohai Sea from the Shandong peninsula in the south to the Liaodong peninsula in the north. Originating from the collision of the North China block with the South China block in Indosinian period, the fault zone had experienced strike-slipping, extensional, compressional deformation and magma intrusions since Mesozoic Era. It is thought to be a continental-scale fault zone that penetrates the crust into the upper mantle. The Bohai Sea links the northern and southern segments of the Tan-Lu fault zone. Its shallow crust is covered by Cenozoic basins and bounded by a series of basement faults. Some faults may be connected to the Tan-Lu fault zone in the deep crust. Geophysically, the Tan-Lu fault zone is a Bouguer gravity boundary that separates negative anomalies in the east and positive anomalies in the west. On the magnetic map, the northern Bohai Sea is characterized by a NNE-trending positive anomaly zone. This magnetic zone becomes scattered in the southern Bohai Sea, with approximately NWW-trending anomalies parallel to the Zhangjiakou-Penglai fault zone. Seismically, most earthquakes are distributed in the southern Bohai Sea, including the $M_s7.4$ event in 1969; very few of them took place in the northern Bohai Sea. To determine the relationship between the deep structure of the Tan-Lu fault zone and local tectonic activity, we used seismic tomography to construct a three-dimensional P-wave velocity model for the crust and upper mantle of the Bohai Sea. The data were collected from existing seismic stations around the marine area. Compared to previous tomographic studies, the crust and uppermost mantle of the Bohai Sea are well imaged with good resolution. A strong heterogeneity is observed in the crustal structure of the Bohai Sea, which shows P-wave velocity variations correlated to tectonic activity on the Tan-Lu fault zone and the Zhangjiakou-Penglai fault zone. A low-velocity sediment layer in the shallow crust and high-velocity layers in the deep crust, with no low-velocity zones in the lower crust, characterize the structure of the northern and central Bohai Sea. These features suggest a stable structure that corresponds to low earthquake activity in the northern Bohai Sea. At the same time, the Tan-Lu fault zone is truncated in the southern Bohai Sea by the NNW-trending Zhangjiakou-Penglai fault zone. Tectonic activity since the Holocene Epoch has made the crustal structure in this area very complicated and is a primary cause of frequent seismic activity. Additionally, low average velocities are observed in the deep crust and upper mantle of the Bohai Sea, which are likely to be related to mantle upwelling beneath the North China Craton. We suggest that hot material from the upper mantle intrudes into the lower crust through the Tan-Lu fault zone to form a high-velocity layer after cooling. This high-velocity layer may strengthen the crust-mantle boundary and lessen seismic activity on the fault zone.

Bohai Sea, Tan-Lu fault zone, seismic tomography, crustal and upper mantle, velocity structure

doi: 10.1360/N972015-00828