

武岩, 丁志峰, 朱露培. 2014. 利用接收函数研究渤海湾盆地沉积层结构. 地震学报, 36(5): 837–849. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.008.
Wu Y, Ding Z F, Zhu L P. 2014. Sedimentary basin structure of the Bohai Bay from teleseismic receiver functions. Acta Seismologica Sinica, 36(5): 837–849. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.008.

利用接收函数研究渤海湾盆地沉积层结构^{*}

武 岩^{1,2),*} 丁志峰^{1,2)} 朱露培³⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100081 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室

3) Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University, Missouri 63103, USA

摘要 对布设于渤海湾盆地地区的 70 个台站 2006 年 9 月—2009 年 9 月记录到的 895 个远震数据进行接收函数计算, 发现位于沉积层上的台站记录的接收函数震相较为复杂, 由沉积层基底的转换波、多次波及莫霍面转换波、多次波共同构成, 且随着沉积层厚度的增加, 沉积层基底转换波、多次波及莫霍面转换波、多次波震相相互叠加, 使之无法分辨出莫霍面转换波及多次波到时. 为此, 本文利用相邻算法对沉积层模型进行搜索, 以获取与实际波形误差最小的波形相对应的模型, 即台站下方的沉积层结构. 结果显示: ① 渤海湾盆地由 NNE 向展布的拗陷带与隆起带组成, 冀中拗陷带的沉积层厚度为 3—6 km, 拗陷带内沿 NE—NNE 向分布着带状拗陷带与凸起带相间的次级构造, 而且其东侧靠近沧县隆起区的拗陷带沉积层基底埋深最大, 体现了渤海湾盆地基底受正断层控制而形成的半地堑(地堑)—半地垒(地垒)构造; ② 隆起带的波速比 v_p/v_s 大于拗陷带的波速比, 推测与隆起带下第三系地层的缺失有关, 拗陷带内高波速比地区与地热田的分布相对应, 说明沉积层内高温环境下波速比较高; ③ 隆起带内的 S 波平均速度较拗陷带内的 S 波平均速度小, 且冀中拗陷带内沉积层较厚地区对应的 S 波平均速度比其它地区更大, 说明渤海湾地区沉积层厚度与沉积层内的 S 波平均速度成反比关系, 推测与下第三系地层的厚度有关, 且下第三系地层越厚的地区, S 波平均速度越大. 以上结果表明, 利用接收函数研究的结果与通过地质、地热等方面的研究结果存在着良好的对应关系.

关键词 接收函数 渤海湾盆地 沉积层结构 相邻算法

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.008 中图分类号: P315.2 文献标志码: A

Sedimentary basin structure of the Bohai Bay from teleseismic receiver functions

Wu Yan^{1,2),*} Ding Zhifeng^{1,2)} Zhu Lupei³⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

3) Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University, Missouri 63103, USA

^{*} 基金项目 中央级公益性科研院所基本科研专项(DQJB12B19)资助.

收稿日期 2014-02-23 收到初稿, 2014-03-21 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: wuyan@cea-igp.ac.cn

Abstract: We calculated P wave receiver functions using 895 teleseismic events from September 2006 to September 2009 recorded by 70 temporary stations located in the Bohai Bay basin. We found that it is difficult to identify the P to S converted phases from the Moho discontinuity. The first few seconds after the direct P arrival are mainly controlled by the sedimentary structure response which includes the Ps phase generated by the bottom of the basin and its multiple reverberations in the basin. Based on these characteristics, we used the neighborhood algorithm to invert the data and try to find the best basin velocity model that produces the best fit between the theoretical receiver functions and observed ones in the least-squares sense. The results show that there is a series of depressions and uplifts orienting in the NNE direction in the Bohai Bay basin. The sedimentary depth in the Jizhong Depression is about 3–6 km. There are several secondary depressions and uplifts alternating in the NNE or NE direction in the Jizhong depression. The thickest sedimentary layer is located in the eastern Jizhong depression. The above shows the characteristics of a half rift valley (rift valley)–half horst (horst) structure. The ratio of the P velocity to S velocity in the uplifts is larger than that in the depressions, which may be caused by the lack of the Paleogene stratum in the uplifts. The proximity of geothermal fields to the high v_p/v_s ratio depressions shows a close relationship between the high temperatures of the stratum and the large v_p/v_s ratios. The average of S velocity of the sedimentary in the uplift is smaller than that in the depression, and the thicker sedimentary area always has a higher average S velocity. These characteristics show a relationship between thick sedimentary and high average S velocity. It may be because that the thicker sedimentary area has a thicker Paleogene stratum and the S velocity of the Paleogene stratum is much higher than that of the Neogene and Quaternary strata. The sedimentary structure provides a base to determine crustal structure beneath the Bohai Bay basin.

Key words: receiver function; Bohai Bay basin; sedimentary structure; neighborhood algorithm

引言

渤海湾盆地位于华北克拉通东部,北靠燕山,西邻太行山,南部和东部分别以鲁西隆起和胶辽隆起为界(Chen *et al.*, 2008),是新生代以来太平洋板块向欧亚板块斜向俯冲及印度板块与欧亚板块碰撞所产生的右旋拉张力作用下形成的伸展盆地(Allen *et al.*, 1997).渤海湾盆地由于蕴藏着丰富的石油资源,近几十年来在石油勘探领域受到广泛重视.而作为一个典型的中新生代形成的伸展盆地,其形成原因与构造特点是地质学界与地球物理学界研究的重点(Allen *et al.*, 1997; 嘉世旭等, 2005; Zhao, Zheng, 2005; Zheng *et al.*, 2005; Zhou, Zhou, 2006; Li *et al.*, 2007; 李三忠等, 2010).渤海湾盆地由于经历了早第三纪裂陷和晚第三纪以来的热沉降两个主要构造演化阶段(Zhou, Zhou, 2006),形成了拗陷带与隆起带相间排列的格局.其中位于渤海湾盆地西侧的冀中拗陷地区,是一个发育在华北地台之上的中、新生代断陷-拗陷盆地,其边界线或为断层,或为下第三系缺失线(林世辉, 龚育龄, 2005).该地区地热资源和石油储备丰富,是产出石油的主要地区之一.开

展对冀中拗陷带沉积层结构的研究,对了解中生代裂陷盆地的形成以及石油储备模式等有很大意义.

目前对沉积层结构的研究方式主要有人工地震探测、钻井采样等,利用天然地震对沉积层结构进行研究的成果则较少. Zheng等(2005)及 Zhao和 Zheng(2005)分别利用接收函数的波形模拟方法和有限差分计算理论波形的波形模拟方法,得到了渤海湾盆地内部一条NW向测线下方的沉积层结构. 罗艳等(2008)利用首都台网数据,对华北地区的沉积层结构进行了计算,由于用于计算沉积层结构的台站较少,且分布稀疏,故分辨率较低.

本文利用分布均匀且较为密集的台阵数据,采用天然地震接收函数的波形模拟算法,对渤海湾盆地的沉积层厚度分布、波速比分布以及沉积层内的S波平均速度进行计算,以期获得分辨率较高的三维成像结果. 同时,研究沉积层结构对于其下方地壳结构的成像研究也具有十分重要的意义. 利用接收函数计算地壳结构时,由于沉积层基底转换波和多次波对Ps转换波震相识别具有较大影响,此时要通过H-k叠加方法获取地壳结构是比较困难的. 若已知其上覆沉积层的结构,则可通过其它方法获得该地壳结构(Zheng *et al*, 2006; 罗艳等, 2008; Chen, 2009). 本文利用相邻算法对接收函数波形进行拟合以得到沉积层基底的厚度,以便进一步计算地壳结构.

1 数据资料

中国地震局地球物理研究所于2006年9月—2009年9月,在华北地区架设了200个宽频带流动地震台,旨在研究华北克拉通的演化及其地下的精细结构. 该台阵覆盖了华北克拉通中、东部地块的大部分地区. 本文的研究区域渤海湾盆地则位于华北克拉通东部地区,为新生代断陷盆地,由一系列子构造单元组成,构造分布如图1所示. 本文所使用的

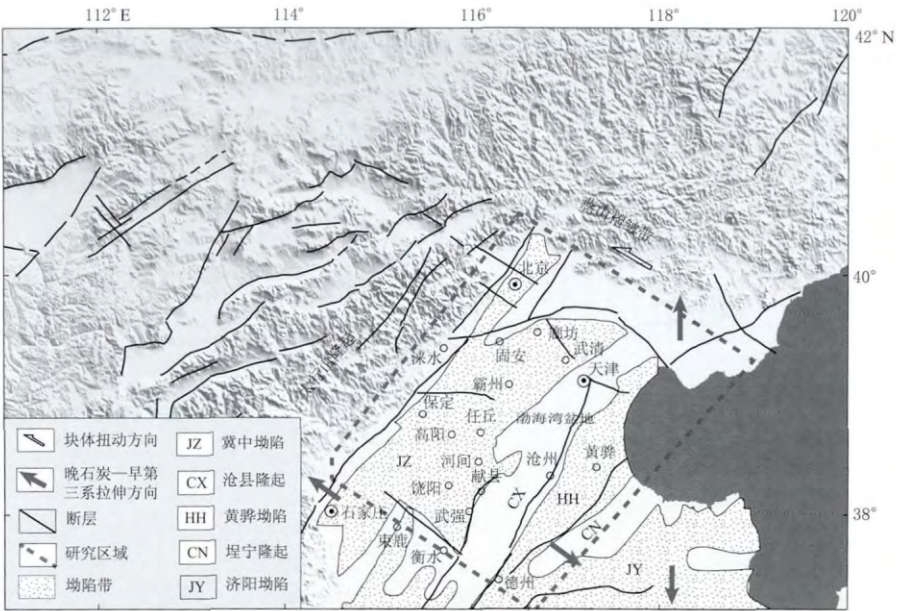


图 1 研究区域构造分布图

Fig. 1 Distribution of the tectonic structure in the research area

台阵分布均匀,除了南北两条台站间距约 15 km 的密集测线(分别以 *L* 和 *K* 开头命名的台站)外,其余台站间距均约为 30 km,呈面状分布(图 2).可以看出,研究区域内的台站主要分布在冀中拗陷和沧县隆起两大构造单元内.

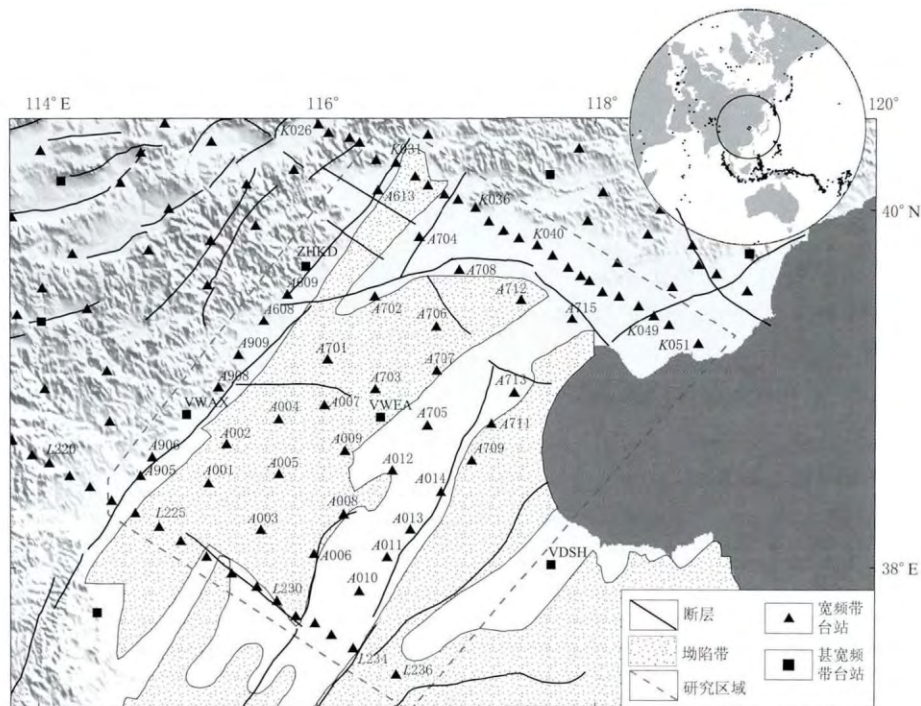


图 2 研究区域台站分布

南北两条测线之间的名称为连续数字,分别以 *L* 和 *K* 开头. 右上角小图为震中分布

Fig. 2 Distribution of the stations in the research area

Upper-right inset gives the distribution of epicenters. The name of the stations in north and south profiles are in continuous numbers, which begin with *L* and *K*

我们从这些台站记录的数据中,筛选出震中距为 30° — 90° 、震级大于 5.5、震相记录良好的事件共 895 个.从图 2 所示的震中分布可以看出,这些事件的方位角覆盖较为全面,有利于接收函数计算的准确性.

2 计算方法

接收函数是将三分量地震数据转换为径向、切向和垂向后,用径向分量和切向分量分别与垂向分量反褶积,以去除震源信息从而得到台站下方结构响应的一种方法.传统的计算方法中,反褶积均在频率域下进行.本文采用 Zhu 等(2006)的接收函数计算程序,在时间域内进行反褶积(Kikuchi, Kanamori, 1982; Ligorria, Ammon, 1999)计算,大大提高了信噪比.

关于沉积层厚度的计算,本文利用 Zhu (2004)所采用的方法,即利用相邻算法(neighborhood algorithm)(Sambridge, 1999)对设定的一定取值范围内的模型进行搜索,利用哈斯克尔(Haskell)传播矩阵方法(Haskell, 1964)计算出理论波形,并与实际接收函数波形进行对比,以找到与实际波形相关度最高的理论波形所对应的模型.该最佳模型对应的参

数即为沉积层结构. 模型划分为沉积层和地壳两层. 由于沉积层结构为本文关注重点, 因此只对接收函数前 10 s 的波形进行模拟计算.

模型主要由 5 个参数组成, 即每层厚度, 每层顶部的 S 波速度, 底部 S 波速度, P 波与 S 波的波速比及其 Q 值. 其中 Q 值本文取经验值.

由于模型的层数越多, 模型越复杂, 计算结果越不稳定, 所以本文只设定了沉积层和地壳两层. 模型参数控制主要为: 沉积层厚度为 0—7 km, 搜寻间距为 0.2 km; 地壳厚度为 1—35 km, 搜寻间距为 0.2 km. 沉积层顶部的 S 波速度为 0.2—3 km/s, 搜寻间距为 0.1 km/s, 底部的 S 波速度为 1—3 km/s, 搜寻间距为 0.1 km/s, 波速比为 2—4, 间距为 0.1; 地壳顶部的 S 波速度为 3—4 km/s, 搜寻间距为 0.1 km/s, 底部的 S 波速度为 3—5 km/s, 搜寻间距为 0.1 km/s, 波速比为 1.60—2.00, 间距为 0.1. 通过对搜寻到的模型进行理论波形计算, 并将其与实际记录到的接收函数波形进行对比, 以得到误差最小的一个理论波形, 该理论波形所对应的模型即为所求沉积层结构.

3 结果分析

对研究区域(图 1 中灰色虚线框所示)内的 70 个宽频带(频宽 50 Hz—60 s)和甚宽频带(频宽 50 Hz—120 s)流动台站进行接收函数计算. 计算之前, 对原始波形进行如下处理: 首先对直达 P 波前 10 s 至后 150 s 时间窗内的波形进行截取, 该时间段内的波形足以包括地球内部各界面的震相; 其次对截取的数据进行滤波, 此处选取切比雪夫滤波器进行带通滤波, 频段为 0.05—2 Hz, 阶数为 4; 然后对滤波后的数据进行重新采样, 间隔为 0.1 s; 最后利用互相关算法从中筛选出相关性较好且直达 P 波清晰的数据进行接收函数计算.

图 3 给出了接收函数的计算结果. 可以看出: 有些台站的接收函数震相简单, 莫霍面的 P_s 转换波震相清晰可辨, 这类接收函数是由基岩上的台站记录的(图 3a); 而有些接收函数震相十分复杂, 尤其是前 10 s 的震相, 莫霍面 P_s 转换波几乎无法识别, 这类接收函数是由沉积层内的台站记录的(图 3b—d). 由于本研究区域主要为沉积层地区, 故图 3a 所示的接收函数较少. 沉积层内的接收函数, 其前几秒的震相主要由沉积层基底的转换波和多次波组成. 例如图 3b 中的接收函数, 其最大震相(沉积层转换波 P_{sed})的到时较图 3c 和 d 所示的同一震相到时晚, 而其台站的沉积层厚度也最大. 图 3d 中最大振幅的到时不为 0, 到时上有延迟, 但其初至波震相与最大振幅(P_{sed})几乎完全重叠在一起, 这类震相也是沉积层台站记录的, 只是其对应的沉积层厚度较薄. 由于接收函数前 10 s 的震相主要由沉积层转换波、多次波及莫霍面转换波组成, 其中沉积层转换波和多次波由于其能量较强, 在最终震相中占主导地位, 因此, 选取接收函数前 10 s 的波形进行模拟, 以获得沉积层结构.

在进行波形模拟前, 首先要选取射线参数间隔均匀且涵盖范围大的 5 道接收函数数据参与相邻算法计算. 建立两层模型(沉积层和地壳), 各参数取值范围见上节所述, 利用相邻算法对模型参数进行搜索, 并利用哈斯克尔传播矩阵对搜索到的模型进行理论波形的计算, 得到与实际波形相关度最高的一个模型, 如图 4a 所示. 而模型的各参数值, 例如, 沉积层厚度、顶部 S 波速度、底部 S 波速度及波速比等, 决定了沉积层的结构(图 4b). 通过本文计算方法, 可以得到研究区域各台站下方沉积层基底的厚度分布, 具有一定梯度的沉积层内的 S 波速度结构, 以及台站下方沉积层的波速比. 这些结果为厘清渤海湾地区的沉积层结构及其与地质构造的对应关系提供了重要的参考信息. 研究区域内各台站计算得到

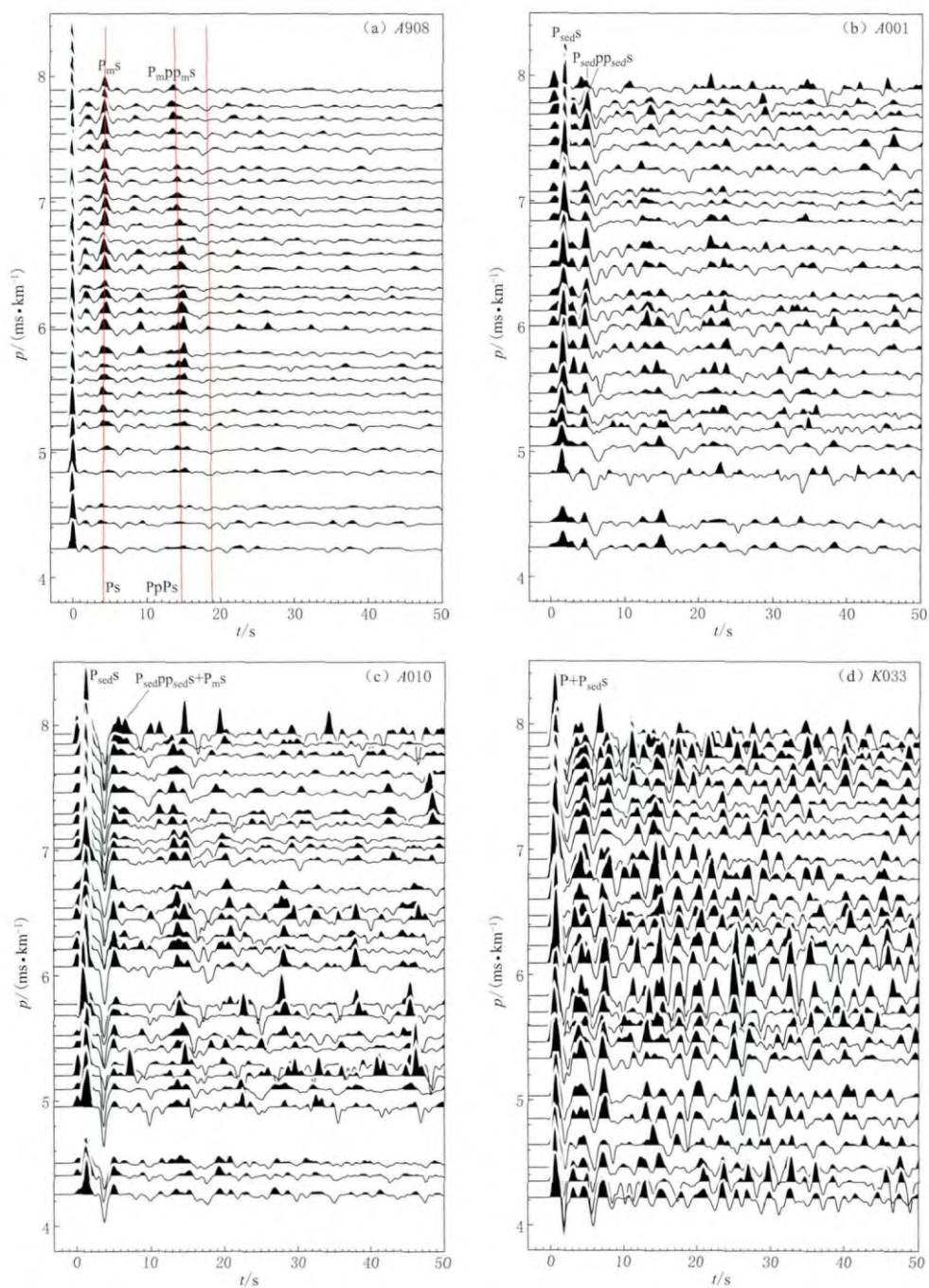


图 3 接收函数计算结果(每个台站的接收函数按射线参数排列)

(a) 基岩台站接收函数; (b)–(d) 沉积层台站接收函数

Fig. 3 The results of the receiver functions. For a given station, the receiver functions are sorted by ray parameter

(a) Receiver function of a rock station; (b)–(d) Receiver functions of the stations located on sedimentary

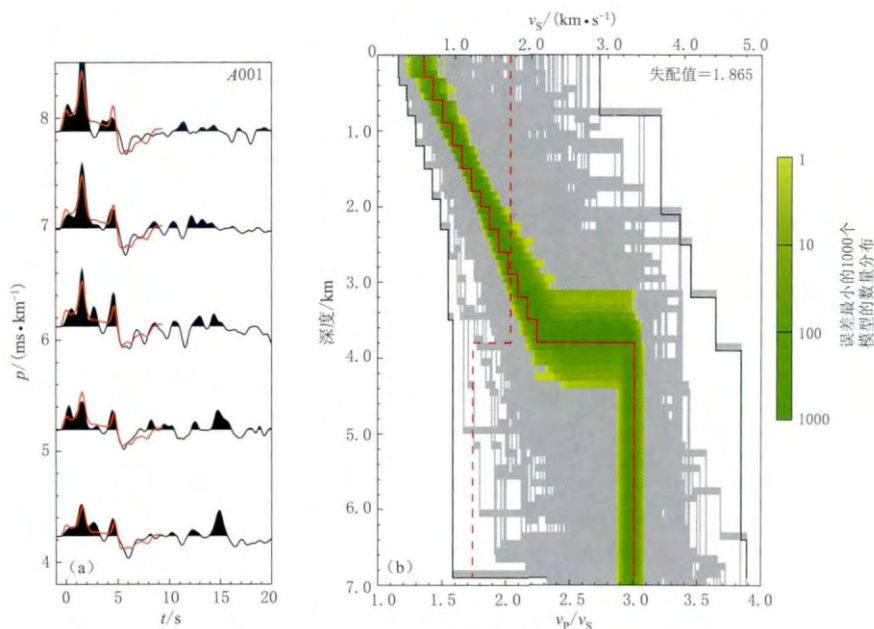


图 4 利用相邻算法得到的波形模拟结果(a)及 S 波速度模型与波速比(b)

图(a)中红色波形为利用最佳模型计算出的波形；图(b)中灰色区域为整个模型参数的搜索范围，绿色区域为误差最小的 1000 个模型的分布区域，红色实线为最佳模型，红色虚线为基于 IASP91 模型得到的波速比 v_p/v_s

Fig. 4 The results of waveform fitting by the neighboring algorithm method

- (a) Waveform comparison, where the red waves are the synthetic wave calculated by the best-fitting model;
- (b) S-velocity velocity models and v_p/v_s ratios where the gray shaded area shows the entire sampled model space, and the green area represents the best 1000 models that have the lowest misfit, red trace represents the model with lowest misfit, red dashed trace represents v_p/v_s from IASP91 model

的沉积层最佳模型的参数值如表 1 所示。

陆克政等(1997)指出，渤海湾盆地主要由 3 个构造层次组成：① 第三系以前地层组成的基底构造层；② 下第三系组成的盆地下部沉积盖层；③ 上第三系和第四系组成的盆地上部沉积盖层。因此我们所求得的沉积层包括下第三系的盆地下部沉积盖层以及由上第三系和第四系组成的盆地上部沉积盖层。由于下第三系末期的喜马拉雅运动，下第三系地层隆起剥蚀，造成隆起带下第三系缺失，故隆起带沉积盖层只包括上第三系和第四系地层。

将表 1 中所示的沉积层厚度，利用克里金插值法，得到渤海湾盆地沉积层的厚度分布，如图 5 所示。可以看出：台站所覆盖区域的沉积层厚度为 1—6 km，不同块体的沉降程度不同；拗陷带的沉积层厚度约 4 km，部分地区可达约 6 km；隆起带的沉积层厚度为 2 km 左右；太行山山前断裂带西侧沉积层厚度约 1 km，至拗陷带内骤变为 3 km，体现了断层对沉积层的控制。

本文台站所覆盖的范围主要为冀中拗陷和沧县隆起两个构造单元，而反演所得到的沉积层厚度分布也与地质构造单元基本相符。冀中拗陷带北部的武清凹陷较周围沉积层厚度更大，这与嘉世旭等(2005)和罗艳等(2008)的结果相吻合。冀中拗陷带中的次级构造，例如武清凹陷、霸县凹陷及部分饶阳凹陷，其沉积层厚度分布结果与地质结构单元划分结果的对应性较好，杨村斜坡和文安斜坡两者吻合得也很好。由于个别次级构造东西向分布范

表 1 各台站最佳沉积层结构模型参数
Table 1 The best sedimentary model of each station

台站 代码	厚度 h /km	$v_{S\text{顶}}$ /(km·s ⁻¹)	$v_{S\text{底}}$ /(km·s ⁻¹)	v_P/v_S	台站 代码	厚度 h /km	$v_{S\text{顶}}$ /(km·s ⁻¹)	$v_{S\text{底}}$ /(km·s ⁻¹)	v_P/v_S
A001	3.7	0.54	2.13	2.04	A715	2.2	0.65	1.78	3.30
A002	3.4	1.14	1.82	3.73	K033	1.3	0.38	2.44	2.65
A003	3.0	0.50	1.59	2.12	K040	0.8	0.36	1.26	2.94
A004	3.8	0.22	2.47	1.77	K041	0.8	0.35	1.09	3.25
A005	3.5	0.58	2.03	2.24	K042	0.9	0.32	1.21	2.80
A006	3.4	0.73	2.02	2.30	K045	1.5	0.28	2.67	2.38
A007	2.8	0.75	1.90	2.60	K046	1.5	0.28	2.67	2.41
A008	5.5	1.15	2.27	2.30	K047	2.5	0.31	2.88	2.57
A009	4.8	0.57	2.80	1.84	K048	2.3	0.20	2.84	2.77
A010	2.1	0.20	2.64	2.43	K049	4.0	0.56	2.75	2.26
A011	2.5	0.27	2.88	2.44	K051	4.7	0.80	2.47	3.50
A012	2.0	0.59	1.91	3.79	L223	0.5	0.40	1.99	2.01
A013	2.4	0.67	1.85	2.59	L224	1.1	0.32	1.60	2.97
A014	2.0	0.92	1.53	3.50	L225	3.1	0.56	2.02	2.30
A613	0.9	0.70	1.15	3.78	L226	3.8	0.39	2.60	2.02
A701	4.3	0.86	2.57	2.50	L227	3.6	0.71	2.52	2.41
A702	2.7	0.21	2.94	2.05	L228	4.6	0.47	2.37	2.16
A703	5.3	0.58	2.68	2.06	L229	3.7	0.80	1.77	2.04
A704	1.2	0.20	2.07	2.04	L230	3.4	0.40	2.13	1.95
A705	2.2	0.27	2.48	3.15	L231	3.2	0.63	1.96	2.35
A706	5.8	0.99	2.20	2.15	L232	2.1	0.49	1.84	2.74
A707	2.7	0.59	2.16	3.46	L233	2.8	1.11	2.10	3.70
A708	3.6	0.61	2.79	3.18	L234	3.3	1.43	2.02	3.64
A709	4.2	0.53	2.23	1.98	L236	3.2	1.48	1.84	2.69
A711	2.6	0.87	1.76	3.07	VDSH	2.0	0.20	2.46	2.51
A712	3.8	0.69	2.43	3.00	VWEA	4.2	0.62	2.53	2.39
A713	2.3	0.22	2.61	2.26					

围较窄，没有台站覆盖，所以一些小的次级构造无法识别。但总体来说，30 km 的台站间距，已将冀中拗陷地区的地质构造格局较为完整地反映出来，且分辨率较高。冀中拗陷地区的次级构造呈 NE–NNE 方向分布。

将表 1 中的波速比结果进行差值成像，得到图 6 所示结果。可以看出，拗陷带的波速比明显低于隆起带。拗陷带的波速比约为 2.5，而隆起带的波速比则约为 3.0。拗陷带与隆起带波速比的这种差异，可能与渤海湾盆地隆起带下第三系的缺失有关。而冀中拗陷带内存在一些高波速比区域，对比该地区的地热田分布结果，得到波速比较高的地区均为地热田的分布，体现了波速比与地热密切相关。

对沉积层内的 S 波平均速度插值成像得到图 7 所示结果。可以看出，拗陷带内的 S 波平均速度要大于隆起带。冀中拗陷带内的沉积层 S 波平均速度为 1.6 km/s 左右，而隆起带内的沉积层 S 波平均速度为 1.2 km/s 左右。且冀中拗陷带中的次级凹陷和凸起与 S 波平均速度呈反对应关系，即次级凹陷对应的 S 波平均速度大于次级凸起对应的 S 波平均速度。沉积层的平均速度为 1.0—2.0 km/s。

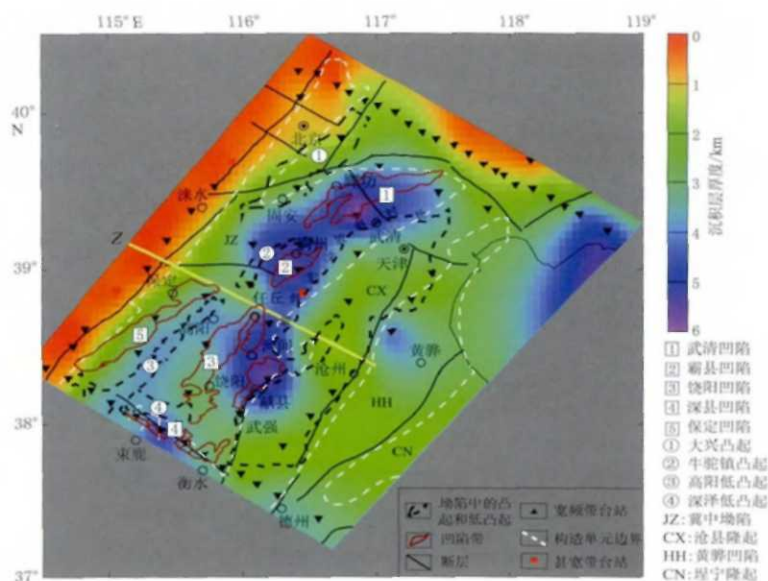


图 5 渤海湾盆地沉积层厚度分布

地质结构据林世辉和龚育龄(2005)修改; Z 测线引自 Zheng 等(2005)

Fig. 5 The sedimentary thickness image of Bohai Bay basin. The tectonic structure modified from Lin and Gong (2005), and Z profile is obtained from Zheng *et al* (2005)

- ① Wuqing sag; ② Baxian sag; ③ Raoyang sag; ④ Shenxian sag; ⑤ Baoding sag; ① Daxing high;
② Niutuozen uplift; ③ Gaoyang low uplift; ④ Shenze low uplift; JZ: Jizhong depression;
CX: Cangxian uplift; HH: Huanghua depression; CN: Chengning uplift

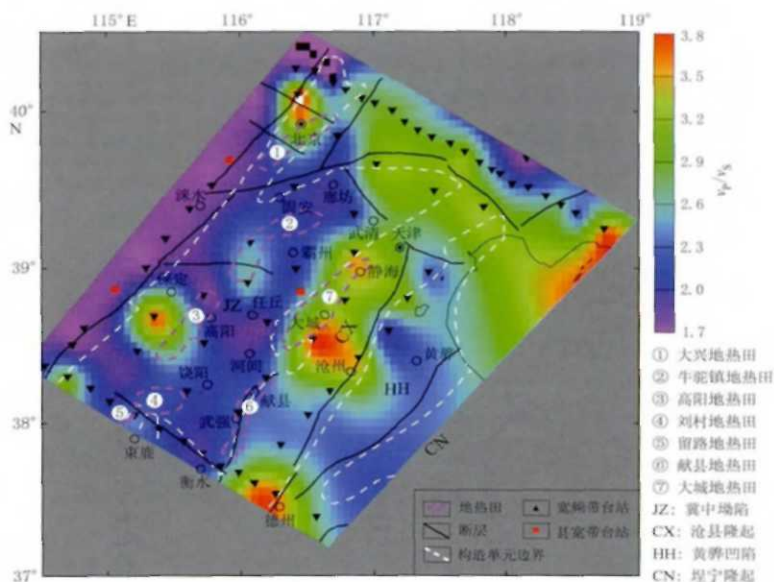


图 6 渤海湾盆地沉积层波速比分布(地热田根据梁宏斌等(2010) 修改)

Fig. 6 Distribution of the v_p/v_s ratio in the sedimentary of Bohai Bay basin where the geothermal field is modified from Liang *et al* (2010)

- ① Daxing geothermal field; ② Niutuozen geothermal field; ③ Gaoyang geothermal field; ④ Liucun geothermal field; ⑤ Liulu geothermal field; ⑥ Xianxian geothermal field; ⑦ Dacheng geothermal field;
JZ: Jizhong depression; CX: Cangxian uplift; HH: Huanghua depression; CN: Chengning uplift

为与 Zheng 等(2005)利用接收函数研究沉积层结构的结果相对比, 本文取其观测测线的位置(图 7 中的 Z 测线), 划分了一条 S 波速度垂直剖面, 如图 9 所示. 同时, 将 Zheng 等(2005)采用的陆克政等(1997)划分的地层结构标示于图 9 中. 可以看出, 保定凹陷、高阳低凸起和饶阳凹陷的沉积层分布结果与陆克政等(1997)的构造结构划分结果对应较好, 且沉积层基底与地层结构中的下第三系底界吻合较好. 由于本文中该测线上的台站分布较少, 所以得到的速度结构比 Zheng 等(2005)的分辨率要低, 且本文得到的沉积层基底埋深深度也较其浅, 但与其深度分布的趋势是一致的. 造成深度上的差异或许与所采用的计算方法不同有关.

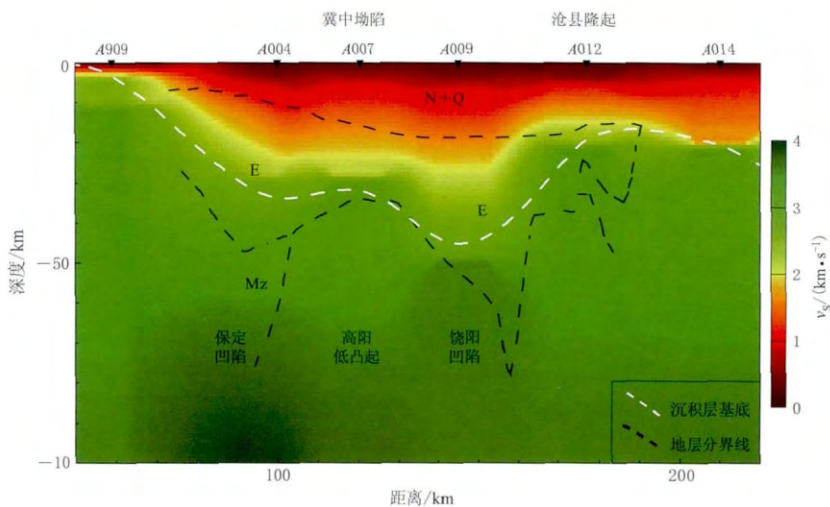


图 9 测线 Z 的纵切面沉积层分布

测线 Z 选取与 Zheng 等(2005)的测线位置相同, 地质结构引自陆克政等(1997)

Fig. 9 The S velocity structure of the profile Z

The location of profile Z is from Zheng *et al* (2005), and the tectonic structure is from Lu *et al* (1997)

对比 L 测线与 Z 测线可知, 冀中坳陷靠近沧县隆起的地区为其沉积层厚度最大的地区, 且在坳陷带中部沿坳陷带分布方向存在一凸起带(高阳低凸起), 一定程度上体现了其受基底断裂系统控制所形成的半地堑(地堑)-半地垒(地垒)构造.

通过上述分析可见, 本文利用面状分布的台站组成的台阵, 获得了台阵覆盖地区分辨率较高, 且与陆克政等(1997)的地质结构对应较好的渤海湾地区的沉积层结构分布结果. 不仅与较大的构造单元, 如冀中坳陷带和沧县隆起带, 吻合得较好, 甚至与台站分布较为密集地区的冀中坳陷带内的次级构造也有很好的对应关系, 较前人利用天然地震对沉积层结构的研究成果(Zheng *et al*, 2005)更为完善, 而这一结果也显示了利用天然地震研究沉积层结构的可靠性和成效性.

4 讨论与结论

通过利用相邻算法对沉积层结构最佳模型的搜索, 得到与实际波形相关度最高的理论波形相对应的模型, 以此作为沉积层的结构, 得到了渤海湾盆地冀中坳陷带和沧县隆起带的沉积层厚度分布、波速比分布以及沉积层内 S 波平均速度的分布情况.

1) 渤海湾盆地各构造带沉降程度不同, 沿 NNE 向呈条带分布. 沉积盖层主要包括第

四系、上第三系和下第三系地层(陆克政等, 1997). 沉积层基底在冀中拗陷东侧为 5—6 km, 在冀中拗陷中部和西部为 3 km 左右, 沧县隆起地区沉积层基底埋深约 2 km, 体现了新生代以来不同块体的沉降差异. 这种沉降差异主要体现在下第三系地层的厚度上. 渤海湾盆地基底被断层肢解, 形成一系列半地堑(地堑)-半地垒(地垒)构造, 而这种构造又体现了渤海湾盆地在新生代受到的拉伸剪切作用(陆克政等, 1997).

2) 渤海湾盆地沉积层内不同构造单元的波速比差异较大, 其中隆起带的波速比普遍较拗陷带大. 隆起带波速比约为 3.0, 而拗陷带地区的波速比约为 2.5. 推测该现象与隆起带下第三系的缺失有关. 年代较新地层的波速较年代较老地层更低, 而波速比更大. 冀中拗陷带内的高波速比与地热田的分布存在良好的对应关系.

3) 渤海湾盆地沉积层内的 S 波平均速度在隆起带地区较低, 而在拗陷带地区较高, 且冀中拗陷带内凹陷带的 S 波平均速度比凸起带大. 推测这种现象与下第三系的厚度有关. 沉积层厚度主要由下第三系断层所控制, 所以各构造单元上第三系与第四系沉积的厚度差异不大, 主要为下第三系地层厚度的差异, 而下第三系地层的 S 波速度比上第三系和第四系地层的 S 波速度还要大, 所以在渤海湾盆地内沉积层厚度较大地区的 S 波平均速度比沉积层厚度较小地区的要大.

综上所述, 渤海湾盆地地区在早第三纪末期的喜马拉雅运动中被抬升、剥蚀, 继而在晚第三纪和第四纪时期又经历了热沉降, 造成隆起带和拗陷带内的部分凸起区下第三系地层缺失, 使得渤海湾盆地沉积盖层的厚度、波速比及 S 波平均速度差异较大. 造成沉积层厚度差异的主要原因为下第三系时期形成的以正断层为主的半地堑(地堑)-半地垒(地垒)结构, 即凹陷区下第三系地层比凸起区下第三系地层更厚. 这种现象也导致了凹陷区较高的 S 波速度和低波速比. 地下热流也主要分布在拗陷带内的凸起区, 这主要与沉积盖层的隔热性能有关. 地热能主要分布在盖层相对较薄的地区(梁宏斌等, 2010).

参 考 文 献

- 嘉世旭, 齐诚, 王夫运, 陈棋福, 张先康, 陈颢. 2005. 首都圈地壳网格化三维结构[J]. 地球物理学报, 48(6): 1316—1324.
- Jia S X, Qi C, Wang F Y, Chen Q F, Zhang X K, Chen Y. 2005. Three dimensional crustal gridded structure of the Capital area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(6): 1316—1324 (in Chinese).
- 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 刘丽萍, 金宠, 刘鑫, 郝天珧, 周立宏, 刘保华, 周均太, 焦倩. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地学前缘, 17(4): 64—89.
- Li S Z, Suo Y H, Dai L M, Liu L P, Jin C, Liu X, Hao T Y, Zhou L H, Liu B H, Zhou J T, Jiao Q. 2010. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64—89 (in Chinese).
- 梁宏斌, 钱铮, 辛守良, 赵克镜, 朱连儒. 2010. 冀中拗陷地热资源评价及开发利用[J]. 中国石油勘探, 15(5): 63—68.
- Liang H B, Qian Z, Xin S L, Zhao K J, Zhu L R. 2010. Assessment and development of geothermal resources in Jizhong Depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 15(5): 63—68 (in Chinese).
- 林世辉, 龚育龄. 2005. 冀中拗陷现今地温场分布特征[J]. 东华理工学院学报, 28(4): 359—364.
- Lin S H, Gong Y L. 2005. Distribution characteristics of geotemperature field in Jizhong Depression, North China[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 28(4): 359—364 (in Chinese).
- 陆克政, 漆家福, 戴俊生, 杨桥, 童亨茂. 1997. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式[M]. 北京: 地质出版社: 72—141.
- Lu K Z, Qi J F, Dai J S, Yang Q, Tong H M. 1997. *The Structural Model of Cenozoic Hydrocarbon Basin in Bohai Bay*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 72—141 (in Chinese).

- 罗艳, 崇加军, 倪四道, 陈棋福, 陈颢. 2008. 首都圈地区莫霍面起伏及沉积层厚度[J]. 地球物理学报, **51**(4): 1135–1145.
- Luo Y, Chong J J, Ni S D, Chen Q F, Chen Y. 2008. Moho depth and sedimentary thickness in Capital region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(4): 1135–1145 (in Chinese).
- Allen M B, Macdonald D I M, Zhao X, Vincent S J, Brouet-Menzies C. 1997. Early Cenozoic two-phase extension and Late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. *Mar Petrol Geol*, **14**(7/8): 951–972.
- Chen L, Wang T, Zhao L, Zheng T Y. 2008. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **267**(1/2): 56–68.
- Chen L. 2009. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S- and P-receiver function migration[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **173**(3/4): 216–227.
- Haskell N A. 1964. Radiation pattern of surface waves from point sources in a multi-layered medium[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **54**(1): 377–393.
- Kikuchi M, Kanamori H. 1982. Inversion of complex body waves[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **72**(2): 491–506.
- Li J, Tian B F, Wang W M, Zhao L F, Yao Z X. 2007. Lateral variation in the sedimentary structure of the west Bohai Bay Basin inferred from P-multiple receiver functions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(4): 1355–1363.
- Ligorria J P, Ammon C J. 1999. Iterative deconvolution and receiver-function estimation[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **89**(5): 1395–1400.
- Sambridge M. 1999. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm: I. Searching a parameter space[J]. *Geophys J Int*, **138**(2): 479–494.
- Zhao L, Zheng T Y. 2005. Seismic structure of the Bohai Bay Basin, northern China: Implications for basin evolution[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **231**(1/2): 9–22.
- Zheng T Y, Zhao L, Chen L. 2005. A detailed receiver function image of the sedimentary structure in the Bohai Bay Basin[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **152**(3): 129–143.
- Zheng T Y, Chen L, Zhao L, Xu W W, Zhu R X. 2006. Crust-mantle structure difference across the gravity gradient zone in North China Craton: Seismic image of the thinned continental crust[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **150**(1/2): 43–58.
- Zhou J X, Zhou J S. 2006. Mechanisms of Cenozoic deformation in the Bohai Basin, Northeast China: Physical modeling and discussions[J]. *Science in China: Series D*, **49**(3): 258–271.
- Zhu L P. 2004. *Refining the Southern California 3D Model in the Los Angeles Area* [R/OL]. [2013-12-18]. <http://earthquake.usgs.gov/research/external/reports/03HQGR0100.pdf>.
- Zhu L P, Mitchell B J, Akyol N, Cemen I, Kekovali K. 2006. Crustal thickness variations in the Aegean region and implications for the extension of continental crust[J]. *J Geophys Res*, **111**(B1): B01301. doi:10.1029/2005JB003770.

作者简介



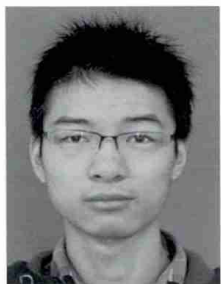
研究地下结构等方面的研究。

武岩 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2006年南京大学地质专业毕业，获学士学位；2011年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业，获博士学位。主要从事



博士學位。現從事高拱坝抗震分析及地震动输入等相关方面的研究工作。

郝明辉 中国地震灾害防御中心助理研究员。2006年山东大学工程力学专业毕业，获学士学位；2009年山东大学固体力学专业毕业，获硕士学位；2012年中国水利水电研究院水工结构工程专业毕业，获



张攀 武汉大学测绘学院固体地球物理专业在读硕士研究生。2008年武汉大学地球物理专业毕业，获学士学位。主要从事接收函数方面的研究。



李兴旺 长安大学固体地球物理专业在读硕士研究生。2012年长安大学地球物理专业毕业，获理学学士学位。目前主要从事有限频射线层析成像的理论及方法研究。



主要从事与地球动力学相关的数值模拟研究。

张晨 武汉大学测绘学院在读博士研究生。2008年武汉大学测绘学院大地测量学与测量工程专业毕业，获工学学士学位；2010年武汉大学中国边界与海洋研究院国际法学专业毕业，获法学硕士学位。现主



刘芳 内蒙古自治区地震局测震台网中心高级工程师。1990年中国科学技术大学应用化学专业毕业。长期从事大震速报、地震编目、数字地震及地震预测预报等方面的工作。内蒙古自治区地震学会会员。