

文章编号: 0253-3782(2002)04-0428-08

## 综述

# 渤海湾及其邻区壳幔速度 结构研究与综述\*

张成科 张先康 赵金仁 任青芳  
张建狮 海 燕

(中国郑州 450002 中国地震局地球物理勘探中心)

**摘要** 利用渤海湾及其邻区的 10 多条地震测深剖面段观测资料, 对部分剖面进行二维射线追踪、走时拟合及合成地震图计算, 获得了本区地壳上地幔速度结构。结果表明, 地壳上地幔结构在纵向和横向具有明显的不均匀性。在冀中坳陷东北部的永清附近、黄骅坳陷的渤海湾和济阳坳陷的垦利附近存在上地幔隆起, 隆起处的地壳厚度分别约为 31, 28 和 29 km。根据地震波动力学及运动学特征和二维速度结构中的地震界面与速度等值线起伏变化, 推测该区有 3 条地壳深断裂带, 在地壳深断裂带一侧或两侧上地壳存在 5.90~6.10 km/s 的低速层(体)。

**关键词** 地震测深 地壳上地幔 速度结构 地震界面

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

## 引言

渤海湾及邻近地区是华北地震活动频繁的地区之一, 了解该区地壳上地幔结构特征与介质的横向非均匀性特征, 对研究地震的孕育环境、提高地震预测水平具有重要意义。多年来, 许多学者在本区开展了重磁(冯锐等, 1989)、地热场(吴乾蕃等, 1988; 田华, 张之立, 1992)、大地电磁测深(刘国栋等, 1984)和深地震测深(孙武城等, 1988; 张先康等, 1994, 1998; 李松林等, 2001)等研究, 并获得了有意义的成果。

在渤海湾及邻近地区, 利用深地震测深宽角反射/折射技术进行了地壳上地幔构造与速度结构及地震活动相关性研究。唐山地震后, 自 1976~1993 年, 国家地震局地球物理勘探大队(中心)为探测地壳上地幔速度结构与构造, 研究地震深部构造环境, 并为了深部矿物资源开发利用提供地壳深部信息, 在研究区完成了大量的深地震宽角反射/折射剖面研究(图 1)。本文对图 1 展布的 14 条深地震测深剖面段中的 H-02、H-04 和 H-10 等 3 条地震测深剖面的资料, 在以前一维地壳上地幔结构解释的基础上, 进行了二维地壳上地幔速度结构的解释, 并结合前人研究结果构制了本区 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 和 M 面等深线图, 在构制壳内界面和 M

\* 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040702)和国家自然科学基金(49774230)共同资助。中国地震局地球物理勘探中心论著 RCEG200133。

2001-10-17 收到初稿, 2002-04-04 收到修改稿, 2002-04-18 决定采用。

面时, 利用了部分曾未公开发表的 $L_2$ 和 $L_4$ 剖面的二维解释结果.

## 1 剖面展布与地质构造概况

图1给出了本区14条深地震测深剖面段的位置. 在总长为3 200 km的剖面上进行了80余次吨级炸药量的爆破观测. 其中, 在通过渤海湾水域的德州—秦皇岛剖面(VIII)上进行了两炮水中爆破观测. 平原区炮距较小, 一般为30~40 km, 观测点距为2~3 km; 山区炮距较大, 一般为60~80 km, 观测点距为3~4 km. 这些地震测深剖面构成本区的测网, 是我国目前深地震测线最密、观测系统最完整、取得地壳上地幔资料最丰富的地区.

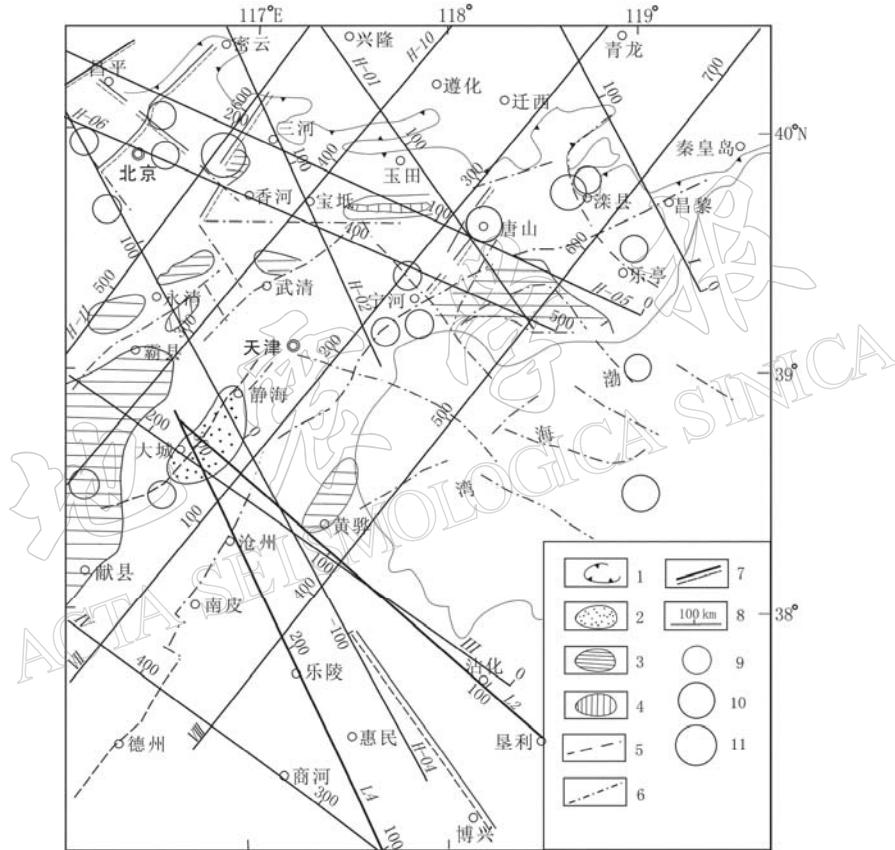


图1 地震测深剖面与渤海湾及邻近地区地震构造图(据徐杰等, 1998)

1. 盆地边界;
2. 第四系厚300 m;
3. 第四系厚400~700 m;
4. 第四系厚700~1000 m;
5. 实例和推断断裂;
6. 隐伏断裂;
7. 晚更新世以来活动断裂;
8. 地震侧深剖面;
9.  $M=6.0\sim6.9$ ;
10.  $M=7.0\sim7.9$ ;
11.  $M=8$ ;
- I. 昌黎—承德剖面;
- II. 海兴—阳泉剖面;
- III. 诸城—定县剖面;
- IV. 沧州—喀左剖面;
- V. 德州—秦皇岛剖面;
- H-01: 柏各庄—正兰旗剖面;
- H-02: 塘沽—密云剖面;
- H-04: 盐山—延庆剖面;
- H-05: 乐亭—张家口剖面;
- H-06: 宁河—涿鹿剖面;
- H-10: 安国—遵化剖面;
- H-11: 石家庄—咯喇沁旗剖面.
- $L_2$ : 寿光—文安剖面;
- $L_4$ : 沂源—大城剖面

地震测深剖面通过北京、唐山、天津、渤海湾、沧州和惠民等地区. 从地质构造上看, 研究区包括近东西向燕山隆起区中南部和太行山隆起区以东的华北平原新生代裂谷系中

部。其裂谷系的总体构造方向为北北东，裂谷系内包含着一系列隆起和拗陷，拗陷内又包含着大量的凸起和凹陷，显得裂谷系支离破碎。裂谷系周边多为大型边界断裂围绕，其内部发育大量的北北东-北东向和部分北西西-北西向的各级断裂。几乎所有的断裂都是张性的，倾角随深度加大逐渐变缓。多数断裂都发生在早第三纪的强烈裂陷时期，其中的一些大断裂在晚第三纪时期仍有活动。在渤海湾地区的晚第三纪乃至第四纪的沉积层内仍发现有大量的张性断裂存在，表明这里断裂活动一直在继续（徐杰等，1998）。

据历史记载和现代仪器记录资料，在渤海湾及邻区共发生17次6级以上地震和大量的中小地震。其中，8级地震1次、7.0~7.9级地震3次、6.0~6.9级地震13次。图1显示地震多发生在渤海湾以北的滦县、唐山、宁河、三河至北京一带。该区是华北地区地震活动性最高的地区之一。

## 2 壳幔基本速度结构与构造

通过渤海湾及邻区10多条地震测深剖面段资料二维解释结果，显示出地壳上地幔纵向和横向非均匀性十分明显。地壳呈层状结构，上地壳和下地壳划分大致以C<sub>2</sub>界面为界。它把脆性的上地壳和相对塑性的下地壳区分开来，并在上部和下部地壳之间起到传递形变和

解耦的作用（张先康等，1996）。由地壳表层至C<sub>2</sub>界面为上地壳，C<sub>2</sub>至Moho面为下地壳。利用各地震测深剖面不同界面埋深构制了C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>和Moho面等深线图（图2、图3和图4）。图5显示通过渤海湾及邻近地区地壳上地幔顶部二维速度结构与构造。

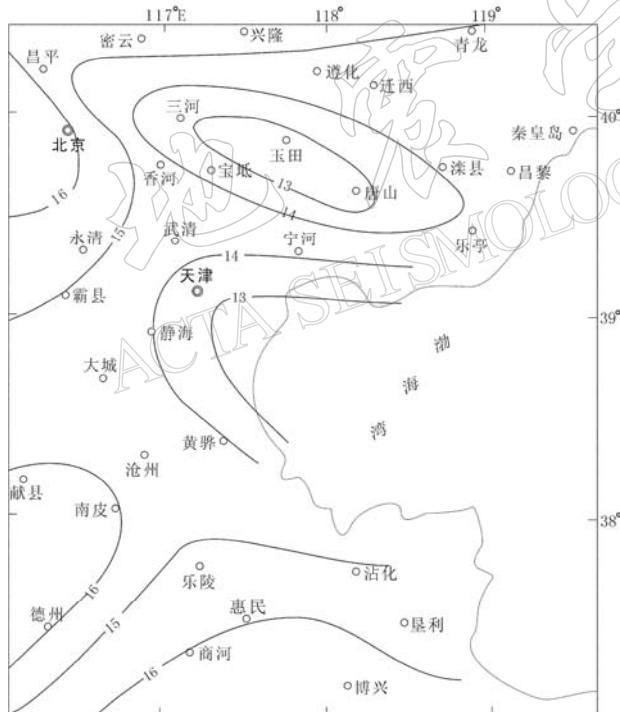


图2 渤海湾及其邻近地区C<sub>1</sub>界面等深线图(单位: km)

### 2.1 上地壳及其界面构造

上地壳包括沉积盖层和其下的结晶基岩，总厚度19~25 km，由渤海湾向西北和西南加厚，向北通过唐山、三河一带后亦逐渐加厚。上地壳由4个不同的速度梯度层组成：第一层主要为新生代低速盖层，码新生代沉积厚度在本区的坳陷区一般为3 000~4 000 m，黄骅坳陷的渤海湾最厚为5 200 m，表层速度在北部山区为3.40~4.60 km/s，平原区为2.00~3.00 km/s，

渤海湾最低达到1.80 km/s左右；第二层为古生界地层以下至Pg波射线穿透的最大深度，速度一般为5.00~6.10 km/s；第三层速度为6.10~6.25 km/s。C<sub>1</sub>界面埋深为13~16 km。图2显示该界面埋深变化较小，渤海湾、天津、宁河、唐山至三河一带为13~14 km，向外围

的遵化、北京、霸县、南皮、乐陵至商河等一带增加至 15~16 km。第四层 ( $C_1-C_2$  界面) 顶面速度 6.30~6.32 km/s, 底面速度为 6.33~6.34 km/s。除部分地段有低速层(体)外, 它是一个速度梯度较弱的层。图 3 显示在本区  $C_2$  界面埋深变化较大, 由渤海湾附近的 19~20 km 向西部和北部缓慢加深至 21~22 km, 向西南部的乐陵附近逐渐加深至 25 km, 再向南逐渐变浅。该层厚度一般为 6~8 km, 乐陵附近最厚为 10 km。

## 2.2 下地壳及莫霍面构造

下地壳基本上由两层组成。其上层  $C_2-C_3$  界面间通常为一弱梯度层, 速度为 6.40~6.50 km/s, 局部出现负速度梯度, 上层厚度为 4~8 km; 下层为一强速度梯度层, 只有个别剖面显示

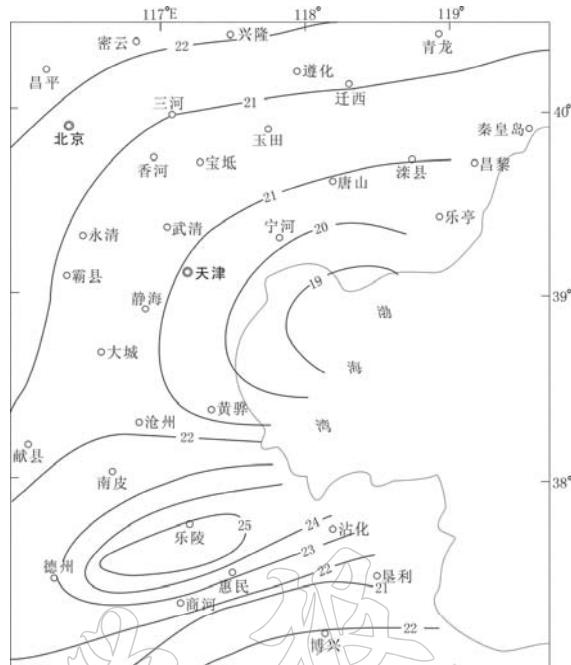


图 3 渤海湾及其邻近地区  $C_2$  界面等深线图(单位: km)

部分地段呈现速度逆转, 下部靠近莫霍面 3~4 km 速度由 6.60 km/s 迅速增至 7.00 km/s 左右, 下层厚度 4~6 km, 反映了壳幔过渡带的特征。

图 4 显示出莫霍面的埋深在渤海湾内最浅为 28 km, 向西北逐渐加深至遵化、三河、北京一带, 为 35~36 km; 向西呈现莫霍面起伏变化; 向南至乐陵附近急剧加深为 36 km, 再向南至惠民、垦利一带变浅为 29~30 km。总体上看, 莫霍面埋深构造与浅部构造呈镜像关系, 冀中坳陷东北部永清附近、黄骅坳陷渤海湾和济阳坳陷垦利附近均存在上地幔局部隆起。沧县隆起的天津、沧县一带和呈宁隆起的乐陵附近均存在上地幔坳陷。莫霍面等深线由渤海湾北侧向西北存在明显的扭曲带, 反映了张家口—蓬莱构造带中段的地壳深部特征。

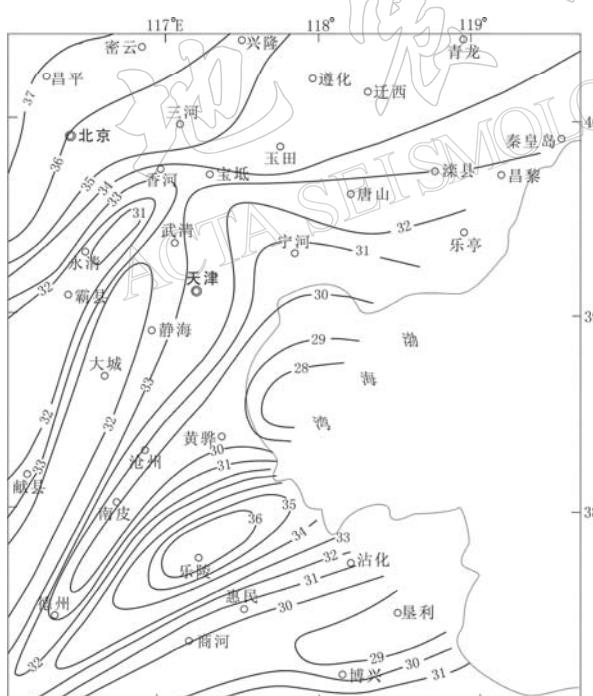


图 4 渤海湾及其邻近地区 M 面等深线图(单位: km)

## 2.3 上地幔顶部速度结构

该区上地幔顶部的速度一般为  $7.90\sim8.10$  km/s。其速度随深度的增加而增大，在M面以下  $10$  km的深度，速度梯度值较小为  $0.015\sim0.030$   $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}/\text{km}$ 。

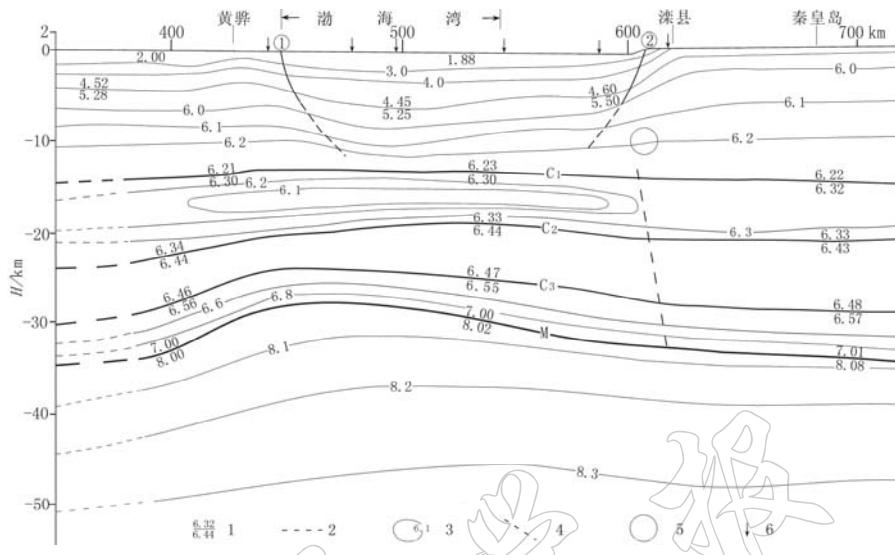


图 5 通过渤海湾地区地震测深剖面(VIII)地壳上地幔速度结构与构造图

1. 地震界面及速度值(km/s); 2. 推断界面; 3. 速度等值线(km/s); 4. 推测地壳深断层;  
5. 深县 7.1 级地震; 6. 炮点位置及桩号(km);  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  为壳内界面;  
M 为莫霍界面; ①呈西断裂; ②宁河—昌黎断裂

### 3 地壳深断裂带展布及壳内低速层分布

### 3.1 地壳深断裂带展布

通过渤海湾及邻近地区的地震测深剖面资料,推测地壳深断裂带有3条,它们分别为:香河—宁河—昌黎地壳深断裂带、唐山地壳深断裂带和沧州—天津—宁河地壳深断裂带(图6)。

### 3.1.1 香河—宁河—昌黎深断裂带

断裂带是依据H-06、H-02、VII、VIII剖面资料及二维结果推测的。H-06剖面275.0炮点东支记录在393 km桩号两侧Pm波形显示出明显差异。其西侧Pm波能量强，而其东侧能量弱，亦不稳定。这些记录特征反映了香河附近的地壳结构。同时，二维结果显示此处为M面深度起伏变化较大的地方（李松林等，2001；赵金仁等，1999）；反映该断裂的H-02剖面35.86炮点59和61号点记录到Pm波能量极弱。该波走时滞后约0.16 s，二维结果显示M面埋深南侧浅、北侧深，断距为1.2 km；在VII剖面245 km桩号附近北侧上地壳存在较明显的低速体（6.10 km/s），此处C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、M界面及速度等深浅起伏变化较大；在VIII剖面600 km桩号附近南侧上地壳存在较明显的低速体（6.10 km/s），其M面为一南浅北深的变化过渡带。

### 3.1.2 唐山地壳深断裂带

推测该断裂带依据为, H-05 剖面 32.64 炮点记录截面显示Pm波在 137 km桩号处, Pm 波能量发生突然变化, 并且该波走时发生突然跳跃, 表明 75 km桩号附近M面存在断裂, M

面埋深在断裂东侧深、西侧浅, 断距达 3~5 km; 在H-01 地震测深剖面 42 km 桩号附近西北侧上地壳存在明显的低速体(5.80 km/s), C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, M面及速度等深线起伏变化大(曾融生等, 1985).

### 3.1.3 沧州—天津地壳深断裂带

该断裂由L<sub>4</sub>、III、L<sub>2</sub>、H-04 和VII剖面结果推测。L<sub>4</sub>和L<sub>2</sub>二维剖面上分别在 260 和 270km桩号附近M界面显示起伏变化, 其东侧上地壳存在低速体(6.10 km/s), 三维构造反演显示本断裂断错 2 km左右(张先康等, 1998); 在III剖面 150 km桩号附近C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>和M界面及速度等深线具有明显的起伏变化, 且断裂东侧上地壳存在低速体(6.00 km/s). 反映该断裂的VII剖面 233.142 炮点 39, 41 和 43 号点记录显示Pm波能量弱, 波组紊乱, 二维结果显示壳内界面和M界面起伏变化较明显.

## 3.2 壳内低速层分布

根据对通过本区 14 条深地震剖面段中的部分剖面二维处理解释结果, 并综合前人的研究成果(孙武城等, 1988; 张先康等, 1998; 李松林等, 2001), 确定了本区地壳内低速层(体)的分布(图 6).

### 3.2.1 惠民—博兴—垦利一带低速区

该低速层(体)的顶面埋深为 12~16 km, 底面深度为 20 km 左右, 速度为 5.90~6.20 km/s, 与围岩的相对速度差为 3%~6%.

### 3.2.2 黄骅—宁河—滦县一带低速区

该低速层(体)的范围较大, 其南部顶面埋深 12~14 km, 底面深度为 17~22 km, 速度约为 6.10 km/s, 与围岩的相对速度差为 3%左右; 北部顶面埋深 9~14 km, 底面深度为 16~22 km, 速度一般为 6.10~6.20 km/s, 与围岩的相对速度差 3%~4%. 在玉田及其邻近地区上地壳低速体速度最低为 5.90 km/s, 与围岩的相对速度差为 6%.

### 3.2.3 密云—昌平—房山一带低速区

该低速层(体)的顶面埋深 8~11 km, 底面深度为 13~15 km, 速度为 5.90~6.10 km/s, 与围岩的相对速度差为 3%~5%.

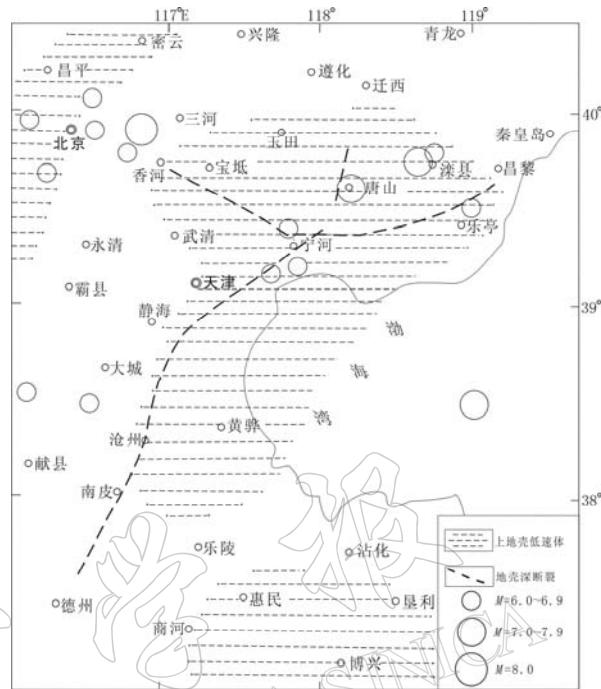


图 6 渤海湾及其邻近地区地壳深断裂与上地壳低速体分布图

## 4 讨论和结论

1) 在渤海湾及其邻区由 14 条宽角反射/折射剖面段所揭示的地壳深部构造特征是：① 由渤海湾向北西方向至北京昌平附近存在明显的地壳厚度变化带，莫霍面等深线在该处发生扭曲(图 4)。它与张家口—蓬莱断裂带中段的位置相当(张先康等, 1998)。1976 年唐山 7.8 级、1679 年三河—平谷 8 级地震就发生在该地壳厚度变化带及其附近。表明地壳厚度明显变化对地震孕育及发生具有一定的关系；② 冀中坳陷东北部的永清附近、黄骅坳陷的渤海湾和济阳坳陷的垦利附近上地幔存在隆起，隆起处的地壳厚度分别为 31, 28 和 29 km；在埕宁隆起的乐陵附近上地幔为一坳陷区。该坳陷区地壳厚度达 36 km。本区的上地幔隆起和坳陷构造与浅部构造呈镜像关系。

2) 研究区上地壳厚度变化较大，它由渤海湾的 19~20 km 向北和西北逐渐加厚，至昌平、遵化、青龙一带为 21~22 km；向西南急剧加厚，至乐陵附近厚度达 25 km 左右。上地壳上部厚度为 13~16 km，在渤海湾附近和宝坻—唐山一带为相对隆起区，隆起区厚 13 km。图 5 显示渤海湾附近新生代沉积厚度越大，结晶上地壳的厚度就越小。这表明该区新生代时期地表的下沉和接受沉积的总量完全是结晶上地壳张裂和侧向伸展的结果(刘国栋, 1985；刘光夏等, 1996)。

3) 本区下地壳厚度在 9~12 km 之间变化。其底界(M 面)的埋深为 28~37 km，在黄骅坳陷区的渤海湾中南部下方，其下地壳厚度和埋深均明显小于北部燕山区。从下地壳的速度结构来看，其上部为一弱梯度层，速度为 6.40~6.50 km/s，局部出现速度逆转；其下部靠近莫霍面 3~4 km 为强速度梯度层，速度由 6.60 km/s 迅速增至 7.00 km/s 左右。根据国内外有关下地壳温压条件下，对各种岩石标本的实验测定结果(Holbraak *et al.*, 1992；张友南，孙君秀, 1998；高山等, 1999)看，6.50 km/s 的速度值相当于中性麻粒岩，而 6.80~7.00 km/s 的速度值则相当于基性麻粒岩。这表明，本区的下地壳组成从上至下是由中性麻粒岩逐渐过渡为基性麻粒岩的。这与渤海湾以北冀东地区出露的下地壳组成变化是一致的(吴宗絮，郭才华, 1991)。

4) 研究区浅部断裂构造发育，有数条断裂分布其间。根据通过本区宽角反射/折射剖面的地震波组运动学和动力学特征突变(如走时突跳、振幅能量突变等)及二维速度等值线、地震界面明显的起伏变化等，推测确定地壳深断裂带有 3 条。该断裂带均断至莫霍面，深断裂一侧或两侧在上地壳下部存在 5.90~6.10 km/s 低速层(体)。该低速层(体)最可能的起因是壳内部分熔融或者是自由水的存在。自始新世开始，华北平原下的软流圈强烈上隆、基性岩浆大量溢出、地壳减薄、地表强裂下沉、上地壳侧向扩张(刘国栋等, 1984；腾吉文等, 1997)。由于热活动和侧向滑动，加之自由水的存在，引起研究区新生代坳陷区上地壳下部出现部分熔融。该低速层(体)可能与地震的孕育、发生过程有密切的关系。这里的温压条件相当于岩石的脆韧转换带，而其上覆岩石是以脆性变形为主，其强度亦达到最大值。虽然在该低速层(体)中应力不容易集中，但可积累很大的应变。显然，这种环境有利于其顶部岩石破裂和地震发生。

## 参 考 文 献

冯锐，黄桂芳，郑书真，等. 1989. 华北地区地壳构造与地震活动[J]. 地质学报, 63(1): 111~123

- 高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 1999. 中国东部地壳的结构和组成[J]. 中国科学(D辑), **29**(3): 204~213
- 李松林, 张先康, 宋占隆, 等. 2001. 多条人工地震测深剖面资料联合反演首都圈三维地壳结构[J]. 地球物理学报, **44**(3): 360~368
- 刘光夏, 赵文俊, 李志雄, 等. 1996. 渤海第三纪裂谷扩张的地球物理分析[J]. 西北地震学报, **18**(3): 18~24
- 刘国栋. 1985. 华北平原新生代裂谷系及其深部过程[A]. 见: 国家地震局地质研究所编. 现代地壳运动研究(1)[C]. 北京: 地震出版社, 17~25
- 刘国栋, 史书林, 王宝均. 1984. 华北地区壳内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
- 孙武城, 祝治平, 张利, 等. 1988. 对华北地壳上地幔的探测与研究[A]. 见: 国家地震局科技监测司编. 中国大陆深部构造的研究与进展[C]. 北京: 地质出版社, 19~37
- 滕吉文, 张中杰, 张秉铭, 等. 1997. 渤海地球物理场与深部潜在地幔热柱异常构造背景[J]. 地球物理学报, **40**(4): 468~480
- 田华, 张之立. 1992. 渤海及其邻区地壳热结构和热应力场的研究[J]. 地震学报, **14**(1): 29~35
- 吴乾蕃, 谢毅真, 祖金华, 等. 1988. 华北地热场研究[J]. 中国地震, **4**(1): 41~48
- 吴宗黎, 郭才华. 1991. 冀东陆壳结构的岩石学模型[J]. 地震地质, **13**(4): 369~376
- 徐杰, 宋长青, 楚全芝. 1998. 张家口—蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨[J]. 地震地质, **20**(2): 146~153
- 曾融生, 张少泉, 周海南, 等. 1985. 唐山地震区的地壳结构及大陆地震成因的探讨[J]. 地震学报, **7**(2): 125~142
- 张先康, 刘国栋, 刘泰升, 等. 1998. 华北地壳结构的三维探测和研究[A]. 见: 中国科学院地质与地球物理研究所编. 寸丹集——庆贺刘光鼎院士工作50周年学术论文集[C]. 北京: 科学出版社, 715~720
- 张先康, 王椿镛, 刘国栋, 等. 1996. 延庆-怀来地区地壳细结构——利用深地震反射剖面[J]. 地球物理学报, **39**(3): 356~364
- 张先康, 杨玉春, 赵平, 等. 1994. 唐山滦县震区的三维地震透射研究[J]. 地球物理学报, **37**(6): 759~766
- 张先康, 祝治平, 张成科, 等. 1998. 张家口—渤海地震带及其两侧地壳上地幔构造与速度结构研究[A]. 见: 活动断裂研究编委会和中国地震局科技发展司编. 活动断裂研究(6)[C]. 北京: 地震出版社, 1~16
- 张友南, 孙君秀. 1998. 华北地壳岩石速度类型及其地质意义[J]. 地震地质, **20**(1): 74~80
- 赵金仁, 张先康, 张成科, 等. 1999. 香河—北京—涿鹿及其相邻地区壳幔构造与速度结构特征[J]. 地震地质, **21**(1): 29~36
- Holbrook W S, Mooney W D, Christensen N I. 1992. The seismic velocity structure of the continental crust[A]. In: Fountain D M, Arculus R J, Kay R W eds. *The Continental Lower Crust*[C]. The Netherlands: Elsevier Science Publishers, 1~43

## STUDY AND REVIEW ON CRUST-MANTLE VELOCITY STRUCTURE IN BOHAI BAY AND ITS ADJACENT AREAS

Zhang Chengke Zhang Xiankang Zhao Jinren  
Ren Qingfang Zhang Jianshi Hai Yan

(Research Center of Exploration Geophysics, China Seismological Bureau, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Observational data from some of the 10-odd deep seismic sounding (DSS) profiles in Bohai Bay and its adjacent areas were processed with the methods of two-dimensional (2-D) ray tracing, travel-time fitting and synthetic seismogram. The crust and upper-mantle velocity structure model in this area was built. The results show that the crust and upper mantle structures present obvious lateral and vertical inhomogeneity. The upper mantle uplifts near Yongqiang of northeast Jizhong depression, in Bohai Bay of Huanghua depression and near Kenli of Jiayang depression, where crustal depths are about 31 km, 28 km and 29 km, respectively. According to the dynamic and kinetic characteristics of seismic waves as well as the seismic interfaces and velocity contour undulation in the 2-D velocity structure model, three deep crustal fault zones are inferred in the area. Low velocity (5.90~6.10 km/s) layers (bodies) exist on one or two sides of these deep crustal fault zones.

**Key words:** deep seismic sounding; crust and upper mantle; velocity structure; seismic interfaces