

束鹿断陷盆地及其邻近的 地壳结构特征^{*}

王椿镛¹⁾ 张先康²⁾ 林中洋¹⁾ 李学清¹⁾

1) 中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

2) 中国郑州 450003 国家地震局地球物理勘探大队

摘要

在邢台地震区内进行的深地震反射剖面探测，获得了对束鹿断陷盆地及其邻近地壳结构的新认识。在 NWW 向的宁晋—新河和临城—巨鹿深地震反射剖面上，CDP 叠加结果在双程走时 4.0 s 以上部分显示出形态基本相同的单边断陷盆地，即束鹿断陷盆地。盆地宽达 15 km（下第三系边界），新河断裂作为其主边界断裂以铲形方式延伸到双程走时 4.0 s（即 8 km 深度）以下。这些剖面上还清晰地显示了中地壳内的滑脱构造。新河断裂向下延伸归并于这一滑脱构造。深地震测深和大地电磁测深的结果表明，滑脱构造下方为低速高导层，有利于上、下盘构造的滑脱。NNE 向的任县—宁晋深反射剖面位于断陷盆地内部，它显示出盆地内部的复杂结构。该剖面的浅部被三个横向凸起分割成三个次一级的盆地。同时，耿庄桥至小河庄之间的中下地壳内，众多的强反射事件具有叠层状特征，并经受强烈的变形。在 NWW 向的两条剖面上也具有类似的反射特征，这表示在束鹿盆地内部可能存在较大范围的岩浆上涌侵入至中下地壳内。下地壳内呈现异常的低速带，表明当前的岩浆活动仍较强烈。笔者认为，岩浆作用是这一地区构造活动的重要因素。

关键词 地壳结构；深地震反射剖面；CDP 叠加；滑脱构造；岩浆作用

前 言

1966 年邢台地震发生在华北平原中部的束鹿断陷盆地及其邻近。深入了解大震震源区的地壳结构和介质物性，对于地震科学的发展和最终解决地震预测的难题是至关重要的。邢台地震区的现代构造活动属性和地震过程特征在华北地区具有代表性。因此，多年来地震学家们对邢台地震区的深部构造进行了广泛的研究。在这一地区先后进行了三次人工地震探测，其中有著名的 NW 向的元氏—济南剖面（滕吉文等，1974），它通过 7.2 级主震的震中位置；其次是 NE 向的任县—河间—武清剖面，它通过 6.8 级前震和 7.2 级主震的震中位置（孙武城等，1986）；1992 年完成的 NW 向的泰安—隆尧—忻州剖

* 国家科委“八五”科技攻关项目 85-907-02 的一部分。国家地震局地球物理研究所论著 94A0078。

1994 年 4 月 6 日收到初稿，1994 年 6 月 7 日决定采用。

面, 它通过 6.8 级前震的震中位置。另外, 邵学钟等(1993)还进行了天然地震转换波的研究。这些地震资料无疑对认识邢台地震区的深部构造是重要的。然而, 转换波方法存在转换震相识别中的不确定性问题。对人工地震测深剖面(简称折射剖面)来说, 一般情形是爆破点较稀, 观测点距较大, 覆盖次数少, 因而所取得的资料不足以认识地壳的细结构。深地震反射剖面是国际上近十几年来发展起来的一种新的深部地球物理探测技术, 它能够提供高分辨的地壳和上地幔顶部结构图象。基于这一认识, 近几年来, 我们在邢台地震区及其邻近相继完成了三条深地震反射剖面。本文试图根据这三条反射剖面资料处理结果, 并结合石油勘探的反射剖面和深地震测深剖面的结果, 给出对这一地区地壳结构的新认识。

1 地质背景

华北盆地是一个大型的裂谷型盆地。它在中生代以前是一个稳定的大陆地块, 在中、新生代期间经历了几次重要的断裂和沉降阶段。盆地内断裂分布为 NNE-NEE 的断裂带和穿插于其中的 NWW 向断裂交织, 将地壳切割成纵向成条、横向成块的结构。一或两条老断裂带控制一个断陷带, 并由此发育成早第三纪拗陷, 从而呈现拗隆相间的构造面貌。大型拗陷通常由次级地堑和地垒组成复式盆地。在冀中拗陷南部, 由晋县凹陷、宁晋凸起、束鹿凹陷、新河凸起和南宫凹陷组成。束鹿断陷盆地呈窄长条形, 长约 80 km, 宽 14—20 km, 其北部和南部分别经北西向的衡水断裂和隆尧断裂与深县断陷盆地和隆尧凸起相连(图 1)。断陷盆地内部被数条北西向的断裂所切割, 较大的断裂为曹庄陆梁北断裂和曹庄陆梁南断裂。

2 深地震反射剖面概况

近期完成的三条深地震反射剖面的位置如图 1 所示。剖面 A 从宁晋县李家营至新河县沙里王村, 称为宁晋—新河剖面, 长度为 40 km; 剖面 B 从临城县渎村至巨鹿县周于庄, 称为临城—巨鹿剖面; 剖面 C 从任县马家庄至宁晋县延白村, 称为任县—宁晋剖面; 剖面 B 和 C 长度均为 55 km。这三条反射剖面分别与上述三条折射剖面在邢台地震区部分基本重合。这一重合的试验方案不仅可以取得震源区地壳细结构图象, 而且能得到推断地壳物质组成及物理状态所需要的信息。三条反射剖面中的大部分为 24 次覆盖的单边放炮排列。数据记录采用 96 道的 MDS-10 数据采集装置。道间距为 100 m, 最小偏移距 1 000 m。采用组合检波方

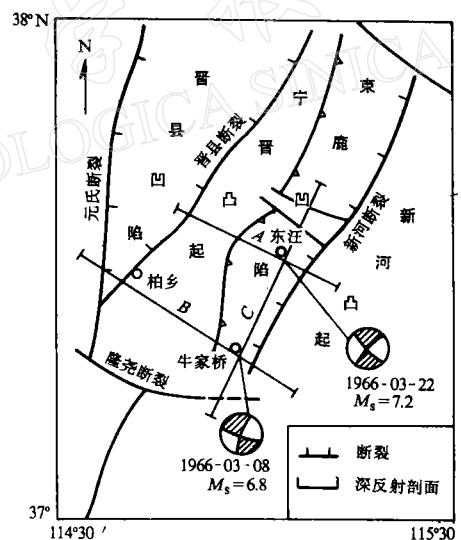


图 1 束鹿断陷盆地及深地震反射剖面位置图。

A 为宁晋—新河剖面, B 为临城—巨鹿剖面,

C 为任县—宁晋剖面。图中还显示了两个

地震(M_s 6.8 和 7.2)的震源机制解

式, 每个测点上使用 2 或 3 组(每组 12 个)10 Hz 的地震检波器。地震信号的记录长度为 20 s。震源为爆炸源, 并深 25 m, 在野外场地条件下基本保证了在潜水面以下爆破, 因而取得了良好的激发效果。

深地震反射的数据处理按照标准的处理流程进行。这一流程由解编、场地静校正、预处理、反褶积、速度分析、剩余静校正、正常时差(NMO)或倾斜时差(DMO)校正和叠加、偏移等处理模块组成。流程中用自动剩余静校正模块先后进行了两次剩余静校正处理, 并用速度分析模块进行两次速度分析, 用于提高处理效果。叠加剖面在倾斜时差校正后得到。虽然目前对深反射资料的常规偏移(叠后偏移)结果尚有不同看法, 我们仍对各剖面作了常规偏移处理。其中, 对剖面 C 使用了几种不同的处理方法。除有限差分法外, 还使用了相移法(Gazdag, 1978)和扩展 Stolt 法(Stolt, 1978)偏移, 试图比较不同方法的偏移效果。结果表明, 不同方法的偏移效果基本一致。在这些偏移剖面上存在一个共同的问题是, 6 s 以下直至 Moho 间断面的反射事件被偏离了一个较大的距离。我们认为, 这与实际情况不相符合。因此, 下面的讨论仍以未偏移的最终叠加剖面为依据, 偏移剖面仅作参考。

深反射剖面 A 和 B 的共深度点(CDP)叠加处理结果, 在 1—4 s 之间共同显示出束鹿断陷盆地这一单边断陷盆地的图象(图 2), 与石油勘探剖面的处理结果(徐杰等, 1988)一致。新河断裂为这一断陷的主断裂, 以铲形方式延伸至 4.0 s 以下, 发育于古生界、中上元古界的蓟县系和长城系以及前长城系的变质岩之间, 控制中生界和下第三系

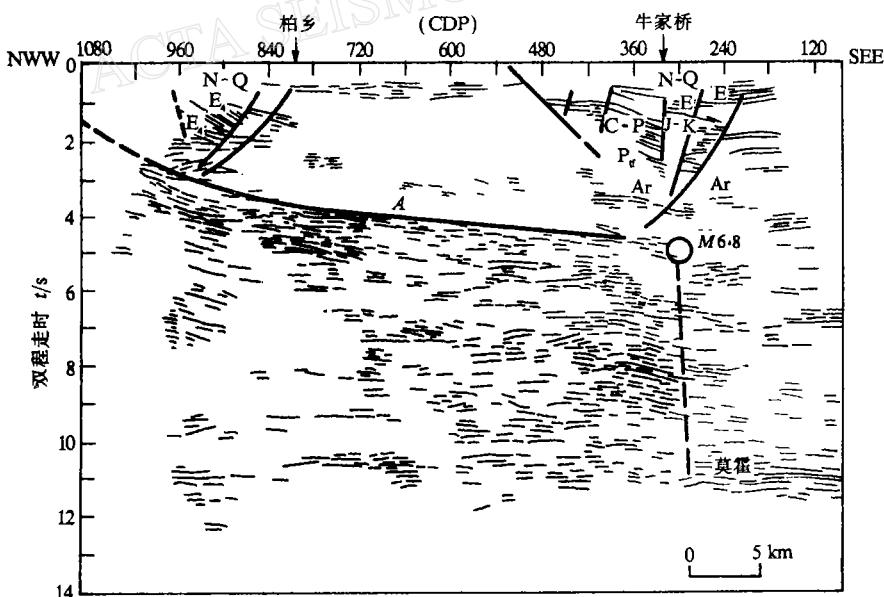


图 2 临城—巨鹿 CDP 叠加剖面的线描图及解释。

A 表示滑脱构造, 虚线表示推断的高角度断裂

地层分布, 向上延入上第三系和第四系。

在剖面 A 和 B 上显示了中地壳的大型滑脱构造。图 2 中展示剖面 B 中滑脱构造从西端 2.5 s 往东一直延续到东部大约 4.0 s 左右, 延续距离达 40 km。新河断裂在 4 s 左右最终归并于这一滑脱构造(王椿镛等, 1993; 1994)。上述反射特征是世界上许多伸展地区普遍存在的。另外, 在剖面的中到下地壳部分, 以震源为界, 其东西两侧的反射事件具有不同的能量、倾向和倾角, 推断存在一条高角度的断裂, 从滑脱面下方直至莫霍过渡带。

剖面 C 位于盆地内部, 与新河断裂平行。在剖面 4 s 以内的部分显示出被一组 NW 向断裂分割的三个盆地。这些浅部断裂以较缓的倾角下延到结晶基底的顶部。紧靠曹庄横向凸起的盆地由 NW 向的曹庄陆梁南断裂和大曹庄北断裂, 以及 NNE 向的新河断裂和宁晋断裂围成一个斛状构造块体。其南边的两个盆地亦有相同的构造形态, 但规模较小。剖面 C 显示出比剖面 A 和 B 更为复杂的中下地壳反射图象(图 3)。剖面上 4—10 s 范围即相当于中下地壳部分。横坐标 CDP600—1 000(即耿庄桥至小河庄)之间呈现众多的强反射事件具有叠层状特征, 并经受强烈变形。这组反射事件在剖面中部从地壳底部向上朝 NE 方向扩展, 并在 4 s 左右中止。在 4 s 左右的反射事件呈拱形, 它对应于剖面 A 和 B 上滑脱面的位置。拱形事件下方显示为相互交错的反射, Meissner 和 Wever (1992)称之为鳄鱼皮状(crocodiles)。这些拱形及鳄鱼皮状的反射事件在用几种偏移方法处理的剖面上仍然存在, 表明了中地壳内确实存在特殊的构造。

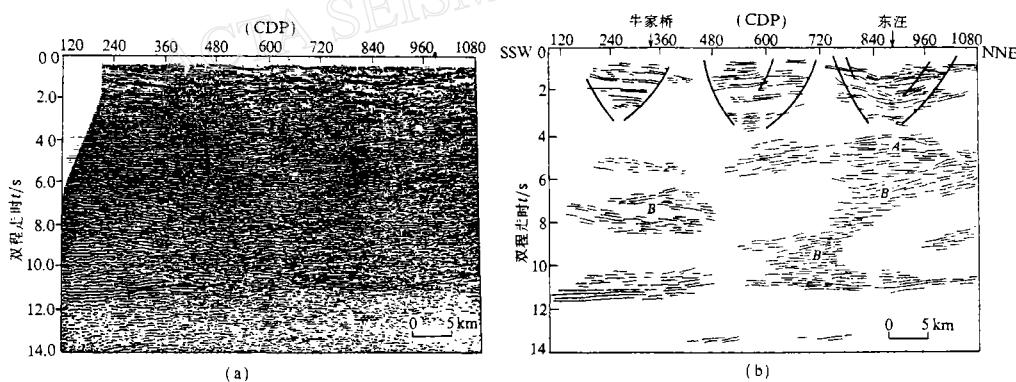


图 3 任县—宁晋 CDP 叠加剖面

(a) 处理结果剖面, (b) 线描图及解释剖面。图中 A 表示拱形事件, B 表示岩浆侵入区

在三条深反射剖面 10—11.5 s 上共同显示出清晰的 Moho 反射事件, 它对应于壳幔过渡带。相应的反射波具有能量强、连续性好以及多循环的特征, 而且在剖面上一般都有较长的持续时间。过渡带具有横向不均匀性。这一强反射持续时间宽度横向变化较大, 其中剖面 A 的西部最宽, 而且在剖面上有局部的弱反射区。此外, 在剖面 C 的 13.5—14 s 之间存在局部的反射事件, 它表示在束鹿盆地内, 上地幔顶部存在局部的间断面。

3 地壳结构特征

3.1 断陷盆地内部的复杂构造

华北盆地以伸展构造为背景，深地震反射剖面再次证实了这一结论。另一方面，束鹿断陷盆地内部有与华北盆地整体相似的断裂分布，即以 NNE 向断裂为主体、与 NW 或 NWW 向的次一级断裂相互交织成多个横向凸起和解状凹陷（图 4）。在反射剖面上显示出反射下地壳的特征。然而，这些下地壳反射事件的分布是不均匀的，在盆地下方呈现出更密集的强反射。另外，位于盆地内部的反射剖面上显示的拱形反射和相互交错的鳄鱼皮状反射，表明地壳内相应部位上存在特殊构造。一般而言，鳄鱼皮状反射是在挤压带中地壳缩短过程的表现。然而，这种反射图象在美国 Basin 和 Range 地区也存在（Klemperer *et al.*, 1986）。他们把这些反射事件解释为这一地区在伸展之前挤压作用的产物。如果我们的研究地区也属于这一情形，则在华北盆地形成之前有一个近南北向的挤压历史。

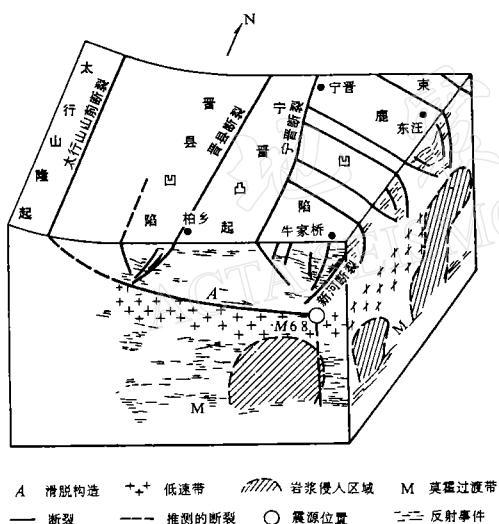


图 4 束鹿断陷盆地及其邻近地区
地壳结构的立体示意图

源区下方有一个局部的低速体 (6.10 km/s)。在 Moho 面上方存在厚度为 $4-6 \text{ km}$ 的速度梯度层，速度为 $6.60-7.0 \text{ km/s}$ 。上地幔顶部的速度为 $7.9-8.0 \text{ km/s}$ 。任县—河间—武清折射剖面在束鹿断陷盆地部分的速度结构，与元氏—济南折射剖面一致。下地壳存在低速层 (6.4 km/s)。另外，在 $10-15 \text{ km}$ 深度的中上地壳内，存在另一个局部范围的低速层 ($5.5-5.9 \text{ km/s}$)，虽然在位置上与元氏—济南剖面一致，但速度差异较大。这

3.2 壳内低速和高导带的存在

赵静娴等根据深反射剖面 A 提供的信息，对元氏—济南折射剖面作再解释^①，取得了二维速度结构。上部地壳横向变化较大。位于中上地壳之间的震源下方，存在一个约 6.5 km 厚的低速体。中地壳层速度为 $6.40-6.60 \text{ km/s}$ 。下部地壳较复杂，可分为三层：下层厚 3.5 km ，速度 7.1 km/s ；中间层为低速层 (6.35 km/s)；上层的速度为 6.80 km/s 。在相当于深反射剖面 B 的泰安—隆尧—忻州折射剖面速度结构模型^②中，上地壳厚度在 10 km 左右，上地壳底部速度为 6.20 km/s 。中地壳内在 16 km 深度上有一个较为连续的反射面，其形态与上地壳底界面基本一致；中地壳的层速度为 $6.22-6.28 \text{ km/s}$ ，在震

^① 赵静娴、陈学波、李金森、彭文涛，1993. 元氏—济南剖面速度结构再研究.

^② 祝治平、盖玉杰、石金虎、聂文英、张建狮，1994. 邢台地震区及相邻地区地壳上地幔速度结构研究.

种差异可能来自于炮点距和观测点距不同而产生速度估计的精度不同。

深反射剖面无法精确确定深层的速度值, 但可以利用与其重合的折射剖面提供合理的速度估计。地壳内低速层存在是这一地区构造活动的一个主要证据。低速层存在常用的物理解释是部分熔融或间隙水的存在。华北地区普遍存在壳内高导层(刘国栋等, 1984)。虽然这一高导层在不同地区的位置有所不同, 但都在中地壳范围内。邢台地区的探测结果同样表明在中地壳内存在高导层。流体(或熔融)的存在是对高导层一种最直接的解释。而无论是孔隙水的存在或是花岗岩的熔融, 都有利于滑脱构造的形成。

3.3 超壳的高角度断裂

深反射剖面 A 和 B 上分别显示出高角度断裂。根据元氏—济南折射剖面资料, 滕吉文等(1974)提出, 剖面上存在多条穿透地壳并延伸至上地幔的高角度断裂; 在东汪震区下方的震源部位存在断裂的局部错动; 以及震源区下方 Moho 面上拱。赵静娴等在这一剖面的再解释中, 也确认这一地区高角度断裂的存在。泰安—隆尧—忻州折射剖面资料的分析结果表明, 在牛家桥下方存在构造分界线, Moho 面反射波振幅在其以东地区很强, 以西则明显减弱以至有些地段难于辨认。根据震相分析和波组对比, 推断在牛家桥下方存在延伸至 Moho 面的断裂。转换波探测的结果同样提出这一地区存在高角度断裂(邵学钟等, 1993)。因此, 在这一问题上, 不同的地震学方法取得相当一致的认识。而且, 根据反射剖面推断存在高角度断裂与震源机制解(图 1)相一致, 因而被推断为是与邢台地震相关的发震断裂。与世界上一些著名的伸展构造地区(例如 Basin 和 Range 地区)不同, 在伸展构造区中下地壳内还存在高角度断裂, 这是邢台地震区的一个典型的构造特征。

3.4 岩浆底蚀作用和岩浆侵入区域

在深反射剖面上, 中下地壳的强反射被认为是岩浆作用所产生。在伸展期间深部地壳的变质作用产生了强烈的近水平分层。而岩浆的侵入体受到变质, 并被分开进入这些分层中。由于分层作用, 层间的相长干涉加大了反射波的振幅。因此, 岩浆的侵入导致地壳的底蚀作用, 产生了壳内强反射。在三条深反射剖面上, 壳幔过渡带均表现出大振幅、连续性好的反射, 并具有持续时间在 1 s 以上的多组反射波。元氏—济南折射剖面上, 在地壳底部存在一层 3.5 km 厚、P 波速度为 7.1 km/s 的层。它介于一般正常下地壳速度(6.50—6.80 km/s)与上地幔顶部的速度值之间。因此, 推测这一层物质为含有镁铁质和超镁铁质的一种组成。在深度上它相当于深反射剖面的壳幔过渡带, 相应的部位则是地壳底蚀作用的堆积带。同时, 在这三条深反射剖面的中下地壳部位上, 不同程度地显示出具有叠层状特征的反射事件, 它们相当于岩浆侵入的异常区域。在 Moho 界面上反射波振幅明显减弱的位置则可能是岩浆侵入的通道。岩浆的存在使得下地壳内反射波频率降低, 下至中地壳内的反射事件产生变形。另外, 这些反射事件在滑脱构造下方终止, 说明岩浆作用局限于中下地壳部分。在下地壳相应部位上的速度值偏低, 出现异常低速带, 这是高温岩浆活动的重要标志。

4 结论和讨论

4.1 伸展构造背景

在浅部，深反射剖面显示出束鹿断陷盆地及其邻近地区为盆岭相间，盆地具有不对称性并以面状或铲状正断层为主边界断裂；在深部，剖面上显示了反射的下地壳，以及由大振幅反射波揭示的壳幔过渡带等。这些构造特征再次证实，束鹿断陷盆地及其邻近是以新生代伸展构造为背景的。

4.2 铲状正断层、滑脱构造和高倾角的发震断层

深部断裂与浅部断裂在倾向及倾角大小方面不一致，这一现象在华北地区普遍存在。深反射剖面显示出中地壳存在一个低角度的滑脱构造。在深地震测深和大地电磁测深剖面分别相应存在的低速层和高导层，位于滑脱构造的下方，有利于上下盘构造的滑脱。浅部的中到低角度的正断层与中下地壳内的高倾角超壳断层，以及中地壳内的滑脱构造，共同组成了邢台地震区内特殊的断裂展布几何关系。在滑脱构造存在的条件下，具有不同动力学特征的深部和浅部断裂同处于一个地质构造单元中。这也许就是人们通常提及的深浅断裂关系。

4.3 岩浆作用是这一地区构造活动的重要因素

岩浆作用被认为是大陆岩石圈演化的一个基本机制。华北盆地中、新生代岩浆活动强烈并存在多次岩浆侵入而构成的复合岩体。从构造上看，岩浆活动主要受断裂控制或与断裂带控制的隆起和凹陷有关。在隆起带常常发育中酸性侵入岩，而在沉陷带内为基性火山岩。剖面上的反射事件对应于中下地壳内的火山岩，它是在早期岩浆侵入后结晶而成的。壳内低速带的存在以及岩浆作用在深反射剖面的表现，说明这一地区的构造活动较强烈。邢台地震就是这一构造活动的具体体现。

野外数据采集工作是在国家地震局地球物理研究所、地球物理勘探大队和高等防灾技术专科学校等单位一百多名人员共同努力下完成的，并得到了石油物探局的大力支持。曾融生、丁国瑜、陈运泰、马宗晋、刘国栋等对这项研究工作提出许多指导意见，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 河北省地震局，1986. 一九六六年邢台地震，1—10. 地震出版社，北京。
- 刘国栋、史书林、王宝钧，1984. 华北地区壳内高导层及其与地壳构造活动性的关系. 中国科学(B辑), 9: 439—448.
- 邵学钟、张家茹、章思亚、杨清源、李鸿生、范会吉，1993. 邢台地震区深部构造背景的地震转换波探测和研究. 地球物理学报, 36, 609—620.
- 孙武城、祝治平、张家茹、孙强民、张明汇、郑远泾，1986. 华北地区深地震测深，中国地壳上地幔地球物理探测成果，20—123. 地震出版社，北京。
- 滕吉文、冯炽芬、李金森、陈学波、闻昆娣、张家茹、熊成君，1974. 华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震(一). 地球物理学报, 17, 255—271.
- 王椿镛、王贵美、林中洋、张四维、刘运生、毛桐恩、刘元生、段以伟，1993. 用深地震反射方法研究邢台地震区地壳细结构. 地球物理学报, 36, 410—415.

- 王椿镛、张先康、吴庆举, 1994. 冀中拗陷内深地震反射剖面揭示的滑脱构造. 科学通报, 39: 625—628.
- 徐杰、方仲景、杨理华, 1988. 1966年邢台7.2级地震的构造背景和发震构造. 地震地质, 10, 51—59.
- Gazdag, J., 1978. Wave equation migration with the phase-shift method. *Geophysics*, 43, 1342—1351.
- Klemperer, S., Hange, T., Hauser, E., Oliver, J. and Potter, C., 1986. The Moho in the northern Basin and Range Province, Nevada, along the COCORP 40°N seismic reflection transect. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 97, 603—617.
- Meissner, R. and Wever, T., 1992. The possible role of fluids for the structuring of the continental crust. *Earth-Science Review*, 32, 19—32.
- Smith, R. B. and Bruhn, R. L., 1984. Intraplate extensional tectonics of the eastern Basin-Ranger inferences on structural style from seismic reflection data, regional tectonics, and thermal-mechanical models of brittle-ductile deformation. *J. Geophys. Res.*, 89, 5733—5762.
- Stolt, R. H., 1978. Migration by Fourier transform. *Geophysics*, 43, 23—48.