

松辽盆地北部薄互层复杂构造的 精细刻画方法与应用

崔凤林¹, 张向君², 王世清²

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

2. 大庆物探公司研究所, 黑龙江大庆 163357

摘要: 随着勘探开发的深入, 小断块、小砂体及其隐蔽圈闭所形成的油气藏越来越具有商业价值。松辽盆地北部薄互层复杂构造发育, 幅度 5~10 m 的小幅度构造、断距 3~5 m 的小断层、1~2 m 厚的薄砂体都可能对油气富集起到重要作用, 其精细刻画需要一系列新的技术方法。根据研究区的地质条件和地震资料的情况, 研究了高精度合成地震记录制作方法、三维相干数据体技术及相干切片断层多边形提取方法以及二维叠偏成图精确空间归位方法等。通过这些方法实现了地震地质层位精细标定、断层的精细解释和二维叠偏成图。这些方法在松辽盆地北部的应用表明, 在断层的延伸位置、破碎带宽度等方面, 解释精度比常规方法有很大提高, 并能识别出断距仅为 3~5 m 的小断层, 在二维工区获得了高精度的成图结果, 不仅提高了构造的解释精度, 而且提高了解释的效率。松辽盆地北部薄互层复杂构造的精细刻画是油藏描述和建立精细地质模型的基础。

关键词: 薄互层; 复杂构造; 精细刻画; 方法应用; 松辽盆地。

中图分类号: P631.4

文章编号: 1000-2383(2005)04-0503-06

收稿日期: 2004-12-28

Meticulous Depiction Methodology and Application of Complicated Structures of Reciprocal Thin Layers in Northern Songliao Basin

CUI Feng-lin¹, ZHANG Xiang-jun², WANG Shi-qing²

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Research Institute of Daqing Geophysical Exploration Company, Daqing 163357, China

Abstract: Small fault blocks, small sand bodies and the related subtle traps have gained greater commercial value with the growth in oil and gas exploration and development. The complicated structures of reciprocal thin layers developed in northern Songliao basin, such as small structures with altitudes 5—10 m, small faults with throws 3—5 m and thin sand bodies 1—2 m thick, play an important role in the accumulation of oil and gas. The meticulous depiction of these complicated structures requires a set of new techniques. We have developed some methods including high precision synthetic seismograms, coherency cubes and fault polygon information extraction, and precise spatial migration technology for 2-D migration sections, according to the geology and seismic data of the northern Songliao basin. We realized meticulous calibration of seismic-geologic horizons, meticulous interpretation of faults and 2-D poststack migration mapping, using those methods. Their application to the northern Songliao basin shows that they can improve the accuracy and efficiency of fault interpretation, such as in defining the extent of faults and the width of their fracture zones, as well as defining small faults with only 3—5 m throws. Meticulous depiction of complicated structures of reciprocal thin layers in northern Songliao basin provides a base for reservoir description and the construction of precise geological models.

Key words: reciprocal thin layer; complicated structure; meticulous depiction; methodology and application; Songliao basin.

20 世纪 70 年代以来发展的一系列新地震勘探技术,如地震地层学、岩性地震学、烃类检验技术和油藏描述技术等,在应用于陆相薄互层含油气区时遇到了困难,因为这样的地区具有物源多、相变快、断层多、断距小、储层薄且横向变化快的特点。松辽盆地薄互层区幅度 5~10 m 的小幅度构造、断距 3~5 m 的小断层、1~2 m 厚的薄砂体都可能对油气富集起到重要作用(崔凤林等,2001)。随着勘探开发程度的不断提高,这些小断块、小砂体及其隐蔽圈闭所形成的油气藏越来越具有商业价值。薄互层复杂构造精细刻画不仅是建立精细地质模型的基础,也是识别岩性圈闭油气藏构造背景和遮挡条件的前提。

在以往的三维构造解释中,常规解释方法和技术难以充分利用三维资料所蕴涵的全部信息,实现对断层、特别是小断层的精细解释。根据二维地震资料进行的高精度构造刻画,不仅需要断层的精细解释还需要有高精度的成图方法。为此笔者研究了高精度合成地震记录制作方法、三维相干数据体技术及相干切片断层多边形提取方法、二维叠偏成图精确空间归位方法等。这一系列技术方法,实现了地震地质层位精细标定、断层的精细解释和二维叠偏成图。其中高精度合成地震记录制作是基础,三维相干数据体技术及相干切片断层多边形提取方法是核心。最终的研究成果是用构造图表达的,二维叠偏成图精确空间归位方法是充分利用二维资料达到精确成图的目的。这些技术方法是相对独立的,可以根据研究区块的具体的地质条件、资料情况和构造编图的阶段,选择应用。这些方法已应用于松辽盆地北部,取得了较好的地质效果和经济效益。

1 合成地震记录与地震地质层位的精细标定

地震地质层位标定就是建立起地震反射层位与地质层位的对应关系,赋予地震反射层以明确的地质含义。高精度层位标定很大程度上取决于合成地震记录的制作精度,其是薄互层构造精细刻画的基础。

1.1 方法原理

合成地震记录是子波与反射系数的褶积,反射系数由测井曲线求得。利用声波测井曲线制作合成地震记录的方法很多(杨文采,1986;李宗杰,1999)。测井资料由于受到井眼环境和探测深度的影响,需

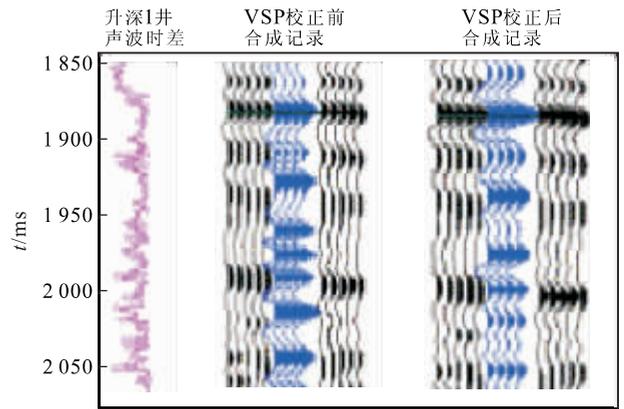


图 1 升深 1 井合成记录与井旁地震记录对比
Fig. 1 Comparison between synthetic seismograms and seismic trace of Shengshen 1

要进行适当的编辑处理,滤除奇异值。现在一些国外软件具有对声波测井曲线畸变进行人工编辑校正的功能,但存在功能不完善和操作繁琐的缺陷。为此,本文提供了 3 种功能完善的测井曲线校正方法。(1)测井曲线交互编辑校正方法。此方法包括 4 种编辑功能,即表格化编辑、方波化编辑、厚度化编辑和交互编辑。在表格化编辑中,编辑个别深度采样不合理的野值点,修改后重新采样,同时也提供修改点恢复功能。在方波化编辑中,对测井曲线振幅值进行修改,根据振幅平均值对各点振幅进行校正,并提供测井曲线整体偏移和幅值缩放功能。在厚度化编辑中,对测井曲线的某一部分进行拉伸、压缩和删除,主要包括 Remove Section、Stretch/Squeeze、Replace above 和 Replace below 等 4 种方式。在交互编辑中,对现有曲线的某一段进行编辑,创建新的曲线段。(2)测井曲线滤波处理。测井曲线的滤波处理采用中值滤波和带通滤波。处理目的是剔除曲线中的野值,平滑曲线。(3)测井曲线 VSP 校正方法。将 VSP 资料应用于声波测井曲线校正,根据校正后的曲线得到的合成地震记录能更准确地进行层位标定(冯昭等,2001)。测井曲线声波校正利用 VSP 层速度校正声波测井曲线。根据实际情况,笔者研制了 2 种校正方法:一种方法是整体校正,利用 VSP 地震资料与整体声波测井资料的误差以求得误差曲线,由此校正原声波测井曲线;另一种是分时差值校正,对测井曲线中某些范围内的测量值进行时差校正,主要考虑不同岩性对声波测井曲线的影响程度不同。图 1 是升深 1 井对声波测井曲线经 VSP 校正前后制作的合成记录的比较图,经 VSP 校正后的对比结果

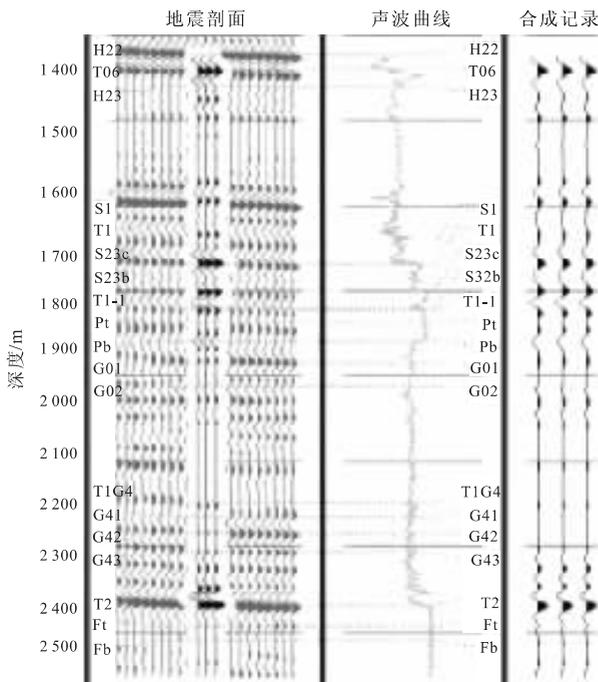


图 2 古龙地区英 38 井层位精细标定

Fig. 2 Meticulous calibration of seismic-geologic horizons of Ying 38 in Gulong area

明显好于校正前的结果。

1.2 应用实例

通过制作高精度的合成地震记录,实现了地震地质层位的精细标定。图 2 是松辽盆地北部古龙地区英 38 井合成地震记录与过井地震剖面的对比。结合声波测井曲线,可以精细标定出 14 个油层组,为薄互层复杂构造精细刻画和储层描述奠定了基础。

2 相干数据体断层精细解释

要充分利用三维地震勘探的全部信息,需对三维地震资料进行全三维解释,全三维解释包括全三维构造和全三维岩性解释。全三维构造解释分为层位和断层解释。断层解释是衡量全三维解释手段的一个重要标志,是全三维构造解释的关键。三维地震资料可以以垂直和水平等多种方式显示。通过时间切片可以以平面图的方式研究地质特征。然而在实际应用中由于地质情况的复杂性,常规时间切片解释效果通常不很理想。Bahorich (1996)首次提出了地震相干数据体技术(Coherency Cube),使得三维地震资料解释精度得到明显提高,为了提高松辽盆地北部三维地震资料的解释精度和效率,笔者开展

了此项研究。

2.1 相干数据体技术的基本原理

相干数据体技术主要根据信号的相干性分析原理,计算三维数据体中所有相邻道之间的相干性。在断层切割的部位和地质体异常的边界上,地震资料的相干性会出现一个明显的差异,存在不连续性。根据这种差异,可在相干数据体及其切片上有效地识别出断层或地质异常体。常规时间切片对于观察垂直于地层走向的断层一般有用,但当断层平行于地层走向时,由于断层线重叠在弯曲的层位线上,它们的特征难以识别。相干计算则压制了侧向的一致性特征,消除了地层影响,因此,相干时间切片在所有方向上都能有效地揭示断层的存在。

相干数据体技术方法目前已发展到第三代(Kurt *et al.*, 1998; Adam and Kurt, 1999; Kurt *et al.*, 1999; 孙夕平和杜世通, 2003)。第一代算法是基于互相关的一种算法,在资料信噪比较高时对断层分辨能力较好,但抗噪音能力差;第二代算法是基于相似的算法,与第一代算法相比是计算相干性较好的算法,且分辨率高,但地震资料品质对相干处理的效果仍有一定影响;第三代算法是基于本征结构的一种算法,代表了该项技术目前的最高水平。

本征结构算法的基本原理是,在三维数据体中取一小的数据体 d_{ij} , i 表示道数, j 表示采样点数,则 $D = d_{ij}$, 计算小数据体 D 的协方差矩阵

$$C = D^T D = \sum_{n=1}^N d_n d_n^T,$$

则本征结构相干计算(E_c)可定义为 $E_c = \frac{\lambda_1}{T} \cdot \sum_{j=1}^T \lambda_j$ 。

其中, λ_j 为协方差矩阵 C 的第 j 个本征值, λ_1 为 λ_j 中的最大值。

2.2 应用实例

利用相干数据体第三代算法,对松辽盆地北部兴城三维地震资料进行了相干处理,用于断层解释(图 3)。图中为相干数据体中的一部分,是三维资料加载到解释系统后未做解释的情况下,直接进行相干处理得到的结果。在相干数据体内通过可视化技术,对断层破碎带宽度、断层的延伸位置、断裂分布及组合得到了清楚识别,大大提高断层的解释精度和效率。

图 4 是兴城三维 T_1 附近(1 160 ms)的相干时间切片与主测线时间剖面的对比。相干时间切片上

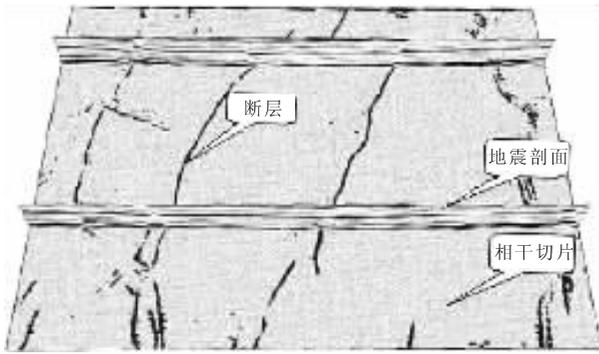


图 3 松辽盆地北部兴城相干数据体(部分)

Fig. 3 Coherency cube of Xingcheng in the north of the Songliao basin (part)

反映的断层与地震剖面上 T_1 断层位置吻合得很好,断层的断点位置在地震剖面上也得到了清楚的印证,大断层和小断层均显示得十分清楚.三维资料采集面元一般为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$,常规三维解释时每隔 3 条线解释一条剖面,而相干切片解释断层的平面延伸最大误差可由常规的 100 m 减小到 25 m ,并至少节省工作量 10% 以上.

3 断层多边形提取技术

为更好发挥相干数据体技术在全三维地震资料解释中的作用,进一步提高断层及岩性异常体解释的精度和效率,使相干数据体技术充分有效地体现,笔者研制了断层多边形信息提取技术.该技术可以在相干切片上将断层多边形所包含的有关信息提取出来,再投影到测区底图上,从而大幅度提高了全三维解释的效率.

3.1 方法原理

通过对三维地震资料相干处理,可使断层在相干切片上较好地显示.相干切片为含有断层的二维图像,利用图像的边缘检测技术可实现断层多边形检测(张向君等,2001).

将相干切片视为灰度曲面, $r = \{x, y, f(x, y)\}$, 其中 x, y 分别为横、纵坐标, $f(x, y)$ 是图像的灰度值,并且具有连续的二阶导数.该曲面的第一基本形式和第二基本形式分别是(梅向明和黄敬之,1988):

$$C_1 = E dx^2 + 2F dx dy + G dy^2,$$

$$C_2 = L dx^2 + 2M dx dy + N dy^2.$$

其中, $E = 1 + p^2, F = pq, G = 1 + q^2,$

$$L = \frac{r}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}, M = \frac{s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}},$$

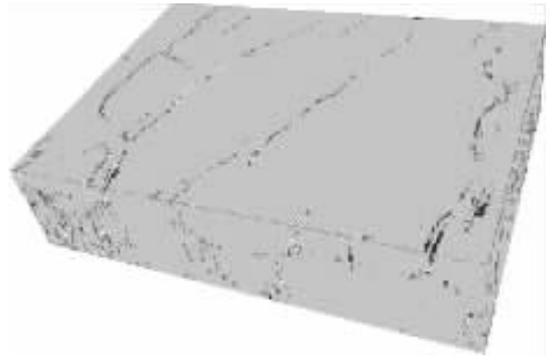


图 4 相干时间切片与垂直地震剖面在 T_1 层的对比

Fig. 4 Correspondence between time coherency slice and vertical seismic profile of T_1 layer

$$N = \frac{t}{1 + p^2 + q^2},$$

$$r = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, s = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}, t = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2},$$

$$p = \frac{\partial f}{\partial x}, q = \frac{\partial f}{\partial y}.$$

则曲面上任一点的法曲率 k 可用下式表示: $k_n = C_1/C_2$.

曲面上一点 P 的 2 个方向,如果它们既正交又共轭,则称为曲面在 P 点的主方向.设在这 2 个方向的正切为 a_1, a_2 ,则是下面方程的根:

$$(EM - FL)a^2 + (EN - GL)a + (FN - GM) = 0.$$

曲面上一点处主方向上的法曲率称为曲面在此点的主曲率.可以证明,主曲率是法曲率的最大值和最小值.主曲率的计算公式为:

$$(EG - F^2)k^2 + (LG - 2MF + NE)k + (LN - M^2) = 0.$$

主曲率是法曲率的最大值和最小值,分别表示不同方向上的弯曲程度.在最大主曲率方向上得到最大主曲率,表明沿该方向曲率的弯曲程度最大,因此沿最大主曲率方向,最大主曲率的局部极值点就是图像的边缘点.同样在最小主曲率方向上得到最小主曲率,表明沿该方向曲面弯曲程度最小,因此最小曲率方向就是图像边缘的走向.得到了曲面的主方向和主曲率,则可沿曲面的最大曲率方向寻找最大主曲率的局部极值,就可检测出断层多边形.

3.2 应用实例

在松辽盆地北部英台三维地震资料解释中运用了相干切片断层多边形检测技术.图 5 是 T_2 层处时间为 1430 ms 的一张相干时间切片和对此切片进行的断层多边形检测结果.从中可以看到断层多边形被清晰地检测出来,断层组合关系、断层破碎带宽度也真实得到反映.相干切片断层多边形检测技

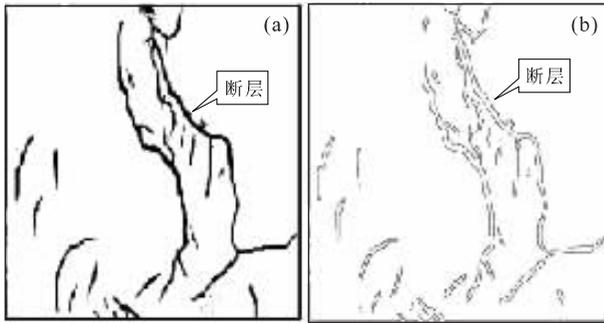


图5 英台 1430 ms 相干时间切片和断层多边形检测

Fig. 5 Time coherency slice at 1430 ms and extracting fault polygons

a. 相干时间切片; b. 在 a 上检测出的断层多边形

术的应用,大大提高了相干切片断层解释的精度和效率,其中解释最小断层断距为 3 m. 此项技术如果辅之以三维层位自动追踪技术,则可以很快做出时间构造图,从而提高三维地震资料解释效率,缩短三维解释周期.

4 三维叠偏成图精确空间归位

以往二维地震叠偏剖面成图方法概括起来有以下 3 种: (1) 对构造平缓、简单地区用叠偏剖面成等 t_0 图, 不进行空校, 直接进行时深转换成深度构造图; (2) 对地层视倾角较大、构造复杂地区, 采用对等 t_0 图沿垂直主测线方向归位, 垂直联络测线方向不进行归位; (3) 用手工空校方法对等 t_0 图视情况沿垂直主测线、联络测线方向归位. 以上 3 种叠偏剖面成图方法实现过程均不完善, 一方面所得到的构造成果精度不高, 另一方面解释工作效率低下.

本文以三维地震两步法偏移为理论依据, 结合手工空校经验, 借助地震解释系统工具, 自动实现二维地震叠偏剖面的三维空间闭合, 即正确地实现层位闭合和断面闭合, 把深度点和断点归位到它们真正的空间位置上, 从而提高二维地震叠偏剖面的构造解释精度及工作效率.

4.1 二维地震两步法偏移原理

水平叠加剖面记录的时间是把自激自收的垂直反射界面的法线深度记录到自激自收点的视铅直深度上, 第一步偏移(沿测线方向的偏移)是把水平叠加剖面上各点的法线深度沿测线方向变为视铅直深度. 第二步偏移(垂直测线方向的偏移)是把测线方向的视铅直深度变为真深度(铅直深度, 即垂直地面

表 1 源 13 井区 T_2 层构造图对井误差统计

Table 1 Errors comparing with drilling datum of T_2 structural map in the area of Yuan 13 well

井名	补心海拔/ m	层位	钻井深度/ m	地震深度/ m	绝对误差/ m	相对误差/ %
源 13	136.3	T_2	1769.7	1767	-2.7	-0.15
源 142	137.5	T_2	1688.9	1691	2.1	0.12
源 291	131.1	T_2	1751.9	1757	5.1	0.29
源 143	138.6	T_2	1696.6	1692	-4.6	-0.23
源 30	130.5	T_2	1681.6	1677	-4.6	-0.27
源 293	130.2	T_2	1738.8	1735	-3.8	-0.21

的深度).

二维叠偏剖面已将地震反射波沿测线方向归位, 但仅仅是沿二维测线方向归位, 而在垂直测线方向未做归位校正, 叠偏剖面仍是法线平面, 两测线交点处读取的 t_0 时间不相等不能闭合, 给制作构造图带来困难. 在二维叠偏剖面上, 若对解释层位在垂直测线方向也进行一次归位, 找出反射点在地下准确位置, 算出反射点到地面的垂直深度, 进行成图, 则可克服叠偏剖面作图时由于主测线、联络测线不闭合带来的问题.

4.2 应用实例

源 13 井区是松辽盆地北部的一个高分辨率二维开发区块. 工区共有测线 22 条, 其中主测线、联络测线各 11 条. 主测线方位角 90° , 联络测线与之正交. 表 1 为该区 T_2 层构造图对井误差统计表, 从中可以看出经偏移空校归位后, T_2 层对井相对误差很小, 偏移归位精度较高. 源 293 井是后钻井, T_2 层处对井相对误差仅为 -0.21% .

5 结论

通过对测井曲线合理编辑、滤波和 VSP 校正等, 实现了地震地质层位的精细标定, 为陆相薄互层复杂构造精细刻画提供了前提. 三维相干数据体技术中第三代算法的研究与运用, 以及相干切片断层多边形的提取方法的提出与实践, 使得全三维断层解释精度和效率大大提高. 实际应用表明, 在断层的延伸位置、破碎带宽度等方面, 解释精度比常规方法有很大提高, 并能识别出断距仅为 $3\sim 5$ m 的小断层. 在二维工区, 根据三维地震两步法偏移原理, 提出了二维叠偏成图精确空间归位法, 获得了高精度的成图结果, 钻井结果也证实了该方法的精确性. 通过一系列新的技术方法使薄互层复杂构造得以精确

刻画,同时也为薄互层储层描述奠定了坚实的基础.

References

- Adam, J. S., Kurt, M., 1999. Delineation of tectonic features offshore Trinidad using 3-D seismic coherence. *The Leading Edge*, 18(6): 1000.
- Bahorich, M. S., 1996. The stratigraphic and structural interpretation using 3D coherency. In: Symposium of the 65th meeting of Geophysical Society of America. Translated by Song, Y.. Petroleum Industry Press, Beijing, 143—152 (in Chinese).
- Cui, F. L., Wang, Y. Q., Chen, S. M., 2001. The interpretation method and effects for seismic data from the thin interbedded formations in the north of Songliao basin. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 40(2): 63—76 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X., Liu, C., Yang, B. J., et al., 2001. The producing method and the application of synthetic seismogram of high precision. *World Geology*, 20(4): 389—395 (in Chinese with English abstract).
- Kurt, J., Marfurt, R., Lynn, K., et al., 1998. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *Geophysics*, 63(4): 1150—1165.
- Kurt, J., Marfurt, R., Sudhakar, et al., 1999. Coherency calculation in the presence of structural dip. *Geophysics*, 64(1): 104—111.
- Li, Z. J., 1999. Method of man-machine interaction of the synthetic seismogram and application. *Oil Geophysical Prospecting*, 34 (Suppl.): 96—102 (in Chinese with English abstract).
- Mei, X. M., Huang, J. Z., 1988. Differential geometry. 2nd Edition. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Sun, X. P., Du, S. T., 2003. Development and application of algorithm of coherency cube technique to seismic interpretation. *Journal of the University of Petroleum*, 27(2): 32—40 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., 1986. The synthetics of reflection seismic traces in viscoelastic medium. *Oil Geophysical Prospecting*, 21(6): 615—623 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. J., Li, Y. M., Zhong, J. T., et al., 2001. Fault polygon detecting in 3D coherence slice. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 23(4): 295—298 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Bahorich, M. S., 1996. 利用三维相干性进行地层和构造解释. 美国地球物理学会第 65 届会议论文集. 宋焰译. 北京:石油工业出版社, 143—152.
- 崔凤林, 王允清, 陈树民, 2001. 松辽盆地北部薄互层地震资料解释方法及效果. 石油物探, 40(2): 63—76.
- 冯暄, 刘财, 杨宝俊, 等, 2001. 高精度合成地震记录制作方法及应用. 世界地质, 20(4): 389—395.
- 李宗杰, 1999. 合成地震记录的人机互制方法及应用. 石油地球物理勘探, 34(增刊): 96—102.
- 梅向明, 黄敬之, 1988. 微分几何(第二版). 北京:高等教育出版社.
- 孙夕平, 杜世通, 2003. 相干体技术计算研究及其在地震资料解释中的应用. 石油大学学报(自然科学版), 27(2): 32—40.
- 杨文采, 1986. 黏弹性介质中反射地震道的合成. 石油地球物理勘探, 21(6): 615—623.
- 张向君, 李幼铭, 钟吉太, 等, 2001. 三维相干切片断层多边形检测. 物探化探计算技术, 23(4): 295—298.