文章编号:1000-0747(2007)05-0566-08

地球物理技术在天然气水合物分布区预测中的应用

刘彦君[1],刘喜武[2],刘大锰[1],赵迎新[3]

(1. 中国地质大学(北京);2. 中国海洋大学海洋地球科学学院;3. 中国石油吉林油田公司)

基金项目:国家天然气水合物资源综合评价及勘探开发战略研究专项项目(GZH200200203-05)

摘要:从天然气水合物发育区特有的构造沉积特征对各种地球物理响应的敏感性分析入手,研究地震属性分析、AVO 分析、陡倾角地层反转速度场建立、伪井约束波阻抗反演等地球物理技术在天然气水合物预测中的应用及其效果。通过多信息联合分析与融合策略,优化集成有效地球物理技术,形成了一套可靠的预测技术方法。实际应用效果表明:反射强度、瞬时相位、层速度、相对波阻抗、绝对波阻抗、AVO 截距剖面联合分析是识别天然气水合物底界似海底反射(BSR)界面的有效技术组合;综合应用原始地震剖面及相对波阻抗、绝对波阻抗、层速度等剖面的特征可提高天然气水合物识别的有效性;而瞬时频率、能量半衰期、层速度、AVO 截距、AVO 乘积、AVO 流体因子等剖面特征的有效组合能更准确有效地识别 BSR 界面以下的游离气。图 10 参 15

关键词:天然气水合物;游离气;地球物理技术;地震属性;BSR

中图分类号:TE132.1 **文献标识码**:A

Applications of geophysical techniques to gas hydrate prediction

LIU Yan-jun[1], LIU Xi-wu[2], LIU Da-meng[1], ZHAO Ying-xin[3]

(1. *China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*; 2. *College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *China*; 3. *Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan* 138001, *China*)

Abstract: Starting with the analysis of geophysical responses of structural sedimentary characteristics of gas hydrate developed areas, this paper studies the applications of geophysical techniques and their effects in the prediction of gas hydrates, including seismic attribute analysis, AVO processing, inverted velocity field construction for steep formations, and pseudo-well constrained impedance inversion. By the tricks and programs of multi-information integration, effective schemes and methods are integrated into a set of reliable prediction means. The practical application shows that the combination of reflection strength, instantaneous phase, interval velocity, relative impedance, absolute impedance and AVO intercept is valid for identifying BSR (Bottom simulation reflectors) from lower boundary of gas hydrates. Integration of seismic section, relative and absolute impedance sections, and interval velocity section can improve the validity for gas hydrate determination. The combination of instantaneous frequency, energy half attenuation time, interval velocity, AVO intercept, AVO product, AVO fluid factor can locate the free gas under BSR accurately.

Key words: gas hydrate; free gas; geophysical technique; seismic attribute; BSR

0 引言

天然气水合物是一种重要的接替能源,它是一种在一定温度和压力条件下形成的水包气笼型固态物[1,2],多分布于两极和深海地区。在两极,天然气水合物通常存在于滨岸大陆沉积物及近海大陆架沉积物永冻层中;在深海区,多分布于外大陆架边缘的斜坡和陆隆沉积物中[3]。

国内外研究表明:天然气水合物在地震记录上的响应表现为团状、楔状的分段性空白反射,底部存在产状似海底的反射,与地层斜交,但极性与海底反射相反,此反射界面被称为似海底反射面 BSR (Bottom Simulating Reflection)[4,5]。对 BSR 的成因机制目前国际上有两种观点,一种观点认为 BSR 是水合物与游离气的分界[6];另一种观点认为 BSR 是水合物与含水沉积物的分界[7]。故不论 BSR 的形成机制如何,BSR 与天然气水合物底界相对应已成共识。目前天然气水合物预测最直接和有效的方法是看是否存在 BSR,但在没有 BSR 的地方,也可能存在天然气水合物[8]。此外,BSR 作为判断是否存在天然气水合物的一个主要标志,却不能确定游离气的存在与否。

针对以上问题,笔者认为,基于天然气水合物分布区地震波传播规律和岩石波阻抗特性,充分挖掘和利用各种地球物理特征信息进行综合分析,能更准确地

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

检测天然气水合物及游离气的富集区,但在运用地球物理技术进行水合物分布区预测的工作中,提取和分析哪些地球物理信息、如何提取和分析及这些特征如何有效融合,仍然是值得深入细致研究的问题。基于上述考虑,笔者通过研究对比,认为利用层速度、相对波阻抗、AVO、"三瞬"(瞬时振幅,瞬时频率,瞬时相位)剖面等信息进行综合分析最为有效。本文首先对以上信息的处理与提取方法进行较详尽的阐述,然后综合评价各种参数剖面所反映的地质特征,圈定各种属性有利区的交集,以减少多解性,提高可靠性,最后对中国南海实际地震资料进行分析。

1 天然气水合物分布区预测关键地球物理技术

1.1 地震属性提取与分析技术

地震记录的信号特征是岩石物理特性及其变异综合产生的,即它是岩石岩性、物性、流体成分(含油气性)等相关信息的综合反映。地震属性提取的过程就是由叠前或叠后地震综合信息中,经数学变换分离出相关的地震波几何形态、运动学信息、动力学信息和统计学信息,这些信息有的对岩石储集层环境敏感,有的对储集层孔隙流体敏感,利用这些分离出的信息突出和解释目标体就是地震属性分析。通过几十余种属性提取分析对比得出"三瞬"等属性对天然气水合物、游离气敏感,可用于识别和预测天然气水合物分布区。

瞬时振幅反映了反射波能量的强弱,以直观方式突出了各种原因引起的振幅包络变化。水合物层的密度与地震波在其中的传播速度要高于含有游离气或含水的沉积层,如果地震资料的子波极性为正,则会形成正极性反射界面,反之,若地震资料子波极性为负,则会形成负极性反射界面,此界面即前面所述的 BSR 界面,所以利用瞬时振幅属性便可从能量上突出 BSR 反射界面。瞬时相位是指地震波某一瞬间的相位,它忽略了振幅强度信息,突出了反射波的连续性。BSR 界面往往与沉积地层斜交,受地层反射的影响,有时 BSR 界面不够清晰,所以利用瞬时相位属性可以突出与地层斜交的 BSR 界面。瞬时频率属性不同于某一时窗内的平均频率,它是一个样点上的频率值,此属性除了可预测古沉积环境外,还能反映沉积地层的吸收性,即强吸收会导致反射波高频成分迅速衰减而使频率降低。当地层中富含游离气时,瞬时频率会出现低值异常,所以利用此属性协同其他手段可用来判断游离气富集区及富集程度。

1.2 AVO 分析技术

基于 Zoeppritz 方程线性逼近的 AVO 分析技术是天然气勘探的主要手段[9,10]。AVO 直线的截距反映纵波反射系数。斜率反映纵波反射振幅随炮检距变化的梯度,它与泊松比有关,而泊松比又是横纵波速度比(v_S/v_P)的函数,所以斜率剖面对 v_S/v_P 敏感,根据高孔隙度岩层中富含天然气时对 v_S/v_P 影响很大的事实,就可以利用斜率剖面来指示含气储集层。截距与斜率乘积可放大数据绝对值范围,提高清晰度,对预测油气很有意义,有人称之为碳氢指示。流体因子剖面主要反映流体性质,当孔隙中流体为水时,流体因子为零,当孔隙中富含油气时,流体因子为负,且其绝对值越大,储集层为气层的可能性越大,所以可以利用此关系进行流体预测。

水合物与游离气一般发育于深海区外大陆架边缘的斜坡海底 200～600m 处,砂岩一般未压实和固结,或压实固结程度较差。所以此处的游离气储集层应该属于 Rutherford 和 Williams 总结出的 3 种岩性组合中的第三类岩性组合[5],这类岩性组合的 AVO 直线截距和斜率均为负,两者乘积将呈现出正异常。另外在流体因子剖面上,当砂岩被水饱和时流体因子为零,被气饱和时为负值。利用这些特征便可进行天然气水合物、游离气的解释。

实际处理时需要加强振幅保真与恢复处理[11,12],可通过几何扩散校正、Q 值补偿、地表一致性振幅处理、反褶积、多次波压制、动静校正,以及基于统计学的随时间和炮检距变化的剩余振幅综合校正等环节实现保幅处理[13],在此基础上进行 AVO 属性剖面处理。

1.3 速度场建立技术

在水合物分布区的地球物理预测中,速度是很重要的参数,因为地震波在水合物中的传播速度比在围岩中的传播速度高,若下伏地层中存在游离气则地震波传播速度会降低导致叠加速度反转[14],利用此现象可初步检测水合物与游离气。图 1 所示速度谱中,1.9～2s 表现为高叠加速度,此层可能发育水合物,2.1～2.2s 处出现速度反转,此层可能为游离气层。在既无声波、偶极横波测井,也无 VSP 测井资料时,可利用叠加速度谱建立速度场。对于无井条件下由地震信息建立的速度场精度低的问题,主要从两方面予以解决:①提高地震资料处理叠加速度的解释精度,采取 250m 小间距速度分析法提高横向分辨率或通过在浅层加密解释点的方法提高纵向解释精度,尤其关注海底 200～600m 存在速度反转的层系。②提高利用叠加速度求取层速度的精度,常规求取层速度的方法是利用叠加

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

速度经倾角校正转换为均方根速度,再由均方根速度用 Dix 公式求取层速度,它的适用条件是假设地层为均匀介质或水平层状介质且排列长度不大,而水合物通常发育于深海大陆斜坡和陆隆区沉积物中,且与地层斜交,不满足公式使用的假设条件,故应用此方法计算地层层速度误差会很大。而采用几何射线追踪的传统模型迭代法,当地层倾角达到 30 °时速度计算误差也较大,当地层倾角大于 60 °时,几何射线往往难以追踪。针对这一情况,可采用波动法追踪射线路径,从而求取层速度。因为波动法可以不受高陡构造或大倾角地层的限制,充分考虑了波的干涉和衍射,尤其在速度突变带和断距较大的断层附近,可以完全模拟地震波的传播路径,最终得到与实际地震记录较为吻合的叠加速度,可以保证反演层速度的准确性。

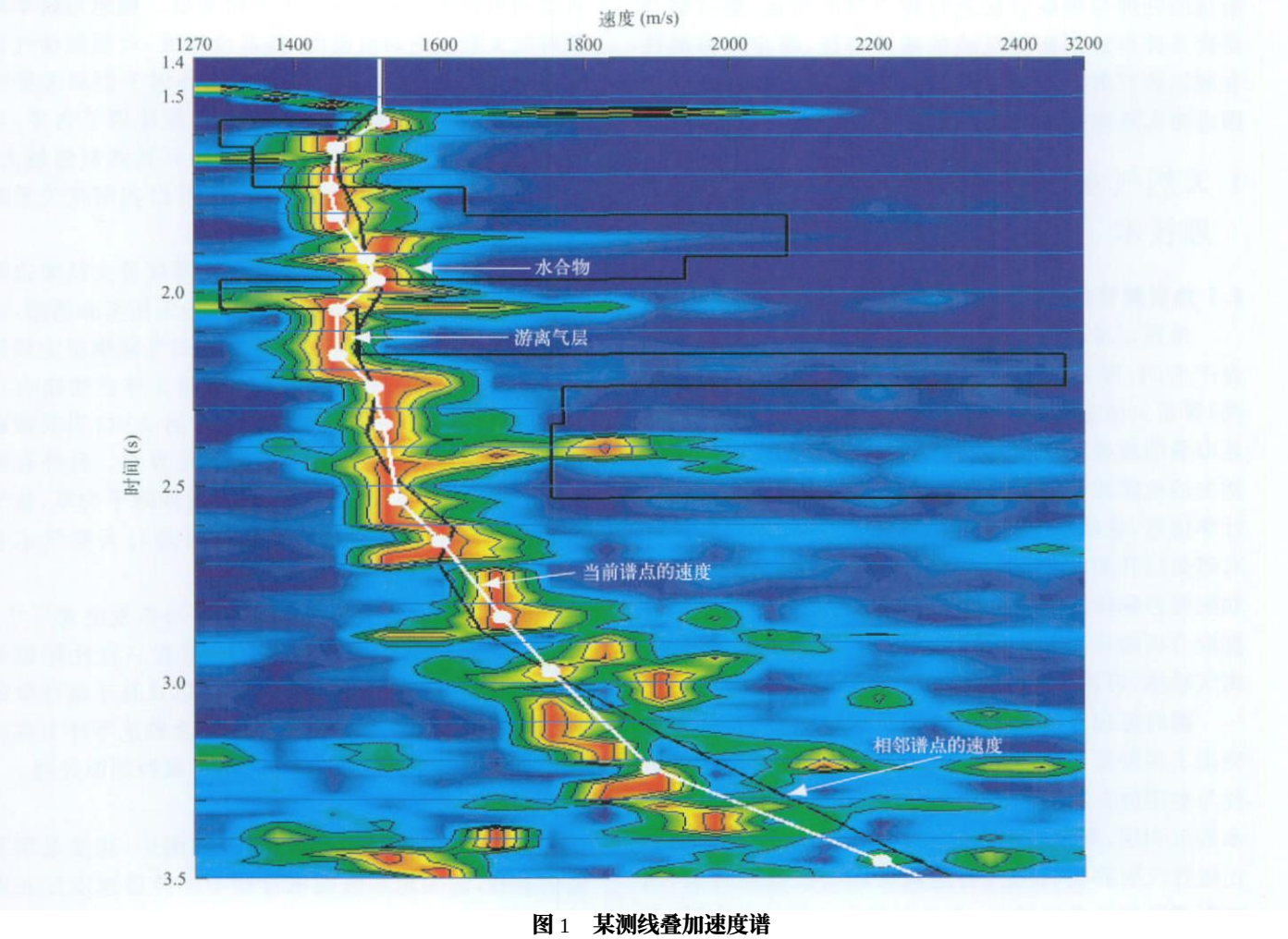


图 1 某测线叠加速度谱

1.4 波阻抗反演技术

水合物、游离气对速度信息比较敏感,因而可利用速度信息建立伪井,并进行伪井约束的稀疏脉冲反演[15],得到相对波阻抗剖面的同时得到绝对波阻抗剖面。稀疏脉冲反演的优点是能够直接从地震信息中提取反射系数,其分辨率、信噪比以及可靠程度完全依赖于地震资料本身的品质,因此要求用于反演的地震资料应具有较宽的频带、较低的噪声、较高的保真度。为得到准确的反演结果可用 AVO 处理得到的纵波剖面代替叠加偏移数据进行反演。

对于水合物分布区,反演要利用精细解释的海底反射面、BSR 界面及深层控制层建立构造框架模型来控制低频模型的产生。由于速度资料是时间域的,为方便起见,可建立时间域的伪井,并提取井旁道子波,为反演及计算绝对波阻抗奠定基础。一般选取纯水合物的密度值为 0.9g/cm^3,计算水合物的绝对波阻抗值,再利用所建伪井建立约束趋势线来约束反演结果,最后对约束稀疏脉冲反演补充 15 Hz 以下的低频率成分得到绝对波阻抗剖面,它能够较好反映水合物和游离气的分布。

2 天然气水合物分布区地球物理预测技术应用效果分析

图 2 为中国南海海域的一张地震剖面,从剖面上

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可以看到 BSR 的影子,但 CDP 为 2050～2230 的地震道 BSR 不够清晰,同时也不能准确断定此处是否有水合物与游离气富集。而在图 3 的反射强度剖面上,在 1.8～2.4s 清晰可见一个类似海底的强反射界面,这可能为 BSR 界面,它距海底强反射界面 0.2～0.3s,在这两个强能量反射界面之间是较弱能量反射,这与原始地震剖面(见图 2)的显示结果具有较大差别,原剖面能量差异不大。

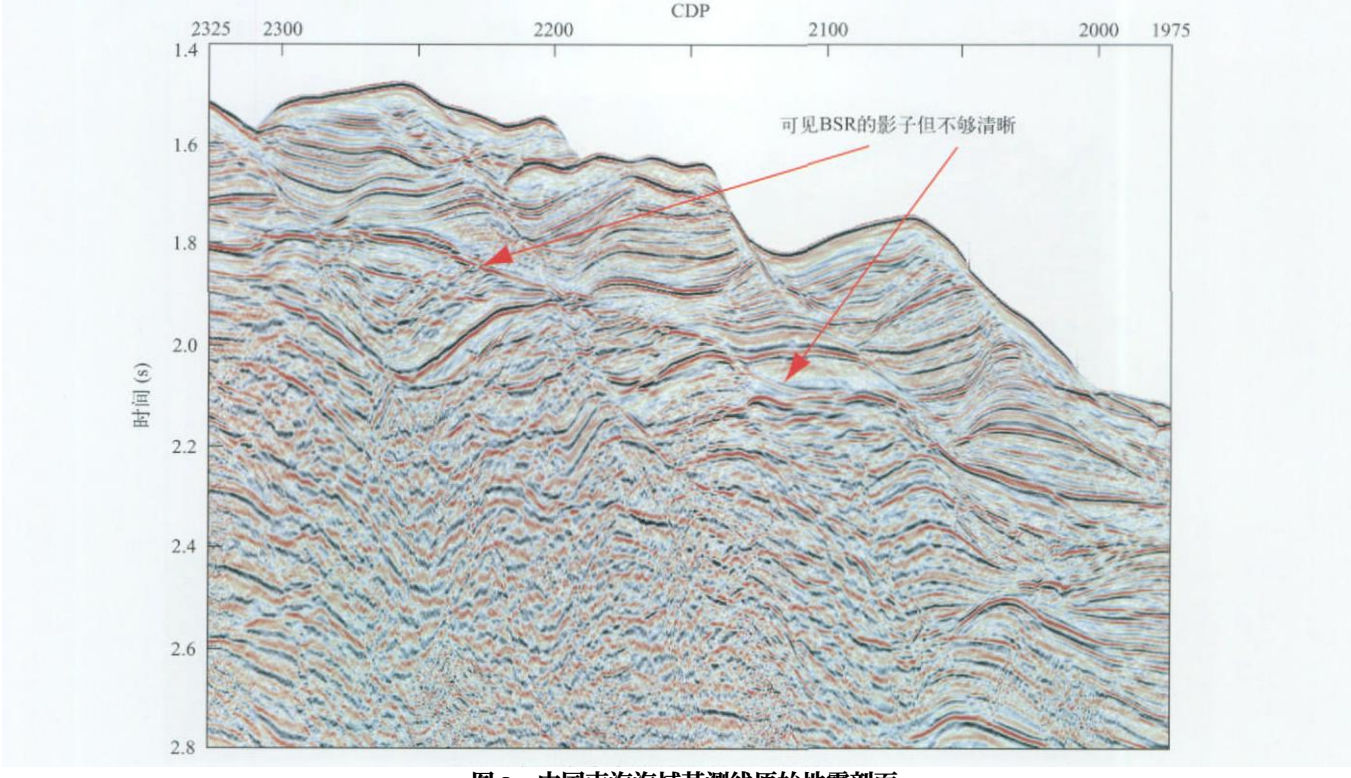


图 2　中国南海海域某测线原始地震剖面

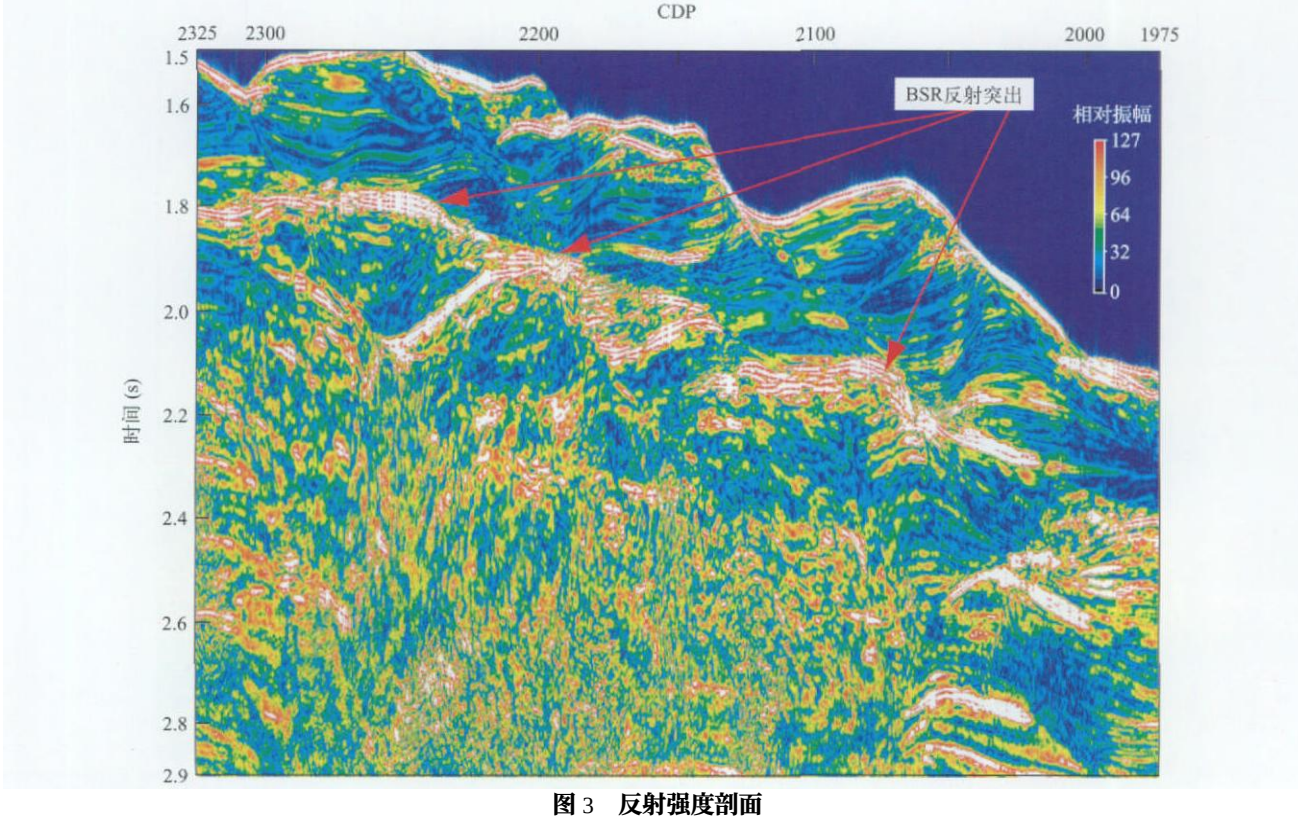


图 3　反射强度剖面

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 4 为瞬时相位剖面,可见所有的反射信息都是均衡的,几乎没有差异,但在距海底大约 0.25s 处有一条清晰的平行于海底的界面穿过地层,这个界面与反射强度剖面上平行于海底的强反射界面是同一个界面。图 5 瞬时频率剖面虽然没有较强的反射界面,却在对应于其他剖面的强反射界面(BSR)下面发育大片的蓝色低频区,同样的位置在能量半衰期剖面上也表现为低值区,推断为游离气富集区。

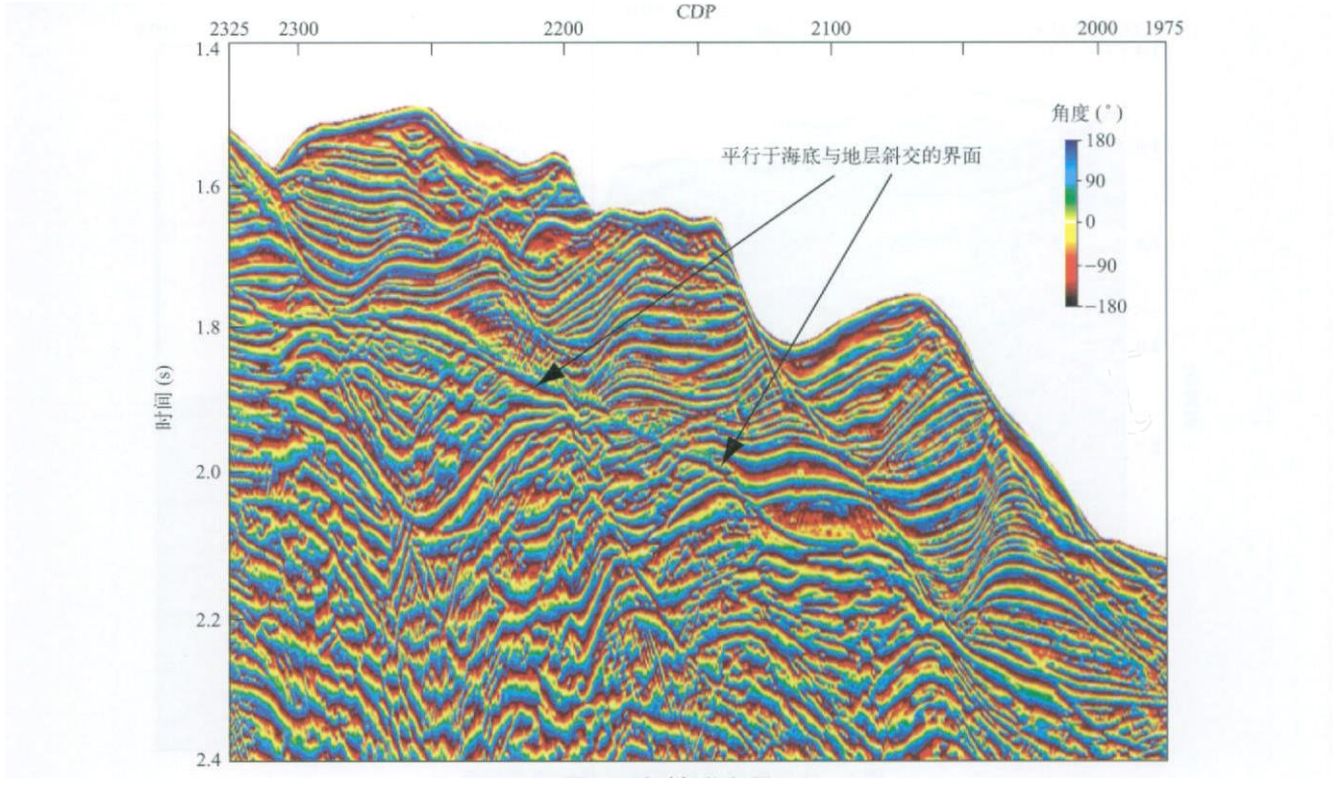


图 4 瞬时相位剖面

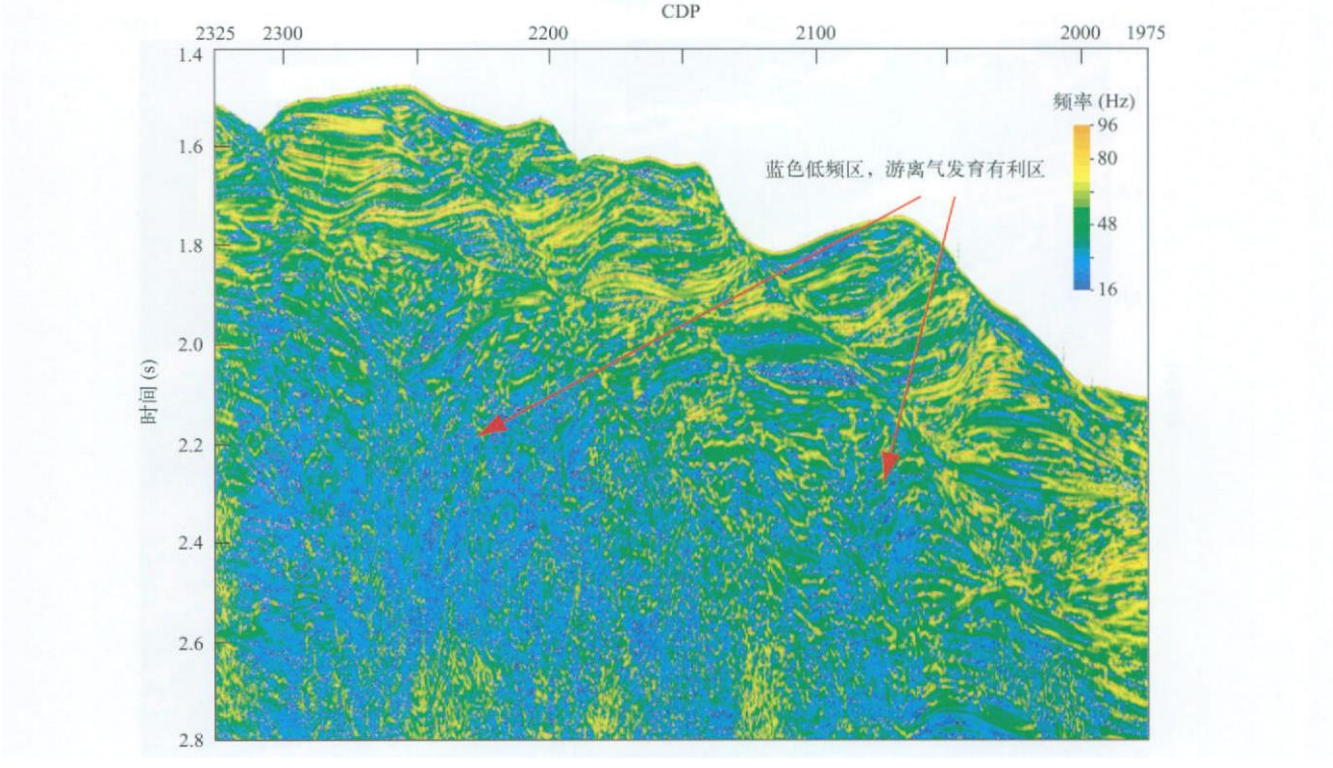


图 5 瞬时频率剖面

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

AVO 各属性剖面对天然气水合物及游离气的识别效果也较明显,从不同角度反映了天然气水合物及游离气的富集程度和分布状态。其中,在截距剖面上,高值异常表明上、下层纵波速度差值大,指示上部可能是水合物而下部为游离气,而且此界面(BSR 面)异常值越大,天然气水合物或游离气越富集。在图 6 所示斜率与截距的乘积剖面上保留了梯度值,但极性变化却取决于斜率与截距的综合,由于地震波在含气砂岩中的传播速度低于在围岩中的传播速度,因而在乘积剖面上有明显正异常。在图7流体因子剖面上,游离

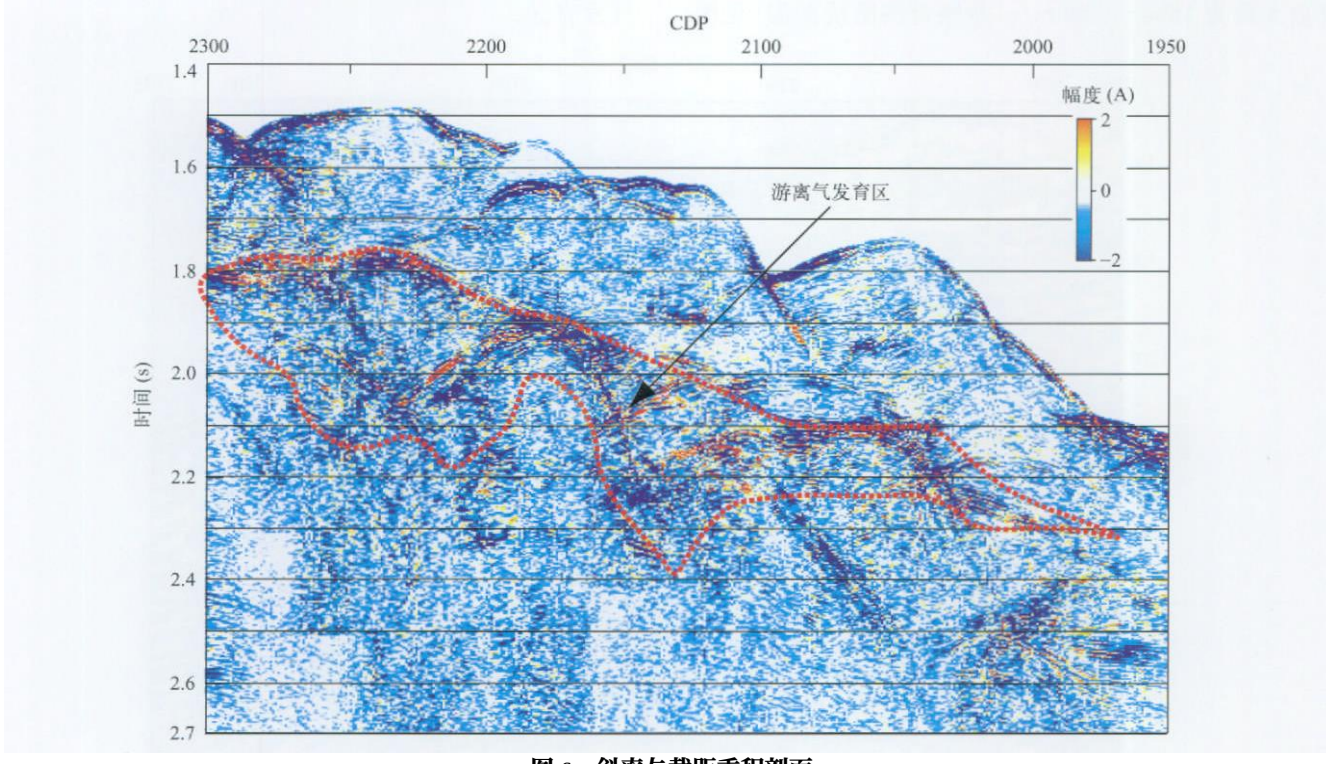


图 6　斜率与截距乘积剖面

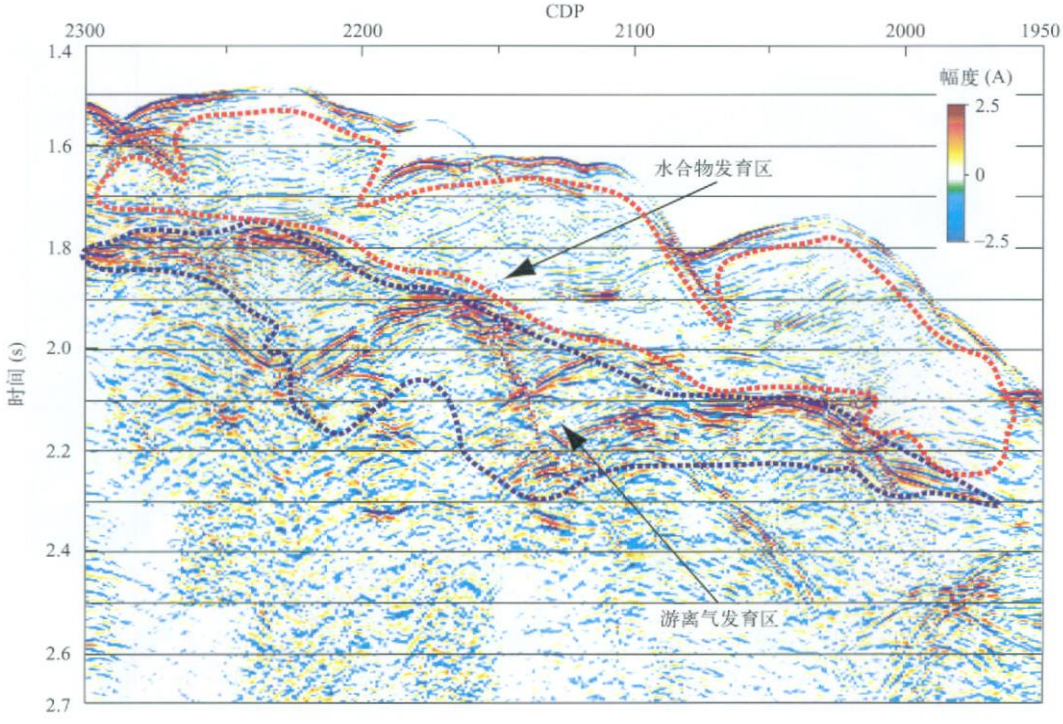


图 7　流体因子剖面

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

气发育区为强负反射,水合物发育区则表现为弱反射。

在图 8 相对波阻抗剖面中,海底以下 0.25s 处为反射强度及截距剖面的强反射界面,综合分析认为此面即为 BSR 界面,BSR 界面之上的相对波阻抗低值区(弱反射区),在速度剖面(见图 9)中为相对高值区,速度值大致为 1600～2200m/ s,在绝对波阻抗剖面(见图 10)中此段也表现为为高值区,可断定该段为水合物分布区。而在速度剖面和绝对波阻抗剖面上 2100～2250 道的 1.8～2.0ms 处,BSR 界面下部出现低速低阻抗区域,此段对应的流体因子剖面为负异常,瞬时频率为高频吸收区,能量半衰期为低值区,综合分析认为是游离气发育区。

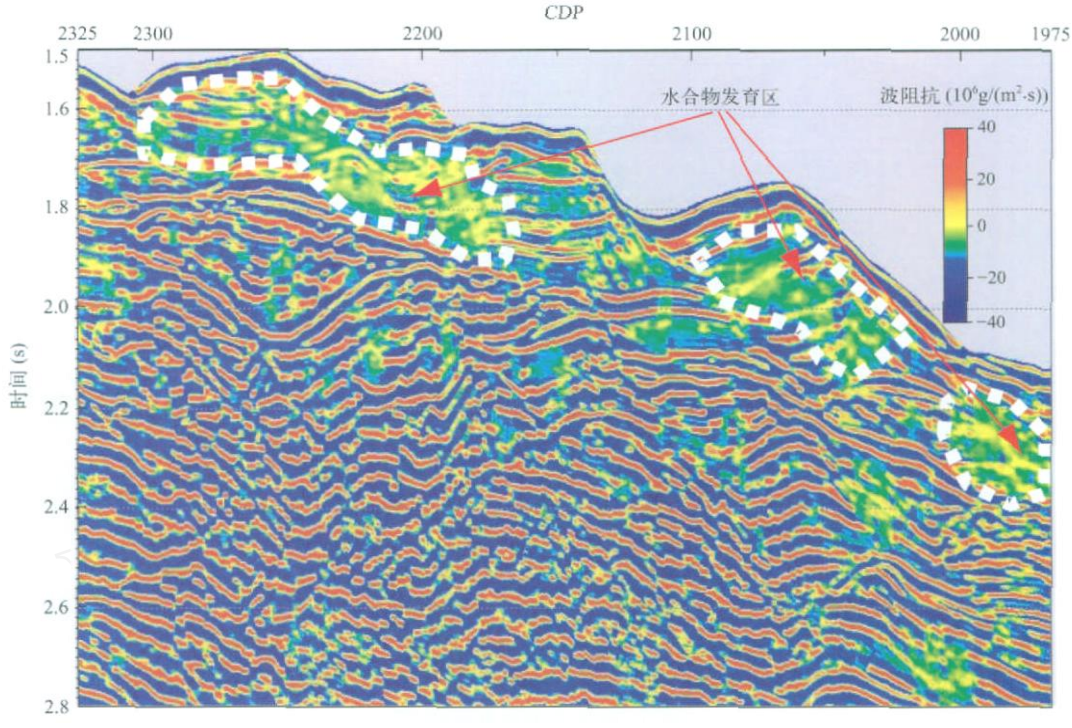


图 8 相对波阻抗剖面

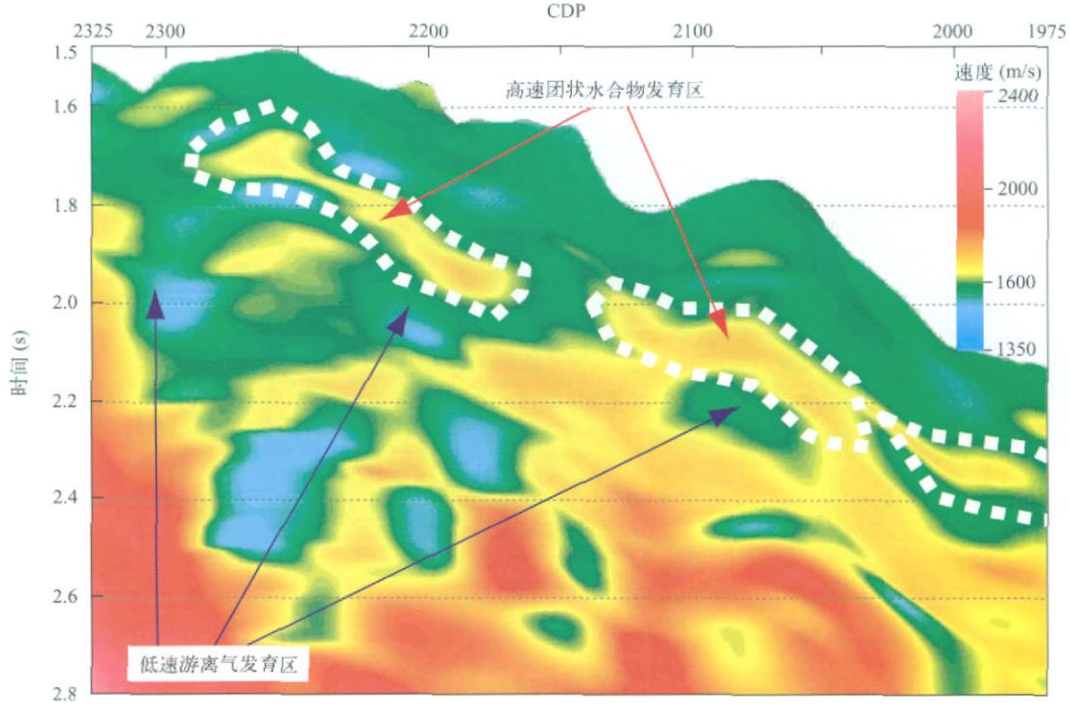


图 9 层速度剖面

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

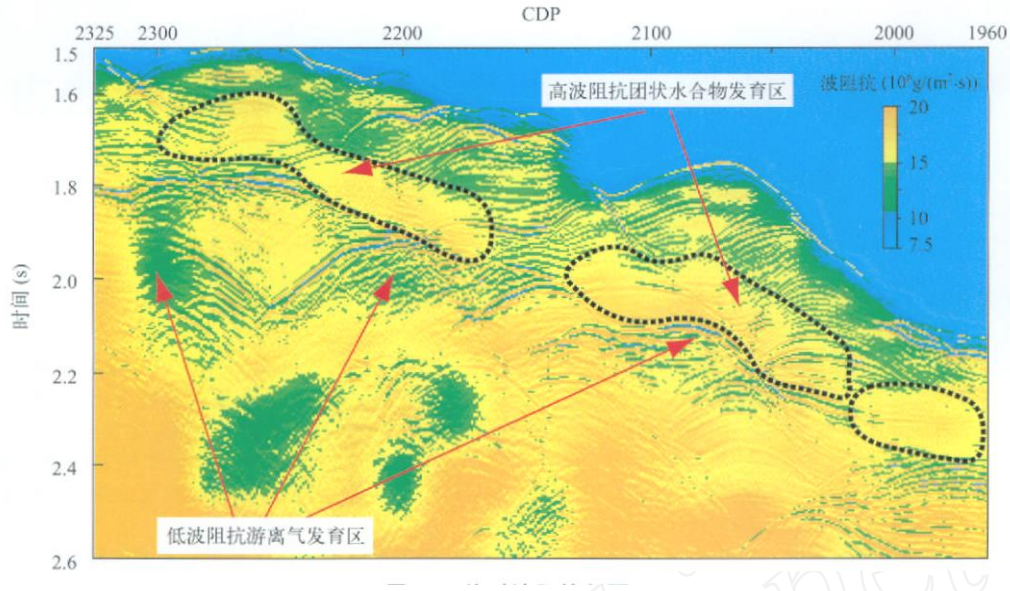


图 10　绝对波阻抗剖面

统计研究区 34 条地震测线的综合研究结果,绝对波阻抗剖面在 BSR 之上表现为高阻抗异常区的有 11 条;在相对波阻抗剖面上团状分布表现中等,而其绝对波阻抗剖面上较明显表现为高值异常区的有 6 条;有 1 条剖面的相对波阻抗剖面与绝对波阻抗剖面异常反应均较弱;在相对波阻抗与绝对波阻抗低值异常区,其对应的瞬时频率剖面也表现为低值异常、能量半衰期剖面上能量衰减快、流体因子为高值的有 8 条测线。这些分析结果表明,仅应用一种技术不能准确唯一地确定水合物、游离气的分布,综合应用 AVO、层速度、"三瞬"、波阻抗等多种技术可以从不同的角度分析识别水合物,提高预测的可靠性,降低钻探风险。

3 结论

在天然气水合物分布区预测地球物理原理分析基础上,优化选取了有效的关键技术指标,建立了利用地震资料预测水合物分布区的实施策略。根据综合研究与分析认为:反射强度、瞬时相位、层速度、相对波阻抗、绝对波阻抗、截距等指标是识别 BSR 界面的有效技术;BSR 界面清晰可见、地震反射相对较弱、层速度较高、相对波阻抗较低、绝对波阻抗高出围岩较多,表明此区域水合物发育,其纯度、富集程度较高。应用瞬时频率、能量半衰期、层速度、截距剖面、乘积剖面、流体因子剖面能指示游离气的存在。

参考文献:

[1] Kvenvolden K A. Methane hydrates and global climate[J]. Global Biogeochemistry Cycle, 1988, 2: 221-229.

[2] 吴保祥,雷怀彦, 段毅, 等. 沉积物体系中甲烷水合物平衡温度、压力条件实验模拟[J]. 石油勘探与开发,2004,31(4):22-28.

[3] 张光学,黄永祥,陈邦彦. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京:海洋出版社,2003.

[4] Markl R G, Bryan G M, Ewing J I, et al. Structure of the Blake-Bahama outer ridge[J]. J. Geophys. Res., 1970, 75: 4539-4555.

[5] Rutherford S R, Williams R H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands[J]. Society of Exploration Geophysicists, 1989, 54(6):680-688.

[6] Katzman R, Holbrook W S, Paull C K. Combined vertical-incidence and wide-angle seismic study of a gas hydrate zone, Blake Ridge[J]. J. Geophys. Res., 1994, 99: 17 975-17 995.

[7] Hyndman R D, Davis E E. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom simulating reflectors by vertical fluid expulsion[J]. J. Geophys. Res., 1992, 97: 7025-7041.

[8] Holbrook W S, Hoskins H, Wood W T, et al. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling[J]. Science, 1996, 273:1840-1843.

[9] 高建荣,藤吉文,李明,等. AVO 流体反演理论与实践[J]. 石油勘探与开发,2006,33(5): 558-561.

[10] 孙鹏远,孙建国,卢秀丽. 基于弹性参数的 PP 波 AVO 分析[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3): 86-88.

[11] 王晓平,陈波,孙维昭,等. 用保真保幅处理三维地震资料解释 YW3 井区东河砂岩尖灭线[J]. 石油勘探与开发,2005, 32 (1): 63-66.

[12] 张颖. 三维地震叠前时间偏移处理应用与展望[J]. 石油勘探与开发,2006,33(5):536-541.

[13] Ecker C, Dvorkin J, Nur A M. Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data[J]. Geophysics, 2000, 65: 565-573.

[14] 刘喜武,年静波,吴海波. 地震波阻抗反演方法之比较与应用分析[J]. 世界地质,2005,24(3):270-275.

[15] 曾忠,阎世信,魏修成,等. 苏里格气田地震预测技术效果分析及对策[J]. 石油勘探与开发,2003,30(6):63-67.

第一作者简介:刘彦君(1970-),男,黑龙江巴彦人,中国石油吉林油田公司高级工程师,现为中国地质大学(北京)能源地质工程专业在读博士研究生,主要从事储集层预测方面的研究工作。地址:北京市海淀区学院路 29 号,中国地质大学(北京)能源学院,邮政编码:100083。E-mail: lyj_1970@163.com

收稿日期:2007-04-11　　**修回日期**: 2007-05-30

(编辑　黄昌武　　绘图　李秀贤)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net