

文章编号: 1001) 1749(2008)01) 0022) 05

# AVO 属性分析在天然气水合物地震解释中的应用

梁 劲<sup>1</sup>, 梁金强<sup>1</sup>, 王宏斌<sup>1, 2</sup>, 沙志彬<sup>1</sup>

( 1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760

2 中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

**摘 要:** 利用 AVO (Amplitude Versus Offset) 属性分析技术, 对南海北部测线 B 进行了 AVO 属性处理, 结合 BSR (Bottom Simulating Reflector), 振幅空白带以及波形极性反转等多种水合物赋存信息, 对水合物成矿带及游离气带的 AVO 属性特征进行了综合研究。结果表明: <sup>1</sup> AVO 1 和 AVO 9 可用于检测 BSR 和水合物成矿带; <sup>0</sup> AVO 4、AVO 6、AVO 9 用于游离气带的检测; <sup>»</sup> AVO 1 高截距值表示上、下层 P 波速度差值大, 弱反射或空白反射表示水合物分布均匀, 是水合物富集和稳定的表现; <sup>¼</sup> AVO 4 高值表示有游离气存在, 强反射特征为游离气顶的反射; <sup>½</sup> AVO 6 正值, 表示有游离气存在, 强反射的发育厚度代表游离气的发育厚度; <sup>¾</sup> AVO 9 低幅值表示水合物成矿带, 正值表示游离气带。研究结果表明, 高精度 AVO 分析不仅可以帮助寻找水合物矿点, 还可以进一步判定水合物的富集层位。

**关键词:** AVO 属性; 天然气水合物; 地震解释**中图分类号:** TE 122 **文献标识码:** A

## 0 前言

天然气水合物是在低温、高压环境下, 由水的冰晶格架及其间吸附的天然气分子组成的笼状结构化合物, 广泛分布于海底和永久冻土带。天然气水合物作为一种新型矿产资源, 具有能量高、分布广、规模大等特点, 被认为是二十一世纪的重要能源。其稳定带受温度和压力的控制, 相同气体成份水合物的形成和赋存, 有相对稳定的温压关系。针对天然气水合物的野外调查及研究表明: 地球物理方法是天然气水合物调查评价中行之有效的办法之一, 其中似海底反射 BSR、速度异常、波形极性反转、振幅空白带以及 AVO 等属性特征, 目前已成为判断天然气水合物是否赋存的重要标志。利用各种 AVO 属性信息, 寻找与天然气水合物相关的异常信息, 具有重要的科学价值和现实意义。在海洋水合物地震勘探中, 由于海洋地震资料的信噪比

比陆地高, 对天然气水合物强反射层地震波振幅的精细分析, 为运用 AVO 技术进行水合物研究提供了技术及资料上的保证, 并在多个方面取得了良好的效果<sup>[1~3]</sup>。

二十世纪九十年代开始兴起天然气水合物的 AVO 属性研究, 一般是研究地震反射叠前振幅生成的属性, 在国外有一套成熟的理论基础。我国对天然气水合物的调查研究起步较晚, 特别是对 AVO 属性的研究才刚刚开始。国土资源部广州海洋地质调查局, 近几年在南海北部陆坡天然气水合物高分辨地震调查的基础上, 对 BSR 较为明显的剖面在 AVO 及其它一些属性进行特殊处理, 发现存在天然气水合物的可靠地球物理标志。该研究通过对南海北部陆坡天然气水合物高分辨地震资料的精细分析, 结合该地区的地质条件, 在已圈定 BSR 分布范围内, 研究陆坡区各沉积层的 AVO 属性特征, 最后对 AVO 属性与水合物的关系进行了分析和探讨。

# 1 AVO技术

## 1.1 AVO概况

AVO是一种振幅随偏移距的变化特征分析和识别岩性及油气藏的地震勘探技术,通过研究振幅随炮检距的变化特征,来探讨反射系数响应随炮检距的变化,进而确定反射界面上覆、下覆介质的岩性特征及物性参数。AVO理论最早形成于二十世纪初,它的分析方法是在叠前对地震反射振幅随炮检距变化特征来进行分析,借此对岩石中孔隙流体性质和岩性作出推断。AVO分析方法就是利用 Zoeppritz方程及其近似式,根据实际观测数据,以某种数学方法为工具,求解产生这些观测数据的原始模型及物性参数值。

AVO技术考虑到了地震传播过程中的纵、横波特性,在常规天然气勘探中,已成为揭示游离气存在与否的重要方法,应用到天然气水合物,则必须研究天然气水合物沉积层的纵、横波速度特征及差异,以及密度差,以此得到正确的界面反射振幅。实践证明,在天然气水合物的研究中,运用 AVO技术同样取得了良好效果,并首先在进行真假 BSR 识别的研究中获得成功。

## 1.2 AVO原理

AVO的理论基础是 Zoeppritz方程。Kœbed (1955)用设定界面二端泊松比不同,所得纵波反射系数随入射角的变化而变化的范围大大增加,简化了 Zoeppritz方程。Shuey(1985)认为,研究绝对振幅涉及到的问题,远比研究相对振幅复杂,于是将该公式进一步进行了简化为:

$$RUP + G\sin^2H$$
$$P = 1/2(\$A/A+ \$Q/Q) = \$ (QB) /2QA$$
$$G = 1/2(\$A/A- 2\$L/QA^2) =$$
$$1/2(\$A/A- 2\$Q/Q) - \$B/B$$
$$L = QB^2$$
$$1/2(P - G) = 1/2(\$B/B+ \$Q/Q) =$$
$$\$(QB) /2QB$$

式中 R 为反射系数; P 为截距分量; G 为梯度分量; H为入射角; A为纵波速度; B为横波速度; Q 为密度; L为剪切模量; 1/2 ( P - G)为拟横波分量。

Shuey(1985)的简化方程主要有以下实践意义:在地震勘探合理的假设条件下,简化方程式明显地表达了 P波反射振幅与介质弹性参数及入射角(或偏移距)之间的关系,这使 AVO异常的识别

由直观定性阶段进入定量研究阶段,带动了 AVO技术的深刻变革。P波反射振幅随入射角(或偏移距)变化的梯度 G 含有岩石孔隙流体性质变化的信息;当入射角 H 小于 30b(或小于临界角)时, P波反射振幅是  $\sin^2H$ 的线性函数。这一结论使得在大范围内快速检测 AVO异常成为可能。P波反射振幅的截距 I和梯度 G 是构造多种碳氢检测因子的基础<sup>[4~6]</sup>。

## 1.3 AVO属性的意义

AVO属性是指利用叠前地震数据,经过数学变换而导出的,有关地震波几何形态、运动学特征、动力学特征和统计学特征。长期以来,人们对地震数据的使用仅局限于对地震波同相轴的拾取,实现对地质体几何形态的描述。事实上,地震数据中隐藏着非常丰富的,有关物性以及流体成份的信息。众所周知,地震信号的特征是由岩石物理特征及其变异直接引起的,所以,地层岩性、物性、流体成份等信息,虽然可能发生各种畸变,但确实是隐藏在地震数据之中。进行地震分析的目的是消除数据畸变,发现和抽取隐藏在数据中的有关岩性和物性的信息,无疑是一项非常有意义的技术<sup>[7、8]</sup>。常规的 AVO有九种属性剖面,具体物理意义见表 1。

表 1 AVO属性意义对照表  
Tab 1 Meaning of the AVO attributes

序号	名称	物理意义及用法
1	AVO 1	截距剖面, 零偏移距 P波叠加剖面
2	AVO 2	梯度剖面, P波反射振幅随偏移距变化的梯度
3	AVO 3	乘积剖面, I* G 振幅随偏移距增大为峰, 反之为谷
4	AVO 4	乘积相关剖面, 梯度、截距、相关系数乘积,用于检测气层
5	AVO 5	转换角剖面, 表示极性反转出现的角度
6	AVO 6	梯度与截距符号乘积剖面, 用于检测气藏
7	AVO 7	相关系数剖面, 检测剖面地震资料的可信度
8	AVO 8	连续同号残差统计剖面, 检测野外及处理流程中的问题
9	AVO 9	流体因子剖面, 反映储层及流体的不同状况

在应用 AVO进行含气检测的研究过程中,大量的试验表明 AVO 1、AVO 4、AVO 6和 AVO 9属性剖面对水合物及其游离气的识别有明显效果,它

们可以反映水合物成矿带内水合物的富集程度、分布状态。其中 AVO 4和 AVO 6对于游离气的反映明显,在 BSR 之下可以看到明显的含气异常。

(1)AVO 1属性剖面:截距 ( Intercept)剖面 ( P波叠加剖面)。当入射波垂直入射到界面时  $RUR_0$ , 截距反映了垂直入射时 P波反射系数的近似值。这里没有转换波,只有反射纵波。因此,由截距值构成的剖面叫 P波剖面。与常规的叠加剖面相比, P波剖面更接近于零炮检距剖面,反映地震波在垂直入射时的振幅叠加。截距值大,表明上、下层 P波速度差值大,反之则小。故可以主要利用该剖面识别 BSR、含水合物和游离气带。

(2)AVO 4属性剖面:梯度与截距、相关系数乘积剖面 ( $I^* G^* \text{Correlation Coefficient}$ )。在该属性剖面中加入了相关系数,剔除或压制了信噪比低的部分。因此可以主要利用该剖面与其它属性结合,来检测游离气。

(3)AVO 6属性剖面:梯度与截距符号乘积剖面 ( $\text{Sign}(I)^* G$ )。它保留了梯度值,但极性变化却取决于梯度与截距的综合。因此,主要利用该剖面与其它属性结合,检测水合物和游离气。

(4)AVO 9属性剖面:流体因子 ( Fluid Factor)剖面。在地震解释中,可以主要利用流体因子剖面,来检测含水合物和游离气带。

2 应用实例

2 1 研究区地质概况

研究区位于南海北部,地质发展经历了由板内裂隙演变为边缘拗陷的过程。区内基底构造复杂,断裂发育,新构造作用活跃,由于受到北东、北东东、东西、北西方向断裂的控制,区内海底地形呈阶梯状逐级下降。在陆坡上发育有深海槽、海底高原、陆坡台地、冲刷槽沟、海底陡崖、海底陡坡和海谷海丘等各种特殊构造地貌或地质体。研究区内张性断层和褶皱构造发育,为下部天然气向浅部地层运移开辟了有利通道,促使气体向上运移到水合物的稳定带上。而褶皱构造更易于对天然气的捕获,进而形成水合物矿藏。区内还发育一系列可能与天然气水合物有关的特殊构造体,如滑塌体,泥底辟、增生楔等,是天然气水合物发育的有利区域。研究区水深在 200 m~ 3 000 m之间,东西横跨约 200 km,南北纵跨 270 km,水深线走向大体与海岸线平行。海底地形比较复杂,坡度变化大,上陆坡陡,下陆坡缓。晚中新世以来,深水重力流相当发

育,沉积速率达 40 cm/ka~ 120 cm/ka 高的沉积速率导致发育有巨厚的中、新生代快速沉积物,厚达几千米,有的甚至超过万米,并在沉积中积累大量有机质含量,为细菌将其降解成甲烷气提供物源。经过近年来的调查,区内已发现多处 BSR 发育区,展示出良好的天然水合物勘探前景<sup>[9]</sup>。

2 2 AVO 属性剖面特征

2 2 1 AVO属性剖面处理流程

AVO资料处理的目的是为了给解释工作提供可信的、足够的资料,以观测和量度振幅随炮检距或入射角的变化。对处理质量要求的核心是:尽可能地恢复和保护振幅信息。处理流程一般包括:1 几何扩散校正;° 对地层吸收的 Q 补偿;» 地表一致性振幅处理;¼ 反褶积;½ 动、静校正;¾ 基于统计学的随时间和炮检距变化的剩余振幅综合校正。处理的每一步都要保护正确的振幅与炮检距的关系。处理流程如图 1 所示。

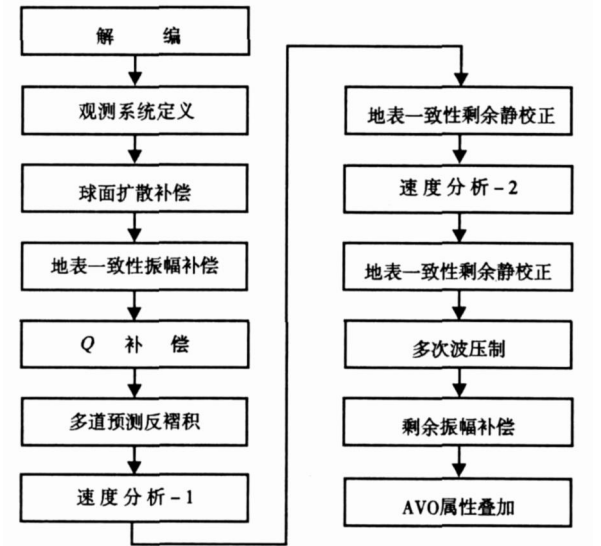


图 1 AVO处理流程图

Fig 1 The flow chart of the AVO processing

2 2 2 AVO属性剖面的天然气水合物特征

由于天然气水合物的性质及成矿的特殊性,因此在各种 AVO 属性剖面上,会产生重要的识别标志。AVO 1和 AVO 9对 BSR 和水合物成矿带响应比较敏感,可用于检测 BSR 和水合物成矿带。AVO 4、AVO 6、AVO 9能够反映岩性的信息,又可以反映流体的信息,因此对反射极性、流体性质、游离气的检测比较敏感。对天然气水合物 AVO 属性的分析,一般选择在 BSR 显示较为明显的地震剖面进行。BSR是指在地震剖面上近似平行于海底展布的反射面,该反射面的形成是由含天然气水合物沉积层与下覆地层(通常为含游离气层)之间

的波阻抗差异所致<sup>[10,11]</sup>。当气体供给及储集层充分的条件下,水合物稳定带的分布仅与地层的温度及压力有关。**BSR**代表水合物成矿带的底面,它是一个近似于平行海底的等温面,与地层产状无关,当地层产状与海底不一致时,**BSR**往往与地层斜交。在地震反射剖面上,**BSR**一般位于海底以下 1 000ms以内的范围内(双程反射时间),水深大于 300m。由于 **BSR**的分布深度与温度和压力有关,一般情况下,**BSR**的深度随着水深的增大而略有增大<sup>[12~14]</sup>。

图 2 是南海北部测线 B 的地震反射剖面。从图 2 可以看出,距海底大约 200ms 处,有二段近似平行于海底较强反射(**BSR**),横向上表现为与地层斜交,其连续性较好,**BSR**上面有明显的、连续性较好的振幅空白带。

图 3 为测线 B 的截距剖面(AVO 1 属性剖面)。从图 3 可以看到,剖面上 **BSR** 特征为中~强 **BSR** 反射,强振幅中~高连续,波形极性反转较明显;高截距值集中在 **BSR** 位置附近,表明 **BSR** 上、下层 P 波速度差值大;**BSR** 上方表现为弱反射或空白反射,空白带发育情况良好;估计水合物分布均匀,含量较高,是水合物富集的稳定区。

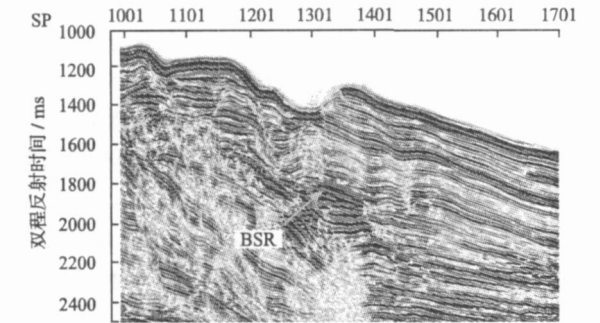


图 2 南海北部测线 B 地震反射剖面  
Fig 2 The seismic profile of the line B in the North of the South China Sea

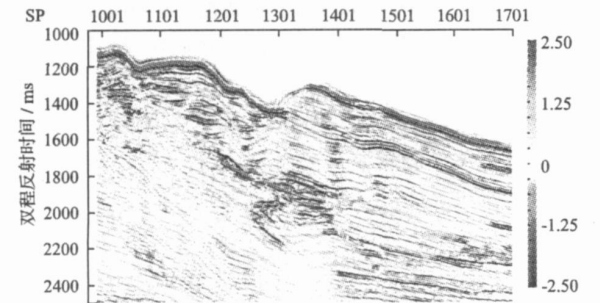


图 3 南海北部测线 B 截距剖面(AVO 1 属性剖面)  
Fig 3 The intercept profile of the line B in the North of in the South China Sea( attribute profile of AVO 1)

图 4 为测线 B 的梯度和截距与相关系数乘积剖面(AVO 4 属性剖面)。在图 4 中,高值区出现在 **BSR** 下方,表明 **BSR** 之下有游离气存在,强反射特征为游离气顶的反射。

图 5 为测线 B 梯度与截距符号乘积剖面(AVO 6 属性剖面),其特征为 **BSR** 之下为正值,表明 **BSR** 之下有游离气存在,强反射的发育厚度代表游离气的发育厚度。

图 6 为测线 B 流体因子剖面(AVO 9 属性剖面),其特征为:水合物成矿带表现为低幅值(近于

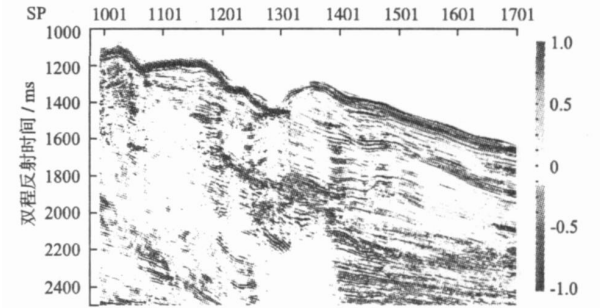


图 4 南海北部测线 B 梯度和截距与相关系数乘积剖面(AVO 4 属性剖面)  
Fig 4 The gradient @ intercept @ correlation coefficient Profile of the line B in the North of the South Ch2 na Sea( attribute profile of AVO 4)

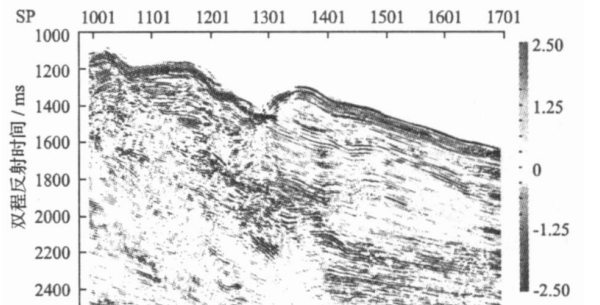


图 5 南海北部测线 B 梯度与截距符号乘积剖面(AVO 6 属性剖面)  
Fig 5 The gñd ient@ intercept sign profile of the line B in the North of the South Ch ina Sea( attribute profile of AVO 6)

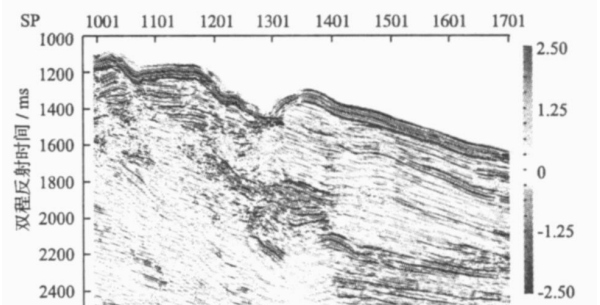


图 6 南海北部测线 B 流体因子剖面(AVO 9 属性剖面)  
Fig 6 The fluid factor profile of the line B in the North of the South China Sea( attribute profile of AVO 9)

零值), 游离气带表现为正值。在图 6 中, BSR 之上的空白带基本上为零值带, 表明这是一个物性均匀的岩体, 其内部有微小的强、弱变化, 结合其它特征可推测为含水合物带。BSR 之下 100 ms 内基本为正值, 高频强烈吸收现象明显, 估计游离气丰度较高, 为水合物的形成提供了充足的气源保证。

应当指出的是, AVO 各种属性剖面的应用不是绝对的。天然气水合物的发育和赋存, 是多种地质因素作用的结果。受各种地质条件的影响 (如沉积条件、构造条件、温压条件等), 水合物成矿带和游离气特征的分析, 要依靠各种属性剖面的信息, 要相互印证, 并结合其它地质、地球物理特征来进行综合分析, 最后才能确定存在水合物和游离气的可靠性<sup>[15~18]</sup>。

3 结论

通过对南海北部陆坡测线 B 的 AVO 属性剖面分析, 并结合 BSR 和振幅空白带识别以及波形极性反转等, 多种特殊地震属性成像进行综合分析, 可进一步了解水合物成矿带和游离气带的 AVO 检测方法 & 属性特征: 1 AVO 1 和 AVO 9 可用于检测 BSR 和水合物成矿带; 2 AVO 4、AVO 6、AVO 9 用于游离气带的检测; 3 AVO 1 高截距值表示上、下层 P 波速度差值大, 弱反射或空白反射表示水合物分布均匀, 是水合物富集和稳定的表现; 4 AVO 4 高值表示有游离气存在, 强反射特征为游离气顶的反射; 5 AVO 6 正值, 表示有游离气存在, 强反射的发育厚度代表游离气的发育厚度; 6 AVO 9 低幅值表示水合物成矿带, 正值表示游离气带。

分析 BSR 上、下的详细 AVO 特征, 是水合物地震资料综合解释的重要手段。高精度 AVO 分析, 可帮助判定水合物的富集层位, 较适用于寻找水合物矿点, 并可据此估算水合物资源量。

参考文献:

[ 1 ] 梁劲, 王宏斌, 龚跃华, 等. 西沙海槽 BSR 发育区热流值计算及其特征分析 [ J ]. 南海地质研究, 2004, 16 ( 1 ): 1051

[ 2 ] 王宏斌, 梁劲, 龚跃华, 等. 基于天然气水合物地震数

据计算南海北部陆坡海底热流 [ J ]. 现代地质, 2005 19( 1 ): 671

[ 3 ] 王宏斌, 黄永祥, 梁劲, 等. 南海北部陆坡坳陷断裂带中水合物赋存的温压场环境 [ J ]. 现代地质, 2006, 20 ( 1 ): 1031

[ 4 ] 吴志强, 陈建文, 龚建明, 等. AVO 技术在水合物勘探中的应用 [ J ]. 海洋地质动态, 2004, 20( 6 ): 311

[ 5 ] 钟森. AVO 反演纵、横波速度 [ J ]. 石油地球物理勘探, 1995, 30( 3 ): 3731

[ 6 ] 李正文, 赵志超. 地震勘探资料解释 [ M ]. 北京: 地质出版社, 19881

[ 7 ] 李邗, 何诚. AVO 处理解释和岩性识别 [ J ]. 物探化探计算技术, 2003, 25( 2 ): 1451

[ 8 ] 周兵, 朱介寿. 一种新的地震成像计算方法 [ J ]. 石油物探, 2004, 43( 1 ): 541

[ 9 ] 梁劲, 王宏斌, 郭依群. 南海北部陆坡天然气水合物的地震速度研究 [ J ]. 现代地质, 2006, 20( 1 ): 1231

[ 10 ] 杨绍国, 周熙襄. AVO 属性叠加剖面的正演模型及应用 [ J ]. 石油地球物理勘探, 1995, 30( 6 ): 7721

[ 11 ] 宋宗平. 应用 AVO 属性数据进行波阻抗反演处理 [ J ]. 石油地球物理勘探, 2004, 39( 4 ): 4651

[ 12 ] 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, 20031

[ 13 ] 宋海斌. 天然气水合物的地球物理研究 [ M ]. 北京: 海洋出版社, 20031

[ 14 ] 陈建文, 闫桂京, 吴志强, 等. 天然气水合物的地球物理识别标志 [ J ]. 海洋地质动态, 2004, 6 91

[ 15 ] 沙志彬, 杨木壮, 梁金强, 等. BSR 的反射波特征及其对天然气水合物识别的应用 [ J ]. 南海地质研究, 2003, 15( 1 ): 551

[ 16 ] SHIPEY T H, HOUSTON, BULLER R T, et al Seismic evidence for wide- spread possible gas hydrates horizons on continental slopes and rises[ J ]. AAPG Bulletin, 1979, 63( 12 ): 22041

[ 17 ] 刘学伟, 李敏锋, 张聿文, 等. 天然气水合物地震响应研究)) 中国南海 HD152 测线应用实例 [ J ]. 现代地质, 2005, 19( 1 ): 331

[ 18 ] 吴志强. AVO 技术在水合物调查评价的应用中应注意的问题 [ J ]. 海洋地质动态, 2002, 18( 2 ): 281

作者简介: 梁劲 ( 1971- ), 男, 高级工程师, 主要从事天然气水合物调查与研究& 工作。

Key words mis-tie correction, amplitude, phase rotation, time shifting, intersection

## THE APPLICATION OF AVO ATTRIBUTE ANALYSIS IN SEISMIC INTERPRETATION OF GAS HYDRATE

LIANG Jin<sup>1</sup>, LIANG Jinqiang<sup>1</sup>, WANG Hongbin<sup>1,2</sup>, et al (1 Guangzhou Marine Geological Survey, Guangdong Guangzhou 510760, China; 2 School of Geophysics and Information, China University of Geosciences, Beijing 100083, China). COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION, 2008, 30(1): 0022

Combining with several gas hydrates existing in formation including bottom simulating reflectors BSRs, amplitude blanking, waveform reverses etc, the AVO attributes of the gas hydrate belt and free gas belt were integrally researched in this paper based on the seismic profile B in the north slope of the South China Sea by AVO attribute analysis technology. The result shows that: (1) AVO1 and AVO9 can be used to detect BSR and gas hydrate belt; (2) AVO4, AVO6 and AVO9 can be used to detect free gas belt; (3) High intercept values of AVO1 suggest that the difference of P-wave velocity in the neighboring strata is high, while weak reflection or blank reflection does that the uniform distribution of gas hydrates and the gas hydrates belt might be enriched and steady; (4) The high values of AVO4 suggest the free gas existing, while the strong reflection suggest the top of free gas; (5) The plus values of AVO6 suggest the free gas existing while the thickness of strong reflection suggest the thickness of free gas; (6) The low values of AVO9 suggest the gas hydrates belt while the plus values suggest the free gas belt. The study reveals that the high-resolution AVO analysis is useful not only to search the hydrate spot, but also to estimate the rich layer of gas hydrate.

Key words AVO attributes, gas hydrate, seismic interpretation

## NONLINEAR METHOD OF QUAKE DATA EXPLANATION BASED ON PATTERN REC

## OGNITION

LIU Cheng, GUO Ke (Chengdu University of Technology College of Information Management, Chengdu 610059, China). COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION, 2008, 30(1): 0027

The method of common quake data explanation can not satisfy the needs of the modern quake data explanation as there are of high errors. This article brings forward a non-linear method of the quake data explanation based on pattern recognition to forecast physical property parameters. The quake data in some work area is processed with the method and the results indicate that the method is more effective than that with the common methods.

Key words quake recognition, pattern recognition, nonlinear, lower dimension, nonlinear indication

## THE APPLICATION OF THE SEISMIC INSTANTANEOUS ATTRIBUTES IN THE KARST EXPLORATION

ZHONG Tao<sup>1</sup>, XIAO Hongyue<sup>2</sup>, LEI Wan<sup>1</sup> (1 College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2 College Network, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION, 2008, 30(1): 0030

The paper introduces the principle of the seismic instantaneous attributes and illustrates the features of karst in the seismic section, the instantaneous amplitude section, the instantaneous frequency section and the instantaneous phase section. Combined with the multi-parameter interpretation of real data, the developed situation, distribution scope and scale of the underground karst can be determined and validated the outcomes by making use of Well Drilling. The results show that the seismic instantaneous attributes can be better to eliminate disturbance and estimate karst anomaly than that with the conventional seismic data processing methods.

Key words seismic exploration, karst, instantaneous phase, instantaneous frequency, instantaneous amplitude