

剩余层速度分析在南海天然气水合物解释中的指示意义

梁 劲^{1,2}, 王宏斌², 沙志彬^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074; 2. 广州海洋地质调查局, 广州 510760)

摘 要 地下介质的地震波速度与岩石性质有密切的关系,反映岩石类别和其中含流体的状况。剩余层速度分析是在分析层速度数据基础之上,进行剩余层速度计算,突出局部速度异常,配合 BSR 分布及振幅异常分析,预测天然气水合物分布的范围。本研究通过对 BSR 层层速度和剩余层速度的计算,并且结合多种特殊地震属性以及 BSR 分布范围进行综合分析,进一步了解层速度和剩余层速度在水合物解释中的指示意义:①地层层速度能在一定程度上反映岩性分层、岩石类别和含流体状况,高值层速度与地层厚度、压实作用和岩石性质有关,含水合物地层的层速度往往比一般地层的层速度高;②剩余层速度消除了地层厚度和压实作用的影响,高值剩余层速度主要是由岩性的差别引起;③结合 BSR 和其他地震属性分析可判断剩余层速度是否由水合物引起;④含水合物地层中,剩余层速度越高水合物的含量越高;剩余速度越低,说明泥质含量越高或者是气体的含量越高。

关键词 剩余层速度 天然气水合物 解释

1 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。其稳定带受温度和压力的控制,相同气体成分的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,其中似海底反射 BSR (Bottom Simulating Reflector)、速度异常、波形极性反转以及振幅空白带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^[1]。

水合物的弹性性质与气、水等物质的弹性性质差别较大,该弹性差异是分析含水合物沉积层性质的基础。其中,地震波速度异常已成为判断沉积层中是否存在天然气水合物的重要条件之一。大量的国内外测试数据显示:水合物的速度与冰的速度较为接近,而比水高。与含水或含游离气沉积层相比,含水合物沉积层的密度降低,地震波速率增大,含水合物层的地层波速往往比一般的地层波速高,含水合物沉积层的下部由于充填了水或气,而使水合

本文研究由广州海洋地质调查局科研项目(编号:GZJK200605)资助。

第一作者简介:梁劲,男,1971年生,高级工程师,1995年毕业于成都理工学院信息工程与地球物理系应用地球物理专业,主要从事天然气水合物调查与研究工作。

物底界面出现速度负异常。因此,地层波速反转是水合物赋存的一个地球物理标志。含水合物地层的地震波速度与水合物的含量有关,水合物含量越高,其地震波速度越高,BSR 是上覆高速的含水合物地层与下伏较低速的含水层或含气层之间的分界面。因此,在速度剖面上,含水合物地层的层速度变化趋势呈典型的三段式,即上下小、中间大的异常特征^[2,3]。

剩余层速度分析是在分析层速度数据基础之上,进行剩余层速度计算,突出局部速度异常,配合 BSR 分布及振幅异常分析,预测天然气水合物分布的范围。剩余层速度分析的方法主要有两种,一种是速度减去法,一种是趋势面分析法。剩余层速度的计算采用趋势面分析法。趋势面分析法是数学中的一种统计方法。一般所求的层速度,有区域性、局部性和随机性三种变化。区域性变化是反映地质区域性规律的,它由区域性构造和区域性沉积岩相所决定。局部性变化亦称局部异常,它具有局部范围变化的特点,它受局部构造及岩性等局部因素控制。随机变化受随机因素影响。宏观趋势分析是为了了解区域性的变化。而微观区域分析是为了突出局部异常,去掉宏观区域背景。该方法在油气勘探中可以直接预测有利油气带,从理论上讲,亦可对含水合物范围进行预测,因此,剩余层速度分析对天然气水合物的解释有重要的意义。

我国对天然气水合物的调查研究起步较晚,特别是对速度研究开展的时间不长。国土资源部广州海洋地质调查局近几年在南海天然气水合物高分辨地震调查的基础上,对 BSR 较为明显的剖面在速度及其他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,并于 2007 年在神狐海区进行了天然气水合物钻探取样工作,其中在三个站位取得了天然气水合物实物样品。

本研究通过对南海北部陆坡天然气水合物高分辨地震速度资料的精细分析,结合该地区的地质条件,对比 BSR 分布范围来研究含 BSR 层的剩余层速度特征,并对剩余层速度与水合物的关系进行了分析和探讨。

2 层速度和剩余层速度的计算方法

传统的层速度计算采用速度谱的叠加速度值,用 Dix 公式计算成像,但 Dix 公式计算的层速度仅仅是一种近似值。原因在于从叠加速度到均方根速度的换算时,当地层倾角较大、特别是非平行倾斜时,倾角校正公式求出的均方根速度仅仅是一种近似值。事实上,从地震剖面上读出的倾角仅仅是视倾角(因为地震剖面上表现的是时间域,而非空间域或深度域)。可见,由倾角校正公式和 Dix 公式所计算出的层速度具有较明显的误差。本研究采用射线追踪法计算,该方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,包括反射、折射、透射的综合效应进行反演,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,其基本原理如下^[4,5,6]:

假设层速度和界面深度都是随 x 变化的函数,根据地震层析成像中广义反演的原理,可以利用层速度 $C_n(x)$ 和界面深度函数 $H_n(x)$, $n=1,2,\dots,N$, N 为反射界面总数,二者联合反演的方法求层速度场。

反演采用的是走时数据,取自共中心点(CMP)反射道集记录。在 CMP 道集中第 n 个反射界面的走时在小炮检距 x 时可近似表示为

$$t_n^2(x) \approx t_n^2(0) + x^2/V_{NMO,n}^2 \quad (1)$$

其中, $t_n(0)$ 为零炮检距的走时; NMO 为正常时差; V_{NMO} 为 NMO 速度, 满足

$$V_{NMO,n}^2 = \frac{1}{t_n(0) \cos^2 \beta_{0,n}} \sum_{i=1}^n C_i^2 \Delta t_i \prod_{k=1}^{i-1} \left(\frac{\cos^2 \alpha_{k,n}}{\cos^2 \beta_{k,n}} \right) \quad (2)$$

其中 $\Delta t_i = t_{i+1}(0) - t_i(0)$, $\alpha_{k,n}$ 和 $\beta_{k,n}$ 为对到达 n 界面的法射线在 k 界面的入射角和折射角, 先用最小二乘法解方程求得 $t_n(0)$ 和 V_{NMO} , 界面水平时 NMO 速度就是均方根速度 V_{RMS} 。

采用矩阵方程的记法, 上面的方程可以记成线性方程组

$$b = A \omega \quad (3)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} \Delta t_1 & & & \\ \Delta t_1 & \Delta t_2 & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \\ \Delta t_1 & \Delta t_2 & \cdots & \Delta t_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\omega_i = C_i^2 \prod_{k=1}^{i-1} \left(\frac{\cos^2 \alpha_{k,n}}{\cos^2 \beta_{k,n}} \right) \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

$$b_j = V_{NMO,j}^2 t_j(0) \cos^2 \beta_{0,j} \quad (6)$$

$$\beta_{0,n} = \arcsin \left(\frac{V_{NMO,1} dt_n(0)}{2 dx} \right) \quad (7)$$

这个方程组解 ω 是与层速度 C_i 有关的中间参数, 解联立方程组可求得 C_2 和 $\beta_{1,2}$ 。如此递推到 $n = N$ 时便可以获得所有层速度及射线参数。对每一个 CMP 道集都这样做, 即可得到各 CMP 点层速度。

剩余层速度的计算采用趋势分析法, 该方法脱离了剖面而转到平面上进行速度分析。平面上的剩余速度表达式:

$$Vr = Vi - fi(V) = V(x, y) - fi(x, y) \quad (8)$$

式中: Vi 为已知速度值, 在平面上为 $V(x, y)$; $fi(V)$ 为趋势值, 在平面上为 $fi(x, y)$ 。

实际应用中, 可使用两种数学方法进行趋势分析: 多项式和傅立叶趋势分析。如果原始数据存在周期性的话, 便可采用傅立叶分析法; 如果希望把曲面的趋势表现出来, 则使用多项式分析为好。主要目的是把趋势分离出来, 因此, 下面的分析使用多项式逼近, 根据需要, 可取一次、二次、三次或更高次项。一次趋势面为平面、二次趋势面为抛物面, 三次趋势面为三次曲面。一次趋势面方程:

$$f(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (9)$$

二次趋势面方程:

$$f(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 \quad (10)$$

三次趋势面方程:

$$f(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + a_6 x^3 + a_7 x^2 y + a_8 xy^2 + a_9 y^3 \quad (11)$$

式中 a_0, a_1, \dots, a_9 为待定系数。

一次曲面有 3 个待定系数; 二次曲面有 6 个待定系数; 三次曲面有 10 个待定系数。由

此看来,次数越高,需求解的待定系数越多,而且越复杂。一般来说,求解一个三次曲面,就能与趋势值 $f_i(x,y)$ 之差的平方和达到最小:

$$Q = \sum_{i=1}^N [V_i - f_i(x,y)]^2 \quad (12)$$

根据数学分析求极值原理,分别求出 Q 为回归方程各系数的一阶偏导数,并令其等于零,即可推导出剩余速度值。

3 研究区概况

研究区位于欧亚、太平洋和印度-澳大利亚三大板块的交汇处,地质发展经历了由板内裂陷演变为边缘拗陷的过程。研究区基底构造复杂,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,研究区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^[7]。研究区水深在 200 ~ 2600m 之间,东西横跨约 200km,南北纵跨 270km,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,整体上呈东陡西缓、东复杂西简单的格局(图 1)。晚中新世以来深水重力流相当发育,沉积速率达(40 ~ 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。经过近几年来的调查,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。

4 剩余层速度的计算

求取剩余层速度是为了消除地表条件、浅层速度的影响,突出重要异常,更好地反映地质体或储集层的横向关系。剩余层速度分析的方法采用趋势分析法,所求的层速度,一般有区域性、局部性和随机性三种变化。宏观趋势分析是为了了解水合物的区域性分布规律。而微观区域分析是为了突出局部异常,去掉宏观区域背景,直接预测水合物有利区域。

在求取层速度之前,首先要对速度谱进行解释(图 2),速度谱的解释和取值是否合理,将直接影响层速度的计算精度。具体步骤如下:

(1)速度谱的解释先从地质条件简单、反射层质量好、能量团强、干扰少的剖面段开始,绘制叠加速度-反射时间曲线,并逐渐向外扩展;

(2)结合地震剖面的反射特征,判断速度极值点是否正确,并选择读取能量团最大的极值点。排除干扰波能量团,从而求得有效波的叠加速度;

(3)对相邻速度谱进行比较,通过比较速度谱曲线的形状、相同反射层的速度极值等方法予以检查和修改;

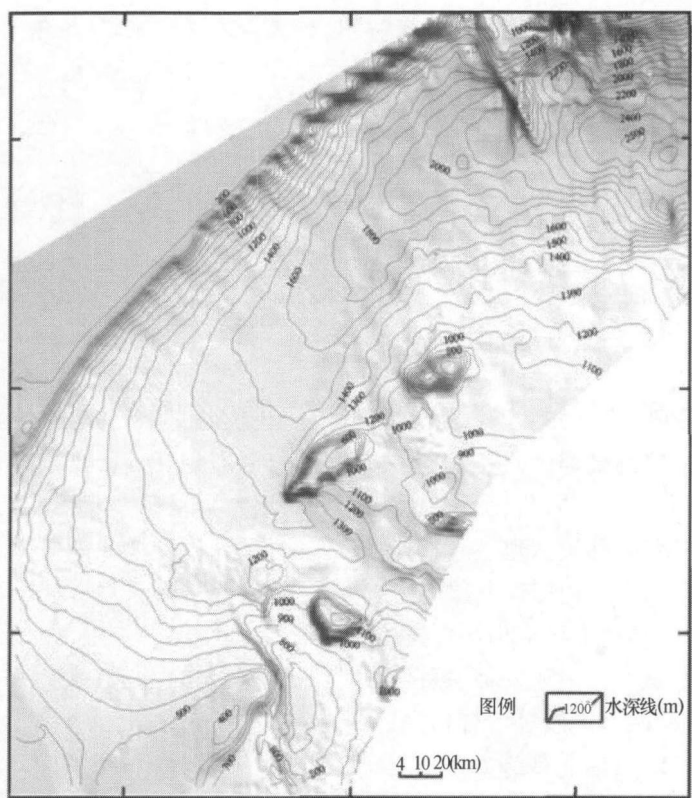


图 1 研究区地形图

Fig. 1 The map of the topographical of study area

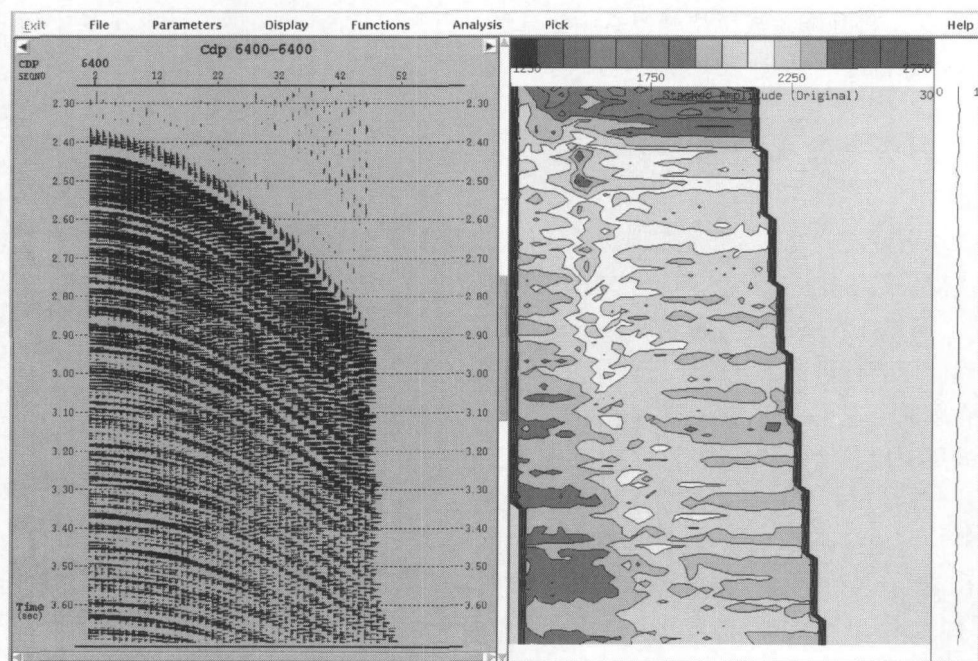


图 2 研究区速度谱

Fig. 2 The velocity spectrum of study area

(4)每隔 40 个 CDP 拾取一组叠加速度数据,然后用射线追踪法计算层速度,并形成层速度剖面(图 3);

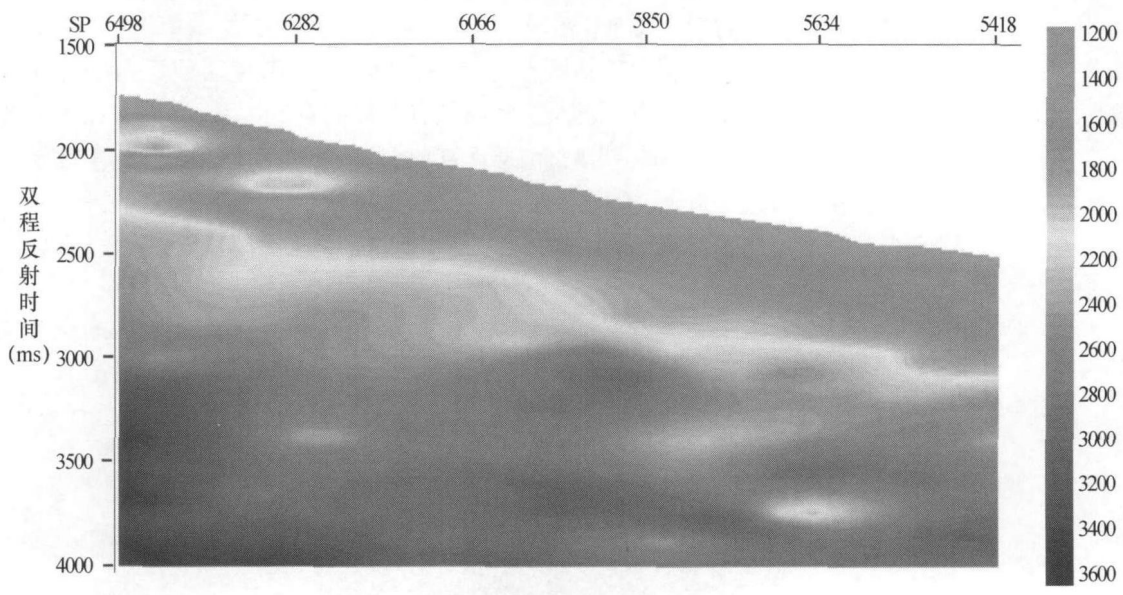


图 3 用追踪射线法计算的研究区测线 A 层速度剖面
Fig. 3 Interval velocity profile of the line A in study area computed by Ray-Tracing Method

(5)利用整个研究区的层速度数据,进一步计算含 BSR 地层的层速度和剩余层速度。

5 含 BSR 地层的层速度和剩余层速度特征

水合物的生成除了需要一定的温度和压力条件外,还需要大量的碳氢气体和充足的水。这就需要地层具有较高的孔隙度和渗透率。未固结沉积岩的孔隙度很高,渗透率大,具备水合物生成的物理条件。具备这种特征的未固结沉积岩的地震波速度较低,而含水合物地层的地震波速度增大。这就形成了水合物成矿带作为低速背景中的高速地质体特征。另外,水合物的生成受温度和压力控制,等温面和等压面近似平行于海底,因此低速背景中近似平行于海底的相对高速地质体是水合物成矿带的特征^[8,9]。

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伏地层(通常为含游离气层)之间的波阻抗差异所致。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,这是 BSR 的主要特征。国内外研究表明,在地震反射剖面上,BSR 一般位于海底以下 1000m 的范围内,分布深度大体在 300 ~ 1000m,水深大于 300 m。一般认为,BSR 是水合物的地震响应特征,含 BSR 地层水合物存在的可能性较大^[10,11,12]。

地层层速度能在一定程度上能反映岩性分层、岩石类别和含流体状况,高值层速度往往与地层厚薄、压实作用和岩石性质有关,含水合物地层的层速度往往比一般地层的层速度

高。研究区全部 BSR 都分布在某一套地层中,即预测的含水合物层全部位于这套地层内,我们把这套地层称为 BSR 层,BSR 层的厚度在 100 ~ 1200m,属全新世和更新世,地层年龄小于 1.806Ma。对研究区 BSR 层的层速度和剩余层速度与 BSR 分布进行对比分析,寻找出层速度和剩余层速度与 BSR 的对应关系。

研究区的 BSR 主要分布在北部和中部偏西范围,图 4 是研究区 BSR 层的层速度分布图,从图中可以看出,总体上 BSR 的分布与层速度的高值有明显的对应关系,特别是在研究区的西北部,层速度高值区与 BSR 分布相当吻合,层速度值在 1700 ~ 2100m/s 之间,东北部和中部 BSR 分布与层速度高值区也有一定的对应性,层速度值在 1700 ~ 1900m/s 之间,可以认为 BSR 层的相对高速的层速度与天然气水合物存在有关,但地层厚度对其有一定的影响。

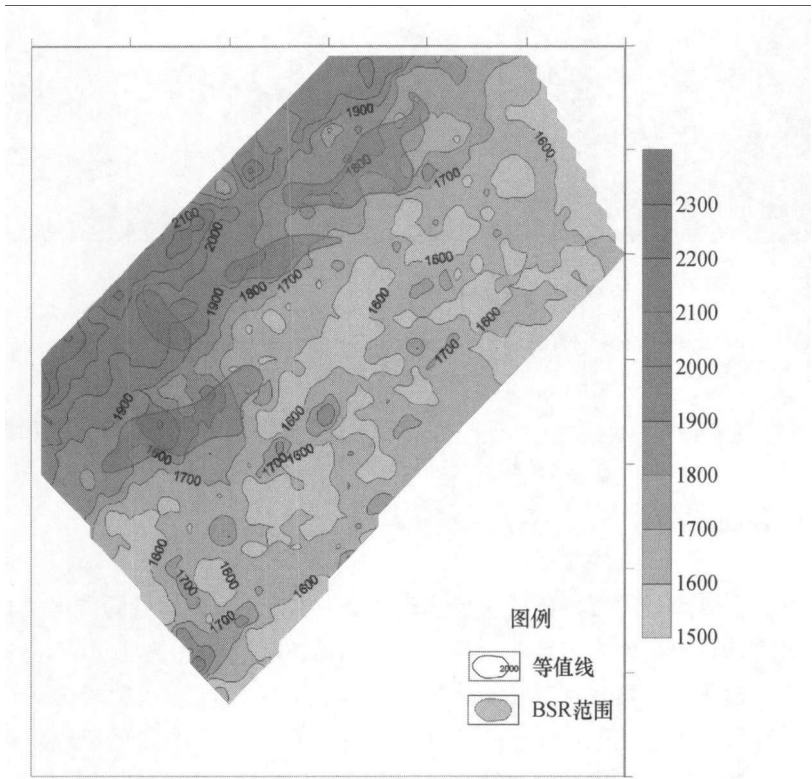


图 4 研究区 BSR 层的层速度分布

Fig. 4 The contour of the interval velocity in BSR strata of study area

剩余层速度分析是在反演层速度数据基础之上,进行剩余层速度计算。剩余层速度消除了地层厚度的影响,突出地层岩性的速度,正速度异常表明该处速度高于背景速度,可能存在有天然气水合物或砂岩等高速异常体。而负速度异常代表该处速度低于背景速度,表明该区可能为泥岩发育区或有游离状态的天然气存在。图 5 是研究区 BSR 层剩余层速度分布图,从图中可以看出,BSR 层剩余速度异常值为 -100 ~ 100m/s,整体上表现为南北高中间低。BSR 范围主要分布在剩余速度异常值为 0 ~ 100m/s 的范围内,特别是在研究区北部局部地区,正异常范围与 BSR 分布比较吻合,说明该层高速正异常值有可能是由于水合

物层的存在而引起的,与水合物层的存在有一定的关系,地层中水合物的含量对剩余层速度异常也有一定的影响。

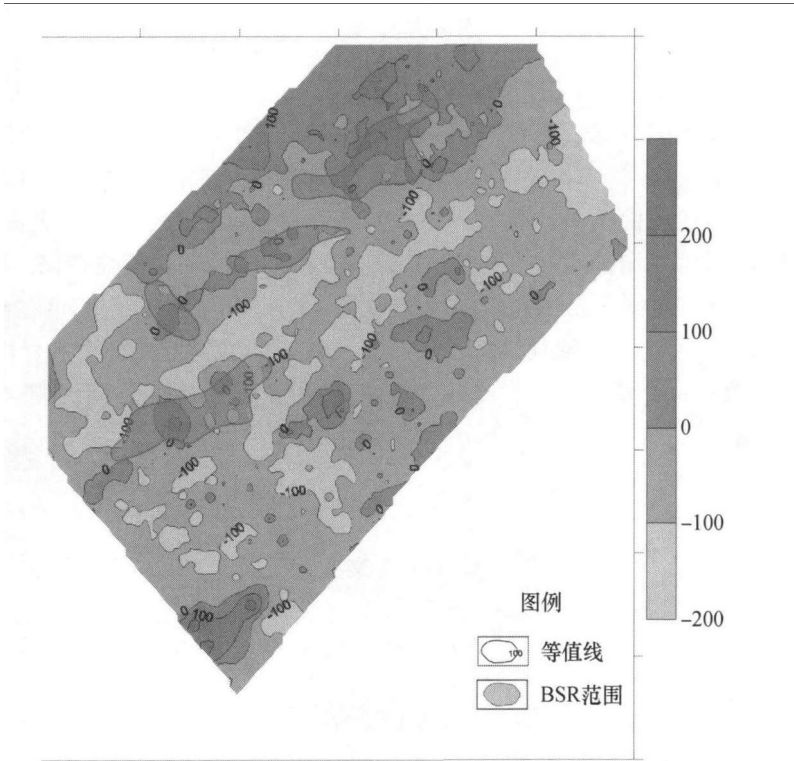


图 5 研究区 BSR 层的剩余层速度分布
Fig. 5 The contour of the remaining interval velocity in BSR strata of study area

6 剩余层速度特征与水合物关系分析

剩余层速度可作为速度异常看待,它反映了广义岩性的变化。对于碎屑岩,它主要反映了岩性的异常。这是因为在通常情况下,埋深越深,压实程度越大,孔隙度也越小,速度越高,速度随深度的变化包含了孔隙度的影响。而剩余层速度不仅消除了深度的影响,也或多或少消除了孔隙度的影响,而其他因素的影响相对较小,因而剩余层速度主要反映了岩性的变化。剩余层速度越高,说明碎屑岩中砂质含量越高,在含水合物地层中水合物的含量越高;剩余速度越低,说明泥质含量越高或者是气体的含量越高^[13,14]。

一般来说,岩性差别的是引起地层的高值剩余层速度的原因,可能是地层中有水合物存在的缘故,也可能是地层砂质含量高。这就要结合 BSR 的分布来进行综合分析,研究区全部 BSR 在这套地层内,异常范围与 BSR 分布比较吻合,说明该层高速正异常值有可能是由于水合物层的存在而引起的,与水合物层的存在有一定的关系,并且地层中水合物的含量对剩余层速度异常也有一定的影响^[15,16]。

根据研究区 BSR 层的剩余层速度分布特征,结合 BSR 的分布和其他地震属性进行综

合分析,可以进一步综合了解由水合物产生的游离状态天然气的存在及分布状况,为预测天然气水合物提供依据。

7 结 论

通过对研究区 BSR 层层速度和剩余层速度的计算,并且结合 BSR 分布范围和多种特殊地震属性进行综合分析,我们可以进一步了解层速度和剩余层速度在水合物解释中的指示意义:(1)地层层速度能在一定程度上能反映岩性分层、岩石类别和含流体状况,高值层速度与地层厚度、压实作用和岩石性质有关,含水合物地层的层速度往往比一般地层的层速度高;(2)剩余层速度消除了地层厚度和压实作用的影响,高值剩余层速度主要是有岩性的差别引起;(3)结合 BSR 和其他地震属性分析可判断剩余层速度是否由水合物引起;(4)含水合物地层中,剩余层速度越高水合物的含量越高;剩余速度越低,说明泥质含量越高或者是气体的含量越高。

参 考 文 献

- [1] 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): 67 ~ 73
- [2] 许宁生,李元元,余志. 首届广东青年科学家论坛论文集[M]. 北京:中国科学技术出版社,2000
- [3] 李正文,赵志超. 地震勘探资料解释[M]. 北京:地质出版社,1988
- [4] 吴国忱,王华忠,马在田. 速度梯度射线追踪与二维速度反演[J]. 石油物探,2003,42(4):434 ~ 440
- [5] 高尔根,徐果明. 二维速度随机分布逐步迭代射线追踪方法[J]. 地球物理学报,1996,39(增刊):302 ~ 308
- [6] 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):54 ~ 58
- [7] 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): 103 ~ 108
- [8] 张光学,黄永祥,陈邦彦主编. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京:海洋出版社,2003
- [9] 宋海斌. 天然气水合物的地球物理研究[M]. 北京:海洋出版社,2003
- [10] Shipsey 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): 2204 ~ 2213
- [11] Lee-M-W, Hutchinson-D-R, Agena-W-F, et al. Seismic character of gas hydrates on the Southeastern US continental margin[J]. Marine Geophysical Researches. 1994, 16(3): 163 ~ 184
- [12] 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): 55 ~ 61
- [13] 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,2004,6:9 ~ 12
- [14] 张聿文,刘学伟,金玉洁. 含天然气水合物地层的速度和衰减研究[J]. 石油地球物理勘探,2004,39(2):205 ~ 214
- [15] 梁劲,王宏斌,赵志超. 射线追踪法在南海天然气水合物速度分析中的应用. 物探化探计算技术,2007,29(6): 486 ~ 491
- [16] 梁劲,王宏斌,郭依群等. 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):123 ~ 129

The Signification of Remaining Interval Velocity Analysis in Interpretation of Gas Hydrates in South China Sea

Liang Jin^{1,2} Wang Hongbin² Sha Zhibin^{1,2}

(1. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, 430074;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, 510760)

Abstract: There exists closely relationship between seismic velocity of underground medium and the geophysical properties of rocks, and seismic velocity reflect the type of rock and status of fluid. Remaining interval velocity analysis, combining BSR and amplitude anomaly analysis, can predict the distribution of gas hydrates through calculation of remaining interval velocity and extrusion of local abnormality of velocity based on analysis of interval velocity. The signification of interval velocity and remaining interval velocity in interpretation of gas hydrates was understood furthermore through analysis of interval velocity and remaining interval velocity of the stratum containing BSRs, combining manifold special seismic attributes and distribution of BSRs, which includes: ①Interval velocity of stratum can reflect rock layers, rock types and status of bearing fluid to a certain extent. The interval velocity with higher value relate to formation thickness, compaction and rock properties, The interval velocity of stratum bearing hydrate often higher than that of average stratum; ②The impact of formation thickness and compaction was eliminated in remaining interval velocity. The remaining interval velocity with higher value is mainly caused by lithology difference; ③Whether the remaining interval velocity is caused by hydrates or not can be judged through analysis of manifold special seismic attributes and BSRs; ④Higher remaining interval velocity suggests higher content of hydrate in strata bearing hydrates, whereas lower remaining interval velocity suggests higher content of sediment or gas.

Key words: Remaining interval velocity Gas hydrates Interpretation