

地震属性分析在浅层气识别中的应用研究

杨肖迪^{1,2}, 淳明浩^{1,2}, 罗小桥^{1,2}, 姚志广^{1,2}

(1. 中国石油集团工程技术研究有限公司, 天津 300450; 2. 中国石油集团海洋工程重点实验室, 天津 300450)

摘 要:海底浅层气在地层中聚集会降低土层强度或形成高压气囊, 危害海洋工程建设, 查明工区内海底浅层气分布具有重要意义。土体中含有浅层气会改变土体的物理力学性质, 对传播过程中的声波具有改造作用。地震属性分析可以利用声波的多种属性参数, 从多个维度进行浅层气识别分析。针对研究区域声学地层剖面资料, 利用振幅、瞬时相位、瞬时频率和品质因子四方面的属性进行浅层气识别分析, 综合杂乱弱反射、同相轴变粗、同相轴下拉、高频缺失、品质因子相对较差等特征, 识别出声学地层剖面上的浅层气反射。研究区域内浅层气呈柱状纵向分布, 与断层部分重合, 终止于海底表层黏土层, 可能是由深部沿着断层向上迁移至浅部聚集形成的。

关键词:浅层气; 声学地层剖面; 地震属性; 高频缺失; 品质因子

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2022)01-0026-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2022.01.003

引用格式:杨肖迪, 淳明浩, 罗小桥, 等. 地震属性分析在浅层气识别中的应用研究[J]. 海岸工程, 2022, 41(1): 26-36. YANG X D, CHUN M H, LUO X Q, et al. Research on application of seismic attribute analysis in identification of subsea shallow gas[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(1): 26-36.

海底浅层气通常指海床以下 1 000 m 以浅聚集的气体。浅层气具有结构简单、密度小、吸附能力小和扩散能力强等特点, 容易在地层中迁移、聚集。当浅层气在地层中聚集时会改变地层的物理力学性质, 孔隙度增加, 地层压实程度低, 强度降低^[1-4]。在外部荷载作用下, 含浅层气地层可能会发生变形, 导致基础沉降或滑动。此外, 具有良好盖层的浅层气, 会形成具有一定压力的气囊, 如果石油平台建设、钻井等海洋工程活动刺穿盖层, 在内部压力作用下, 浅层气会喷涌而出, 可能会导致井喷事故。因此, 查明工区内浅层气的分布特征对于海洋工程建设选址、评估等具有重要意义。

地层中含浅层气时改变了地层的物理性质, 从而与周围正常地层存在差异, 当声波经过含浅层气地层时会受到地层影响, 其属性均会发生变化。目前通常使用声学探测的方法进行浅层气的识别, 根据声学地层剖面上的声学空白、声学扰动、声学幕、不规则强反射顶界面、两侧相位下拉和同相轴速度下拉等特征识别浅层气^[5-11], 主要是利用声波的振幅特征。但是这些特征对于浅层气识别来说是充分条件, 可能存在多解性。因此本研究使用多种地震属性进行浅层气的识别, 以期提高浅层气识别的准确率。

1 地震属性

地震属性是一种描述和量化地震资料的特性, 是原始地震资料中所包含的全部信息的子集, 而地震属性的求取是对地震数据进行分解, 每一个地震属性都是地震数据的一个子集。从应用地球物理学的角度来看, 地震属性是刻画、描述地层结构、岩性以及物性等地质信息的地震特征量。

1.1 振 幅

振幅是最常使用的地震属性, 声波反射的振幅是声波与地层反射系数的褶积, 反映地层性质的变化特

收稿日期: 2021-07-22

资助项目: 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目——海洋油气管道设计施工关键技术研究(2019B-3010)

作者简介: 杨肖迪(1989—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋工程勘察方法等方面研究. E-mail: yangxiaodi1989@126.com

(李 燕 编辑)

征。地层对声波的改变称为波阻抗,为介质的密度 ρ 与声速 v 的乘积,声波在穿透相邻不同介质的界面时,会发生反射和透射。地层的反射系数(R)为:

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad (1)$$

式中, ρ_1 、 c_1 、 ρ_2 、 c_2 分别为界面上层介质的密度、声速和界面下层介质的密度、声速。不同性质的地层往往具有不同的密度和声速,其界面处的反射系数不为零,并且地层性质差异越大,反射系数绝对值越大,反射波的振幅也越大。

1.2 瞬时相位

可根据声波穿越不同地质体引起的相位变化来识别不同地质体间的边界。瞬时相位 $P_h(t)$ 是信号的子集:

$$P_h(t) = \frac{180}{\pi} \arctan \left[\frac{g(t)}{f(t)} \right], \quad (2)$$

式中, t 为时间或深度, $g(t)$ 和 $f(t)$ 分别为信号道的实部和虚部。

相位信息与振幅无关,与声波波前的传播相位有关,是声波的一种物理属性,不受波形振幅影响,对弱振幅的反射区域也具有较好的显示,可用于识别地层连续性和地层层序边界^[12]。

1.3 瞬时频率

瞬时频率的计算方法为瞬时相位的时间导数,与声波的频谱有关。瞬时频率 $\varphi(t)$ 是相位随时间的变化率,计算公式为:

$$\varphi(t) = \frac{d[P_h(t)]}{dt}, \quad (3)$$

式中, $P_h(t)$ 为瞬时相位。

瞬时频率与声波经过的地层性质有关,是声波信号的一种物理属性,与地层的疏密程度有关,通常可作为油气区、裂隙区以及地层厚度的指示器。当地层中存在油气时往往会造成声波中的高频成分被吸收衰减^[13-16]。

1.4 品质因子

地层对声波的吸收衰减可用品质因子 Q 表示,其意义为声波在地层中传播一个波长 λ 距离后,原来储存的能量 E 与所消耗的能量 ΔE 之比^[17]。品质因子 Q 可以定义为:

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} = 2\pi \frac{1}{1 - e^{-2\alpha\lambda}} = \frac{\pi f}{\alpha c}, \quad (4)$$

式中, f 为声波频率, t 为声波旅行时, c 为声波波速, α 为介质的吸收系数。品质因子指示地层对声波的吸收衰减,品质因子越大,地层对声波的吸收衰减越小;反之,地层对声波的吸收衰减则越大。品质因子与声波频率正相关,即当地层对声波吸收衰减较小时,会保留较高的频率成分;地层对声波吸收衰减较大时,声波的频率会降低。由于浅层气的存在会导致声波中的高频成分衰减,因此在含浅层气地层中声波的衰减较大,品质因子较小。

2 含浅层气地层特征

声波在地层的传播过程中其能量的衰减可以分为 2 部分:非固有衰减和固有衰减。非固有衰减主要由声波的几何扩散和介质的几何构造引起;固有衰减与岩石黏弹性质有关,其会使声波的振动能量转化为热能。在充满流体的孔隙介质中,固有衰减起主导作用。孔隙介质中固体与流体(气或者水)的相对运动都是造成声波能量衰减的主要因素^[18]。

地层中聚集浅层气后,气体饱和度增加,对声波的吸收衰减增强,会影响地层中声波的传播速度。地层声速与孔隙度和含水量有关,具有以下经验公式^[19-21]:

$$c = 1\,981.753\,9 \times (0.995\,8 - 0.004n + 0.000\,2w), \tag{5}$$

式中, c 为声波波速, n 为地层孔隙度(%), w 为含水量(%)。

地层声速随孔隙度和含水量的变化如图 1 所示。由图 1 可以看出,孔隙度对地层声速的影响要大于含水量对地层声速的影响。当地层中赋存浅层气时,由于盖层的作用,会形成局部高压,挤占沉积物颗粒之间的孔隙水的空间,促使孔隙水被排出,地层的孔隙度增加,导致地层声速降低。

地层中含浅层气时,地层的物理属性和声学反射特征均会发生变化。正常层序中同一套地层内部的性质往往较均匀,波阻抗相近,反射系数近乎为零。当地层中含有浅层气时,地层的密度和声速均会降低,波阻抗也会随之降低,与周围地层界面处的反射系数为负,形成强反射界面,对下部形成一定的屏蔽效应。声波在经过含浅层气地层时,高频成分衰减增加,声速降低,旅行时将增加。由地震属性分析可知,声学地层剖面中浅层气反射波具有如下特征:①顶界面为强反射,下部为弱反射;②水平连续同相轴局部向下凹陷;③相对低频;④品质因子相对较差。

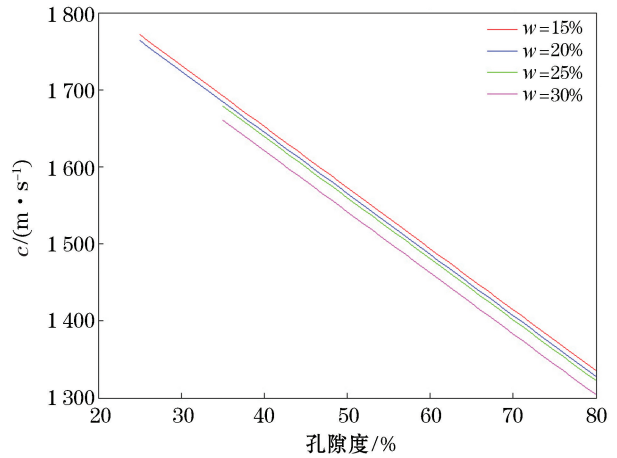


图 1 不同含水量下地层声速与地层孔隙度的关系
Fig.1 Relationship between the sound velocity and the porosity in the strata under different water content

3 工程案例

在渤海湾黄骅海域海底存在较多浅层气。近 5 年在该海域导管架石油平台检测中发现,平台周围 200 m 内海底会冒出油花、气泡。为全面评估平台安全性,在某石油平台周围区域进行了声学地层剖面测量,采用电火花震源,激发能量为 1 000 J,记录时长为 300 ms。在声学地层剖面上发现了疑似浅层气反射,对声学地层剖面进行振幅、瞬时相位、瞬时频率、品质因子四种地震属性分析,同时结合本区域的工程地质钻孔数据,识别浅层气。

3.1 钻孔数据

研究区域的工程地质钻孔为全取芯钻孔,深度为 120 m。其钻孔数据如表 1 所示。研究区域海底以下 120 m 主要为软黏土、粉细砂、粉土、黏土、粉质黏土等,地层含水量和孔隙度随深度增加而逐渐降低,地层密度和地层声速随深度增加而逐渐增大,地层为正常沉积层序。

表 1 钻孔地层物理属性和声速数据汇总表

Table 1 Physical properties and sound velocities in the strata of the borehole

序 号	层底深度/m	土层名称	$w/\%$	湿容重/($\text{N} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土粒比重	$n/\%$	$c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	2.4	软黏土	55	16.5	2.70	62	1 506
2	3.3	中密粉土	29	18.9	2.71	46	1 620
3	14.5	软质淤泥质黏土	38	18.5	2.72	51	1 588
4	16.7	粉质细砂	26	19.3	2.69	45	1 627
5	19.8	硬质粉砂	26	19.7	2.70	43	1 643

续表 1							
序 号	层底深度/m	土层名称	$w/\%$	湿容重/($\text{N} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土粒比重	$n/\%$	$c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
6	22.0	密实粉土	23	20.0	2.72	42	1 651
7	25.7	密实粉细砂	20	20.5	2.68	38	1 684
8	28.8	密实粉土	28	19.1	2.68	46	1 621
9	34.8	硬黏土	37	18.5	2.69	50	1 594
10	44.6	密实粉土	23	19.6	2.71	44	1 635
11	49.8	粉质黏土	27	20.4	2.71	39	1 674
12	55.7	密实粉土	26	19.6	2.70	44	1 638
13	58.8	硬黏土	35	18.2	2.71	52	1 575
14	61.7	致密细砂	24	19.2	2.70	46	1 619
15	81.1	硬质粉质黏土	30	19.8	2.72	43	1 644
16	91.7	致密砂质粉土	21	19.9	2.72	42	1 645
17	106.6	硬质粉质黏土	20	20.5	2.72	39	1 673
18	111.1	致密粉土	26	19.5	2.71	44	1 631
19	120.3	硬质粉质黏土	21	20.5	2.71	39	1 676

3.2 振幅特征

调查区域内 2 条典型振幅剖面(图 2 中的测线 1 和测线 2)中浅层气的反射特征如图 3、图 4 所示。由图 3 可以看出,在剖面左侧和右下侧各存在一个异常区域,呈弱反射特征,同时存在数个空白弱反射区域,在剖面中分散分布。异常区域内反射波能量较弱,同相轴不连续,波形不稳定,呈杂乱反射。无明显层状结构,与周围正常同相轴存在明显的间断,边缘处同相轴明显变粗,并向下弯曲。左侧弱反射区域呈柱状纵向延伸,宽度约 130 m,顶部距海底约 15 m;右下侧弱反射区域呈团状,宽度约 140 m,纵向延伸约 50 m。

由图 4 可以看出,在剖面左侧存在 1 条正断层。在海底以下 15~35 m 的剖面能量相对较弱,疑似古河道。在剖面中部存在一个垂向异常区域,同相轴向下凹陷,近乎贯穿整个剖面,而两侧同相轴无错断,仍然平齐,疑似为地层中含浅层气造成的声速降低导致的同相轴向下凹陷。异常区域内上部反射波能量较稳定,同相轴较连续;下部反射波能量较弱,同相轴不再连续,波形不稳定。异常域内呈柱状纵向延伸,宽度约 40 m,顶部距海底约 15 m。

在图 3、图 4 中声学地层剖面异常的区域,声波呈弱反射特征,波形杂乱、同相轴不连续,同相轴向下凹陷,与浅层气的声学反射特征相似。同时,调查区域内无任何人工构筑物、海底平滑,杂乱反射并非接收系统异常或人工构筑物造成的,故推测其为浅层气反射特征。

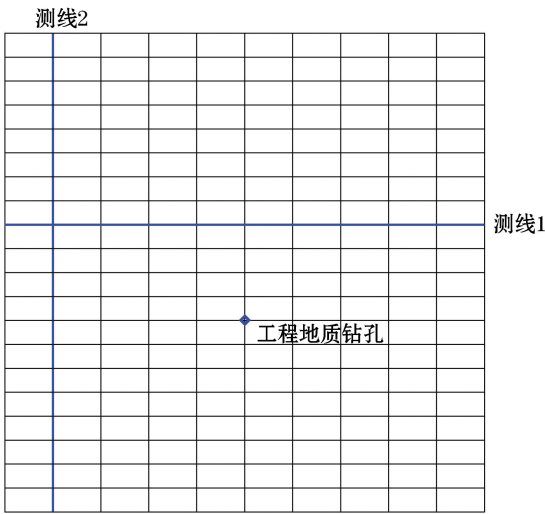


图 2 调查范围内测线布设及选取的测线
Fig.2 The layout of surveying lines and the lines selected for the analysis

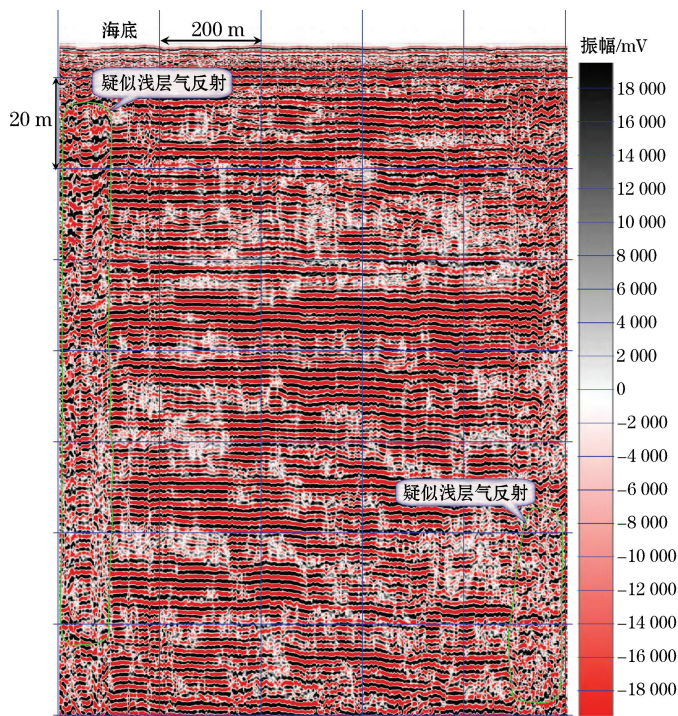


图3 振幅剖面(测线1)上疑似浅层气杂乱反射

Fig.3 The chaotic reflections in the amplitude profile (surveying line 1), which are suspected as the shallow gas

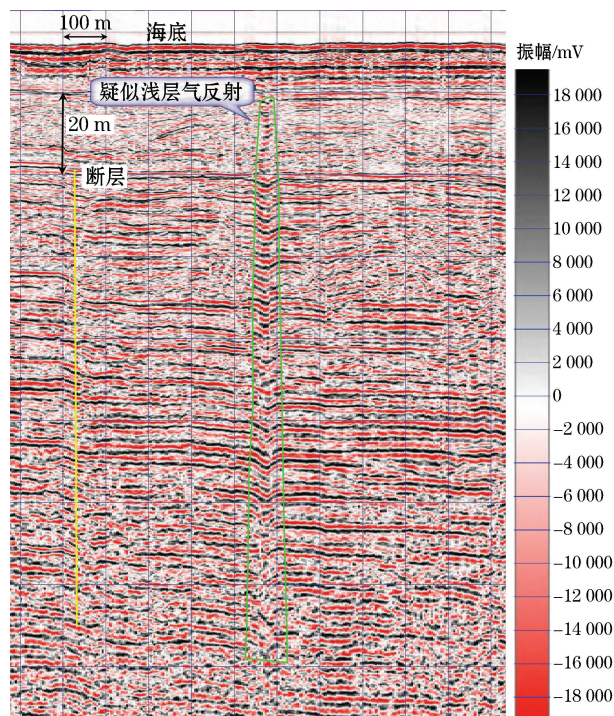


图4 振幅剖面(测线2)上疑似浅层气造成的同相轴下拉

Fig.4 Lineups pulling-down occurring in the amplitude profile (surveying line 2), which is suspected to be caused by shallow gas

3.2 瞬时相位特征

分别对图3和图4的2条振幅剖面进行瞬时相位属性计算,其瞬时相位剖面如图5、图6所示。由图5可以看出,在剖面的左侧和右下侧分别存在1个异常区域,相位杂乱,无明显层状结构。同时在剖面中存在数个同相轴扰动区域,与振幅剖面中的空白弱反射相近,在剖面中分散分布,其余区域同相轴则稳定、连续。左侧异常区域呈柱状,宽约130 m,与振幅剖面上的杂乱反射区域相近。顶部距海底约15 m,在此区域内无明显层状结构,同相轴明显变粗并向下凹陷;右下侧异常区域呈团状,与振幅剖面(图3)中右下侧的杂乱反射区域相近,宽约140 m,纵向延伸约50 m。

由图6可以看出,在海底以下5~30 m同相轴杂乱。剖面底部、海底下140 m以深同相轴杂乱。在剖面中部存在一个同相轴下凹区域,其余区域同相轴稳定、连续。此区域呈柱状,宽约40 m,与振幅剖面(图4)上同相轴下凹区域相近,顶部距海底约15 m。在此区域内的顶部,同相轴发生错断、反转;上部同相轴虽然下凹,但仍然连续;下部同相轴逐渐变得不连续,层状结构逐渐不明显。此区域疑似浅层气反射,并且从下至上,浅层气含量逐渐减少。

瞬时相位剖面上大部分区域同相轴连续,表明研究区域地层结构稳定。而剖面上的异常区域呈现出相位杂乱、同相轴不连续和同相轴下凹的特征,推测其为地层中含浅层气所致。

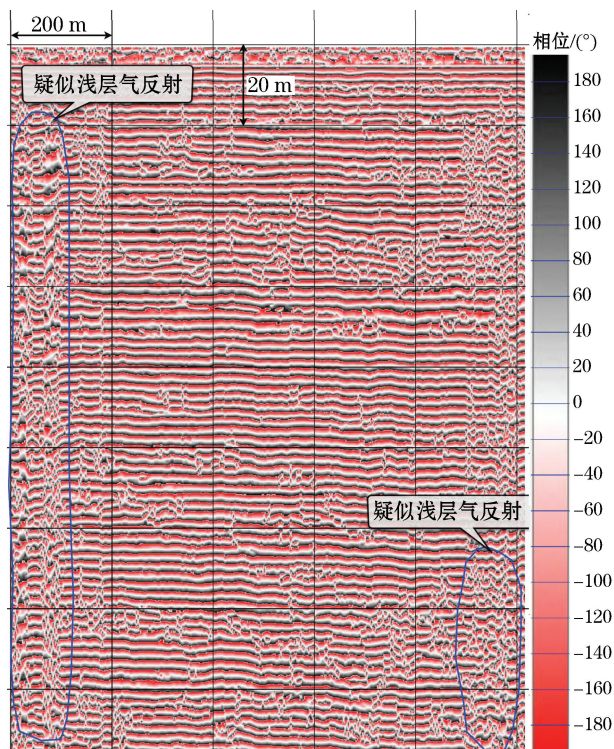


图5 瞬时相位剖面(测线 1)上的相位杂乱区域

Fig.5 Phase chaotic region in the instantaneous phase profile (surveying line 1)

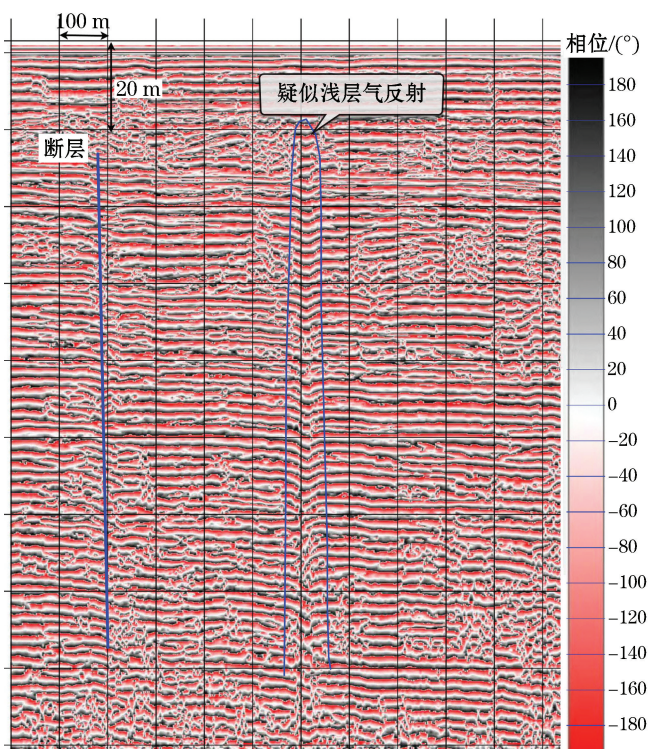


图6 瞬时相位剖面(测线 2)上同相轴下拉区域

Fig.6 Lineups pulling-down region in the instantaneous phase profile (surveying line 2)

3.3 瞬时频率

分别对图 3 和图 4 的 2 条振幅剖面进行瞬时频率属性计算,其瞬时频率剖面如图 7、图 8 所示。由图 7 可以看出,整个剖面的瞬时频率在 50~500 Hz,整体上呈现出上部高、下部低的趋势。在剖面左侧和右下侧分别存在 1 个低频区域,同时在海底以下 50~55 m 存在 1 处横向低频区域。左侧区域呈柱状,宽约 130 m,顶部距海底约 15 m;右下侧区域呈团状,与振幅剖面(图 3)上的杂乱反射区域、瞬时相位剖面(图 5)上的相位杂乱区域相似。低频区域内高频成分缺失,呈现低频特征,瞬时频率约 90~150 Hz,周围区域的瞬时频率普遍大于 250 Hz。

由图 8 可以看出,整个剖面的瞬时频率在 50~500 Hz,整体上呈现出上部高、下部低的趋势。海底以下 40 m 内瞬时频率约 350~500 Hz,海底以下 140 m 区域瞬时频率约 90~150 Hz。在剖面中部存在一个低频区域,呈柱状从底部凸出,宽约 40 m,与振幅剖面(图 4)和瞬时相位剖面(图 6)上的同相轴下凹区域相似,顶部距海底约 15 m。此区域内高频成分缺失,呈现出低频特征,瞬时频率约 100~180 Hz,周围区域的瞬时频率普遍大于 200 Hz。

在图 7 中存在 2 处主要的纵向低频区域和 1 处横向低频区域,横向低频区域对应钻孔中的密实粉土层,由于声波中高频成分在含气地层中有较大衰减,因此推测纵向低频区域为浅层气区域,横向低频区域是由浅层气在粉土层中横向迁移扩散造成的。图 8 的剖面底部为低频区,剖面中部存在 1 处纵向延伸的低频区,呈倒 V 形,在 0~140 m 呈尖脉冲状,向上突出,在 140 m 以下变宽。因此推测 140 m 以下为含气地层,并且随着气体压力增加,从中部突破地层压力向上迁移至浅部地层直至与地层压力平衡。

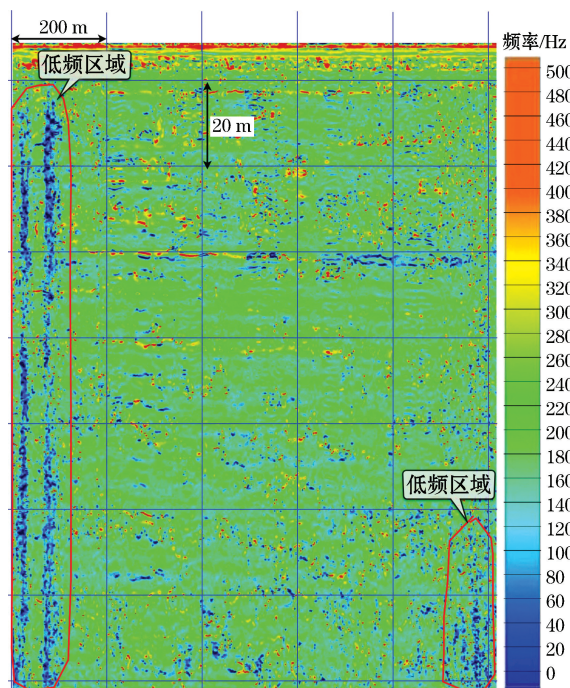


图 7 瞬时频率剖面(测线 1)中的异常低频区域

Fig.7 Abnormal low frequency region in the instantaneous frequency profile (surveying line 1)

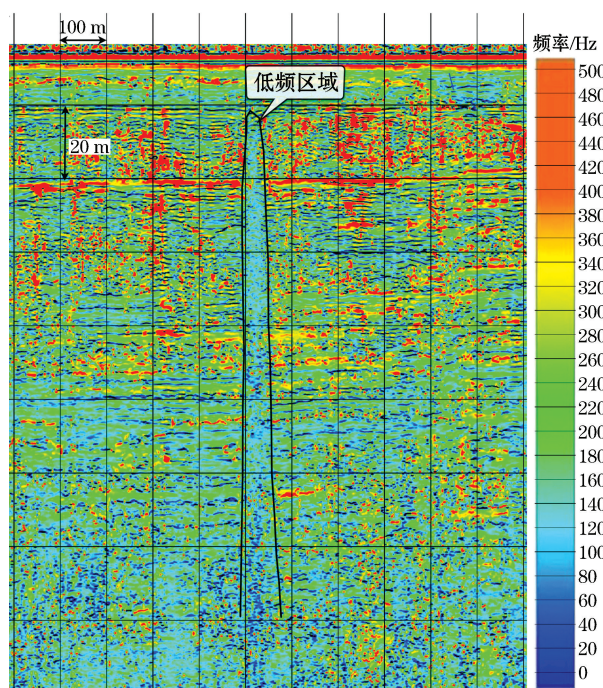


图 8 瞬时频率剖面(测线 2)中部的异常低频区域

Fig.8 Abnormal low frequency region in the middle part of the instantaneous frequency profile (surveying line 2)

3.5 瞬时品质因子

分别对图 3 和图 4 中的 2 条振幅剖面进行品质因子属性计算,其品质因子剖面如图 9 和图 10 所示。从图 9 中可以看出,整个剖面的品质因子在 4~18,在左侧和右下侧各存在 1 个品质因子较差的区域,同时在地底以下 50~55 m 存在一个横向品质因子较差的区域。左侧区域呈柱状,宽约 140 m,顶部距海底约 15 m;右下侧区域呈团状,与瞬时频率剖面(图 7)中的低频区域相近。此区域内品质因子在 5~8,明显低于周围地层的品质因子。

从图 10 中可以看出,整个剖面的品质因子在 4~18,在中部存在 1 个品质因子较差的区域。此区域呈柱状,宽约 50 m,顶部距海底约 15 m,与瞬时频率剖面(图 8)中的低频区域相近,此区域内品质因子在 5~7,明显低于周围地层的品质因子。

由品质因子的定义可知,品质因子较差的区域即为地层对声波的吸收衰减严重的区域,由于含浅层气地层对声波有较大的吸收衰减,并结合杂乱反射、同相轴变粗、速度下拉、高频缺失等特征,推测其为地层中含有浅层气造成的对声波的吸收衰减,即品质因子较差的区域为含浅层气区域。

3.6 综合分析

由钻孔资料和地层剖面资料可知,研究区域地层连续,剖面上的异常来自于地层内部。在振幅剖面上出现柱状区域的弱反射、杂乱反射、同相轴下拉以及分散的空白弱反射,在瞬时相位剖面上出现柱状区域的相位扰动、同相轴向下凹陷,在瞬时频率剖面上出现柱状区域和横向层状的相对低频区域,在品质因子剖面上出现柱状区域和横向层状的品质因子相对较差区域,并且这些区域基本重合,符合浅层气的特征,因此推测其为浅层气。利用声学剖面识别浅层气的过程如图 11 所示。

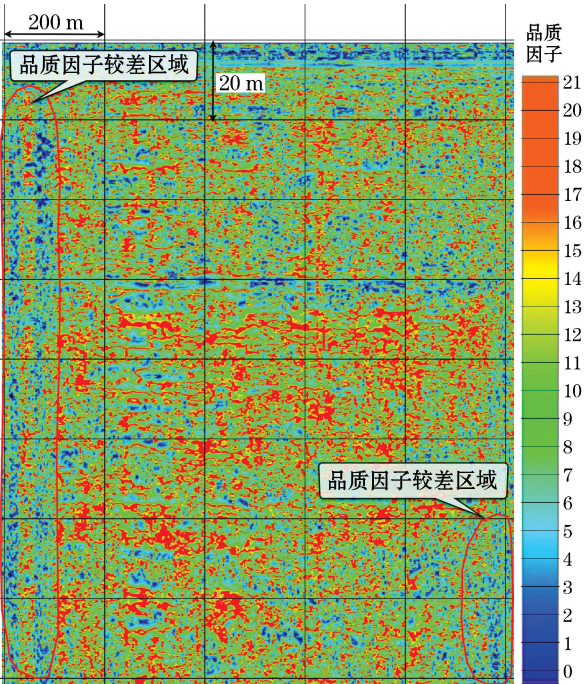


图 9 品质因子剖面(测线 1)上品质因子相对较差的区域
Fig.9 The relatively poor quality factor region in the quality factor profile (surveying line 1)

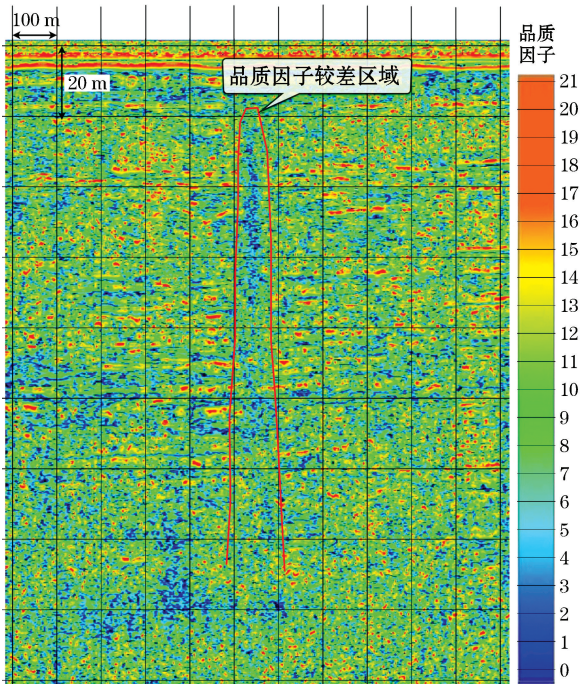


图 10 品质因子剖面(测线 2)上品质因子相对较差的区域
Fig.10 The relatively poor quality factor region in the quality factor profile (surveying line 2)

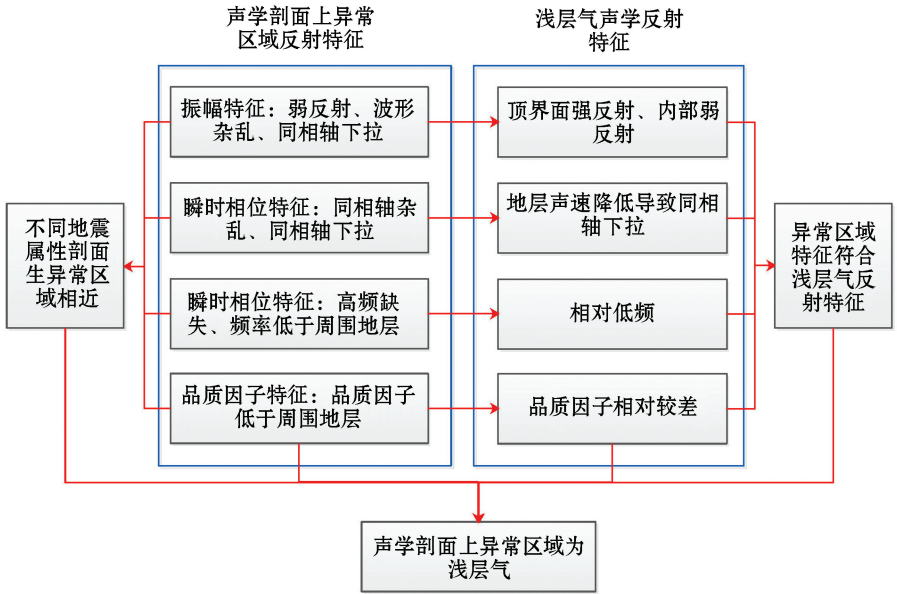


图 11 利用声学剖面识别浅层气
Fig.11 The Identification of shallow gas by using acoustic profiles

研究区域内浅层气和断层的分布特征如图 12 所示。由图 12 可以看出,浅层气位于一条正断层的末端,断层顶端埋深 31~57 m,由工程地质钻孔数据可知海底以下 15 m 主要是淤泥质黏土层,是较好的盖层。依据平台场址往年调查资料,平台周围 60 m 地层内浅层气是最近 10 a 内才出现的,并且平台位于埕北断阶区

羊二庄-赵家堡断裂带,断层发育,长期发育的赵北断层、羊二庄断层既是分界断层,同时又和不整合面形成了油气运移通道,在断层两侧和不整合区形成油气藏,油层埋深 990~1 985 m,孔隙度大于 30%,渗透率为 $1\ 200 \times 10^{-3} \sim 1\ 700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油气运移较快。

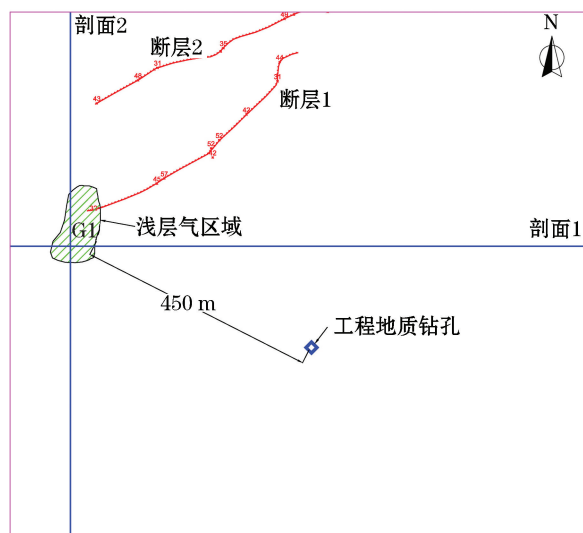


图 12 浅层气和断层的分布特征

Fig.12 Distribution characteristics of the shallow gas and the faults

因此,可推断剖面中的异常区域为浅层气反射,而大规模的声学空白需要相对较多的气体持续补充才能维持其形态^[22]。浅层气有可能来源于深部地层,沿着断层向上迁移,近年来随着气体压力增大而呈柱状突破地层阻力向上运移至海底以下 15 m,遇到海底表层淤泥质黏土层,气体压力与地层阻力平衡,在浅部地层中形成柱状浅层气,同时浅层气沿地层横向迁移,由于气体压力较小未能连片,形成分散分布的空白弱反射。

4 结 论

通过分析含气地层的物理性质以及浅层气在不同地震属性剖面上的特征,提出了利用多种地震属性综合识别浅层气的方法,并结合具体工程识别圈定了浅层气的分布特征,得到如下结论:

1) 地层中含有浅层气时,气体饱和度增加,地层的密度和声波速度均会降低。

2) 从振幅、瞬时相位、瞬时频率、瞬时品质因子四种属性方面分析了声学剖面上的异常区域:在振幅剖面上表现为弱反射、波形反射、同相轴下拉,在瞬时相位剖面上表现为相位扰动,在瞬时频率剖面上表现为相对低频,在品质因子剖面上表现为品质因子相对较差。

3) 通过工程地质钻孔资料、前期地质调查资料、断层等特征推测声学地层剖面上异常区域为浅层气,浅层气来源于深部地层,沿断层向上迁移至海底表层聚集成浅层气。

参考文献(References):

- [1] 宋召军, 张志珣, 刘立. 南黄海海底地质灾害因素的识别[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(4): 8-11. SONG Z J, ZHANG Z X, LIU L. Identification of geological hazards in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2003, 19(4): 8-11.
- [2] 尚久靖, 沙志彬, 梁金强, 等. 南海北部陆坡某海域浅层气的声学特征及其对水合物勘探的指示意义[J]. 海洋地质动态, 2013, 29(10): 23-30. SHANG J J, SHA Z B, LIANG J Q, et al. Acoustic reflections of shallow gas on the northern slope of South China Sea and implications for gas hydrate exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(10): 23-30.
- [3] 王勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 含浅层气砂土的赋存特征及其非饱和参数预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1945-1950. WANG Y, KONG

- L W, GUO A G, et al. Occurrence characteristics and unsaturated parameters prediction of shallow gassy sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 1945-1950.
- [4] WHELAN N T, COHMEN J M, SUHAYDA J N, et al. Acoustical penetration and shear strength in gas-charged sediment[J]. *Marine Geotechnology*, 1997(2): 147-159.
- [5] 王海平, 张伟, 李春雷, 等. 海底浅层地质灾害的高分辨率地震识别技术[J]. *海洋科学*, 2014, 38(7): 103-109. WANG H P, ZHANG W, LI C L, et al. High resolution seismic identification of seafloor shallow geological hazards[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(7): 103-109.
- [6] 顾兆峰, 张志珣, 刘怀山, 等. 南黄海西部地区浅层气的浅部埋藏地质背景[J]. *海洋科学*, 2008, 32(7): 46-51. GU Z F, ZHANG Z X, LIU H S, et al. Shallow geological background of shallow gas in the western South Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(7): 46-51.
- [7] 杨肖迪, 马瑞民, 罗小桥, 等. 海底浅层气探测识别方法研究[J]. *海岸工程*, 2020, 39(3): 187-195. YANG X D, MA R M, LUO X Q, et al. The research of detecting and identifying method for seabed shallow gas[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 39(3): 187-195.
- [8] 杨进, 张百灵, 周波. 深水浅层气地质灾害声波识别预测技术[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(1): 143-146. YANG J, ZHANG B L, ZHOU B. Geological disaster acoustic wave identification and prediction technology of deep-water shallow gas[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(1): 143-146.
- [9] 顾兆峰, 张志珣, 刘怀山. 海底浅层圈闭与浅层气地震反射特征对比[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(3): 115-122. GU Z F, ZHANG Z X, LIU H S. Contrast between traps at the shallow sub-bottom depth and the seismic reflection features of shallow gas[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(3): 115-122.
- [10] 闫章存, 刘燕平, 曲伟, 等. 辽东湾葵花岛构造区浅层气分布特征、成因探讨及工程影响[J]. *海岸工程*, 2007, 26(3): 1-10. YAN Z C, LIU Y P, QU W, et al. Distribution characteristics and formation causes of shallow gas in the Kuihuadao Structure area of Liaodong Bay and its impact on the engineering[J]. *Costal Engineering*, 2007, 26(3): 1-10.
- [11] WOODSIDE J M, MODIN D I, IVANOV M K. An enigmatic strong reflector on sub-bottom profiler records from the Black Sea-the top of shallow gas hydrate deposits[J]. *Geo Marine Letters*, 2003, 23: 269-277.
- [12] 雷宛, 肖宏跃, 邓一谦. 工程与环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 19-27. LEI W, XIAO H Y, DENG Y Q. Principle of engineering and environmental geophysical exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 19-27.
- [13] 侯月明, 李熙盛, 鲁全贵, 等. 频谱衰减属性分析在消除浅层气影响中的研究与应用[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(2): 96-99. HOU Y M, LI X S, LU Q G, et al. Research and application of spectrum attenuation attribute analysis in eliminating the influence of shallow gas[J]. *Journal of petroleum and natural gas*, 2013, 35(2): 96-99.
- [14] SAGER W W, LEE C S, MANDONALD I R, et al. High frequency near bottom acoustic reflection signature of hydrocarbon seeps on the Northern Gulf of Mexico continental slope[J]. *Geo-Marine Letters*, 1999(18): 267-276.
- [15] 胡高伟. 南海沉积物的水合物声学特性模拟实验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010. HU G W. Experimental study on acoustic responses of gas hydrates to sediments from South China Sea[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020.
- [16] DANIEL L O, ANA G G, DAN M, et al. High resolution surveys for geohazards and shallow gas: NW Adriatic (Italy) and Iskenderun Bay (Turkey)[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2005, 26(2): 247-266.
- [17] 牟永光, 陈小红, 李国发, 等. 地震数据处理方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 19-22. MOU Y G, CHEN X H, LI G F, et al. Seismic data processing method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 19-22.
- [18] 李传辉. 含水合物地层地震波衰减特性及衰减系数估计方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. LI C H. Seismic wave attenuation in hydrate-bearing sediments and the estimates of attenuation coefficient [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [19] 邹大鹏, 吴百海, 卢博. 海底沉积物声速经验方程的分析和研究[J]. *海洋学报*, 2007, 29(4): 43-50. ZOU D P, WU B H, LU B. Analysis and study on the sound velocity empirical equations of seafloor sediments[J]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(4): 43-50.
- [20] 龙建军, 李赶先. 海底沉积物声速与物理性质的理论关系[J]. *声学学报*, 2015, 40(3): 462-468. LONG J J, LI G X. Theoretical relations between sound velocity and physical-mechanical properties for seafloor sediments[J]. *Acta Acoustic*, 2015, 40(3): 462-468.
- [21] 邹大鹏, 吴百海, 卢博, 等. 海底沉积物声学物理力学性质聚类分析研究[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(5): 12-17. ZOU D P, WU B H, LU B, et al. Studies on clustering analysis of acoustic and physical-mechanical properties of seabed sediments[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(5): 12-17.
- [22] 顾兆峰, 刘怀山, 李刚, 等. 南黄海西部地区浅层气成因[J]. *天然气工业*, 2009, 29(1): 26-29. GU Z F, LIU H S, LI G, et al. Genesis of shallow gas in the western area of the South Yellow Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(1): 26-29.

Research on Application of Seismic Attribute Analysis in Identification of Subsea Shallow Gas

YANG Xiao-di^{1,2}, CHUN Ming-hao^{1,2}, LUO Xiao-qiao^{1,2}, YAO Zhi-guang^{1,2}

(1. *CNPC Research limited company of Engineering Technology*, Tianjin 300450, China;

2. *CNPC Key Laboratory of Marine Engineering*, Tianjin 300450, China)

Abstract: The accumulation of subsea shallow gas in the strata can reduce the strength of the sediments and/or form high pressure gas bags, which can endanger the marine engineering constructions. It is, therefore, of great significance to identify the distribution of the subsea shallow gas in the working area. If the sediments contain shallow gas, their physical mechanical properties could be changed and the acoustic waves during the propagation could be transformed. The seismic attribute analysis can use multiple attribute parameters of the acoustic waves and perform the identification and analysis of the shallow gas from multiple dimensions. In view of the acoustic stratigraphic profile data in the study area, four types of seismic attributes, i.e. amplitude, instantaneous phase, instantaneous frequency and quality factor, are used to identify and analyze the shallow gas. Based on the characteristics such as chaotic weak reflections, lineups widening, lineups pulling-down, high frequency missing, relatively poor quality factor, and so on, the reflections of shallow gas are identified in the acoustic stratigraphic profiles. It is found that the subsea shallow gas in the study area shows a column-like longitudinal distribution, is partially overlapped with the faults and ends in the subsea surface clay layer. This gas may possibly be accumulated by migrating along the faults from the deep part to the shallow part.

Key words: subsea shallow gas; acoustic stratigraphic profiles; seismic attributes; high frequency missing; quality factor

Received: July 22, 2021