

冯 鑫,张树林,范洪耀,等. 地震平点技术与应用进展[J]. 海洋地质前沿,2019,35(6):1-11.

# 地震平点技术与应用进展

冯 鑫,张树林,范洪耀,贾建忠,饶 湖

(中海油研究总院有限责任公司,北京 100028)

**摘 要:**利用平点技术进行地震勘探虽然经历了 50 多年的发展历程,但是国内外尚缺乏对平点技术与应用进展的系统分析。通过对平点技术的基本原理、平点识别方法、平点技术应用进展及应用“陷阱”进行全面的调研与梳理认为,不同流体纵波阻抗的差异是产生平点反射的基本条件;水平反射与 AVO 振幅异常突变处吻合并且具有统一的深度值,是烃类平点最重要的判别标准;通过地震反射特征,结合共等值线抽道集叠加技术和基于信号强化处理的平点增强技术等,可以提高平点的识别效果;地震资料产生的假象、非储层因素导致的平点假象以及流体界面由于速度和压力的变化都会导致平点“陷阱”的产生。研究指出,加强地质与地球物理综合分析,进一步提高地震资料的保真度、信噪比和分辨率,加强与其他烃类检测方法的综合应用及大力发展多波多分量地震技术在平点勘探中的应用是平点技术的发展趋势,未来其应用必然会更加广泛。

**关键词:**平点技术;判别标准;识别方法;应用进展;烃检陷阱;发展趋势

中图分类号:P744

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.06001

## 0 引言

众所周知,油气勘探开发投资成本大,尤其是在深水、深层、复杂地表条件下钻井成本更高。用地震方法预测储层含油气性、油气分布范围以及落实油气储量,可以大大节约钻井费用,提高勘探成功率以及开发经济性。在这种情况下,多种直接烃类检测方法的提出与应用取得了显著的成效,在全球发现了一批规模较大的油气藏。20 世纪 60 年代末出现的亮点技术,就是利用地震振幅信息直接预测油气藏,并在墨西哥湾油气勘探中

取得了成功<sup>[1]</sup>,在业界引起强烈反响。然而多年的勘探实践证明,单纯利用亮点技术预测油气具有一定的多解性,振幅亮点与地震平点的同时出现,大大提高了油气预测的可靠性。此后平点技术越来越受到重视,逐渐演变为一种实用的烃类检测技术,可以有效地降低油气预测的多解性,提高勘探成功率。

作为直接烃类检测方法,平点技术为储层含油气性预测以及流体界面的识别提供了直接而有效的证据。随着全球油气勘探程度的不断提高,地震采集、处理技术不断进步,三维地震资料的保真度、分辨率和信噪比有了很大的改善,为平点技术的应用与发展提供了有利条件。地震平点勘探经历了 50 多年的发展历程。国外学者就地震平点反射产生的岩石物理基础以及平点代表流体界面的判别标准进行了比较详细的分析<sup>[2-4]</sup>,在油气勘探中取得了显著的应用成效,但同时也存在很多平点应用“陷阱”。平点技术在国内的研究与应

收稿日期:2019-01-11

基金项目:国家“十三五”科技重大专项“非洲重点区油气勘探潜力综合评价”(2017ZX05032-002)

作者简介:冯 鑫(1986—),男,硕士,工程师,主要从事海外油气勘探综合地球物理研究方面的工作。E-mail:fengxin3@cnoc.com.cn

用起步较晚,近30年来先后发现了一批规模较大的油气藏。

笔者对平点技术的基本原理以及平点代表流体界面的判别标准进行了分析,在此基础上阐述了地震平点的识别方法,总结了平点技术在烃类检测中的应用及“陷阱”,最后讨论了平点技术的发展与应用面临的瓶颈问题及未来发展趋势。

## 1 平点技术基本原理

### 1.1 基本原理

由于油、气、水岩石物理性质的差异,形成重力分异作用,在油气藏内部的油气水分界面通常是一个水平面,在地震剖面上表现为一条水平产状的反射波同相轴。尤其是上覆地层倾斜时,在倾斜面层间出现的平点反射,更能代表油气的存在。平点技术就是利用流体接触面产生的水平反射特征识别气油界面、气水界面和油水界面,进而确定油气分布特征等<sup>[5]</sup>。不同流体之间由于速度和密度不同导致的纵波阻抗的差异是产生平点反射的基本条件。一般来说,流体界面的反射系数越大,越容易产生平点。

此外,地层倾角、油气层厚度的变化与平点的产生密切相关。地层倾角的变化对平点反射的产生具有双重影响。一般来说,地层倾角越小,产生平点反射的横向距离就越大,对横向分辨率的要求就越低,更容易产生平点反射;再是,由于平点反射同相轴与地层同相轴夹角过小,导致平点反射可能会“隐藏”到地层反射中,增加了平点的识别难度。相反,地层倾角越大,产生平点反射的横向距离就越小,对横向分辨率的要求就越高,增加了平点反射的识别难度;另一方面,由于平点反射同相轴与地层同相轴夹角过大,平点反射更容易在地层反射中凸显出来。因此,只有特定范围内的地层倾角才有利于平点反射的产生。总体来说,对于边水型油气藏,油气层厚度越大,平点反射的横向宽度越大,这种情况下,对地震横向分辨率和纵向分辨率的要求就越低,自然就更容易产生平点。而底水型油气藏,油气层的厚度与平点的横向宽度没有直接的关系。

根据含不同流体砂岩与泥岩纵波阻抗差异的不同,平点一般可以分为3种类型,即亮点型、暗点型和极性反转型平点(图1)。图1示意图是按照零相位情况下讨论的。

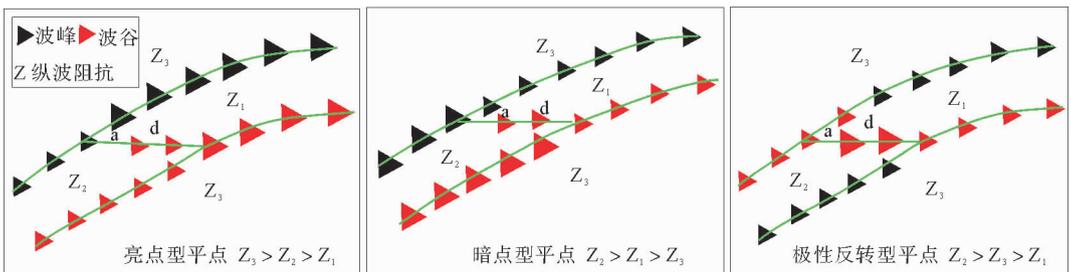


图1 不同流体与围岩介质之间阻抗差异产生的平点类型示意图(据文献[3]修改)

Fig. 1 Different flat spots caused by different impedance between fluids and surrounding rock media (modified from reference [3])

(1)亮点型平点 含水砂岩纵波阻抗( $Z_2$ )低于围岩(泥岩)纵波阻抗( $Z_3$ ),含油(气)砂岩的纵波阻抗( $Z_1$ )会进一步降低,总体表现为 $Z_3 > Z_2 > Z_1$ 。这种情况下,砂岩表现为上波峰、下波谷,高部位含油(气)砂岩振幅增大。这是典型的顶、底高振幅零相位亮点反射。当油(气)层具有一定的厚度和地层倾角时,使得其顶、底反射能被分开,在含油(气)砂岩和含水砂岩之间的流体接触面就会产生平的强振幅波谷反射特征。

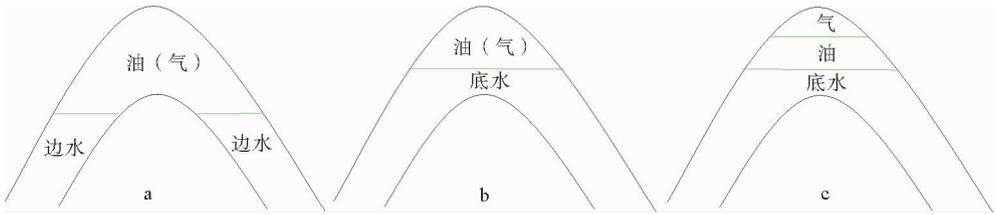
(2)暗点型平点 含水砂岩的纵波阻抗( $Z_2$ )比围岩(泥岩)的纵波阻抗( $Z_3$ )高,砂岩表现为上波谷、下波峰。当油(气)取代了砂岩孔隙中的水,其纵波阻抗( $Z_1$ )会降低,总体表现为 $Z_2 > Z_1 > Z_3$ ,上、下界面处的纵波阻抗差也会降低甚至接近,高部位含油(气)砂岩表现为暗点特征。当油(气)层具有一定的厚度和地层倾角时,在含油(气)砂岩和含水砂岩之间的流体接触面会产生平的强振幅波谷反射特征。

(3)极性反转(或相位反转)型平点 由于油气饱和度增加,含油(气)砂岩的纵波阻抗( $Z_1$ )降低,使得纵波阻抗从高于围岩(泥岩)变为低于围岩(泥岩),总体表现为 $Z_2 > Z_3 > Z_1$ ,从而产生含油(气)砂岩顶、底界面极性反转的情况。当油(气)层具有一定的厚度和地层倾角时,在含油(气)砂岩和含水砂岩之间的流体接触面则会产生相位反转的水平波谷反射特征,平点处振幅较强。

平点特征受到多种因素控制,其中沉积地层年代及埋深的影响最为明显。地层的纵波阻抗会随着埋深和年代的增加而增大。同时随着压实作用的增强,使得泥岩纵波阻抗增大速度小于砂岩阻抗的增速。一般来说,随着地层年代的增加和埋深的增大,平点的表现形式从亮点型、相位反转型到暗点型过度<sup>[3]</sup>。也就是说,浅层碎屑岩流体界面基本上表现为亮点型平点反射特征,中深层流体界面一般表现为亮点型或相位反转型平点反射特征,超深层流体界面往往表现为暗点型平点

反射特征。但有时也会有例外,笔者认为,如果地层年代较老,但是埋深较浅,也可能产生亮点型平点。同样,如果地层年代较新,但是埋深很大,也会产生极性反转或者暗点型平点反射。

对于边水油(气)藏,油(气)柱的高度大于储集层的厚度,这时油(气)充满圈闭的高部位,水围绕在油(气)藏的四围,在地震剖面上,流体接触面会产生短轴型平点特征(图2)。在地震资料分辨率允许的条件下,通过平点的横向长度与地层倾角的大小,可以预测接触面处油(气)层的厚度。对于底水油(气)藏,油(气)柱的高度小于储集层的厚度,油(气)藏的下部全部为水,流体接触面会表现为长轴型平点特征。当顶部含气、中部含油、底部含水时,由于气层与油层、油层与水层纵波阻抗的差异,会产生2条平行的双轴型平点特征。对于底水油气藏,通过识别平点的平面分布范围,可以预测油(气)层的平面分布特征及含油(气)面积。



(a)边水油气藏平点示意图;(b)底水油气藏平点示意图;(c)底水油气藏双平点示意图

图2 根据油气藏与水的分布关系划分的平点类型

Fig. 2 Different types of flat spots according to the distribution of oil, gas and water

## 1.2 平点反射指示流体界面的判别标准

Blom等<sup>[2]</sup>就地震平点反射代表流体界面的判别标准进行了比较详细的论述。Brown<sup>[3]</sup>、Simm等<sup>[4]</sup>进行了归纳总结与补充。上述学者的观点已被广泛认可,并应用于实际油气勘探中,已经取得了较好的勘探成效。总体来说,如果水平同相轴具有以下几种特征,那么这种水平同相轴就极有可能代表着不同流体的界面,具体包括:①在储层内部产生的流体反射。②与可能的多次波反射具有不同的倾角。③具有代表研究区流体响应的AVO特征,如振幅随偏移距增大而增强的3类AVO特征。④水平反射位于构造底部,并且

与反射振幅异常突变一致。笔者认为该观点比较片面。水平反射的位置与油气藏类型、油(气)柱高度及油气充满度有很大关系。例如背斜圈闭油气藏,如果该构造内全部被油气充满,那么水平反射的位置,即油(气)水界面,与构造溢点位置一致。如果只是在高部位充注了一些油气,其水平反射位置则位于构造高部位的油(气)水界面处。⑤多个规律一致地平点反射,比局部单一出现的平点更能代表流体界面。对于同一油藏单元,不同位置处往往会出现多个平点反射,并且平点的位置与构造圈闭线吻合效果较好,这种情况下的平点反射更能够代表流体界面。单一出现的平点响应往往没有明确的地质意义。

## 2 地震平点识别方法

目前识别地震平点的方法有很多种,大体上可以分为直接识别和间接识别两大类。直接识别方法是通过地震反射特征识别平点最真实而有效的方法;间接识别方法是通过一定的技术手段提高地震平点的识别效果,从而提高对流体界面识别能力。共等值线抽道集叠加技术和基于信号强化处理的平点增强技术均属于间接方法。需要指出,每一种方法都有其优缺点,在实际应用中应基于地质条件、岩石物理分析以及地震资料分析合理选用。

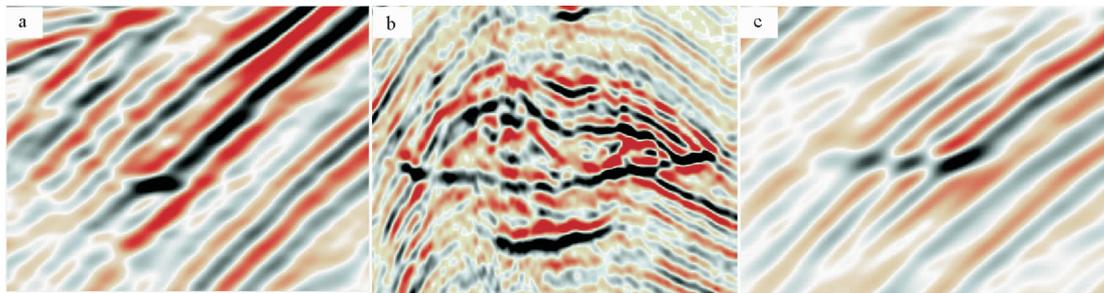
### 2.1 直接识别方法

地震反射特征直接识别平点的依据主要包括几何外形、振幅及相位特征、AVO 以及与构造吻合程度等方面。

(1)从几何外形上判断,平点在地震剖面中

一般表现为与倾斜地层具有明显夹角的水平连续同相轴反射,具有短轴(图 3a)或长轴状(图 3b)的几何特征。如果储层较薄,由于薄互层之间的调谐效应影响,可能出现断续的水平反射特征(图 3c)。受到含油气后低速效应的影响,有时会表现出中间下凹、两端上翘的“非水平”几何特征。总体来说,通过水平轴的剖面特征,可以直观地识别出平点。此外,结合几何类地震属性,如沿层最大方差属性,可以较好地识别平点的平面分布特征。

(2)从地震振幅及相位特征判断,平点可以表现为顶部伴生亮点或者暗点的水平反射特征,以及边部出现相位(极性)反转的水平反射特征。总体来说,水平同相轴的反射振幅较强,与下伏地层的地震反射具有比较明显的振幅差异。对于亮点型或相位反转型平点来说,从剖面特征上分析,一般情况下,同相轴的水平延伸范围与上覆强振幅边界匹配较好。



(a)短轴平点;(b)长轴平点;(c)薄互层调谐产生的断续平点

图3 基于地震剖面几何外形识别的平点类型

Fig. 3 Different types of flat spots according to geometric shape in seismic section

(3)从 AVO 特征方面判断,代表流体界面的地震平点通常会出现在 AVO 属性异常突变处。如尼日尔三角洲盆地某深水油气藏,在远道叠加剖面上,构造低部位强振幅突变处,出现了平点反射,极有可能代表着油水界面。

(4)从平面分布特征上来判断,可靠的平点,一般呈平面连续分布,与构造等值线吻合程度较高,同时,与强振幅的平面下倾边界吻合程度较好。通过地震几何类属性、振幅类属性、AVO 属性的综合应用,对识别平点的平面分布特征具有很好的效果。结合与构造等值线的匹配关系,可以推测平点代表流体界面的可靠程度。

地震反射特征直接识别方法具有一定的局限性。不是所有的流体界面在地震剖面上都会表现出平点反射特征。当地震分辨率无法识别平点反射时,该方法不可用。仅能够在局部识别出“疑似”平点反射时,这种方法的应用效果一般。

### 2.2 间接识别方法

(1)共等值线抽道集叠加技术。赵争光等<sup>[6]</sup>针对在地震剖面上难以识别无显著地震振幅响应的油气水界面这一问题,提出了基于三维地震波形叠加的共等值线抽道集叠加技术。在油气充注的构造中,当油气水界面为水平界面时,

地震振幅异常一般会沿着等深线分布,即地震振幅异常等值线与构造等值线吻合。将构造等值线上的地震道叠加,油气效应将叠加放大,同时地层影响和噪声将被消除,从而识别出无显著地震响应的油气水界面。该技术方法在北海上侏罗统至下白垩统的背斜气藏以及塔里木盆地构造一岩性复合圈闭气藏得到很好的应用,

并得到钻井证实。运用该方法在尼日利亚某深水构造圈闭内预测了双平点的存在。如图 4 所示,通过共等值线叠加之后,发现在 2 310 m 和 2 445 m 处,分别出现了振幅和频率同时突变,而在地震剖面上对应的深度出也可以识别出 2 个平点的存在,因此推测该构造发育“上气下油”的油气藏特征。

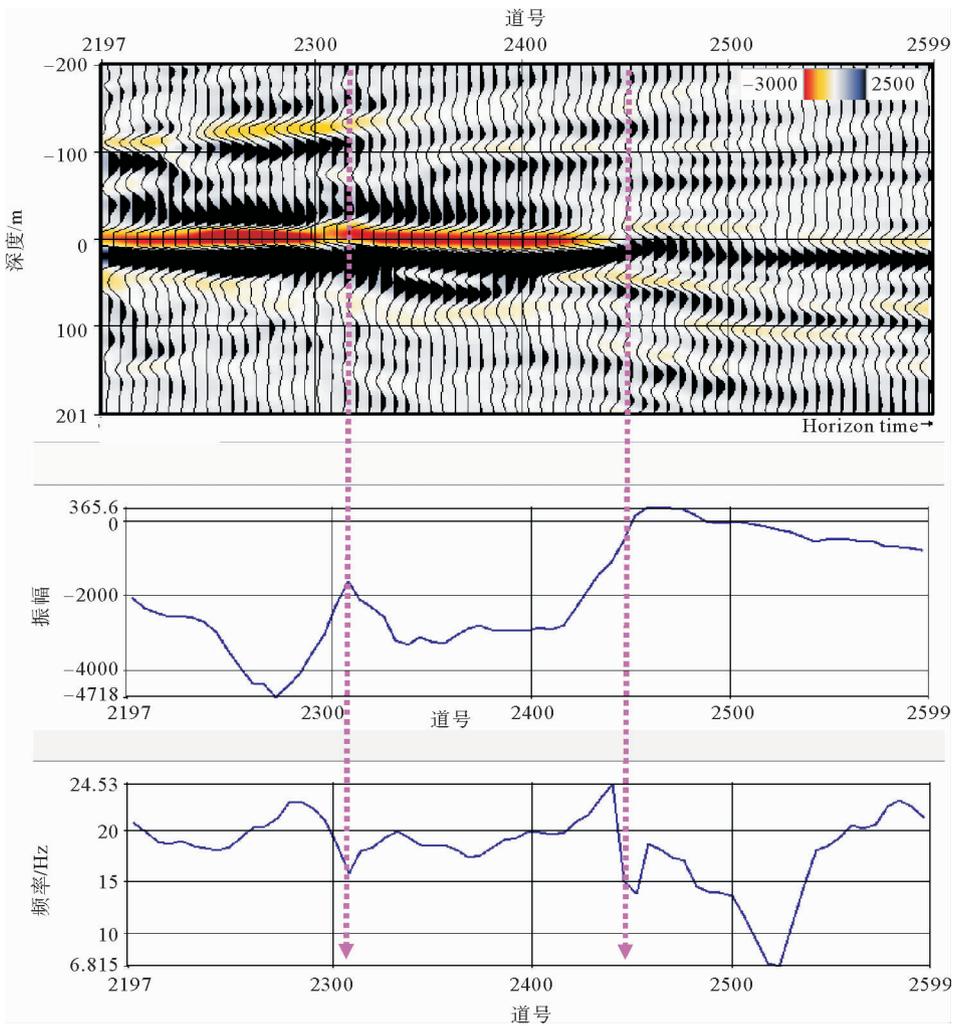


图 4 通过共等值线叠加以得到的振幅与频率变化剖面

Fig. 4 Common contour binging stacking analysis

该项技术具有一定的局限性。从技术原理上来看,当流体界面是水平的,并且与构造吻合较好时,该方法应用效果较好。但是当流体界面不是水平的,或者流体界面是水平的,但与构造等值线不吻合,或者单一圈闭油气藏被断层切割为多个断块油气藏的情况时,该技术方法已经不再适用。

(2)基于信号强化处理的平点增强技术。李子顺等<sup>[7]</sup>和 J. R. 特里贝克等<sup>[8]</sup>通过不同的技术手段,将常规地震剖面中难以识别的平点反射进行了平点增强处理,提高了直接检测油气的能力。李子顺等<sup>[7]</sup>通过对叠加速度的优选,弱化倾斜地层反射能量,加强平反射能量,结合滤波及其他修

饰性处理手段,形成准平点地震剖面,进一步将准平点地震剖面与常规地震剖面叠合,形成平点地震剖面,从而提高平点的识别效果。J. R. 特里贝克等<sup>[8]</sup>提出,在自定义的目标区域内,优选合适的倾角以及距离等参数,进行叠加处理,减少背景噪音,强化平点反射特征,从而提高对流体界面的识别能力。

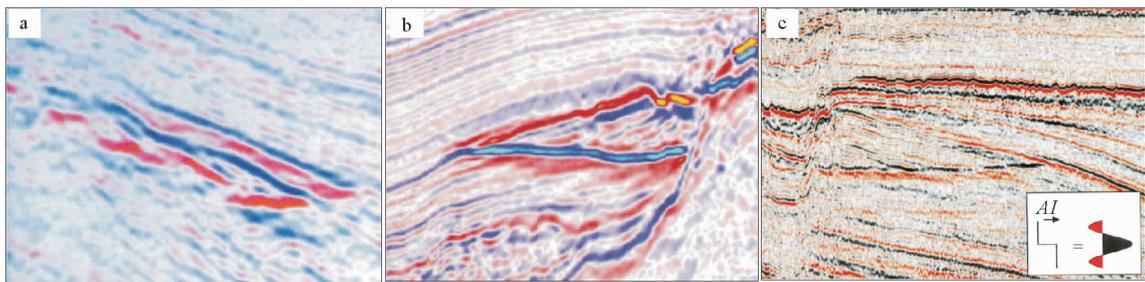
此类技术同样具有一定的局限性。从方法原理及实现过程来看,李子顺等<sup>[7]</sup>提出的方法在叠加速度的选择以及修饰性处理过程中,会改变原始地震数据的频率、相位等信息,得到的平点地震剖面仅能定性的判断平点的存在。同样,在 J. R. 特里贝克等<sup>[8]</sup>提出的方法中,定义不同的目标区域形状及尺寸、选择不同的倾角以及距离等参数对叠加结果都会产生很大的影响。如果参数选取不合适,信号强化后的地震剖面很可能与原始地震信息相差很大,平点的横向距离有可能被放大,结果不可靠。通过此类技术进行地震平点解释、含油边界预测以及油层厚度计算时会产生一定的误差。

### 3 平点技术的应用及未来发展方向

#### 3.1 平点技术应用进展

平点技术在烃类检测中的应用经历了 50 多年的发展历程。20 世纪 70 年代,由于数字地震、水平叠加技术和偏移技术的发展,地震资料的分

辨率和信噪比不断提高,平点技术开始应用。这时期西方石油公司在美国墨西哥湾等地区运用平点技术寻找油气,取得显著的效果,引起全球油气勘探者广泛关注。Backus 和 Chen<sup>[1]</sup>首次比较全面地论述了平点勘探的岩石物理基础以及对地震系统的要求,并提出通过对平点的识别和平面绘制,预测储层的发育范围以及估算储层厚度。Blom 和 Bacon<sup>[2]</sup>就地震平点反射代表流体界面的判别标准进行了比较详细的论述,限于篇幅不再赘述。国外发表了大量的平点勘探案例<sup>[9-15]</sup>。如墨西哥湾某亮点气藏,其上部薄层砂岩下倾边界出现中等强度的平点反射,下部厚砂岩底界面出现了明显的强振幅的短轴平点反射(图 5a),说明砂岩厚度与平点反射有直接的关系。此外,印度尼西亚某气藏、埃及近海东尼罗河三角洲上新统气藏、奥地利维也纳上新统气藏以及挪威北海海姆达尔油田的流体界面都出现了典型了亮点型平点反射特征。马来西亚沙巴州近海某大型气藏,其流体界面表现为典型的极性反转的长轴平点反射特征(图 5b)。另外,墨西哥湾、澳大利亚西北陆棚区等气藏均出现了极性反转型的平点反射特征。挪威海上某侏罗系气田,其流体界面处表现为强振幅的长轴平点反射,平点上部的流体为弱振幅特征,为典型的暗点型平点(图 5c)。荷兰某二叠系气田中出现了亮点型平点,深度为 2 850 m,平均孔隙度为 18%。这说明只要物性条件满足,随着地震资料的分辨率和信噪比的进一步提高,平点勘探的层系可以覆盖至更老的地层中。



(a)亮点型平点;(b)极性反转型平点;(c)暗点型平点

图 5 国外典型油气藏平点剖面(a,b 据文献[3]; c 据文献[4])

Fig. 5 Typical oil and gas reservoir flat spot profile (a, b from reference [3]; c from reference [4])

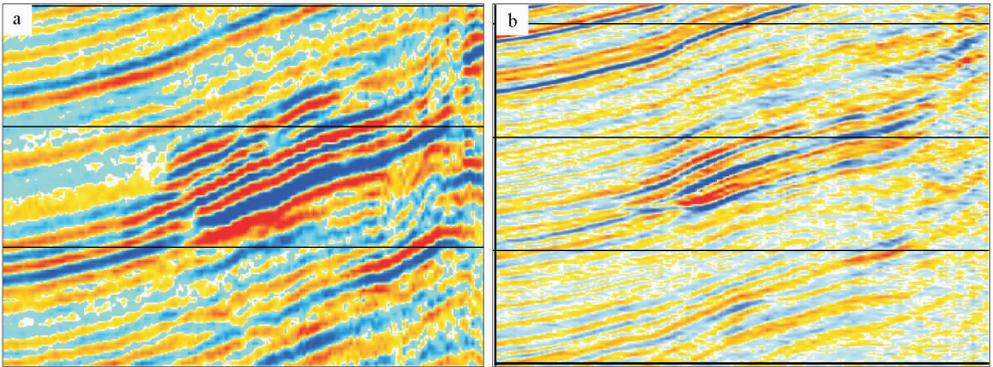
国内平点勘探的历程比国外晚了约 20 年。20 世纪 90 年代,中国大力发展高分辨率地震勘

探技术。地震分辨率的提高对平点技术的应用与推广起到了极大的推动作用。何正怀和马传

东<sup>[16]</sup>首次提及了准格尔盆地夏 18 井区断层遮挡的倾斜断块气藏,其高产层底部出现明显的平点响应。傅妮莉等<sup>[17]</sup>首次提出在海上油气田应用平点技术预测油气水界面及含油气平面分布,为储量计算提供有利条件。张鸿烈等<sup>[18]</sup>从高精度三维地震速度谱中获得与地下油气藏密切相关的平点信息,结合其他地质与地球物理条件,设计探井井位,提高钻探成功率。秦秉让<sup>[19-20]</sup>首次提出利用平点技术在寒武系碳酸盐岩地层中预测油气,并通过与构造及烃源岩的匹配关系推测平点可能为气油界面或气水界面的波阻抗反应。何汉漪<sup>[21]</sup>应用高分辨率地震的亮点加平点技术,在原认为是空构造的 LD8-1 构造发现了高产天然气。张德林<sup>[22]</sup>提出,二连盆地阿尔善浅层气藏由于背斜翼部储层倾角变小、气柱变低、断裂活动使储层构造复杂化,造成阿尔善平点表现为短轴型、弱反射型和扭曲型等特征,这与平点反射波和储层顶界面反射波的相互干涉有关。张德林<sup>[23]</sup>在研究云南陆良盆地大嘴子背斜构造时,发现了独

特的双层平点反射特征,认为分别是气油界面和油水界面的反射,说明大嘴子背斜构造是具有油环的天然藏。此后十几年,平点技术分别在东濮凹陷中央隆起带濮城构造<sup>[24]</sup>、吐哈盆地雁木西低幅背斜<sup>[25]</sup>、花沟地区东营组鼻状构造<sup>[26]</sup>、济阳坳陷古近十新近系中层砂岩气藏<sup>[27]</sup>、淮北凹陷柳疃地区鼻状构造<sup>[28]</sup>、吐哈盆地台北凹陷葡萄沟地区鼻隆构造<sup>[29]</sup>、柴达木盆地狮子沟弧形背斜<sup>[30]</sup>、莺歌海盆地中深层超压带<sup>[31]</sup>等得到较好地应用,发现了一批油气藏。

前已述及地震资料的分辨率对平点识别有极大的影响。以莺歌海盆地为例,早期的常规三维地震资料分辨率较低,无法在剖面中观测到明显的平点反射(图 6a),限制了平点技术的应用。随着地震分辨率的提高,出现了典型的平点反射特征(图 6b)。基于平点技术有效预测了气层及气水界面,钻探成功发现了气层。并且应用平点技术圈定了含气范围,有效地减少了评价井数量,节约了勘探成本。



(a)常规剖面,无平点反射;(b)高分辨率剖面,出现平点反射

图 6 莺歌海盆地不同类型地震剖面对比

Fig. 6 Comparison of different types of seismic profiles in Yinggehai Basin

### 3.2 平点技术应用的“陷阱”

虽然通过平点技术的应用在国内外发现了一大批油气藏。但是也有不少失败的案例。利用平点技术进行烃类检测时,在很多的“陷阱”。总结原因大致可以归为 4 类。

(1)岩石物理条件或资料条件不满足平点技术应用的基础。如果不同流体之间的纵波阻抗差异太小,在流体界面处产生微弱的反射界面,在实

际地震资料中基本无法观测到。此外,圈闭规模过小,或者储层厚度过小、以及地层倾角过大等,也不利于平点反射的产生和识别。地震资料的横向分辨率和纵向分辨率始终是有限的,因此,有些流体界面在地震剖面上无法表现出“可见”的平点反射特征,但这并不代表没有流体界面,需结合其他烃类检测技术或者提高分辨率的方法进行储层含油气性及流体界面的综合预测。

(2)地震资料产生的平点假象。由于地下波

场的复杂性,常规采集的地震剖面往往会出现反射畸变、多次波、绕射波等的干扰,如果在处理环节没有很好地加以消除,则会在地震剖面中保留这些噪音,尤其是20世纪90年代以前的地震资料,噪音的存在往往会产生一些假的平点反射,影响流体界面的判断。何正怀和马传东<sup>[16]</sup>认为准格尔盆地地质条件复杂,加之地震绕射波发育,很难应用平点及亮点技术预测油气。不过随着地震采集及处理技术的快速发展,地震资料的信噪比不断提高,高保真度、高信噪比、高密度三维地震资料的应用越来越普遍,极大地推动了平点技术的应用与发展。

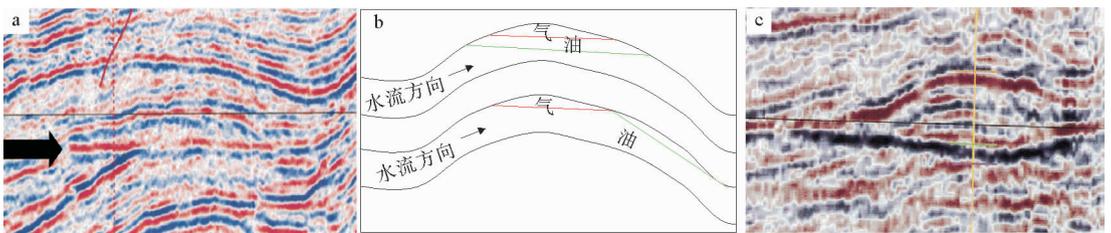
(3)非储层因素导致的平点假象。在地震剖面上出现的横切地层的平点反射同相轴并非都代表着流体界面,需要综合判断得出结论。煤层、火成岩等特殊岩性体由于反射系数的差异,也可能产生平点反射,与流体界面无关。有时平点同相轴代表着与流体无关的早期界面。如澳大利亚西北陆棚区的地震剖面中,识别出平点和伴生的亮点反射,实钻结果是干井,通过分析认为该平点指示成岩作用的古接触面(图7a),而不是流体界面<sup>[3]</sup>。Gluyas等<sup>[32]</sup>认为油气溢散后的残余圈闭一般具有较高的孔隙度,平点反射可能是由于孔隙单元中的油气抑制胶结作用产生的结果。Yal-iz等<sup>[33]</sup>认为也有可能是抑制残余流体界面附近的沥青化等其他成岩作用导致的。

此外,温度变化导致的矿物转化也可以产生非储层成因的平点响应。最典型的例子是Isaacson等<sup>[34]</sup>和Aram<sup>[35]</sup>介绍的Fylla平点。地震剖面上出现明显的平点反射以及振幅随偏移距增强的特征,但是钻井证实为泥岩。Christiansen等推测可能是由于非晶质蛋白石向石英转化,使得

岩相发生变化产生的结果<sup>[36]</sup>。

(4)有些情况下流体界面会出现“非水平”的假象。Blow等<sup>[37]</sup>分析认为,由于上覆岩层速度或压力横向的变化影响,会导致流体界面的地震响应倾斜,而不是水平的特征<sup>[37]</sup>。在静水条件下,油气藏中的油(气)水界面一般都是水平的。但是在动水条件下,如果水流方向是从地层上倾方向流向地层的下倾方向,则在净浮力与水动力的合力作用下,油(气)水界面会发生倾斜,使本来不具备圈闭条件的构造挠曲形成了圈闭,聚集油气后形成水动力油气藏(图7b)。这种油气藏最重要的特征有2点:①从剖面上看油(气)水界面是倾斜或弯曲的,呈悬挂式;②从平面上看,油(气)水边界与构造等值线相交<sup>[38]</sup>。前苏联索柯洛夫气藏和美国得克萨斯州韦特油田均出现了水动力因素导致的倾斜流体界面。Dennis等<sup>[39]</sup>通过构造、地震振幅与油水界面的综合分析认为,强振幅的范围相较于构造圈闭向N—W方向发生偏移,据此判断水动力梯度效应是引起该区流体界面不是水平而是倾斜的主要原因<sup>[39]</sup>。

当储层岩性在横向上由高孔、高渗至低孔、低渗渐变时,油水界面高度会向低孔、低渗岩性方向增加。而在某些特殊情况下,裂缝性储层和地层圈闭因为岩性变化造成的孔隙度和渗透率的化会使流体界面表现为“非水平”状态。如埃及近海尼罗河三角洲上新统气藏的气/水界面产生了向下弯曲的平点反射特征(图7c)<sup>[16]</sup>,这是由于中间含气砂岩厚度最大处的低速效应延长了地震波在气层内的旅行时,导致气层底界面中间下凹、两端上翘的“非水平”的假象,不过通过“非水平”同相轴的水平延伸范围与上覆强振幅边界匹配较好的特征,也可以推测该同相轴代表流体界面。



(a)古接触面产生的平点;(b)在水动力作用下形成的倾斜平点;(c)低速效应引起的非弯曲平点

图7 几种地震平点“陷阱”(a据文献[3];b据文献[41]修改;c据文献[16])

Fig. 7 Different types of flat spot illusion (a from reference [3]; b modified from reference [41]; c from reference [16])

### 3.3 平点技术未来发展方向

随着全球油气勘探程度的不断提高,待发现的油气藏的油气层厚度会越来越薄,圈闭幅度会越来越低、埋深会越来越深,导致平点技术对地震资料分辨率的要求越来越高。从利用平点技术进行流体检测时存在的“陷阱”来看,目前平点技术的应用与发展面临着一些瓶颈问题。首先是基础原理的研究有待进一步完善,缺乏定量分析的理论依据;其次是地震资料条件的限制,常规三维或二维地震资料很难达到高保真度、高信噪比、高分辨率的条件,极大地限制了平点技术的发展与应用;再者就是平点识别的技术方法比较单一,除了通过地震反射特征进行平点的直接识别外,目前没有形成以成熟理论基础为指导的通用技术方法。

对于推动平点技术的应用与发展,应该重视和加强以下4个方面的研究和应用:

(1)加强地质与地球物理综合分析。首先,应该深入研究平点技术的基本原理,形成一套可以推广应用的定量分析技术方法;其次,加强地质与地球物理的综合分析,以基于地质认识导向的平点技术的应用,可以排除一些由于构造、沉积现象等导致的非流体因素产生的平点反射假象,提高流体界面识别的准确性。

(2)通过先进的地震采集、处理及解释一体化技术,进一步提高地震资料的保真度、信噪比和分辨率。大力发展高密度、宽频带、宽方位地震采集技术<sup>[40-42]</sup>。对于海上地震勘探,发展具有转换波、对称采集、宽方位及长偏移数据等技术优势的OBC、OBN等技术。此外,大力发展高保真度和高信噪比的处理技术,可以有效地消除多次波,提高地震资料的信噪比,进而提高平点的识别效果。另外,发展基于平点强化的处理、解释技术,推动平点技术的发展与应用。

(3)加强与其他烃类检测方法的综合应用。加强AVO技术、敏感属性分析技术、高分辨率反演技术等与平点技术的综合应用。通过多种烃类检测方法,提高含油气性预测、流体界面预测的准确性,提高含油气面积预测的精度,降低预测的多解性。

(4)大力发展多波多分量技术<sup>[43-45]</sup>在平点勘

探中的应用。砂岩含油(气)后,纵波速度会降低,流体界面处纵波反射系数的差异,导致在纵波剖面中会产生平点反射;而横波速度不受流体的影响,因此在横波剖面中,流体界面是不会产生平点反射的。综合利用纵波、横波资料分析,如果仅在纵波剖面中出现平点反射,而横波剖面中没有平点反射,那么该平点反射代表流体界面的可靠性大大增强。如果在纵波剖面 and 横波剖面中均出现了平点反射,则可以认为该反射为不整合面等非流体界面造成的平点假象。基于多波多分量的平点技术可以大大提高流体界面预测的准确性,降低勘探风险,提高勘探成功率。

## 4 结论

作为直接烃类预测方法,平点技术在储层含油气性预测、油气水界面识别、含油气范围预测以及油气层厚度估算等方面起到了非常重要的作用,提高了全球油气勘探的成功率。本文对平点技术的基本原理以及平点代表流体界面的判别标准进行了分析。在此基础上阐述了地震平点的识别方法,总结了平点技术在烃类检测中的应用及“陷阱”,最后讨论了平点技术的发展与应用面临的瓶颈问题及未来发展趋势,得到如下结论:

(1)不同流体之间由于速度和密度不同导致的纵波阻抗的差异是产生平点反射的基本条件。根据纵波阻抗差异的不同,平点一般可以分为亮点型、暗点型和极性反转型平点;根据油气藏类型的不同,平点一般可以分为短轴型、长轴型和双轴型平点。

(2)具备代表流体响应的AVO特征(如振幅随偏移距增大而增强的3类AVO特征)、水平反射与构造低部位振幅异常突变处吻合较好、不同位置处的水平反射具有相同的深度,代表了平点反射指示流体界面最重要的3个判别标准。

(3)地震平点的识别方法可以分为直接识别方法和间接识别方法两大类。直接识别方法是通过地震反射特征识别平点最真实而有效的方法。间接识别方法包括共等值线抽道集叠加技术和基于信号强化处理的平点增强技术等,通过一定的技术手段提高平点的识别效果。

(4)国内外通过平点技术的应用,取得了较好

地成效,发现了一大批大、中型油气田。然而利用平点技术进行烃类检测时,也存在很多“陷阱”,如地震资料产生的假象、非储层因素导致的平点假象以及流体界面由于速度和压力的变化会出现“非水平”的假象等,在实际应用中应该充分考虑这些因素。

(5)对于推动平点技术的应用与发展,应该重视和加强以下4个方面的研究和应用:加强地质与地球物理综合分析;进一步提高地震资料的保真度、信噪比和分辨率;加强与其他烃类检测方法的综合应用及大力发展多波多分量技术在平点勘探中的应用。

#### 参考文献:

- [1] Backus M M, Chen R L. Flat spot exploration[J]. *Geophysical Prospecting*, 1975, 23(3): 533-577.
- [2] Blom F, Bacon M. Application of direct hydrocarbon indicators for exploration in a Permian-Triassic play, offshore the Netherlands[J]. *First Break*, 2009, 27(3): 37-44.
- [3] Brown A R. 三维地震数据解释[M]. 康南昌,赵玉光,柯宗强,等,译.北京:石油工业出版社,2015:115-138.
- [4] Simm R, Bacon M. 地震振幅解释与应用[M]. 高建虎,李胜军,马 龙,等,译.北京:石油工业出版社,2014:73-92.
- [5] 王永刚. 地震资料综合解释方法[M]. 北京:中国石油大学出版社,2012:232-238.
- [6] 赵争光,杨瑞召,马彦龙,等. 共等值线抽道集叠加识别油气水界面方法及其应用[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(4): 808-814.
- [7] 李子顺,徐有梅,吴清岭,等. 一种平点地震处理解释油气检测方法:02104927.0[P]. 2002-09-18.
- [8] 特里贝克 J R, 博恩赫斯特 J J, 巴斯比 M, 等. 增强三维地震解释中的平点的方法:201480002987.9[P]. 2015-10-21.
- [9] Clark V A. The effect of oil under in-situ conditions on the seismic properties of rocks[J]. *Geophysics*, 1992, 57(7): 894-901.
- [10] Cliff D C B, Tye S C, Taylor R. The Thylacine and Ceographe gas discoveries, offshore Eastern Otway Basin [J]. *Appea Journal*, 2004, 44(1): 441-462.
- [11] Francis A, Millwood H M, Mulholland P, et al. Real and relict hydrocarbon indicators in the East Irish Sea Basin [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1997, 124(1): 185-194.
- [12] Greenlee S M, Gaskins G M, Johnson M G. 3-D seismic benefits from exploration through development: An Exxon perspective[J]. *The Leading Edge*, 1994, 13(7): 730-734.
- [13] Luchford J. A view of amplitude fit to structure as a hydrocarbon-indicating attribute[J]. *First Break*, 2001, 19(7): 411-417.
- [14] Tilbury L A, Smith P M. Seismic reflection amplitude (dim spot) study over the Goodwyn Gas Field, Northwest Shelf, Australia[J]. *Exploration Geophysics*, 1988, 19(2): 179-183.
- [15] Wigger S T, Bailey J, Larsen M, et al. Ha'py Field; a Pliocene bright spot example from the Nile delta, Egypt [J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(1): 1827-1829.
- [16] 何正怀,马传东. 准噶尔盆地利用“亮点”找气的可行性[J]. *新疆石油地质*, 1989, 10(2): 14-23.
- [17] 傅妮莉,韩 林. 地震方法在海上油气田储量计算中的应用[J]. *天然气地球科学*, 1991(4): 186-192.
- [18] 张鸿烈,邓金华. 用地震速度谱信息寻找地下油气藏的方法[J]. *石油地球物理勘探*, 1996, 1(增刊2): 53-59.
- [19] 秦秉让. 黔南碳酸盐岩地震“亮点”、“平点”与“暗点”分析[J]. *贵州地质*, 1998, 10(2): 338-344.
- [20] 秦秉让. 贵州南部碳酸盐岩地震“亮点”与油气意义[J]. *贵州科学*, 1991, 9(2): 87-94.
- [21] 何汉漪. 海上高分辨率地震实例研究[J]. *地球物理学报*, 1999, 42(1): 11-13.
- [22] 张德林. 二连盆地阿尔善浅气藏的地震特征[J]. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(1): 107-118.
- [23] 张德林. 大嘴子气藏“平点”的倾斜产状与成因[J]. *石油地球物理勘探*, 2000, 35(5): 608-616.
- [24] 张云鹏,李 东,张新民,等. “平点反射”在濮城深层天然气滚动勘探中的应用[J]. *江汉石油学院学报*, 2000, 22(4): 21-22.
- [25] 王瑞英,汤新啼,宋承文. 烃类检测技术在吐哈盆地油气勘探中的应用[J]. *吐哈油气*, 2002, 7(3): 235-237.
- [26] 李红梅,李惠玲. 花沟地区天然气藏分布规律及地震反射模式[J]. *勘探地球物理进展*, 2004, 27(1): 45-49.
- [27] 王兴谋. 济阳拗陷浅、中层天然气藏地震预测技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(3): 322-327.
- [28] 尚 刚,白 钢,任瑞军. 淮北凹陷柳疃地区孔一段气藏及油气界面地震识别方法[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2005, 27(5): 569-573.
- [29] 刘护创,王劲松,韩 成. 台北凹陷葡萄沟地区岩性油气藏勘探技术[J]. *天然气工业*, 2007, 27(增刊A): 375-378.
- [30] 史晓辉,何亨华. 柴达木盆地一个可能的地震平点异常的解释与分析[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(4): 586-591.
- [31] 潘光超,裴健翔,周家雄,等. 莺歌海盆地中深层超压带气水界面平点特征分析[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(5): 42-46.
- [32] Gluyas J G, Robinson A G, Emery D, et al. The link between petroleum emplacement and sandstone cementation [C]// *Petroleum Geology of Northwest Europe: Proceedings of the 4th Conference*. London: Geological Society, 1993: 1395-1402.

- [33] Yaloz A, McKim N. The Douglas Oil Field, Block 110/13b, East Irish Sea[J]. Geological Society, 2003, 20(1): 61-75.
- [34] Isaacson E S, Neff D B. A, B AVO cross plotting and its application in Greenland and the Barents Sea[C]// Petroleum Geology of Northwest Europe; Proceedings of the 5th Conference. London: Geological Society. 1999: 1289-1298.
- [35] Aram R B. West Greenland versus Voring Basin: Comparison of two deepwater frontier exploration plays[C]// Petroleum Geology of Northwest Europe; Proceedings of the 5th Conference. London: Geological Society. 1999: 315-324.
- [36] Christiansen F G, Bojesen-Koefoed J A, Chalmers J A, et al. Petroleum geological activities in West Greenland in 2000[J]. Geology of Greenland Survey Bulletin, 2001, 189: 24-33.
- [37] Blow R A, Hardman M. Calder Field appraisal well 110/7a-8, East Irish Sea Basin[J]. Geological Society, 1997, 124(1): 387-397.
- [38] 柳广第. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 113-114.
- [39] Dennis H, Bergmo P, Holt T. Tilted oil-water contacts: modelling the effects of aquifer heterogeneity[C]// Petroleum Geology of Northwest Europe; Proceedings of the 6th Conference. London: Geological Society, 2005: 145-158.
- [40] 吴志强, 闫桂京, 童思友, 等. 海洋地震采集技术新进展及对我国海洋油气地震勘探的启示[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3056-3065.
- [41] 高少武, 钱忠平, 马玉宁, 等. OBC 水陆检数据合并处理技术[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(4): 703-709.
- [42] 龚明平, 张军华, 王延光, 等. 分方位地震勘探研究现状及进展[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(3): 642-658.
- [43] 张树林, 夏 斌, 何家雄. 海上多波多分量地震采集技术的应用——以莺歌海盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(1): 103-107.
- [44] 符志国, 李 忠, 赵 尧, 等. 薄砂岩储层多波叠后地震反射特征分析及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(5): 1061-1024.
- [45] 杨 帅, 芦 俊, 杨 春. 含裂缝致密砂岩多波 AVO 响应分析[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(4): 798-804.

## REVIEW OF PROGRESSES IN SEISMIC FLAT SPOT TECHNOLOGY

FENG Xin, ZHANG Shulin, FAN Hongyao, JIA Jianzhong, RAO Su

(CNOOC Research Institute, Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** As a direct hydrocarbon detection method, the flat spot technology may provide effective evidence for reservoir prediction and fluid interface recognition. The difference of impedance between different fluids leads to flat spot reflections. AVO characteristics, well matched to the strong amplitude and structural contour, provide strong evidence for fluid interfaces. Seismic reflection features are the most direct and effective evidence for identification of flat spot. Up to date, a number of large-scale oil and gas reservoirs have been found in the world by application of flat spot technology. Of course, there are "traps" in the application of flat spot technology, such as the false appearance of seismic data, non-reservoir factors caused illusion of flat spot and non-horizontal fluid interfaces due to changes in velocity and pressure. Therefore, it is suggested that flat spot technology be applied upon the basis of comprehensive analysis of geology and geophysics, and enhancing high fidelity, signal-to-noise ratio and seismic resolution together with other hydrocarbon detection methods. Application of multi-wave and multi-component technology is also recommended.

**Key words:** flat spot; criteria; identification methods; application progress; trap; trend downhole