

doi: 10.11720/wyht.2022.2489

冯鑫.平点技术在西非深水碎屑岩储层烃检中的应用[J].物探与化探,2022,46(2):433-443,450.http://doi.org/10.11720/wyht.2022.2489

Feng X. Application of flat spots in detection of hydrocarbons in deep-water clastic reservoirs in West Africa[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2):433-443, 450.http://doi.org/10.11720/wyht.2022.2489

# 平点技术在西非深水碎屑岩储层烃检中的应用

冯 鑫

(中国海洋石油国际有限公司,北京 100028)

**摘要:**针对西非深水碎屑岩储层部分高孔隙度含水砂岩和含油砂岩具有相似振幅亮点和远道振幅增强的三类 AVO 异常的难题,提出运用平点技术进行储层烃类检测。通过地震反射几何外形、振幅及相位等信息落实研究区发育短轴单平点、短轴双平点、短轴复合单平点和长轴复合单平点 4 种类型,W 目标目的层以短轴双平点为主。在以反射系数和地层倾角为核心参数进行正演模拟的基础上,建立了地震平点反射产生的定量判别模板。运用平点强化技术及共等值线抽道集叠加技术,落实了平点分布。通过烃类平点的判别依据,推测上部平点条带代表气油界面、下部平点条带代表油水界面。结合烃检敏感属性分析,有效预测了含油气面积。平点技术的应用,降低了储层烃检的多解性,提高了预测精度。

**关键词:** 储层预测;平点技术;模型正演;定量模板;平点识别;烃类平点

**中图分类号:** P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)02-0433-11

## 0 引言

西非尼日尔三角洲盆地是全球勘探热点区之一。深水钻井成本极高,提高储层预测精度可以大大降低深水钻井的失利风险,提高经济效益。研究区周边 X-1 井揭示了 23 m 的含水砂岩,水深为 1 650 m,埋深为 1 050 m,孔隙度为 30%。井震标定揭示了该套高孔隙度含水砂岩具有振幅亮点和远道振幅增强的三类 AVO 异常,与含油砂岩具有相似的响应特征,表明运用地震亮点技术及 AVO 技术在西非深水碎屑岩储层烃类检测中存在多解性,无疑增加了储层预测的难度。利用合适的技术方法进行储层烃类检测,降低多解性,是决定目标勘探研究进展的关键因素。作为直接烃类检测方法,地震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。

赵争光等<sup>[1]</sup>、冯鑫等<sup>[2]</sup>利用平点相关技术方法识别油气水界面,提高了流体界面识别能力。国内外虽然发表了不少关于平点勘探的论述,但缺少从

平点成因机理、平点识别技术方法,以及烃类平点判断依据等方面深入和系统的研究分析。本文基于高密度三维地震资料,以西非深水 OML130 区块碎屑岩储层为研究目标,基于模型正演技术提出了平点反射产生的定量判别模板,从成因机理上阐述了研究区具备平点反射产生的有利条件;应用多种有效的平点识别方法,落实平点的剖面特征及平面分布;提出烃类平点判别标准,对储层含油气性以及流体界面进行有效识别。

## 1 研究区地质概况

研究区(图 1)位于尼日尔三角洲盆地深水区,水深 1 100~1 300 m。目标构造特征为 NW—SE 走向被密集断层复杂化的断块构造。发育深水扇沉积体系,平面上发育多支近 NE—SW 向水道,其中 P 目标主要储层为 A 水道砂体,已钻 2 口井(A-1、A-2),揭示 A、B、C 共 3 个油组,W 目标位于 P 目标西侧,主要储层为 B 水道砂体,两个目标具备相似的构造背景及沉积储层特征。周边失利井 X-1 井钻遇了 C 水道砂体。

收稿日期: 2020-12-21; 修回日期: 2021-11-02

基金项目: 国家科技重大专项项目“非洲重点区油气勘探潜力综合评价”(2017ZX05032-002);中海油综合科研项目“大西洋被动陆缘重点盆地漂移层系油气藏勘探综合评价技术研究”(YXKY-2021-ZY-01)

第一作者: 冯鑫(1986-),男,2013 年中国地质大学(北京)硕士毕业,工程师,主要从事海外油气勘探地震解释及综合评价工作。

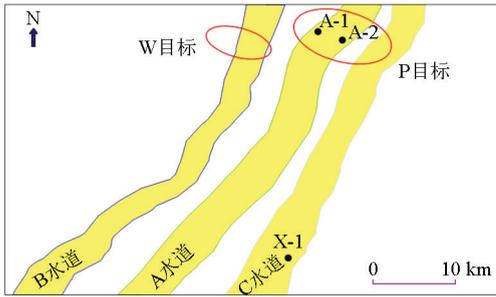


图1 研究区目标及已钻井位置示意

Fig.1 Schematic diagram of targets and well locations in the study area

## 2 平点识别方法及技术

平点技术运用于地震勘探始于20世纪70年代。1975年Backus等<sup>[3]</sup>首次对平点勘探进行了比较详细的论述,指出平行于构造等值线的平点反射是流体接触面的标志。2014~2015年,Rob等和Alistair等分别论述平点技术的应用,并对平点反射产生的岩石物理基础和代表流体界面的依据进行了研究分析,同时指出了非储层因素导致的平点响应,在实际应用中应予以考虑<sup>[4-5]</sup>。几十年来,平点技术在尼日尔三角洲盆地、墨西哥湾盆地等海外油气勘探中成效显著,发现了大量油气田<sup>[6-10]</sup>。平点技术在国内油气勘探的应用起步稍晚,近30年来在莺歌海盆地、柴达木盆地等多个油田得到较好应用<sup>[11-15]</sup>。随着地震采集和处理技术的进步,三维地震资料的保真度、分辨率和信噪比不断提高,为地震平点反射的识别和技术应用提供了更好的条件<sup>[16-18]</sup>。把平点技术与其他烃类检测技术方法结合进行储层含油气性预测及流体界面的识别,已经得到越来越广泛的应用。

地层中不同的流体具有不同的岩石物理性质,尤其是速度和密度的差异,直接导致纵波阻抗的差异,从而在油气藏内部的气油、气水、油水分界面产生一个水平面特征,在地震剖面上可能产生一条与倾斜地层反射有一定夹角的水平产状的反射波同相轴。反射系数的差异是平点反射产生的岩石物理基础,其与速度和密度的关系为:

$$R = \frac{\rho_2 \times V_2 - \rho_1 \times V_1}{\rho_2 \times V_2 + \rho_1 \times V_1}, \quad (1)$$

式中: $R$ 代表反射系数; $V_1$ 代表上部含油气砂岩的速度; $\rho_1$ 代表上部含油气砂岩的密度; $V_2$ 代表下部含水砂岩的速度; $\rho_2$ 代表下部含水砂岩的密度。

当砂岩地层上、下充填泥岩时,砂岩地层内流体性质的差异会导致反射系数的变化。理论上来说,不同流体之间的纵波阻抗差异越大,流体接触面的反射系数越大,那么在流体界面之间越容易产生平点反射。如果不同流体之间的纵波阻抗差异太小,导致流体接触面反射系数过小,则在流体界面处产生微弱的反射界面,甚至无反射界面,在实际地震资料中基本无法识别。因此,本文采用调谐反射系数进行界定。

定义调谐反射系数,当流体界面的反射系数达到某一定值,能够产生地震平点反射时,该值即为调谐反射系数。大于调谐反射系数时,能够产生平点反射,小于调谐反射系数时,无法产生平点反射。

平点技术就是通过流体接触面产生的水平反射特征识别流体界面,从而预测油气分布。除了反射系数的影响外,地层倾角、储层厚度以及地震分辨率对平点反射的产生都有一定影响。例如,地震纵向分辨率为30m,则无法识别30m以下的储层,储层中的流体接触面更加无法识别,此时平点技术已无法应用。同样,地震横向分辨率越高,对平点的识别更有利。通过研究认为,在地震分辨率满足要求的前提下(如纵向分辨率能够识别储层,横向分辨率越高越好),大于调谐反射系数和具有一定的地层倾角是地震平点反射产生最重要的两个因素。

由于含不同流体砂岩与泥岩纵波阻抗的差异,会产生亮点型平点、暗点型平点和相位反转型平点(图2)。当含水砂岩纵波阻抗( $Z_2$ )低于泥岩纵波阻抗( $Z_3$ ),含油气砂岩的纵波阻抗( $Z_1$ )会进一步降低,总体表现为 $Z_3 > Z_2 > Z_1$ ,这种情况下会产生顶、底强振幅的亮点反射,具备一定反射系数及地层倾角条件下,即可产生亮点型平点反射。当含水砂岩的纵波阻抗( $Z_2$ )比泥岩纵波阻抗( $Z_3$ )高,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反射特征,具备一定反射系数及地层倾角条件下,即可产生暗点型平点。当含油气砂岩纵波阻抗( $Z_1$ )降低,使得纵波阻抗从高于泥岩变为低于泥岩,总体表现为 $Z_2 > Z_3 > Z_1$ ,从而产生含油气砂岩顶、底界面相位反转,具备一定反射系数及地层倾角条件下,即可产生相位反转型平点。

目前识别地震平点的方法较多,大体上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,是最真实而有效的方法。间接识别方法就是通过一定的技术手段

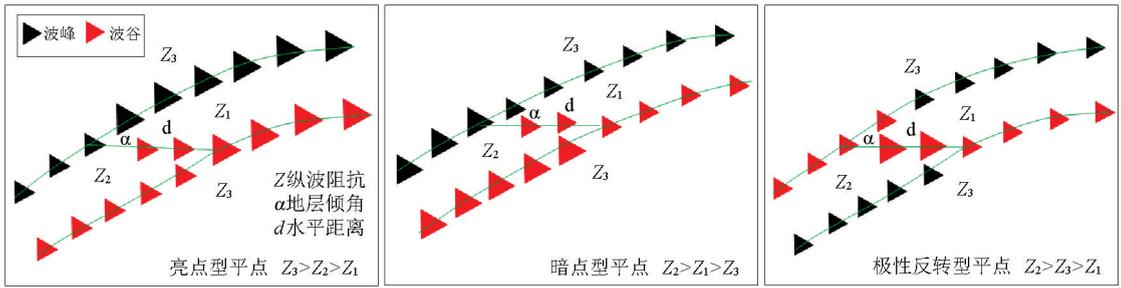


图 2 平点类型示意

Fig.2 Different flat spots caused by different impedance

提高地震平点的识别效果,从而提高对流体界面的识别能力,如平点强化技术和共等值线抽道集叠加技术。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 地震平点直接识别法

地震平点直接识别法是通过地震反射特征识别平点,包括几何外形、振幅特征、相位特征及与构造吻合程度等。从几何外形上来说,根据油气藏类型不同,平点一般可以分为短轴单平点、短轴双平点、短轴复合平点、长轴单平点和长轴双平点等类型。短轴型平点通常出现于边水油气藏。由于油气水界面在构造侧翼,流体接触面一般较窄,通常会产生短轴型平点。当构造侧翼流体接触面表现为油水或气水界面时,会产生短轴单平点,当出现双层流体接触时,会产生短轴双平点,当纵向多套薄油层叠置时,会产生因调谐厚度原因造成的短轴复合平点反

射。长轴型平点通常出现于低水油气藏。由于流体接触面变宽,地震平点反射轴边长,在顶油(或气)下水的油(或气)藏以及顶气、中油、下水的油气藏中,会分别出现长轴单平点以及长轴双平点反射特征。从地震振幅及相位特征上来说,由于含不同流体砂岩与泥岩纵波阻抗的差异,会产生亮点型平点、暗点型平点和相位反转型平点(表 1)。从平面特征来看,可靠的平点反射一般与地震振幅异常的边界吻合度较高,同时与构造等值线吻合程度较好。基于以上方面,可以有效识别地震平点的剖面特征和平面分布,从而落实流体界面及含油气分布。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。当仅能够在剖面中识别出“疑似”平点反射时,这种方法的应用效果一般。

表 1 地震平点类型

Table 1 Types of flat spots

识别特征	平点类型
几何外形	①短轴单平点;②短轴双平点;③短轴复合平点;④长轴单平点;⑤长轴双平点
振幅及相位	①亮点型平点;②暗点型平点;③相位反转型平点
平面特征	烃类平点;条带状分布,与构造等值线及振幅异常边界吻合

### 2.2 平点强化技术

不同流体之间的纵波阻抗差异过小,或者地震分辨率不够时,会导致平点反射“隐藏”在地层反射中,增加了平点识别难度。当地层倾角过大时,平点反射的横向距离就越小,对地震横向分辨率的要求也更高,同样不利于平点识别。此外,由于地震噪声的影响,水平反射同相轴易被噪声掩盖。针对疑似平点或者“隐藏”平点的情况,可以运用平点强化技术进行平点识别。Petrel 软件、OpenTect 软件均可实现三维地震平点强化的效果。

平点强化技术原理。对于原始输入的叠加偏移数据,给定特定的叠加方位角(储层顶面某点正北

方顺时针旋转的角度)、叠加距离及叠加点数,将一定范围内的多个点叠加得到一个平均点(图 3),得到平点强化数据。该技术的核心思想就是通过对真实油气层厚度以及地层倾角的分析,推测出合理的叠加距离和叠加方位角,进行空间扫描叠加,从而减少背景噪声,将倾斜地层中平反射信号进行叠加聚焦,凸显平点反射效应。在应用该技术时,要充分考虑实际地质情况,进行合理的参数选取,才会达到最佳的应用效果。在叠加距离的优选方面,如果叠加距离过短,则平点不突出;叠加距离过长,平点效应会夸大,频率变化也比较大,与真实情况不符。在叠加角度选择方面,角度偏大或偏小,会破坏原始频

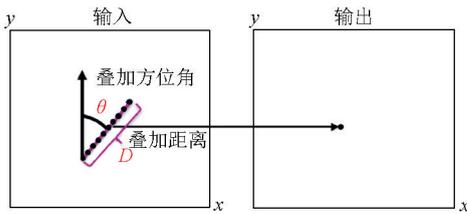


图3 平点强化技术原理示意

Fig.3 Schematic diagram of flat spot strengthening technology

率、相位信息,结果不可靠。基于平点强化技术,可以有效增强疑似平点或“隐藏”平点的反射特征,提高平点识别能力,结合振幅异常边界及构造等值线的吻合程度进一步判断平点的可靠性。

### 2.3 共等值线抽道集叠加技术。

赵争光等<sup>[1]</sup>针对地震剖上难以识别、无显著振幅响应的油气水界面的问题,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(图4),通过放大由流体变化产生的振幅变化,消除地层响应,凸显油气界面处的平点特征,识别出油气水界面。当砂岩孔隙中含油气时,会引起地震振幅和波形的异常。当流体界面为水平界面时,地震异常会沿着构造等值线分布,根据这个特点,在设定的等值线步长和地震道采样步长参数控制下,将每条构造等值线上的地震道进行叠加,根据各等值线叠加后振幅、频率和相位的突变或异常来确定油气水界面(平点)的存在和位置。以研究区W目标为例,该目标圈闭内均方根振幅高值区对应的深度范围为2 200~2 450m。设计等值线范围2 200~2 600 m之间、目的

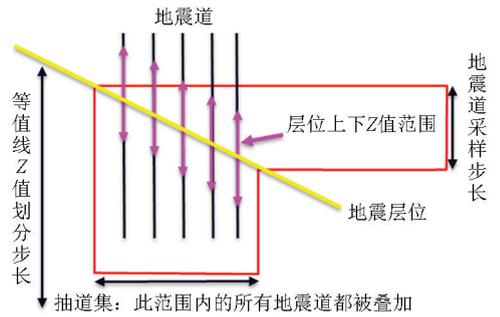


图4 共等值线抽道集叠加原理示意

Fig.4 Principle of common contour binning stacking

层位上下 200 m 的范围进行抽道叠加,得到等深叠加剖面以及振幅与频率变化曲线。该技术方法属于平点间接识别方法,结合平点直接识别方法和平点强化技术,应用效果会更好,结果更可靠。

### 3 平点成因及类型分析

研究区采集有常规三维深度域地震和高密度三维深度域地震资料。从两套地震资料对比(图5)不难看出,高密度三维地震揭示了清晰可靠的平点反射,而在常规三维地震剖面中未见平点反射。由于高密度三维地震具有更高的纵向分辨率,可以揭示更薄的地层响应,所以目的层在常规三维剖面中由一组同相轴构成,而在高密度三维剖面中,目的层变成了两组同相轴。由于高密度三维地震具有更小的面元,具有更高的横向分辨率,在剖面中可以观测到更密的地震道,因此在流体界面处出现了一组明显的短、平反射同相轴。

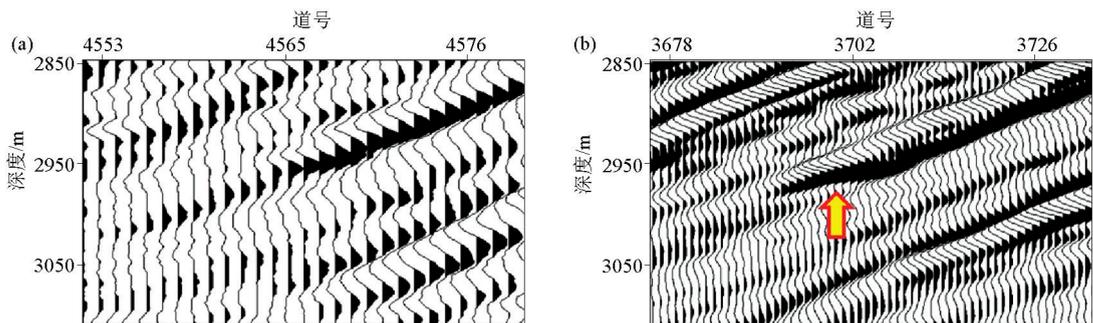


图5 常规三维深度域地震(a)与高密度三维深度域地震平点反射(b)对比

Fig.5 Comparison of conventional 3D(a) and high-density 3D seismic flat spot reflection(b)

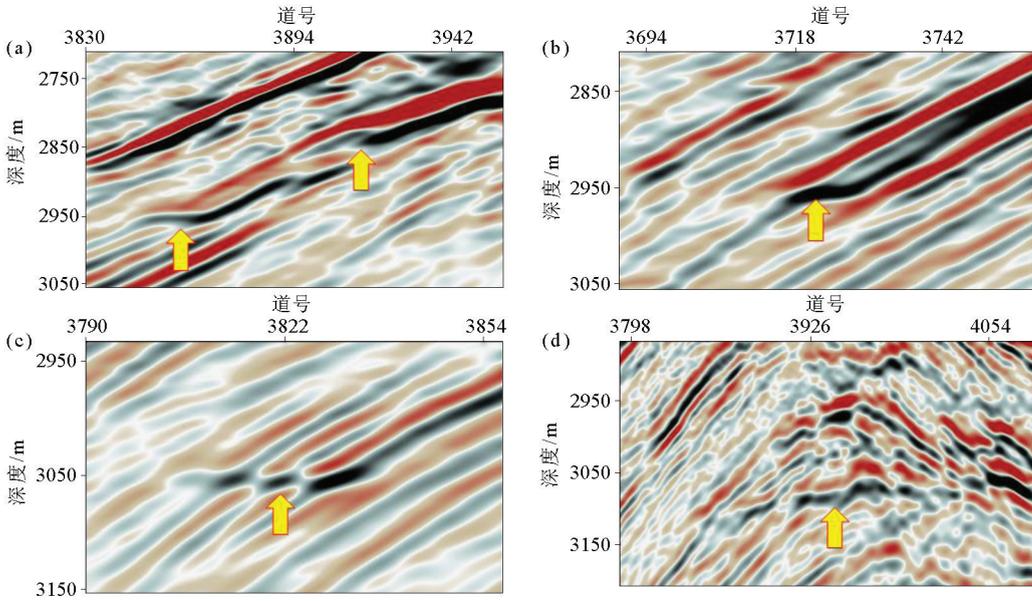
结合对全球已发现油气藏典型平点剖面的总结,通过地震反射几何外形、振幅及相位等信息,在研究区识别出四类平点反射,分别为短轴双平点、短轴单平点、短轴复合平点以及长轴平点(图6)。短轴双平点在地震剖面中表现为侧翼两个强振幅短、平轴反射特征,且上部平轴之上振幅强度大于下部,

可能代表气顶油环的油气藏特征。短轴单平点在地震剖面中表现为侧翼短、强振幅的平轴反射,上部亮点反射,可能代表上部油(气)层、边部水层的油气藏特征。局部出现短轴复合平点,地震剖面中表现为多个同深度平点断续出现,主要原因是多个薄互层调谐效应使得多个短轴平点在同一深度处得到了

横向拼接,从而增大了平点的横向长度,可能代表上部油(气)层、边部水层多个薄油(气)层的油气藏特征。长轴平点在地震剖面中表现为底部为长轴、平反射,顶部亮点反射特征,可能代表顶部油(气)层、底部水层或多薄油/气层的油气藏特征。

研究区目标 P 主力目的层出现短轴单平点反射(图 6b),局部出现了疑似平点(图 7a)。针对疑似平点,利用平点强化技术,通过对噪声的有效压制,一定程度上加强了平点的反射特征,从而提高了平点的剖面识别效果(图 7)。在叠加距离和叠加角

度的选择方面,通过参数优选,叠加距离选择 200 m,叠加方位角选择 90°时,得到比较可靠的平点强化效果,在保持振幅能量和频率相对稳定的情况下,提高了平点的反射特征(图 7c)。研究发现,当固定合适的叠加距离(200 m),叠加角度过小(30°)或过大(150°)时,与原始剖面相比,频率变化很大,平点横向范围变大,出现了假象,得到的结果不可靠(图 7b、图 7d)。当固定合适的叠加角度(90°),叠加距离过小(50 m)时,平点强化的效果不突出(图 7e),叠加距离过大(500 m)时,频率变化过大,夸大了平



a—短轴双平点;b—短轴单平点;c—短轴复合平点;d—长轴平点

a—short axis double flat spot;b—short axis single flat spot;c—short axis compound single flat spot;d—long axis single flat spot

图 6 研究区 4 类地震平点

Fig.6 Four types of flat spots in study area

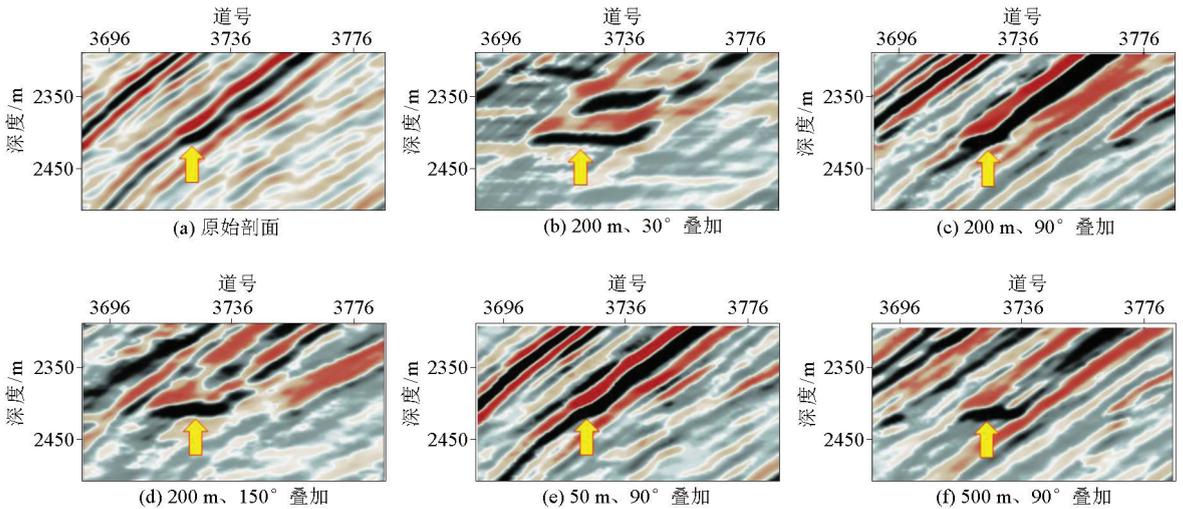


图 7 平点强化参数优选

Fig.7 Optical stacking for enhancement of flat spot

点效应(图 7f)。研究区目标 W 主力目的层出现短轴双平点反射特征(图 6a),局部同时出现了疑似双平点反射(图 8)。针对疑似双平点,利用平点强化技术,增强了疑似双平点的剖面识别效果(图 8)。从图 8 中可以看出,强化后平点剖面,上、下两个平点反射更加直观,尤其是上部平点,在常规剖面中难以有效识别,而在强化后的剖面中,表现效果突出。

通过共等值线抽道集叠加技术,落实平点的平面分布。对一定范围内每一个深度等值线上所有的地震道进行抽道集叠加分别形成每一个地震道,在

这些地震道中找出振幅和频率的差异突变点,突变点处的深度即为平点的位置。以 W 目标为例,从图 9 可知,沿储层顶界面(0 点线)上、下 200 m 幅度、2 200~2 600 m 深度范围内进行抽道集叠加,在 2 310 m 和 2 445 m 处出现了两个振幅和频率同时突变的位置,与剖面中两个平点的深度吻合,说明了两个平点条带是沿着 2 310 m 和 2 445 m 两条等值线分布的。上部的平点条带长度约 2.5 km,沿 NW—SE 向分布,下部的平点条带长度约 5 km,沿 NW—SE 向分布。

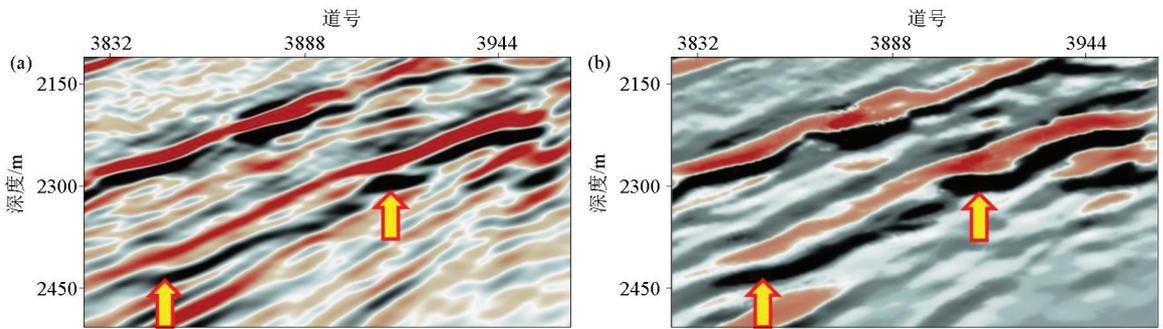


图 8 常规剖面 (a) 和平点强化剖面 (b)

Fig.8 The conventional section (a) and enhanced section (b)

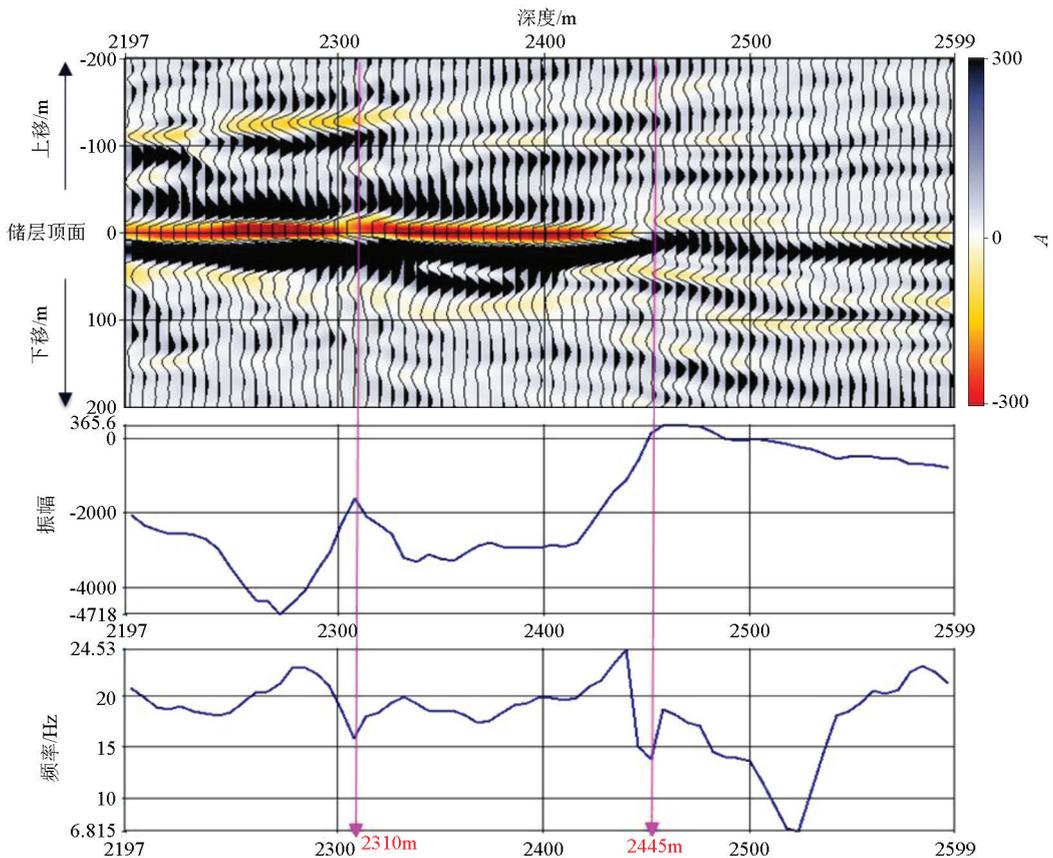


图 9 通过共等值线叠加得到的振幅与频率变化剖面

Fig.9 The amplitude and frequency section obtained by common contour binning stacking

### 4 平点定量模板的确定

模型正演技术应用广泛<sup>[19-20]</sup>,本次研究基于模型正演技术建立研究区平点定量模板。以工区内同一构造背景下 A 水道测井岩石物理参数为基础,进行模型正演。基于实际地震地质特征,设计地层倾角为 20°,储层厚度为 25 m,选用 30 Hz 零相位雷克子波,改变含不同流体砂岩的速度及密度参数,得到多个正演模型(图 10)。选取 A-1 井 C 油组参数,上部油层纵波速度为 2 462.1 m/s,密度为 2.19 g/cm<sup>3</sup>,下部水层纵波速度为 2 609.6 m/s,密度为 2.18 g/cm<sup>3</sup>,得到反射系数为 0.03。选取 A-1 井 B 油组参数,上部油层纵波速度为 1 998.7 m/s,密度为 2.04 g/

cm<sup>3</sup>,下部水层纵波速度为 2 386.9 m/s,密度为 2.11 g/cm<sup>3</sup>,得到反射系数为 0.11。选取 A-2 井 A 气组参数,上部气层纵波速度为 1 816.5 m/s,密度为 1.95 g/cm<sup>3</sup>,下部水层纵波速度为 2 059.5 m/s,密度为 2.04 g/cm<sup>3</sup>,得到反射系数为 0.08。从图中可以看出,反射系数为 0.03 时,自激自收正演剖面中的流体界面处没有产生平点反射,反射系数为 0.08 时,正演剖面中的流体界面处产生了中强反射的疑似平点反射,而当反射系数提高到 0.11 时,正演剖面中的流体界面处出现了强反射的平点特征。基于多组正演模拟结果推测,研究区平点产生的调谐反射系数为 0.08,也就是说,只有达到调谐反射系数时,流体界面处才会出现可识别的平点反射,并且反射系数越大,平点的振幅越强、平轴反射特征越明显。

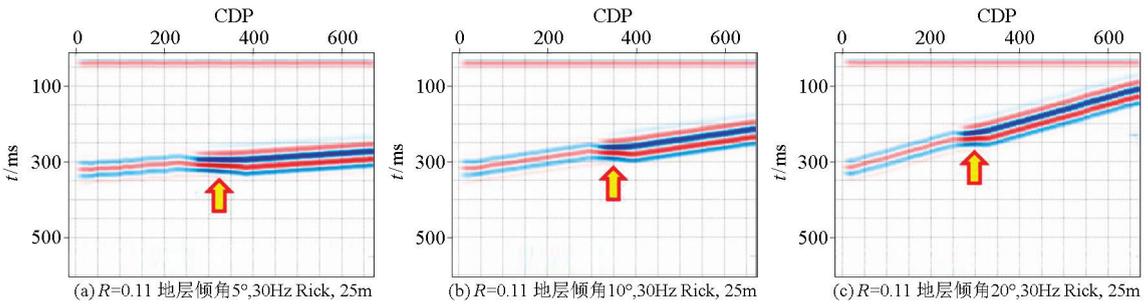


图 10 不同反射系数产生的平点正演模型

Fig.10 Forward modes of different reflection coefficients

设计固定反射系数为 0.08,地层倾角为 20°,选用 30 Hz 零相位雷克子波,改变含油气层厚度及油气层叠置关系进行正演模拟(图 11)。从图中可以看出,当接近调谐反射系数时,多个薄油气层互层比单层条件下更易产生平点反射,主要原因是多个薄互层调谐效应使得多个短轴平点在同一深度处得到了横向拼接,从而增大了平点的横向长度。工区内 B 水道局部位置出现了横向断续的平点反射,推测

是由于薄互层调谐效应引起的地震响应。

设计固定的反射系数,储层厚度为 25 m,选用 30 Hz 零相位雷克子波,改变地层倾角得到多个正演模型(图 12)。从图中可以看出,当反射系数为 0.11 (大于调谐反射系数)时,在不同的地层倾角(大于 5°)情况下,其流体界面处均能产生平点反射,并且随着地层倾角不断增大,平点所占道数会逐渐减少,这说明需要更高的横向分辨率才能识别大倾角条件

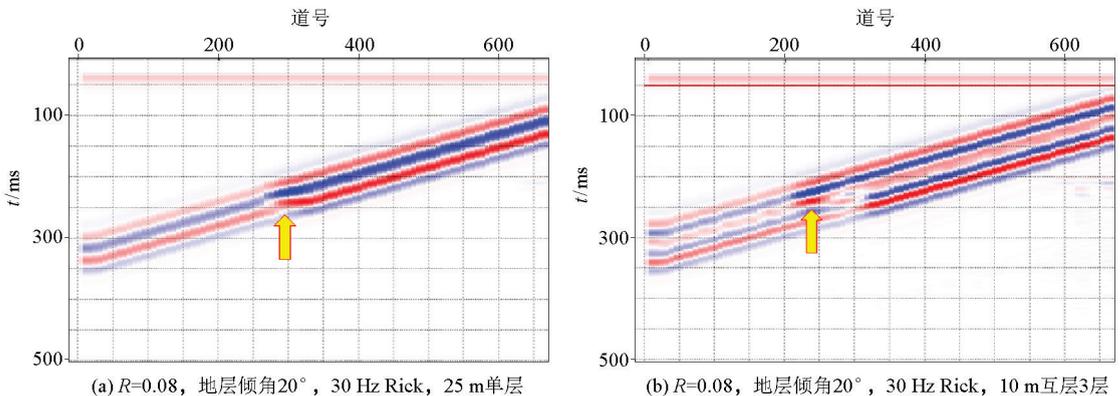


图 11 单层与多个薄互层条件下的正演模型

Fig.11 Forward modes of single layer and multiple layers

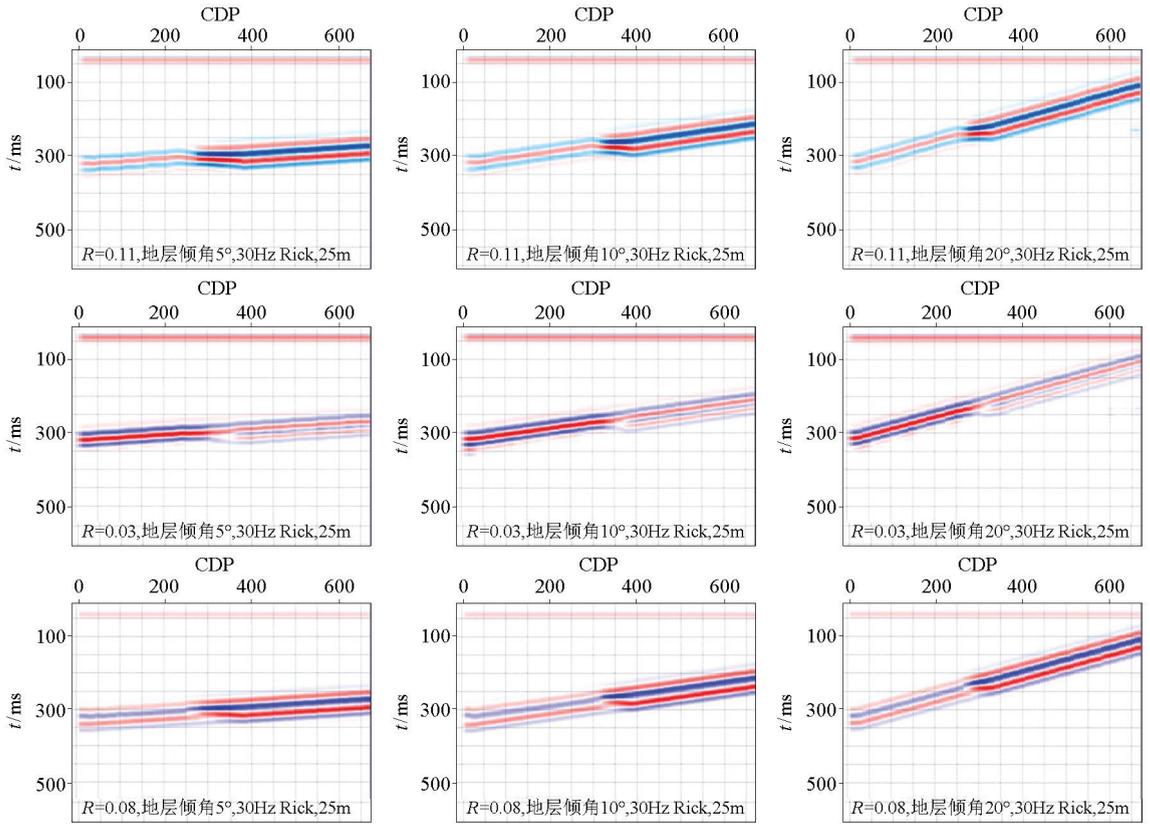


图 12 固定反射系数、改变地层倾角的正演模型模拟结果

Fig.12 Forward modes with fixed reflection coefficients and varying dips

下的平点反射。而当地层倾角过小时,平点易于湮没在水平地层反射中,在剖面中同样不易识别。当反射系数为 0.03(小于调谐反射系数)时,改变地层倾角的大小对平点反射没有影响,在流体界面处均无法产生平点反射。而当反射系数为 0.08(调谐反射系数)时,地层倾角大于 10°时出现明显的平点反射特征,而且地层倾角越大,平点反射特征越明显。

基于多种正演模型模拟结果的分析,得到以反射系数和地层倾角为核心的平点成因模型,在此基础上建立研究区地震平点反射定量判别模板(图 13)。定量模板中包括平点识别有利区、平点识别不利区、平点识别模糊区、平点识别盲区以及平点无法识别区。当大于调谐反射系数、地层倾角在 10°~40°之间时,为平点识别有利区。当大于调谐反射系数,地层倾角大于 40°时,需要更高地震横向分辨率才能识别平点反射;当小于调谐反射系数、地层倾角大于 10°时,需要更高纵向分辨率才能识别平点反射;这两种情况为平点识别不利区。当接近调谐反射系数时,为平点识别模糊区,此时地层倾角越大,平点反射特征越明显。当大于调谐反射系数、地层倾角小于 10°时,为平点识别盲区,可能出现疑似平点或“隐藏”平点,在地震剖面中很难识别。当小于调谐反射系数、地层倾角小于 10°时,为平点无法识别区,平点技术已无法应用。

根据地震平点反射定量判别模板,可以推测研究区是否能够产生可以识别的平点反射。B 水道与 A 水道具有相似的构造背景、沉积期次以及地层埋深,推测如果 B 水道的地震平点响应代表着不同流体的接触面,那么其界面处的反射系数应该与 A 水道油水界面的反射系数相似,大于调谐反射系数。此外 B 水道位于背斜构造侧翼,地层倾角在 15°~25°之间。结合反射系数和地层倾角两大因素判断, B 水道内部出现的平点反射,是由于有利的反射系数和地层倾角引起的。

需要指出,由于地下地质条件的差异,不同研究区调谐反射系数会有差异,对地层倾角的要求也会有所不同。基于不同研究区测井岩石物理参数进行模型正演,总结形成的定量判别模板的定量区间会有所变化,但总体来说,其揭示的基本规律是一致的。需要指出,当地震分辨率达不到储层厚度的识别要求时,地震剖面中无法识别出平点反射特征,因此本文讨论的平点识别是基于地震分辨率满足储层识别的前提。从多个正演模型可知,储层厚度越大,越有利于平点的产生。研究区储层物性较好且差异较小,因此未讨论储层物性与平点的内在关系,笔者认为,储层物性的差异对平点识别也会产生一定影响,一般来说,物性越好,越有利于平点的产生。

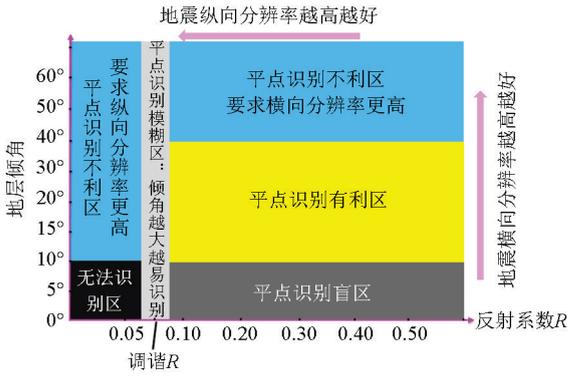


图 13 地震平点反射定量判别模板

Fig.13 The flat spot reflection quantitative discrimination template with reflection coefficients and dip angles

### 5 含流体(油气)平点判别依据

以目标 W 为例,对两个平点条带进行综合地质与地球物理分析,推测其代表了不同的流体界面,即上部平点代表气油界面,下部平点代表油水界面。

1) 排除非烃因素导致的平点响应。除了流体界面可以产生平点反射,火成岩等特殊岩性体、古接触面、温度控制的岩相变化以及地震资料本身的噪声等非烃因素都可能产生平点反射。研究区为深水扇沉积体系,岩性组合表现为砂泥岩互层沉积,排除了因特殊岩性体造成的平点响应;古接触面一般具有一定的横向延伸距离,会产生长轴的平点反射,与研究区出现的短轴平点差异较大,也可排除;温度控制的岩相变化影响下,可能产生断续的长轴平点响应,其上部一般表现为泥岩的弱反射特征,与研究区顶部强振幅、短轴平反射差异较大;此外,研究所用的地震资料采用 SRME 技术有效压制多次波,成像质量好,信噪比高,可以排除因多次波产生的平点响应。综合分析认为,研究区出现的平点反射可以排

除非烃因素导致的平点响应。

2) 正演模拟分析揭示了目标存在双平点反射的岩石物理基础。通过已钻井揭示的气、油、水层与上覆/下伏泥岩的速度和密度参数,设计多个正演模型。上部油层(纵波速度 1 999 m/s、密度 2.04 g/cm<sup>3</sup>)、下部水层(纵波速度 2 387 m/s、密度 2.11 g/cm<sup>3</sup>)模型正演揭示,在油水界面处出现了强振幅短轴平点反射。上部气层(纵波速度 1 817 m/s、密度 1.95 g/cm<sup>3</sup>)、中部油层(纵波速度 1 999 m/s、密度 2.04 g/cm<sup>3</sup>)、下部水层(纵波速度 2 387 m/s、密度 2.11g/cm<sup>3</sup>)模型正演表明,在气油界面和油水界面均出现了强振幅短轴平点反射(图 14)。由此证明目标存在产生双平点反射的岩石物理基础。

3) 目标位于平点识别有利区。基于平点成因分析提出的地震平点反射定量判别模板,可以高效预测目标是否位于产生平点反射的有利区。前已述及,推测目标流体界面大于调谐反射系数,侧翼地层倾角为 15°~25°,对于平点识别有利。基于以上两个关键参数,认为目标位于平点识别有利区,地震剖面上出现的平点响应极有可能是烃类界面的指示。

4) 定量振幅比与研究区已发现油气田规律一致,且双平点条带与构造等值线吻合度高。基于模型正演结果可知(图 15),气层、油层、水层的振幅依次减小。基于研究区已发现油气田的井震分析可知,含不同流体砂岩与背景泥岩的定量振幅比与流体性质匹配度高(图 15)。根据已发现油气田不同油、气、水层的定量振幅比统计结果可知,气层的振幅比大于 10,油层的振幅比为 3~10,水层的振幅比小于 3。由目标振幅比属性可知,高部位平点条带之上的振幅比基本大于 10,两个平点条带之间的振幅比一般在 3~9,而低部位平点条带之下的振幅比基本都小于 3,由此说明了高部位平点条带之上发育气层,两个平点条带之间发育油层,两个平点条带

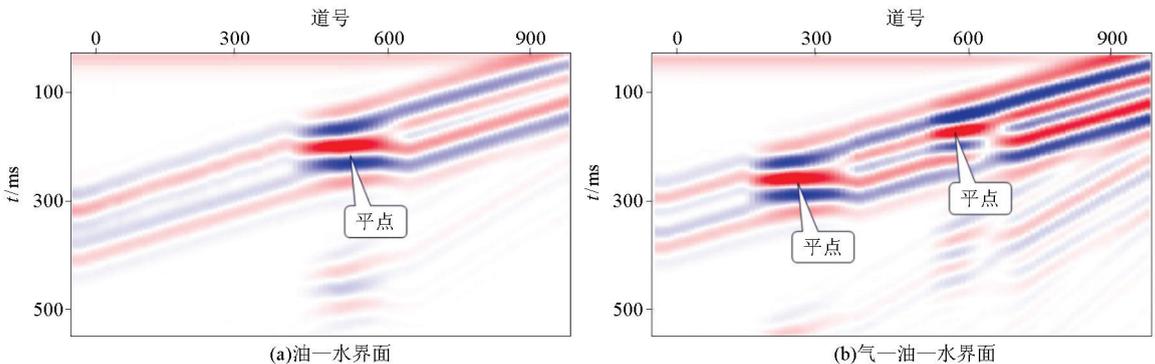


图 14 单流体界面 (a) 和双流体界面 (b) 正演模型

Fig.14 Forward modes of single (a) and double fluid interface(b)

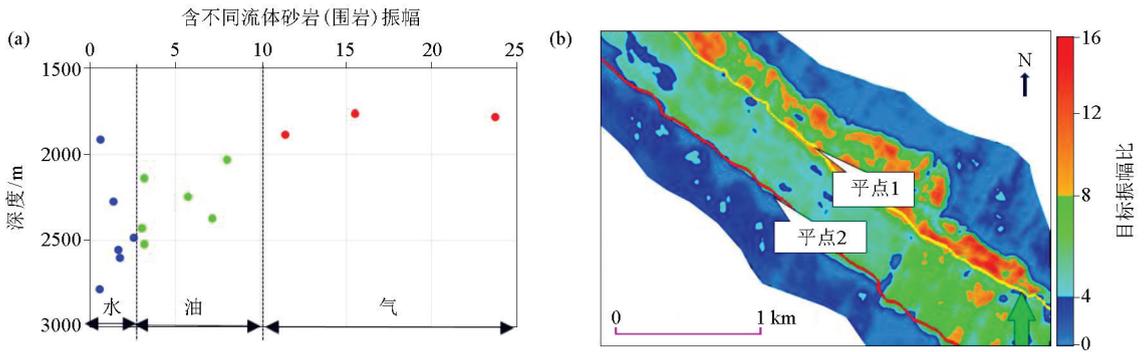


图 15 已发现油气田含不同流体砂岩/围岩定量振幅比统计量版 (a) 与目标振幅比属性 (b) 对比  
Fig.15 Comparison of quantitative amplitude ratio statistics of oil and gas fields (a) and target amplitude ratio attributes (b)

分别代表着气油界面和油水界面。值得一提的是,双平点条带与振幅异常的边界、构造等值线吻合度高,进一步证明了双平点条带代表了不同的流体界面。

## 6 对地震资料预处理的要求

地震平点反射的产生,除了地下地质因素影响外,因地震采集、处理方面造成的平点反射或似平点反射,会对流体界面的判断造成一定假象。由于地下波场的复杂性,常规采集的地震剖面会出现多次波、绕射波等干扰波,如果预处理不理想,则会在地震剖面中保留这些信息,从而导致这些因素产生的平点假象。在地震资料采集方面,利用高密度地震采集技术,可以实现更高的面元尺寸与道密度,提高地震资料的纵向和横向分辨率。由于多次波是产生疑似平点的主要原因,因此在处理中需要采用表面相关多次波消除技术 (SRME) 等方法压制噪声,该方法对复杂海底产生的多次波的衰减效果显著。运用叠前深度偏移 (PSDM) 处理技术,可以提供更丰富的细节信息,提高三维地震资料的成像效果。基于以上地震采集、处理技术,可以实现高保真度、高分辨率和高信噪比的地震资料,消除因地震采集、处理方面产生的平点假象,为平点技术的应用提供良好的资料基础。

## 7 应用效果分析

以平点技术为核心,通过模型正演、平点强化技术、定量振幅比技术等,有效预测主力目的层油气层分布特征。对于目标 W,根据高部位平点条带和定量振幅比异常边界,预测了含气平面分布。根据双

平点条带及定量振幅比边界,预测了含油平面分布。高部位平点条带的深度 (2 310 m) 即为气油界面的深度,低部位平点条带的深度 (2 445 m) 即为油水界面的深度。对于目标 P,识别出了平点深度 (2 420 m) 及其平面分布特征,平面上且平点位置与振幅异常边界和 2 420 m 等值线高度吻合,推测平点代表了油水界面,结合振幅异常及构造等值线可以预测含油面积。基于目的层平点处设计井位,在多个目的层累计钻遇 50 m 以上油层,证实了预测结果的准确性。井钻遇油层均在平点界面之上,且平点界面之上振幅特征与靶点位置一致,有效验证了该平点代表油水界面。

## 8 结论

本文针对西非深水碎屑岩,开展平点技术实际应用研究,取得以下认识和结论:

1) 基于多种正演模型规律分析,建立了地震平点反射定量判别模板,包括平点识别有利区、平点识别不利区、平点识别模糊区、平点识别盲区以及平点无法识别区。从成因机理上论证了研究区具备平点反射产生的有利条件。

2) 总结了含流体 (油气) 平点判别标准。利用地震平点反射定量判别模板,考虑目标流体界面反射系数、侧翼地层倾角特征,结合正演模拟结果,认为目标存在双平点反射的岩石物理基础。研究区井震标定表明,定量振幅比属性可有效区分气层、油层和水层,且双平点条带与构造等值线吻合度高。

3) 划分了研究区平点主要类型。基于地震反射几何外形、振幅、相位等信息,总结研究区发育短轴单平点、短轴双平点、短轴复合单平点和长轴复合单平点四类平点特征。目标 P 以短轴单平点为主,

目标 W 以短轴双平点为主。结合平点强化技术以及共等值线抽道集叠加技术的应用,落实了目标 W 主力目的层沿 NW—SE 向分布的两个平点条带。

4) 注意区分非流体成因的“假平点”。火成岩等特殊岩性体、古接触面、温度控制的岩相变化以及地震资料本身的噪声等非烃因素都可能产生平点反射,在实际资料分析中,要结合地震地质情况进一步分析。

## 参考文献 (References):

- [1] 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.  
Zhao Z G, Yang R Z, Ma Y L, et al. Method for pinpointing the contacts of oil, gas and water by common contour binning stacking and its application [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 808-814.
- [2] 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.  
Feng X, Zhang S L, Fan H Y, et al. Review of progresses in seismic flat spot technology [J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(6): 1-11.
- [3] Backus M M, Chen R L. Flat spot exploration [J]. Geophysical Prospecting, 1975, 23(3): 533-577.
- [4] Rob S, Mike B. 地震振幅解释与应用[M].北京:石油工业出版社,2014:73-92.  
Rob S, Mike B. Seismic amplitude: An interpreter's handbook [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 73-92.
- [5] Alistair R Brown. 三维地震数据解释[M].北京:石油工业出版社,2015:115-138.  
Alistair R B. Interpretation of three-dimensional seismic data [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015: 115-138.
- [6] Clark V A. The effect of oil under in-situ conditions on the seismic properties of rocks [J]. Geophysics, 1992, 57(7): 894-901.
- [7] Cliff D C B, Tye S C, Taylor R. The Thylacine and Geographe gas discoveries, offshore Eastern Otway Basin [J]. Appea Journal, 2004, 44(1): 441-462.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Luchford J. A view of amplitude fit to structure as a hydrocarbon-indicating attribute [J]. First Break, 2001, 19(7): 411-417.
- [11] 史晓辉,何亨华.柴达木盆地一个可能的地震平点异常的解析与分析[J].天然气地球科学,2009,20(4):586-591.  
Shi X H, He H H. Interpretation and analysis of a potential flat spot anomaly [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 586-591.
- [12] 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.  
Pan G C, Pei J X, Zhou J X, et al. An analysis of flat spot features on a gas-water interface in the middle-deep overpressure zone, Yinggehai basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 42-46.
- [13] 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.  
Zhang D L. Dip “flat spot” and its generating mechanism in Dazuizi gas accumulation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(5): 608-616.
- [14] 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.  
Wang X M. Seismic prediction of mid-shallow gas reservoirs in Jiyang Depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(3): 322-327.
- [15] 邓勇,潘光超,李明,等.莺歌海盆地“平点”叠前 AVO 特征及识别[J].石油地球物理勘探,2019,54(5):1123-1130.  
Deng Y, Pan G G, Li M, et al. Prestack AVO characteristics and identification of flat spot in Yinggehai Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(5): 1123-1130.
- [16] 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.  
Gao S W, Qian Z P, Ma Y N, et al. OBC dual-sensor data combination processing [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(4): 703-709.
- [17] 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.  
Gong M P, Zhang J H, Wang Y G, et al. Current situations and recent progress in different azimuths seismic exploration [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(3): 642-658.
- [18] 冯鑫,韩文明,范洪耀.西非深水目标高密度三维地震勘探效果[J].石油物探,2020,59(1):150-157.  
Feng X, Han W M, Fan H Y. High density 3D seismic exploration of deep water targets in West Africa [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(1): 150-157.
- [19] 徐磊,汪思源,张建清,等.近垂直反射正演模拟及其地下工程应用[J].物探与化探,2020,44(3):635-642.  
Xu L, Wang S Y, Zhang J Q, et al. Forward simulation of approximate vertical reflection method and its application to underground engineering [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 635-642.
- [20] 谭磊,刘宏,唐昱哲,等.四川盆地龙女寺构造龙王庙组储层特征及地震响应[J].天然气地球科学,2020,31(12):1802-1813.  
Tan L, Liu H, Tang Y Z, et al. Reservoir characteristics and seismic response of Longwangmiao Formation of Longnvsi structure in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(12): 1802-1813.