

汪生好, 李黎, 蒋玉婷, 等. 少井条件下低缓畸变构造精细研究及油气勘探启示[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 63-69.

WANG Shenghao, LI Li, JIANG Yuting, et al. Fine study on lower gentle-distorted structures under the condition of few wells and its implications for oil and gas exploration[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(6): 63-69.

少井条件下低缓畸变构造精细研究及油气勘探启示

汪生好, 李黎, 蒋玉婷, 杨小江, 王要森, 刘振, 赵红娟

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054)

摘要:南海东部地区生产油田构造多为受断层阴影影响的低缓构造, 通常存在一定程度的上拉或下拉畸变。对于较大幅度的畸变, 可以通过改进地震采集方式、处理技术、解释成图技术予以部分消除; 但对于小尺度的畸变, 因研究人员不易识别或者主观上觉得畸变小而忽略其存在, 给油田构造和储量的认识带来较大不确定性, 影响油田总体开发方案的设计。为此, 以 HA/HB 油田为例, 从构造成图的各个环节进行回顾分析, 认为探井位置上拉畸变的构造可能有一定的外围储量潜力; 同时, 针对性地提出了趋势面约束校正的方法, 有效恢复了构造真实形态。油田勘探开发的实践表明, 该方法有效提高了构造预测精度, 成功指导了评价井的设计和实施, 对类似地质条件下油气田的构造研究具有良好的推广应用价值。

关键词:低缓构造; 断层阴影; 构造畸变; 趋势面校正; 构造成图

中图分类号: P744.4; P631.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.015

0 引言

断层阴影是因断层两盘地层速度横向突变或者不准确导致的断层下盘一定范围内成像畸变和能量减弱的现象^[1-2]; 当断层上盘地层速度大于对接盘地层速度时, 对接部分下伏地层产生上拉畸变, 当上盘地层速度小于对接盘地层速度时, 对接部分下伏地层产生下拉畸变^[3]。针对这一问题的研究已成为近几年来南海东部地区的热点和难点, 该区油田构造多为低缓构造, 地层倾角基本 $<2^\circ$, 且部分油田受断层阴影影响, 导致构造存在或大或小、或上拉或下拉的畸变, 甚至出现假断层^[4-6], 严重影响了含油气构造圈闭的落实和评价。

现阶段, 单就断层阴影区构造畸变问题, 学者们分别从采集、处理和解释成图方面进行了大量研究和实践, 并给出了相应的解决方案。其中, 地震采集方向和采集方式的不同对断层阴影区成像都会有不同程度影响, 通过宽/双方位、增加照明度或

覆盖次数等方式有利于改善资料品质^[7-11]。处理方面, 叠前深度偏移处理是较为可行的方法, 关键问题在于如何在速度建模和反演阶段精细刻画断层两侧速度; 而构造约束全波形反演和断控网格层析反演能够满足这一要求^[4,12-15]。在解释成图阶段, 通过识别断层阴影区范围, 同时借助于地震正演模拟补偿校正或者三维速度场校正的方法基本可以恢复阴影区真实构造^[3,16-20]。

总体而言, 上述技术方法对畸变量较大的断层阴影区构造往往具有一定的宏观成效, 但当畸变量 $<10\text{ m}$ 级别时, 效果不佳, 在解释成图过程中也极有可能被忽略, 给储量认识和开发方案带来一定风险。因此, 本文以 HA/HB 油田为例, 重点针对少井条件下畸变小低缓构造, 在分析构造影响因素及前期成图问题的基础上, 提出了趋势面拟合校正的评价技术, 有效提高了构造预测精度, 基于此方法提出的开发评价井也取得了很好的效果。

1 含油气构造圈闭畸变研究的基本原理

1.1 构造成图思路

对于断层阴影畸变量较小的地震资料, 在只有

收稿日期: 2022-01-18

资助项目: 中海石油(中国)有限公司科技项目“恩平 18 区疏松砂岩稠油油藏有效开发技术”(YXKY-2019-SZ-01)

作者简介: 汪生好(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油藏地球物理方面的研究工作. E-mail: wangshh7@cnooc.com.cn

一口探井的情况下,研究人员往往只是专注于速度研究以获得较为可靠的构造,忽视了一些成图细节的重要性,比如小畸变的消除、井点误差校正方式的选取等等。对这些细节的处理方式不同,构造研究结果会有差异,对油田储量的认识可能也会发生较大变化。

为了说明局部小畸变对储量规模的影响,笔者绘制了畸变构造形态和真实构造形态纵向放大的剖面示意图。如图1所示,探井处于断层阴影区,存在小幅上拉畸变,如果严格按照地震同相轴

解释成图得到图中黑色顶底构造线,如果参考外围趋势修正高部位畸变得得到图中粉色构造线。直观上理解,探井所在的构造高部位上拉畸变,校正后应该是高部位变深,实际结果揭示边部构造抬升。对于低缓构造而言(地层倾角一般为 2°),两者剖面含油范围存在明显差异,对储量计算影响较大;对于高陡构造(地层倾角 $>10^\circ$),畸变初始构造和实际构造的剖面含油范围和储量差异相对较小。

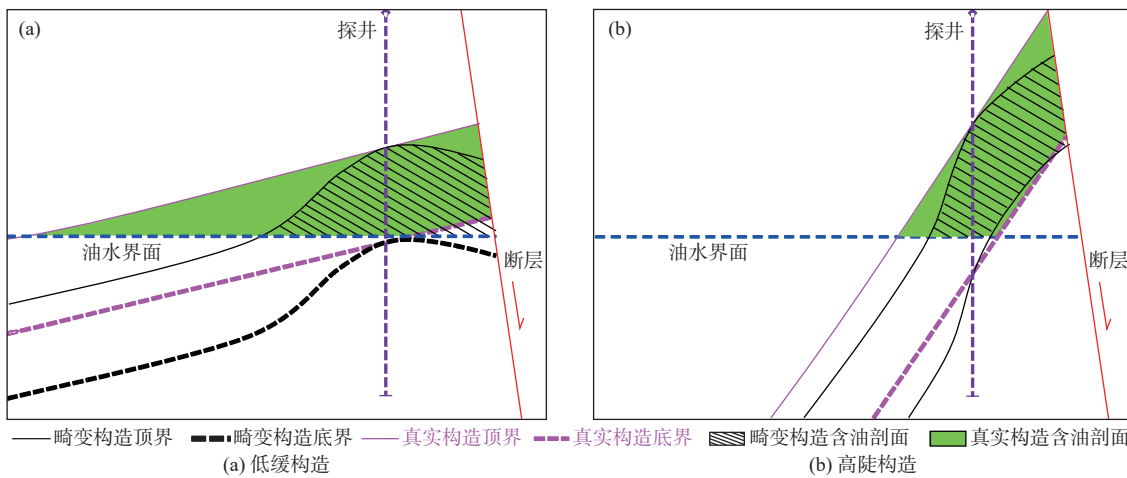


图1 畸变构造形态与真实构造形态剖面纵向放大示意图

Fig.1 Enlarged schematics of longitudinal section of distorted structural form and real structural form

基于上述分析形成了构造成图基本思路,即在识别断层阴影区范围的基础上,通过外围构造趋势校正阴影区构造得到相对真实的构造形态,结合分层数据进行纵向平移得到最终构造。

1.2 趋势面约束校正

前已述及,受断层阴影影响,断面下方近断层位置地震同相轴扭曲变形,构造形态变得较为复杂,完全依托地震资料解释只能得到失真的构造,调整地震解释方案又存在主观人为因素;因此,本次研究提出了利用外围构造网格数据拟合趋势面,然后约束校正畸变区域构造。其中,趋势面拟合的过程及相应表达式(1)~(6)如下:

$$Z_i = w_0 + w_1 x_i^1 y_i^0 + w_2 x_i^0 y_i^1 + \dots + w_j x_i^j y_i^1 + w_{j+1} x_i^{j-1} y_i^2 + w_{j+2} x_i^{j-2} y_i^3 + \dots + w_i x_i^0 y_i^n \quad (6)$$

$$Z_m = w_0 + w_1 x_m^1 y_m^0 + w_2 x_m^0 y_m^1 + \dots + w_j x_m^j y_m^1 + w_{j+1} x_m^{j-1} y_m^2 + w_{j+2} x_m^{j-2} y_m^3 + \dots + w_i x_m^0 y_m^n + \dots + w_k x_m^n y_m^1 + w_{k+1} x_m^{n-1} y_m^2 + w_{k+2} x_m^{n-2} y_m^3 + \dots + w_m x_m^n y_m^n \quad (7)$$

实际构造数据 $Z = z(x_i, y_i)$ 的趋势面为 $\widehat{Z} = \widehat{z}(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。则实际构造可表示为,

$$Z = \widehat{Z} + \epsilon \quad (1)$$

式中: ϵ 为实际构造值与趋势面值残差向量;

m 为样本数; (x_i, y_i) 为空间中任意 i 点的坐标值。

假设 \widehat{Z} 满足广义线性多项式,则 \widehat{Z} 可表示为:

$$\widehat{Z} = WX^T \quad (2)$$

利用经典最小二乘法,使得 $\|e\|_2^2$ 最小,并引入二阶正则项 $\alpha \|W\|_2^2$,则优化目标函数 J 为,

$$J = \min_W \|WX^T - Z\|_2^2 + \alpha \|W\|_2^2 \quad (3)$$

$$W = (w_0, w_1, w_2, L, w_m) \quad (4)$$

$$Z_0 = w_0 + w_1 x_1^1 y_1^0 + w_2 x_1^0 y_1^1 \quad (5)$$

$$X = \begin{pmatrix} \begin{matrix} \text{1阶项} & & & & & \text{k阶项} & & & & & & \text{n阶项} \\ 1 & x_1^1 y_1^0 & x_1^0 y_1^1 & & & x_1^k y_1^1 & L & x_1^{k-j} y_1^j & L & x_1^0 y_1^k & x_1^n y_1^1 & L & x_1^{n-j} y_1^j & L & x_1^0 y_1^n \\ M & M & M & & & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ 1 & x_i^1 y_i^0 & x_i^0 y_i^1 & L & x_i^k y_i^1 & L & x_i^{k-j} y_i^j & L & x_i^0 y_i^k & L & x_i^n y_i^1 & L & x_i^{n-j} y_i^j & L & x_i^0 y_i^n \\ M & M & M & & & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ 1 & x_m^1 y_m^0 & x_m^0 y_m^1 & & & x_m^k y_m^1 & L & x_m^{k-j} y_m^j & L & x_m^0 y_m^k & x_m^n y_m^1 & L & x_m^{n-j} y_m^j & L & x_m^0 y_m^n \end{matrix} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$Z = (z(x_1, y_1), z(x_2, y_2), \dots, z(x_m, y_m)) \quad (9)$$

式中: α 为正则化系数;

n 为多项式的阶数;

W 为高阶趋势面方程中的各项系数;

上标 T 表示对 X 求转置;

符号 $\| \cdot \|_2^2$ 代表 L2 范数。

将公式(4)~(9)带入式(2)并优化求解目标函数 J 可以求得线性多项式趋势面, 可利用该趋势面约束校正得到断层阴影畸变区正常构造。

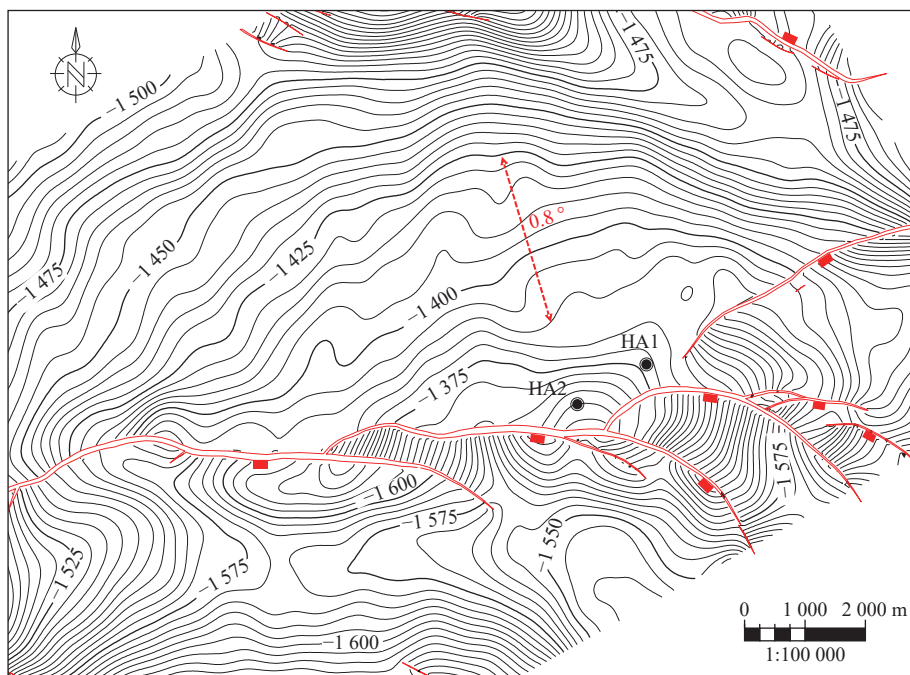
2 油气勘探实例分析及启示

2.1 HA/HB 油田应用实例

HA 油田构造为多条断层控制的断背斜构造, 在开发项目实施前仅钻探 HA1 和 HA2 两口井(图 2), 主要目的层为 hor3(图 3), 其储量占油田总储量的一半。开发井实施前, 结合本区探井的速度分析和

地层对比情况, 认为本油田横向速度变化小(图 4)。基于时间域解释层位, 利用单井时深关系拟合公式进行时深转换, 据此得到的构造可以满足油田开发的需求。从钻井时深关系拟合转深的构造看, 边部较缓, 地层倾角为 0.8°, 高部位相对较陡, 地层倾角为 1.7°(图 2)。

随着开发井实施的逐步推进, 研究人员发现基于上述构造预测的开发井钻遇油藏顶界的深度普遍比实钻深度深。经过研究分析, 认为构造高部位受断层阴影影响, 为了充分体现畸变特征, 将地震剖面横向压缩, 如图 5 所示, 探井附近同相轴扭曲较明显, 方差体属性也有异常响应。以 hor3 层顶界构造为例, 仅利用 HA2 井进行构造校正和成图, 其他探井和开发井全部作为盲井, 对阴影区构造的校正主要分为 4 个步骤: ①根据阴影区反射特征和方差体属性圈定断层阴影影响范围; ②剔除上述范围内的网格节点值; ③利用构造边部网格节点值拟合生成趋势面; ④以趋势面为约束, 对剔除畸变范



图内等值线为海拔深度/m

图 2 HA 油田 hor3 层开发项目实施前构造图

Fig.2 Structure before project implementation in hor3 layer of HA Oilfield

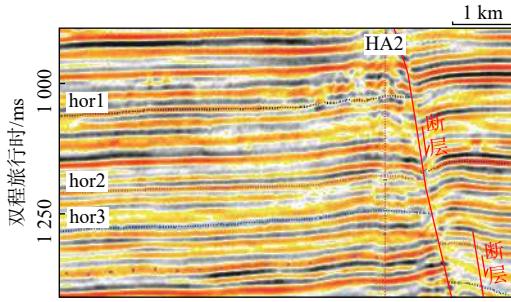


图3 过HA油田断层阴影区地震剖面

Fig.3 Seismic profile of the fault shadow area across HA Oilfield

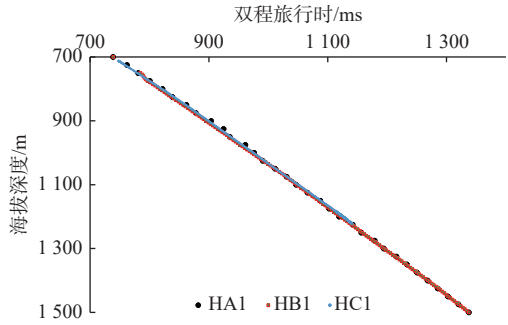


图4 HA油田及周边探井时深关系对比

Fig.4 Comparison in time-depth relationship between HA Oilfield and surrounding exploration wells

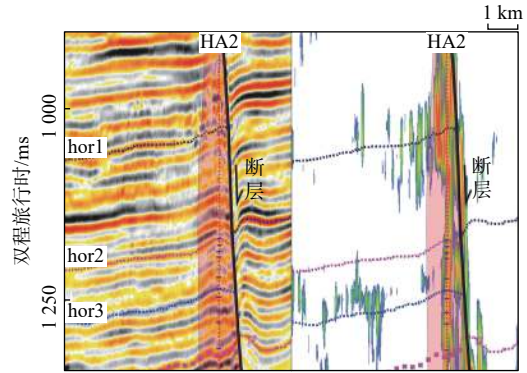
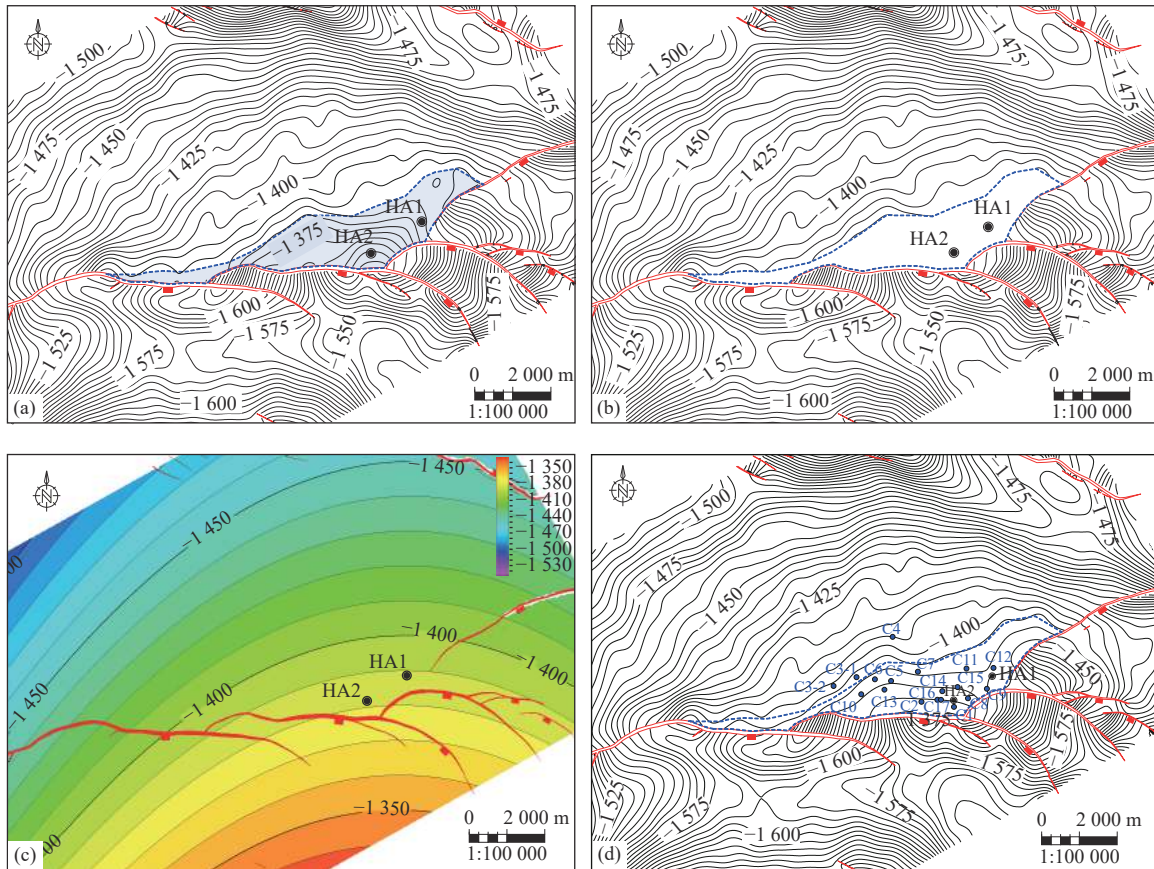


图5 原始地震及方差体属性横向压缩剖面

Fig.5 Lateral compressed profile of original seismic and variance cube attributes

围的网格进行内插得到形态较为准确的构造。最后,结合井点分层数据向上平移得到最终构造(图6)。

结合另一口探井和其他所有开发井的实钻结果,对校正前后构造的误差,如图7所示,趋势面校正前构造普遍比实钻深,且构造边部的开发井深度误差较大,最大超过20 m,趋势面校正后构造误差介于-5~5 m。基于趋势面校正后的构造计算储



(a) 断层阴影圈定范围; (b) 剔除阴影区网格节点构造; (c) 边部网格节点拟合趋势面; (d) 校正后最终构造
图内等值线为海拔深度/m

图6 趋势面构造校正中间及最终成果图

Fig.6 Intermediate and final results of structural trend surface correction

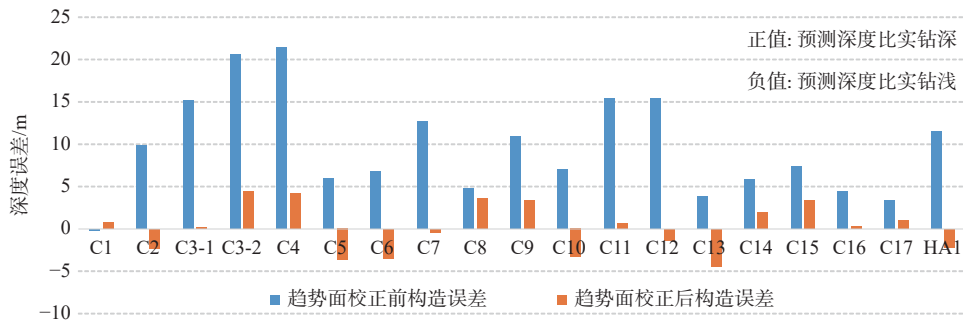


图 7 HA 油田 hor3 层趋势面约束校正前后构造误差对比

Fig.7 Comparison in structural errors before and after constraint correction for trend surface of hor3 layer in HA Oilfield

量,在其他参数不变的情况下,全油田叠合含油范围和储量几乎增加一倍,与开发项目实施完后构造和储量的认识基本一致。

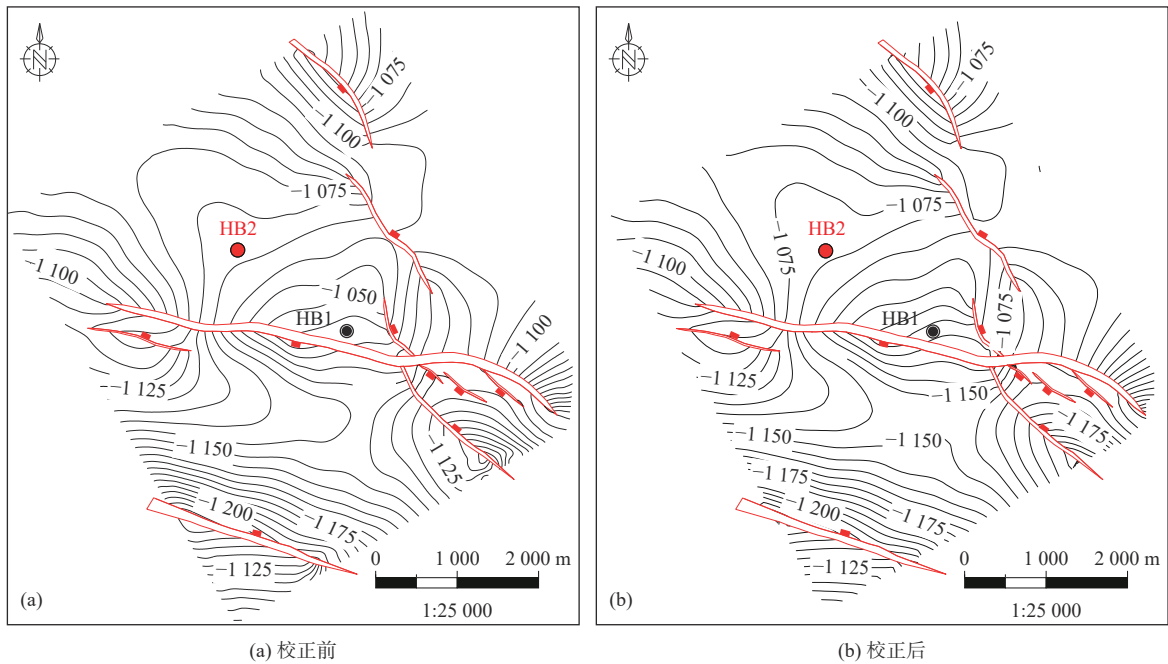
HB 油田与 HA 油田相距不到 6 km,前期在钻探 1 口井 HB1 的情况下向国家储委申报储量并通过审查;油田构造高部位同样因断层阴影导致 5 m 左右的小幅上拉畸变,表现为高部位地层倾角 1.6°,边部地层倾角 0.85°(图 8a)。根据 HA 油田构造研究的基本认识,认为 HB 油田构造边部存在抬升的可能,同样采用趋势面约束校正的方法得到潜力构造(图 8b);为了提升油田开发项目的经济性,基于上述研究成果提出 1 口滚动评价井 HB2,部署于构造边部。HB2 实钻结果揭示,趋势面校正后各油层构造预测深度与实钻深度相差-2.5~2.8 m,校正前构造的误差介于 0~10 m(图 9);全油田含油面积

增加超 50%,探明储量增加近 45%,其中,绝大部分储量增量为边部构造抬升的贡献。

2.2 油气勘探启示

一般情况下,对于横向速度无明显变化的构造类型油田,当地震资料上拉畸变时,研究人员很容易直观地理解为构造存在风险,需往下校正;反之,当地震资料下拉畸变时,构造存在潜力,需往上校正。通过本次研究认识到上述观点不准确,构造上拉或者下拉是否代表风险或潜力,取决于探井所在位置。

对于上拉畸变的低缓构造,若探井处于畸变部位,则构造边部存在一定储量潜力,类似于 HA 油田和 HB 油田构造研究实例;若探井处于畸变区域以外,则构造畸变区域存在储量风险。对于下拉畸



图内等值线为海拔深度/m

图 8 HB 油田主力油层趋势面校正前后构造图

Fig.8 Structural map before and after trend surface correction for the main oil layers of HB Oilfield

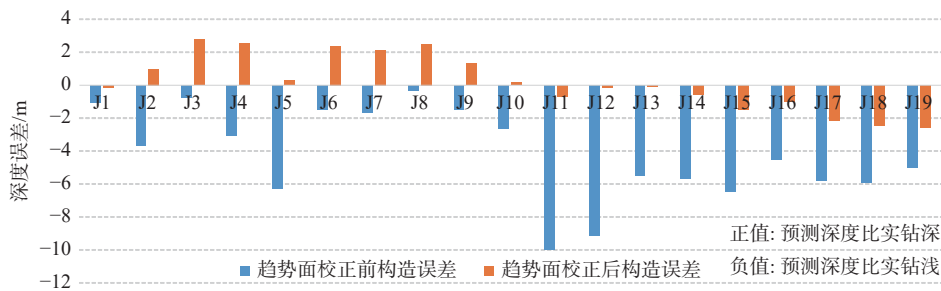
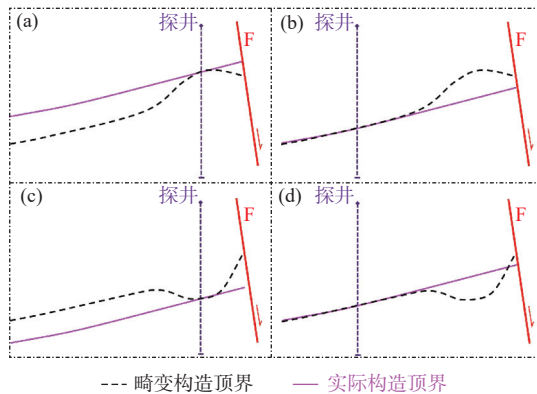


图9 HB2井位置各油层顶界构造预测深度与实钻深度误差对比

Fig.9 Comparison in bias between predicted depth and actual drilling depth of top boundary structure in each oil layer of Well HB2

变的构造,若探井处于畸变部位,则构造边部存在整体下压的风险;若探井处于畸变区域以外,则下拉畸变区构造存在抬升可能,储量具有一定潜力(图10)。



(a)探井处于上拉畸变范围内;(b)探井处于上拉畸变范围以外;
(c)探井处于下拉畸变范围内;(d)探井处于下拉畸变范围以外
图10 畸变构造潜力与风险模式

Fig.10 Potential and risk model of the distorted structure

3 结论

现阶段,单纯从地震处理时速度分析的角度或者应用某种时深转换方法进行构造成图,只是抓住了宏观主要矛盾,或许可以满足勘探评价的需求。但当油气田进入开发生产阶段,随着开发地震技术研究的深入,对构造的精细评价可能不再是唯一的唯数据驱动的速度分析及偏移成像问题,而是在明确各阶段地质认识基础上的速度分析及构造校正问题;也就是说,准确认识构造影响因素并在构造研究过程中予以消除,才能进一步提高构造和储量评价的精度。

参考文献:

[1] ALLEN J L. A case history of velocity problems in the shadow of a large growth fault in the Frio formation, Texas Gulf Coast[J]. *Geophysics*, 1989, 54(4): 426-439.

[2] YAN N, WEI J, JIE Z, et al. A forward simulation research to resolve the fault shadow problem[J]. *Energy Procedia*, 2012, 16(part-PA): 97-102.

[3] 宋亚民,戴朝强,张丽萍,等.恩平凹陷南部斜坡断层阴影带构造恢复方法研究[J].*地球物理学进展*, 2020, 35(6): 2194-2202.

[4] 赵斌,张衡,高红芳,等.叠前深度偏移技术在珠江口盆地的应用及其地质意义[J].*海洋地质前沿*, 2018, 34(7): 6.

[5] 张在金,陈可洋,范兴才,等.井控与构造约束条件下的网格层析速度建模技术及应用[J].*石油物探*, 2020, 59(2): 208-217.

[6] 李操.地震构造解释中断层阴影区假断层现象分析:以松辽盆地北部敖古拉断层为例[J].*新疆石油地质*, 2020, 41(2): 223-227.

[7] BIRDUS S, ARTYOMOV A. Fault shadow distortions on 3D seismic data and their removal by depth processing[J]. *ASEG Extended Abstracts*, 2010(15): 1-4.

[8] 刘依谋,印兴耀,张三元,等.宽方位地震勘探技术新进展[J].*石油地球物理勘探*, 2014, 49(3): 596-610.

[9] 朱明,何敏,张振波,等.海上二次三维双方位地震资料联合成像[J].*中国海上油气*, 2016, 28(6): 15-20.

[10] 胡高伟,邓勇,潘光超,等.双方位,高密度地震资料在文昌凹陷勘探中的应用[J].*地球物理学进展*, 2019, 34(6): 2444-2450.

[11] 张振波,罗伟.拖缆宽方位与双方位效果分析[J].*海洋地质前沿*, 2021, 37(3): 66-73.

[12] 彭海龙,邓勇,赫建伟,等.基于断层与层位约束的3D速度建模方法在消除断层阴影中的应用研究[J].*地球物理学进展*, 2017, 32(6): 2520-2526.

[13] 胡光辉,李熙盛,郭丽,等.构造约束全波形反演及其海上资料应用[J].*石油物探*, 2018, 57(4): 592-596.

[14] 李黎,沈水荣,吴意明,等.全波形反演与断层层析反演联合速度建模:以南海东部A油田为例[J].*中国海上油气*, 2020, 32(5): 107-113.

[15] 胡言防,谷延斌,李虹,等.高精度速度建模及深度偏移解决断层阴影问题[C].*中国石油学会2021年物探技术研讨会论文集*, 2021: 455-458.

[16] YANG X J, WEN X T, ZHOU D Y, et al. Reconstruction of distorted structures in the fault shadow zone based on the fully connected network [J]. *Interpretation*, 2021, 9 (4): 1085-1096.

[17] 姜岩,程顺国,王元波,等.大庆长垣油田断层阴影地震正演模拟及校正方法[J].*石油地球物理勘探*, 2019, 54(2): 320-329.

- [18] 陈祖银, 张霞, 邓海东, 等. 断层阴影识别技术研究及应用效果分析[J]. *物探化探计算技术*, 2021, 43(5): 579-583. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20211105.0928.010.html>
- [19] 孙维昭, 王中凡, 张智. 断层阴影的正演模拟、识别与校正: 以尼日尔Termit盆地为例[J/OL]. *地球物理学进展*: 1-14[2022-04-27].
- [20] 杨小江, 文晓涛, 王亚会, 等. 支持向量回归约束去除断层阴影研究: 以南海珠江口盆地东部YP油区某油田为例[J]. *华南地震*, 2021, 41(1): 78-83.

Fine study on lower gentle-distorted structures under the condition of few wells and its implications for oil and gas exploration

WANG Shenghao, LI Li, JIANG Yuting, YANG Xiaojiang, WANG Yaosen, LIU Zhen, ZHAO Hongjuan

(Shenzhen Branch of CNOOC(China) Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: In the eastern area of South China Sea, most production oilfields are in low and gentle structures and affected by fault shadow, and there is usually a certain degree of pull-up or pull-down distortion. For larger distortion, it can be partially eliminated by improving seismic acquisition method, seismic processing technology, and structural mapping with good understanding. However, the small-scale distortions are difficult to identify thus often ignored due to subjective thinking of the researchers. Consequently, small-scale distortions could sometime bring considerable uncertainty to the real pictures of oilfield structure and reserves, and further affect the overall development plan of oilfields. Therefore, taking HA and HB oilfields as examples, we conducted a retrospective analysis in each stage of structural mapping, and considered that the structure with pull-up distortion at the location of exploration well may have a certain reserve potential in the lower part. At the same time, a correction method of trend surface constraint was proposed, by which the real shape of the structure can be effectively restored. The practice of oilfield development and rolling evaluation show that this method could well improve the accuracy of structural prediction, successfully guide the design and implementation of evaluation wells, and shall be worthy of promotion and application for the structural research of oil and gas fields under similar geological conditions.

Key words: low and gentle structure; fault shadow; structural distortion; trend constraint and correction; structure mapping