

涂齐催, 娄敏, 毛云新, 等. 基于构造-流体耦合约束的变速成图方法及其在东海 A 气田挖潜阶段的成功应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 56-63.

TU Qicui, LOU Min, MAO Yunxin, et al. Variable velocity mapping based on structure-fluid coupling constraints and its successful application in A Gas Field in the East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(12): 56-63.

基于构造-流体耦合约束的变速成图方法及其在东海 A 气田挖潜阶段的成功应用

涂齐催, 娄敏*, 毛云新, 王伟, 黄鑫, 李炳颖, 王腊梅, 陈易周

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要: 时深转换是构造解释关键步骤之一, 时深转换方法主要包括常速成图与变速成图两大类。常速成图操作简单, 应用普遍, 但不适合速度场横向变化剧烈的工区。建立一种适应速度场横向变化且符合工区地质及油气藏特征的时深转换方法, 是本研究探讨的重点。迭代变速成图技术基于叠加速度反演, 综合了流体检测成果, 通过不断优化速度场开展变速成图, 能较准确地预测地下复杂构造的深度, 该方法刻画的构造油气藏含气范围与流体检测分布一致, 实现了同一油气藏的分布在不同地震信息维度下的耦合。利用迭代变速成图技术, 较好解决了 A 气田钻前构造气藏面积与“亮点”展布范围之间的矛盾, 统一了地质油藏认识, 扩大了地质储量, 有效推动了 A 气田的挖潜与调整, 实现了增储上产。

关键词: 速度建模; 烃类检测; 变速成图; 时深转换; 深度预测

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.219

0 引言

地震速度和时深转换是构造深度预测研究中的重要课题, 为了得到地下真实准确的构造, 地球物理学家一直在不断探索^[1-3]。油气勘探开发工作中, 地震资料解释是十分重要的环节。构造的精度影响地质人员对地下的认知。构造不仅影响储量规模的计算, 而且关系到对油藏的整体认识及开发井位的部署, 尤其是水平井对构造的精度要求更高。

构造的精度主要取决于速度和时深转换^[4-6]。速度在地震资料的采集、处理和解释各阶段发挥着

重要的作用。准确的速度是时深转换得到目的层深度的重要基础^[7-10]。时深转换是深度预测的重要手段, 目前主要包括常速成图和变速成图^[11]。一般情况下, 在工区范围小, 目标层基本属于同一相带, 储层比较稳定, 速度横向变化小, 常速成图往往能取得较好的效果。常速成图采用已钻井的时深拟合函数关系式用于时深转换^[12]。对于较浅的地层, 采用三项式拟合效果较好; 对于较深的地层, 采用幂函数拟合的误差较小。然而对于三维地震资料解释而言, 时深关系不是一个简单的函数关系式, 而是由多个地层相匹配的多个公式组成^[13]。随着深度的增加, 不同地层的速度变化与深度的关系是不同的。另一方面, 由于岩性组合、砂地比、流体性质、断裂的影响, 地震速度横向变化快^[14]。常速成图往往不能满足勘探开发钻前深度预测的要求。理论上, 在速度横向变化快的工区, 必须采用变速成图。实际工作中, 还需结合工区地质油藏特征以及烃类检测的成果, 综合应用变速成图技术, 才能取得较理想的构造成图效果。因此, 在速度求取准确的基础上, 变速成图比常速成图更合理, 预测的

收稿日期: 2021-08-19

资助项目: 国家科技重大专项“东海厚层非均质性大型气田有效开发关键技术”(2016ZX05027-004); 中海石油(中国)有限公司综合科研项目“西湖凹陷在生产油气田中后期综合调整关键技术研究与实践”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 39 SH03)

作者简介: 涂齐催(1979—), 硕士, 高级工程师, 主要从事油气田开发地震研究工作. E-mail: tuqc@cnooc.com.cn

* 通讯作者: 娄敏(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震解释和储层综合研究工作. E-mail: loumin2@cnooc.com.cn

构造精度更高。

1 地质背景

东海 A 气田位于西湖凹陷中央反转构造带南部(图 1), 为一个 NNE 向展布的长轴状低幅反转背斜构造。构造高点位于南部, 整体上具有西缓东陡的特点。构造形态较完整, 主体构造被早期 SN 向正断层 F1 分为东、西 2 块; 东块后期遭受 EW 向断层 F2 和 F3 改造; 西块 SN 向分为北、中、南 3 带,

受 EW 向断层影响较小^[15-16]。A 气田开发目的层是花港组 H5—H7 层, 埋深 3 200~3 500 m; 主力开发层为 H5 层, H5 层依据测井曲线特征可进一步划分为 H5a 小层和 H5b 小层。A 气田花港组沉积时期整体古地形平坦, 为三角洲-河流相沉积, 主要发育三角洲平原、三角洲前缘分流河道砂体, 垂向上表现为多期河道的横向迁移与垂向叠置, 平面上河道具有填平补齐的规律^[17-20]。A 气田整体表现为构造主控的气藏, H5 层储层稳定发育, 油气主要分布在构造高部位。

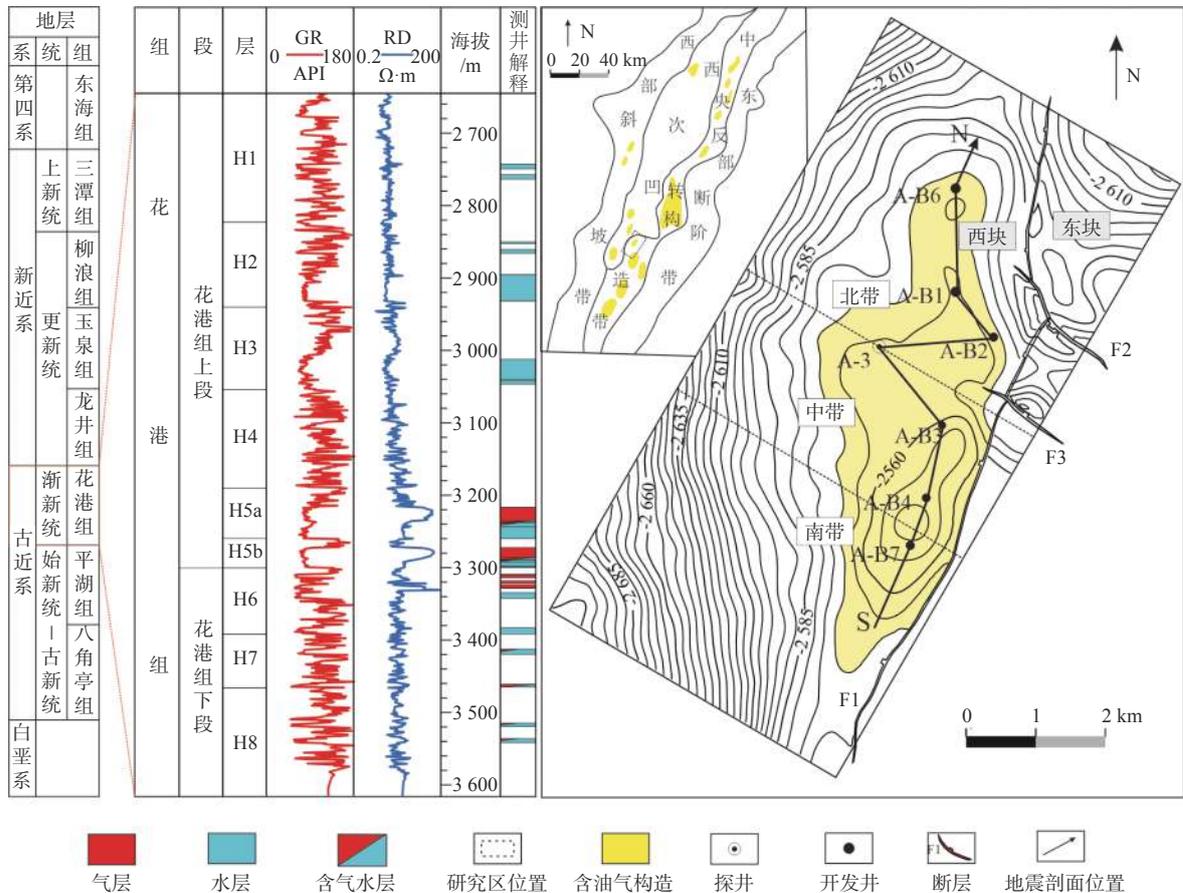


图 1 研究区地层综合柱状图及井位分布

Fig.1 Stratigraphy column, logging data, and the distribution of wells in the study area

研究区目前开发井位主要分布在西块中北部, 南部无钻井(A-B7 井为本次研究后新钻井)。生产动态表明中部钻井(A-B3 井和 A-B4 井)生产效果均好于北部钻井(A-B1 井、A-B2 井和 A-B6 井)。H5 层现有含气构造认识与生产动态上存在地质储量和动用储量不匹配的矛盾, 且现有含气构造范围与流体检测含气范围叠合度差。以 H5a 层为例, 钻井确定的气水界面圈定的含气范围面积为 3.57 km², 小于叠后烃检对应的“亮点”面积 4.70 km², 两者得

到的油气藏面积不一致, 从而给后续储量计算及开发设计带来难题。

在参考前人研究的基础上, 针对 A 气田目的层常规成图构造与地质油藏认识不符的特点, 提出构造-流体耦合约束的变速成图方法。综合考虑流体检测成果中亮点的面积与构造含气面积的叠合程度, 通过不断优化速度场开展变速成图。利用该方法对 A-B7 井进行精确的钻前深度预测, 落实 A 气田南部构造, 指导油气田下一步滚动挖潜和综合调整。

2 技术流程及思路

在地震资料保幅性好的前提下,振幅强度与含油气性对应关系较好,具备开展识别“亮点”油气藏的基础^[21-22]。理论上,如果地震速度求取准,地震保幅性好,构造含气范围与“亮点”分布区范围是一致的(图2a)。如果地震速度与真实速度有偏差,获得的深度构造就不准确,圈定的构造含气范围与“亮点”范围不一致。具体存在2种情况:当预测构造浅于真实构造时,圈定的构造含气范围大于“亮点”范围(图2b);当预测构造深于真实构造时,圈定的构造含气范围小于“亮点”范围(图2c)。因此,在进行深度预测时,可以考虑构造含气范围与“亮点”范围的叠合程度,以此来指导速度建模,求取地下接近真实构造的深度图,减小构造预测的误差,降低构造预测变化导致的风险。

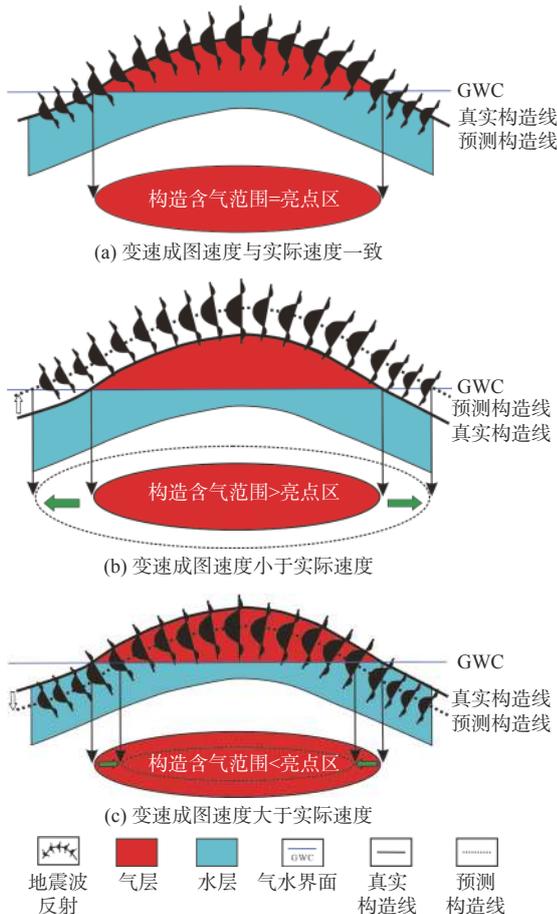


图2 不同构造预测条件下含气范围与亮点范围的关系

Fig.2 Relationship between gas range and bright spot range in different tectonic prediction models

2.1 流体检测

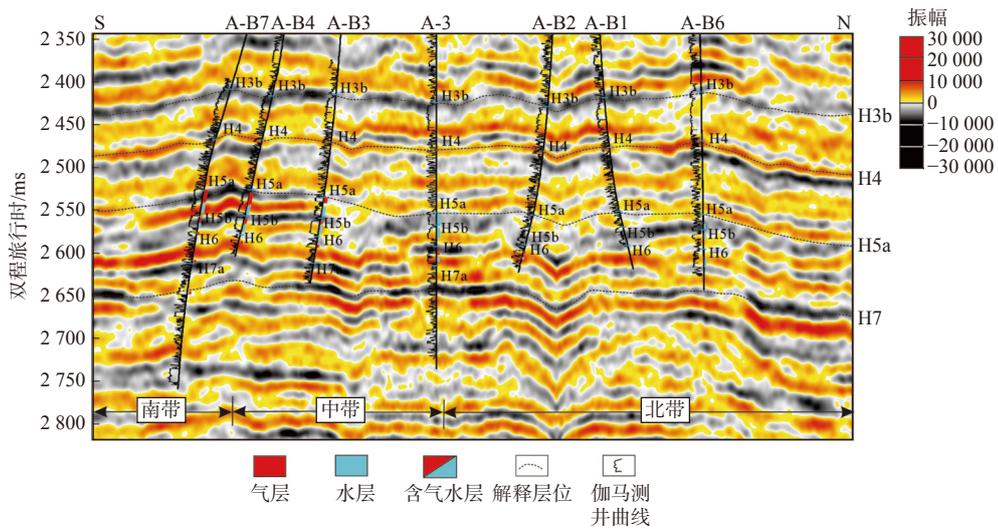
目前,流体检测技术主要有叠后亮点技术、AVO技术和叠前反演技术。在地震资料保幅性好的情况下,气层在叠后地震上变现为“亮点”特征。AVO技术是地震反射振幅随炮检距变化而变化的规律以及与地层岩性的关系。一般中浅层砂岩物性较好,含气后多变现为Ⅲ类AVO特征。据此可以进行中浅层砂岩含气性的预测。叠前反演技术主要利用多种弹性参数,通过岩石物理分析,构建对油气敏感的流体因子来预测油气。

研究区地震资料保幅性好,地震子波为正极性,已钻井气层与波谷强振幅对应关系较好。H5层气层孔隙度范围为11.6%~16.2%,平均孔隙度为13%;渗透率范围为 $(3.1\sim 36.1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $15\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,整体属于中低孔-中低渗储层,储层物性中等。A气田背斜高部位处储层靠近油源断层,且构造有利,成藏条件较好。中部A-B4井和A-B3井在H5层均发育气层,北部井在H5层均为水层。通过精细的井震标定,在地震剖面上气砂的砂顶表现为波谷强振幅反射特征(图3)。但是,“亮点”的成因具有多解性,叠后地震上的强振幅不一定是含油气性的响应。“亮点”可能是含气的响应,也可能是煤层、火成岩或者薄层砂岩调谐的响应^[23]。A气田钻井揭示不发育火成岩,“亮点”主要位于中南部构造,且中部已有钻井(A-B3井和A-B4井)证实H5层为气层。因此,中南部的“亮点”作为含气范围可靠性强。此外,通过叠前CRP道集分析,南部H5层表现为Ⅲ类AVO特征(图4),进一步证实“亮点”对含油气性的指示。因此,A气田中南部背斜高点强振幅的范围理论上应与含油气范围匹配。

2.2 构造-流体耦合约束的变速成图

变速成图关键在于速度求取是否精确。通常速度场求取是在地震处理的叠加(偏移)速度基础上,通过DIX公式转换的方法得到层速度,然后得到平均速度。由于DIX公式的应用存在一个水平层状介质假设的前提,即要求速度场上横向无变化,这与一般地下情况不符,因此,按照该方法求取的速度自然也不够精确。

叠加速度反演是一种更先进的求解地下层速度的方法。不同于DIX公式,叠加速度反演技术避开了水平层状介质的假设,可适用于更复杂的地下



剖面线见图 1

图 3 过井 SN 向常规地震剖面

Fig.3 Cross-well SN conventional seismic profile

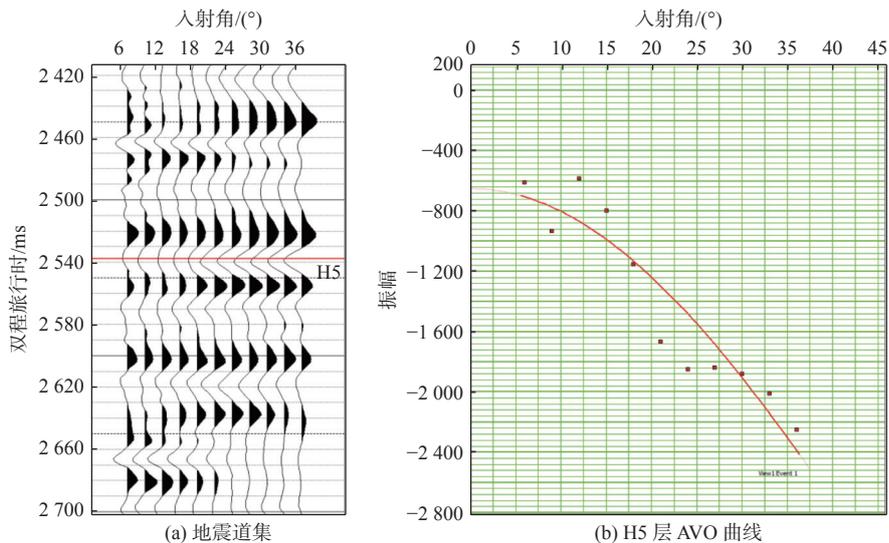


图 4 H5 层 AVO 曲线特征

Fig.4 Characteristics of the AVO curve of H5 layer

条件,因此可以得到较为准确的层速度。它本质上是一种基于模型的速度反演方法,通过迭代 CRP 射线追踪的办法获取准确的空间位置的层速度。该方法利用等 t_0 图和叠加速度图来估计层速度,对某层某点给定一个层速度,按照非双曲线假设,通过射线追踪计算实际的旅行时曲线,并与叠加速度对应的旅行时曲线(按照双曲线理论)进行对比,从一定范围的层速度中优选出两者匹配最好的层速度,作为最好的层速度输出。

迭代变速成图技术就是在井点速度约束的基础上,运用叠加速度反演求取层速度进行时深转换,将深度域刻画的构造油气藏面积与“亮点”技

术等烃类检测手段预测的油气藏范围进行比较,如两者一致,则认为叠加速度反演求取的速度场精准可靠,可作为最终的速度场进行时深转换及深度域成图;如两者不一致,则认为叠加速度反演求取的速度场仍需进一步优化,方法是参考工区构造及油气藏分布特征,对速度场进行合理优化(优化后的速度场整体变化规律应与初始速度场保持一致)。利用含气范围与亮点范围的关系控制速度增减的方向(图 2),当构造圈定的含气范围大于亮点范围时,变速成图速度小于实际速度,下次迭代的平均速度要增加;反之,平均速度要减小。速度变化的增量则受气水界面深度对应的平均速

度控制。由于已知气水界面深度与“亮点”边界在时间域大致对应的双程旅行时,可以初步计算出含气边界对应的平均速度。将迭代的平均速度调整至接近含气边界对应的平均速度。然后再次进行时深转换及深度域成图,如此循环迭代,直到上述两者范围基本一致,则最终的速度场为所要求取的速度场,最终的深度域构造为所要得到的构造(图5)。除了考虑深度域刻画的构造油气藏面积与“亮点”范围的吻合度外,还需考虑新钻井的深度预测误差检验。两者综合考虑,误差均较小是时候迭代可以结束。

迭代变速成图技术考虑了叠加速度反演,同时融合了烃类技术的检测成果,通过新一轮的迭代,可以求取更加合理的速度场。该速度场整体趋势与叠加速度反演的结果保持一致,同时在局部上又符合工区构造及地质油气藏分布的特征。因此,迭代变速成图技术包括了两重“迭代”,是一种“双迭代”的变速成图技术。它可以在叠加速度反演基础上求取更准确更合理的地下速度场,由于在速度场修改过程中考虑了工区的构造、油气藏分布特征,因此该速度场具有一定的地质意义。通常在构造高部分布有油气藏的地方,速度场会表现为低值异

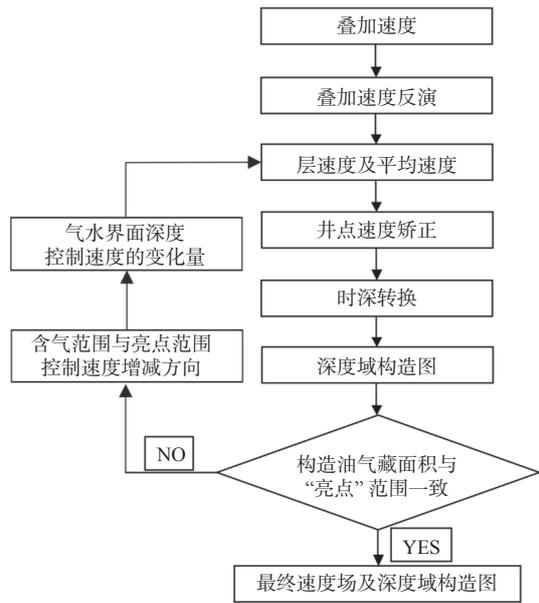


图5 迭代变速成图技术流程

Fig.5 Technological flowchart of iterative variable velocity mapping

常。此外,由于迭代变速成图技术综合应用了烃类技术检测成果,因此,根据该方法得到的深度域构造图及构造油气藏面积与烃类检测的认识是一致的,两者的统一有利于对储层及流体的认识,有利于工区地质储量的计算。

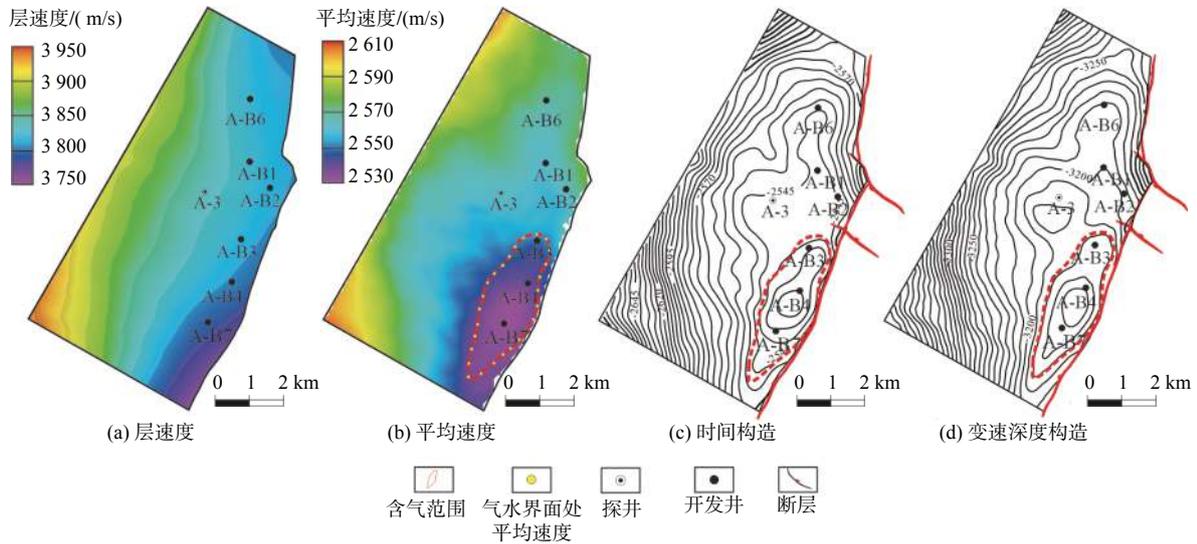


图6 H5a层速度及构造平面图

Fig.6 The velocity and structure map of H5a layer

在得到最终平均速度场的基础上,利用时间域解释的层位提取平均速度平面分布。通过等 t_0 图与平均速度相乘得到矫正前的深度构造图。最后结合已钻井目的层的深度,进行井点矫正得到最终的深度构造图(图6)。新钻井的深度预测采用设计井井轨迹与深度构造面的交点深度坐标,避免人工剖面读值产生误差。

3 应用效果

3.1 构造预测效果分析

研究区主要以低幅构造气藏为主,断裂发育,

速度横向变化快。通过变速成图, 落实低幅构造幅度是该区下一步滚动挖潜所面临的重点研究问题之一。本次解释的层位经过严格的井震标定, 追踪对比可靠; 且通过准确的速度分析建立了高精度的三维速度场, 为构造成图奠定了可靠的基础。通过构造-流体耦合约束的变速成图, 获得的速度平面图与构造趋势一致, 且构造成果图形态自然, 无畸变现象, 与钻井分层吻合较好。表明所编制的构造图准确可靠, 能够真实的反映地下的实际情况, 达到了所需的精度要求。

为突出变速成图的合理性, 本次分别采用了变速和常速 2 种方式进行构造成图。常速成图采用探井 C-3 井的时深进行拟合, 未考虑速度的横向变化, 最终的构造图与地质油藏特征不符, 圈定的含气面积与亮点范围吻合度低。依据生产动态资料估算的动储量大于按照常速成图方案计算的探明地质储量, 动储量与静储量存在较大的矛盾。与常

速构造成图相比, 变速成图构造在油藏动态及地质特征方面与实际情况更吻合。变速成图的构造气水界面与“亮点”范围叠合度更高。值得注意的是构造等值线与“亮点”范围的吻合度是一个相对的概念, 相比于常速成图构造, 变速成图构造等值线明显与“亮点”范围更吻合(图 7)。分别对比“亮点”分布、变速成图构造含气范围(图 7a、c)、常速成图构造含气范围(图 7b、d), 三者面积、长轴长度和短轴长度的差异性, 可以明显发现, “亮点”分布和变速成图构造含气范围更匹配(图 8)。值得注意的是 H5a 层“亮点”分布的短轴长度与变速成图含气范围短轴长度差异较大。这主要由于并非所有厚度的气层均对应于“亮点”, H5a 层构造东西两翼由于气层厚度较薄, 振幅较弱, 但仍在含气范围内。通过变速成图表明 H5 层南部构造均有一定幅度的抬升, 变速深度构造图对应的气水边界较常速构造图对应的气水边界范围更大。

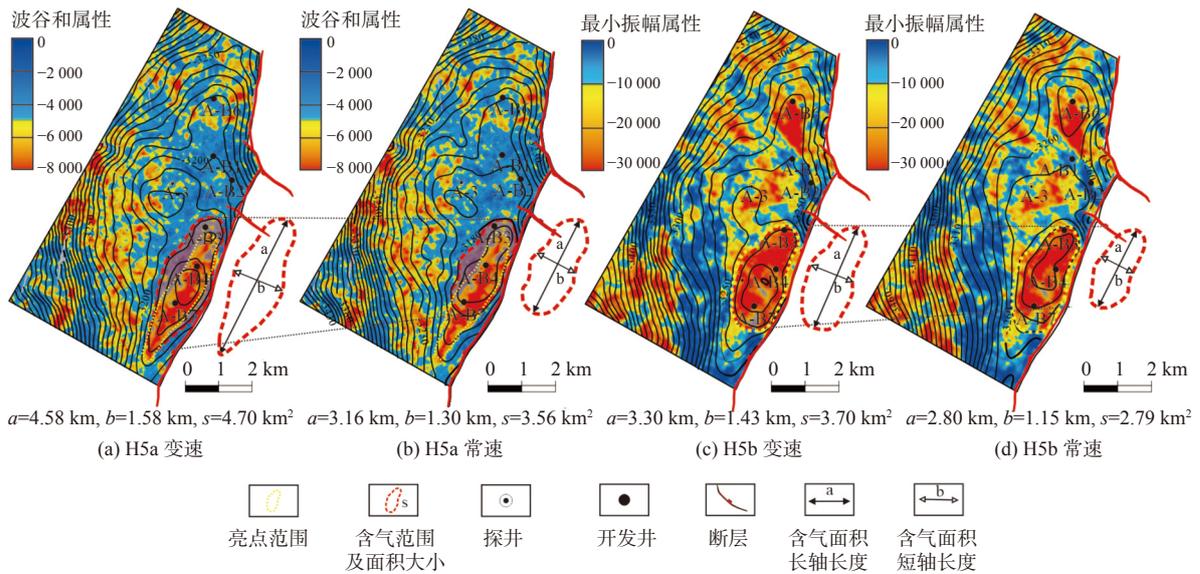


图 7 H5 层构造与振幅类属性叠合图

Fig.7 The structure overlaps with the amplitude attributes of H5 layer

因此, 相比常速成图, A 气田变速成图得到的构造图更符合地质油藏认识。A-B3 井和 A-B4 井钻后揭示南高点构造落实, 自投产 H5b/H6 层以来, 生产平稳, 目前日产气量较高, 基本不出水, 开发效果较好。此外, 通过变速成图计算的探明地质储量与动储量更匹配, 进一步表明 A 气田南部存在构造抬高的可能性, 存在储量增长的空间。据此, 在 A 气田南部设计了 A-B7 井。

3.2 钻探效果分析

验证构造成图精度最有效的方法是盲井检验,

盲目目的层构造预测误差越小, 则构造图精度越高。A-B7 井钻后证实南部构造抬高, 变速成图预测误差更小。以 H5a 层为例, 钻前变速成图预测海拔深度为 -3 156.8 m, 钻前常速成图预测海拔深度为 -3 168.24 m。钻后实际海拔深度为 -3 155.4 m, 与变速成图预测结果更接近, 误差仅 1.4 m, 而常速成图误差高达 11.4 m。总体上, 按照变速成图方式, 钻后构造预测误差 < 3 m, 预测的最大埋深误差 2% 以内, 证实了变速成图的可靠性。

在新落实的低幅度构造圈闭上部署 A-B7 井, 钻探取得良好地质效果, 其中在花港组气测异常

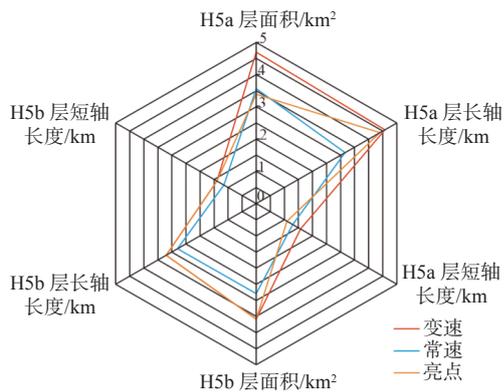


图8 H5层变速成图构造、常速成图构造和“亮点”分布关系对比

Fig.8 The comparison among variable-velocity mapping, constant-velocity mapping and distribution of "bright spot" area of H5 layer

217 m/27层;测井解释气层 61.7 m/18层,为A气田近几年高效开发井之一。变速成图方法预测深度误差小、精度高,取得了明显的应用效果。证实了通过构造-流体耦合约束的变速成图方法在A气田落实低幅构造的可靠性和准确性。

4 结论

(1)在东海A气田首次将以地震“亮点”为特征的流体检测引入变速成图进行约束监督,通过不断优化地震速度场及时深转换,实现精确构造成图与深度预测。在地震资料保幅的情况下,“亮点”的范围与含油气范围吻合度高。相比于常速成图,可以大大提高低幅构造区钻前深度预测的精度。

(2)基于构造-流体耦合约束的变速成图较好解决了A气田钻前构造气藏含气面积与“亮点”范围展布之间的矛盾,统一了地质油藏认识,扩大了地质储量,有效推动了A气田的挖潜与调整,实现了增储上产。

参考文献:

[1] 王树华,刘怀山,张云银,等.变速成图方法及应用研究[J].中国海洋大学学报,2004,34(1):139-146.
 [2] 马海珍,雍学善,杨午阳,等.地震速度场建立与变速构造图的一种方法[J].石油地球物理勘探,2002,37(1):53-59.
 [3] RESHEF M. The use of 3D prestack depth imaging to estimate

layer velocities and reflector positions [J]. Geophysics, 1997, 62(1): 206-210.

- [4] 彭军,周家雄,马光克,等.构造成图时深转换方法[J].地质与勘探,2020,56(2):411-417.
 [5] 白晓寅,黄玉,陈永波,等.低幅度构造-岩性油气藏识别技术[J].石油地球物理勘探,2012,47(2):1-8.
 [6] 徐立恒,鲜波,薛玉英,等.高精度地震时深转换方法研究及应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(5):1712-1719.
 [7] JONES I F, IBBOTSON K, GRIMSHAW M, et al. 3-D prestack depth migration and velocity model building [J]. The Leading Edge, 1998, 19(7): 897-906.
 [8] RUSSELL B. A simple seismic imaging exercise [J]. The Leading Edge, 1998, 19(7): 885-889.
 [9] 李贺,秦童,张笑桀,等.基于精细迭代建模的速度异常识别方法与应用[J].海洋地质前沿,2019,35(12):74-80.
 [10] 樊奇,田继军,成赛男,等.南沙东北部海域地震速度岩性分析应用[J].海洋地质前沿,2015,31(12):42-51.
 [11] 黄兆林,王兴芝,李添才,等.变速成图技术在南海西部地区的应用[J].海洋地质前沿,2011,27(11):55-59.
 [12] 陈广军,宋国奇.低幅度构造地震解释探讨[J].石油物探,2003,2(3):395-398.
 [13] 周蒂,胡登科,何敏,等.深部地层时深转换中的拟合式选择问题[J].地球科学(中国地质大学学报),2008,33(4):531-537.
 [14] 左中航,姜利群,张海义,等.渤海油田新近系地层速度异常研究[J].地球物理学进展,2019,34(5):2128-2132.
 [15] 蔡华,张建培,唐贤君.西湖凹陷断裂系统特征及其控藏机制[J].天然气工业,2014,34(10):18-26.
 [16] 徐发,张建培,张田,等.西湖凹陷输导体系特征及其对油气成藏的控制作用[J].海洋地质前沿,2012,28(7):24-29.
 [17] 李文俊,段冬平,何贤科,等.西湖凹陷HY气田低渗储层分类描述及流体检测[J].海洋地质前沿,2021,37(12):17-26.
 [18] 张建培,徐发,钟韬,等.东海陆架盆地西湖凹陷平湖组-花港组层序地层模式及沉积演化[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(1):35-41.
 [19] 娄敏,刘江,涂齐催,等.河流-三角洲相不同厚度储层的地震沉积学研究[J].地球物理学进展,2021,36(5):2191-2203.
 [20] 毛云新,娄敏.河流相储层刻画与垂向非均质性分析—以西湖凹陷C油田柳浪组为例[J].东北石油大学学报,2021,45(5):51-62.
 [21] 涂齐催,刘江,崔树果,霍凤斌.基于流体替换进行AVO分析检测深层I类气藏[J].工程地球物理学报,2011,8(3):279-283.
 [22] 涂齐催,张雷,蔡华,等.砂岩孔隙度对地震反射影响的模型研究[J].中国海上油气,2013,25(4):22-25.
 [23] 周晶,李久娣,江东辉,等.海上X构造浅层“亮点”油气藏识别技术及应用[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(6):207-215.

Variable velocity mapping based on structure-fluid coupling constraints and its successful application in A Gas Field in the East China Sea

TU Qicui, LOU Min^{*}, MAO Yunxin, WANG Wei, HUANG Xin, LI Bingying, WANG Lamei, CHEN Yizhou
(Shanghai Branch of CNOOC(China)Ltd, Shanghai 200335, China)

Abstract: Time-depth conversion is one of the key steps in structural interpretation. It includes mainly two categories: constant-velocity mapping and variable-velocity mapping. The constant-velocity mapping is not suitable for a work area whose lateral velocity field changes intensely. The key point of this paper is to establish a time-depth conversion method that is suitable for the field with variation of lateral velocity and in accordance to the geological characteristics, for which an iterative variable velocity mapping technique was developed based on the inversion of superposition velocity, and the results of hydrocarbon detection were integrated. The iterative mapping technique was applied to the mapping of various complex underground structures, and the results are consistent with the distribution of hydrocarbon and geological implications. In addition, by using the iterative mapping technique, the controversy between structural gas reservoir area, "bright spot" area in the A Gas Field was well solved, and the geological reserves were expanded, and the construction and development of A Gas Field was effectively promoted.

Key words: velocity modeling; hydrocarbon detection; variable-velocity mapping; time-depth conversion; forecast of depth