

孙龙飞, 李慧勇, 许鹏, 等. 渤海海域渤中 19-6 构造古近系泥岩段速度异常分析及定量预测[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(11): 11-17.

渤海海域渤中 19-6 构造古近系泥岩段 速度异常分析及定量预测

孙龙飞, 李慧勇, 许鹏, 秦德海, 崔海忠, 陶莉

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452)

摘要:渤中 19-6、渤中 21/22 构造区位于渤中凹陷西南部, 其中渤中 19-6 构造古近系底部砂砾岩层和太古界潜山以及渤中 21/22 构造古生界潜山均有商业性油气发现。已钻井揭示研究区古近系泥岩段普遍发育异常高压, 实测压力系数介于 1.2~2.0。在这样的超压背景下, 应用传统方法对未钻区块超压泥岩段速度预测存在较大误差。而该段地层速度预测的准确性, 对于更深部的砂砾岩层和潜山顶面深度预测及钻井作业安全至关重要。以超压形成机制为出发点, 明确本区速度异常的主要控制因素为欠压实作用和生烃作用。随着埋深增加, 通过对比压力、速度受欠压实和生烃作用强弱变化的影响, 发现在古近系超压泥岩段, 欠压实作用对速度影响逐渐趋于稳定, 速度的变化主要受控于生烃作用的强弱, 并据此建立了速度和影响因素之间的定量关系。根据该方法预测的潜山顶面深度与探井实钻深度吻合度较高, 提高了钻井作业的安全性。

关键词:渤中坳陷; 异常高压; 欠压实; 生烃作用; 速度预测

中图分类号: P618.130.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.149

0 引言

渤海湾盆地渤中 19-6、渤中 21/22 构造区受复杂地质情况、钻井成本的影响, 深层探井较少, 地层速度预测缺乏邻井速度资料借鉴, 而利用速度体资料进行深度预测往往存在较大误差, 导致速度预测精度低, 无法满足钻探需求^[1]。研究区地层纵向上可划分为 3 套压力系统: 古近系东二下段上覆地层为常压系统; 东二下段至沙河街组地层为超压系统; 沙河街组以下地层为常压系统。古近系稳定发育的泥岩段正是超压系统层段, 地震传播速度发生异常变化, 并且井间速度差别很大, 一直是本区速度预测的难点。准确的深度预测能判断目的层之上

套管的准确下深位置, 从而防止井漏的发生, 确保钻井安全, 因此, 古近系泥岩段精确的速度预测十分关键。

在沉积岩覆盖地区, 地震速度的空间分布受沉积环境、相带分布和区域地质结构的控制, 具有成层性、递增性、方向性和分区性^[2]。前人大多通过声波测井曲线重构方法进行速度预测^[3-7], 该区探井在古近系泥岩段随钻测井很少, 因此这种方法并不适用。Han 等^[8]经过大量岩心测试实验研究表明, 声波速度最主要的影响因素为岩性、孔隙度和垂直有效应力, 即声波速度主要是岩性、孔隙度和垂直有效应力的函数。樊洪海^[9]认为密度在一定程度上可以反映矿物组成、颗粒粗细、胶结物等对纵波速度有一定影响的因素, 因此又加入了密度的数据, 而该区未钻块超压泥岩段孔隙度、垂直有效应力等参数很难预测。针对上述方法存在的问题, 笔者建立了一套适用于渤海湾盆地古近系超压泥岩段的速度预测方法。声波速度异常变化往往伴随着异常压力的存在, 这是因为影响地层压力变化的机制不均压实和卸载作用同样是影响声波速度变化

收稿日期: 2020-09-20

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“近海大中型油气田形成条件及勘探技术”(2016ZX05024-002)

作者简介: 孙龙飞(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事成藏动力学方面的研究工作。E-mail: sunlf4@cnooc.com.cn

最重要的因素^[10-11]。近年来,国内外学者密切关注超压和速度异常的研究进展,尤其是对其成因机制进行了大量研究^[12-13]。应力作用、流体体积膨胀、流体流动是国内外学者提出的可能产生超压和速度异常的主要机制^[14]。本文从影响该区压力和速度异常的机理出发,通过构建速度和机理控制因素的关系,对古近系超压泥岩段速度进行定量预测。

1 地质概况

渤中 19-6、渤中 21/22 构造区位于渤中凹陷西南部,渤中 25-1 油田北部,夹持在渤中凹陷主洼和西南洼之间(图 1),渤中 19-4 油田主要油气发现层位为该区新近系。渤中凹陷西南部基底整体表现为被两洼夹持的 2 条近 SN 向构造脊——渤中 13 构造脊和渤中 19 构造脊,渤中 19-6 构造位于南侧

的渤中 19 构造脊上。研究区基底被 SN 向走滑断层和近 EW 向次级断裂分割为多个断块。

渤中凹陷西南部新生代地层保存比较完整,自下而上依次发育古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组和第四系平原组。沙河街组和东营组为此次研究的主要层位。沙河街组和东营组沉积时期,沉积区距离物源较远,发育区域稳定沉积的湖相泥岩加薄层粉—细砂岩。泥岩颜色为褐灰—深灰色,局部含灰质,有机质类型好、丰度高,处于低成熟—成熟阶段,为该区主要的生油层系。已钻井揭示该区古近系泥岩段普遍发育有异常高压,实测压力系数介于 1.2~2.0。区域稳定分布的巨厚湖相超压泥岩盖层一方面控制了油气在这套厚层泥岩之下的运移聚集,另一方面阻止油气以较快的速度向上逸散,为油气聚集成藏提供了很好的保存条件^[15]。

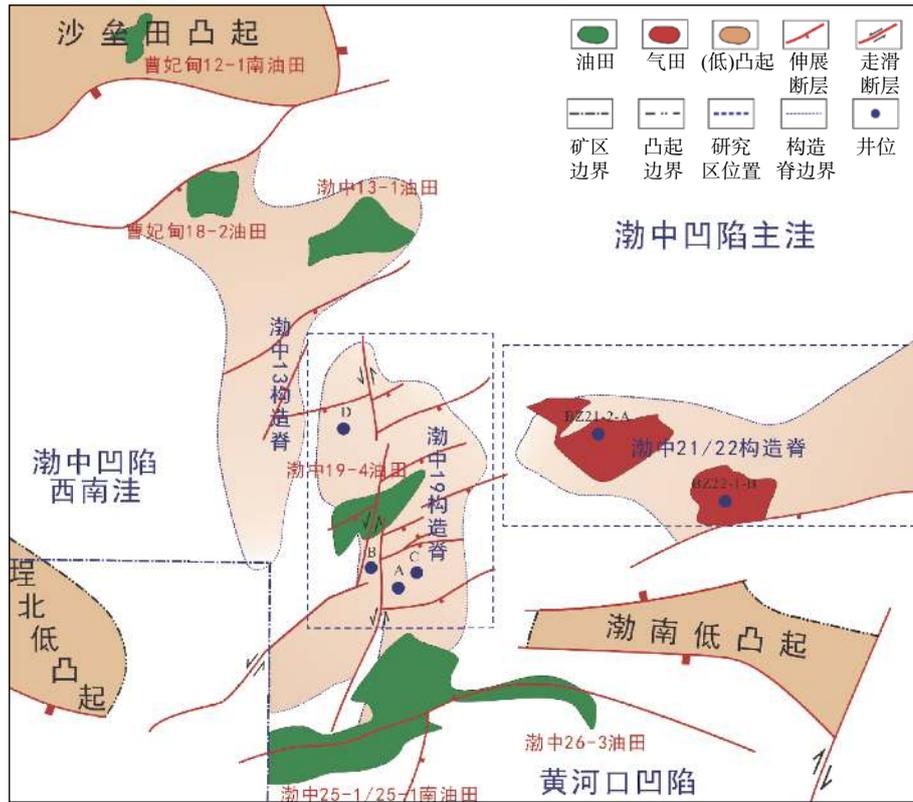


图 1 渤中 19-6、渤中 21/22 构造区域位置图

Fig.1 Geographic location of BZ19-6 and BZ21/22 structures

2 速度异常机理

本区古近系泥岩岩性比较稳定,为稳定沉积的

湖相泥岩。由于岩性特征比较一致,那么影响泥岩段速度主要影响因素是孔隙度和垂直有效应力,也就是说控制孔隙度和垂直有效应力变化的作用就是导致速度异常的机理^[8-9]。随着油气勘探开发的

不断发展,对速度和压力异常的控制机理分析也在不断深入。引起速度异常和超压发育的机理有很多,可以将其划分为不均衡压实、流体膨胀、成岩作用、构造挤压、压力传递 5 类^[16]。目前,普遍认为沉积盆地中大规模超压的主要原因是欠压实与流体膨胀(生烃作用)^[13,17-19],这也正是该区超压和速度异常的主要成因^[20-21]。

2.1 欠压实作用

随着沉积物的快速沉积,地层孔隙流体未及时排出,地层压实受阻,继续增加的上覆载荷部分或全部由孔隙流体承担,造成异常高压,这就是本区

欠压实作用下形成超压的原因。沉积物的快速沉积是产生欠压实的地质条件,研究区古近系泥岩段平均沉积速率 $> 140 \text{ m}\cdot\text{Ma}^{-1}$,在这样的欠压实沉积背景下,东二下段地层压力随埋深增加逐渐增大,而速度逐渐减小。随着欠压实作用进一步增强,压力和声波速度变化趋势减缓,逐渐趋于稳定不变(图 2)。

研究区古近系泥岩段速度在东二下段底部—东三段顶部已逐渐趋于稳定,几乎保持在一个稳定的速度值(图 2、3)。即在这个层段欠压实作用对速度的影响开始趋于稳定。而在以东三段为主的超压层段,速度再一次发生剧烈异常变化,我们将从其他影响因素进一步研究。

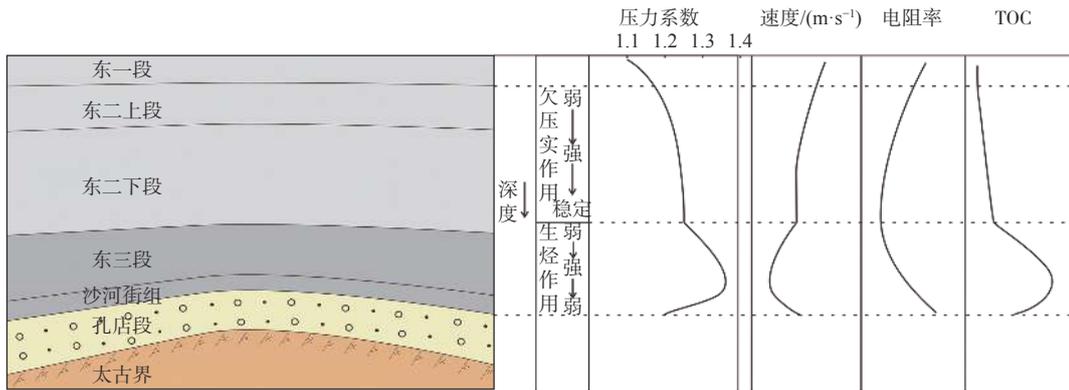


图 2 速度、压力受欠压实、生烃作用变化影响模式

Fig.2 Model of pressure and velocity affected by undercompaction and hydrocarbon generation

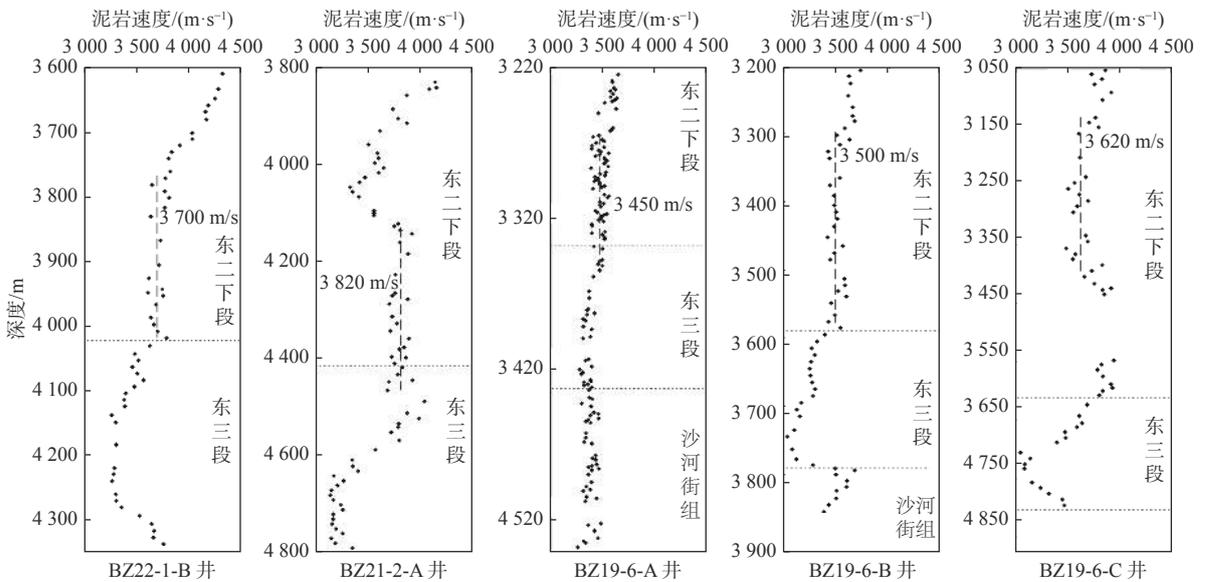


图 3 各井古近系泥岩速度

Fig.3 Velocity of Paleogene mudstone in wells

2.2 生烃作用

通过对研究区古近系烃源岩样品有机质丰度、类型和成熟度(表1)分析可知,东三段已经达到了较好—优质的烃源岩标准,并且有机质成

熟度较高,具有较强的生烃能力。结合前人认识和本区各井速度变化与生烃作用相关指标的关系对比(图2、4),综合认为在以东三段为主体的层段,压力和速度的变化主要受控于生烃作用的强弱。

表1 各层有机质特征对比

Table 1 Characteristics of organic matters

层位	TOC/%	S ₁ + S ₂ /(mg·g ⁻¹)	类型	成熟度Ro/%	综合评价
东二下段	0.35~1.78	0.47~12.97	II 2型为主	0.5~0.8	一般—较好
东三段	0.59~3.89	0.72~18.89	II 1和II 2混合型	0.7~1.2	较好—优质
沙河街组	0.43~2.78	0.53~16.37	I和II 1混合型	0.9~1.2	较好—优质

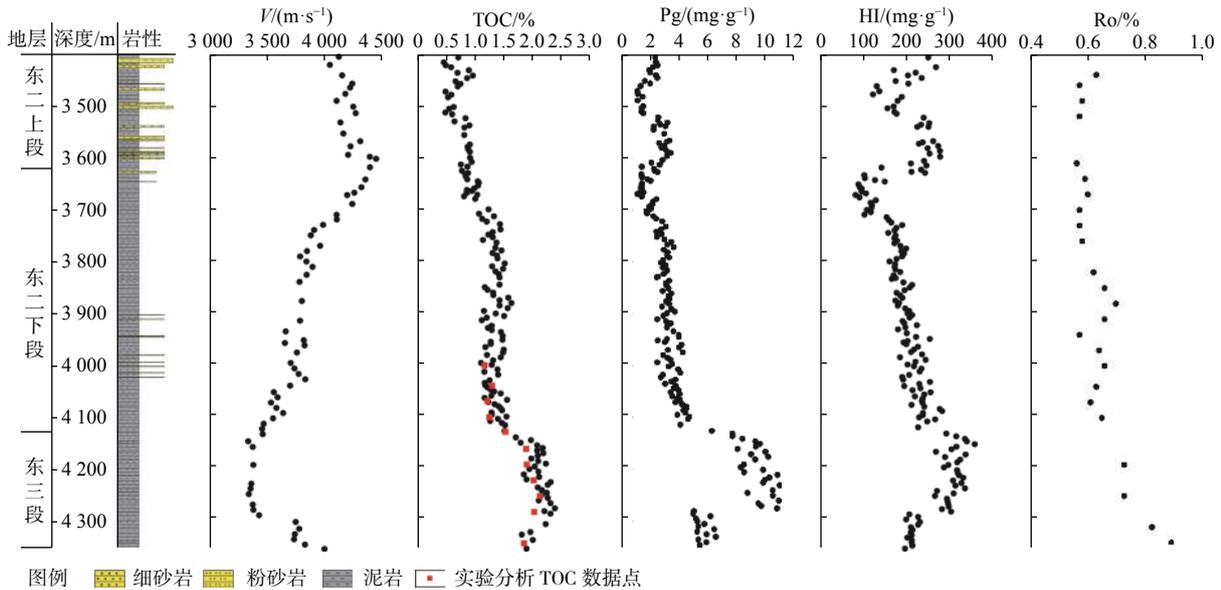


图4 BZ22-1-B 井生烃指标与速度关系对比

Fig.4 Comparison of hydrocarbon generation index and velocity of Well BZ22-1-B

生烃作用及其所引起岩石结构及孔隙流体性质等的改变可以极大地提高孔隙的剩余压力^[22-23]。在该区东二下段—东三段顶部欠压实作用已趋于稳定的背景下,东三段速度又出现进一步减小的变化(图2~4),这主要是因为生烃作用逐渐增强,孔隙含烃流体增多,地层压力增大,导致岩石结构有效应力减小,减少了可传播声波的晶粒间触点数量,从而引起速度降低^[24]。

3 速度定量预测

根据上述以东三段为主的泥岩段速度变化和欠压实作用、生烃作用之间的关系,初步建立起三

者之间的关系式:泥岩段速度=欠压实作用下速度稳定值+生烃作用引起的速度变化量,即

$$V = V_{\text{欠压实}} + V_{\text{生烃}}$$

生烃作用强弱主要影响因子包括:有机质类型、有机质丰度和有机质成熟度。其中该区东三段有机质类型较为一致,因此,不作为此次定量关系建立的主要影响因素,生烃作用的强弱引起速度变化主要取决于该区有机质丰度和有机质成熟度。

3.1 生烃指标优选

代表有机质丰度指标的选取至关重要,本文通

过对比各项指标, 选取了 TOC 作为有机质丰度的代表指标, 主要依据如下:

(1) TOC 和速度随深度变化响应关系最好

从 BZ22-1-B 井各项生烃指标和速度随深度变化的关系对比来看(图 4), 其中 Ro 数据点较少, 在数据量上不能满足建立关系式要求; Pg 在同一深度点附近数据值比较散乱; HI 在东三段顶界面呈现突变的变化情况, 且在东三段随深度增加与速度响应关系较差; TOC 数据点相对集中, 与速度变化响应关系最好。

(2) TOC 数据点较可靠

TOC 现场数据量比较齐全, 同时实验室还会根据采集样品做实验分析, 实验分析数据点更为真实可靠, 缺点是实验分析数据点较少, 但可用来验证现场 TOC 数据点的可靠性(图 4)。

(3) TOC 数据预测更准确

生烃指标的可预测性和预测的准确性对于速度定量预测至关重要。前人通过相关研究, 提出了许多利用地震资料预测和评价烃源岩 TOC 的方法, 并取得了较好的效果, 可以对低勘探程度地区的 TOC 进行预测^[25-26]。

3.2 速度与 TOC 响应关系的建立

3.2.1 速度与 TOC 响应关系

通过各井速度和 TOC 数据点的拟合(图 5), 建立起速度和 TOC 之间的关系。随着 TOC 逐渐增大, 速度减小, 呈明显的对数关系。其中, 关系式中的常数即 $V_{\text{欠压实}}$ 与实际速度(图 2)对比, 吻合度非常高, 证明本文对于该区超压泥岩段速度异常机理的认识是正确的。

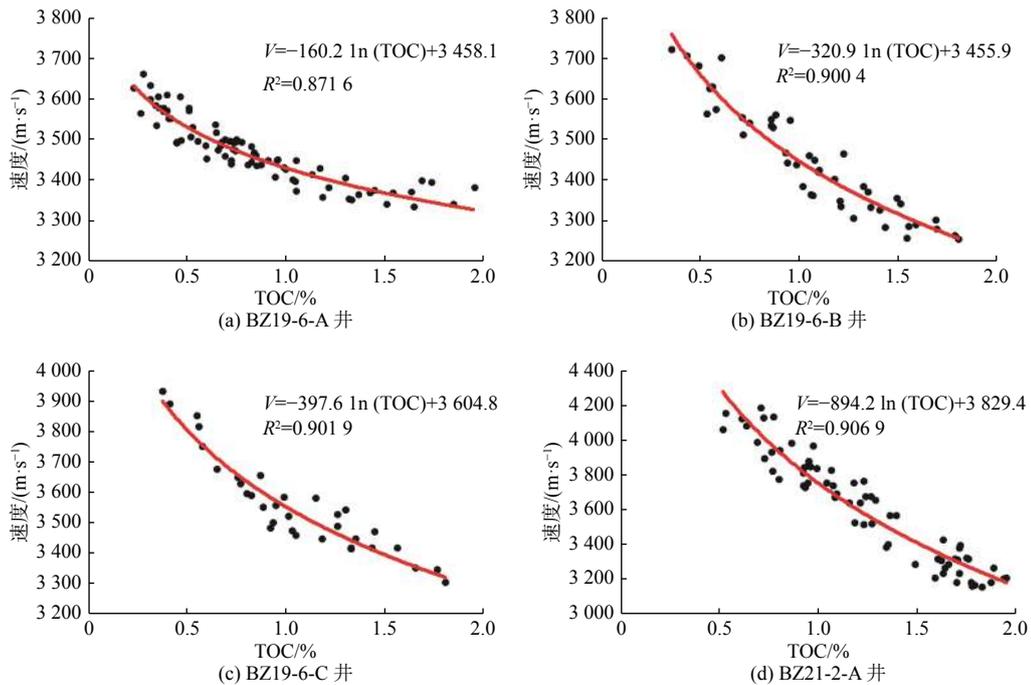


图 5 速度和 TOC 响应关系

Fig.5 Response relationship between velocity and TOC

关系式中 $a \times \ln(\text{TOC})$ 表示的是生烃作用引起速度的变化量, 其系数 a 因有机质成熟度的不同而存在差异。由此, 将各井 a 值和对应的超压泥岩段实测 Ro 值进行数据拟合, 可得出系数 a 所代表的有机质成熟度的定量关系:

$$a = -1400 \times \text{Ro} + 737 (0.6 < \text{Ro} < 2.0)$$

综上所述, 建立起该区超压泥岩段速度预测公式:

$$V = (-1400 \times \text{Ro} + 737) \times \ln(\text{TOC}) + V_{\text{欠压实}} (0.6\% < \text{Ro} < 2.0\%, 0.2\% < \text{TOC} < 2.0\%)$$

3.2.2 公式中 Ro 的预测

镜质体反射率 Ro 目前被认为是有机质热演化和成熟度评价最可靠的指标, 被广泛应用^[27]。随着埋深增加, 烃源岩成熟度越高。依据各井的实测 Ro 数据和深度关系, 建立了该区东三段顶面和底面的 Ro 等值线图(图 6)。

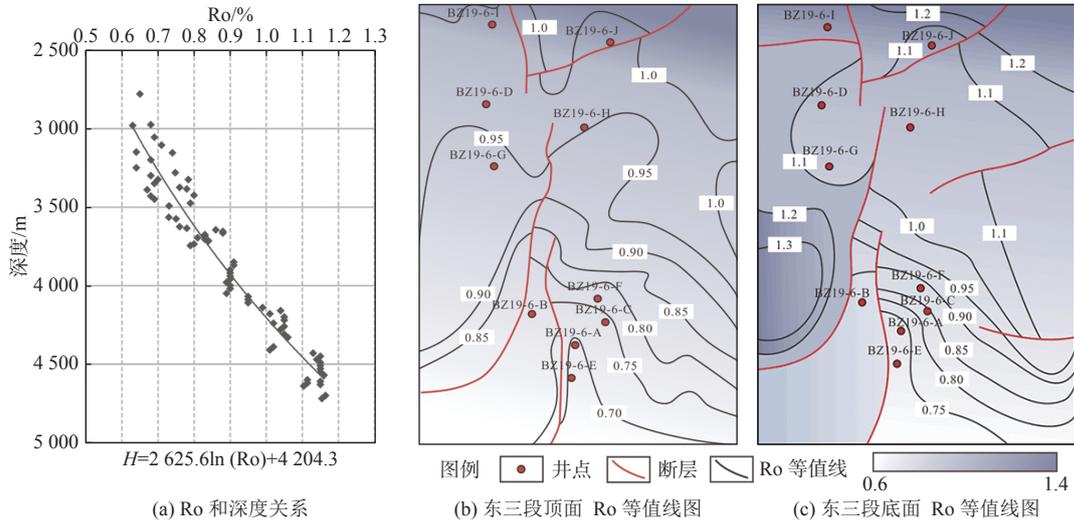


图6 研究区东三段 Ro 顶面和底面等值线图

Fig.6 Ro contour maps of the top surface and bottom surface of Ed₃ section in the study area

3.3 速度定量预测结果

建立了欠压实背景下,生烃作用引起速度变化的超压泥岩段速度定量预测的方法,即以 TOC、Ro 和 $V_{欠压实}$ 来预测超压泥岩段的速度。根据该方法预测速度计算出的太古界潜山顶面深度与后续探井实钻深度误差很小(表 2),证实了该方法的准确度和可靠性。该方法能够解决某些地区因为速度预测的不准确性而造成的深度预测不准的问题,并且提高钻井作业安全。

表 2 太古界潜山顶面预测深度与实钻深度对比
Table 2 Comparison between predicted depth and actual drilling depth of Archean buried hill top surface

井名	预测深度/m	实钻深度/m	误差/m
BZ19-6-F	4 112	4 121	-9
BZ19-6-G	4 533	4 525	8
BZ19-6-H	4 576	4 564	12
BZ19-6-I	4 411	4 416	-5
BZ19-6-J	4 817	4 828	-11

4 结论

(1) 研究区古近系超压泥岩段速度异常主要控制因素为欠压实作用和生烃作用。在以东三段为主体的泥岩段,欠压实作用对速度影响趋于稳定,速度的变化主要受控于生烃作用的强弱。

(2) 建立了依据代表有机质丰度的指标 TOC、代表有机质成熟度的指标 Ro 和欠压实趋于稳定时泥岩段速度 $V_{欠压实}$ 来定量预测古近系泥岩段速度的方法。根据该方法预测的太古界潜山顶面深度与探井实钻深度吻合度较高。

参考文献:

- [1] 李芳,周凡,李洋森,等. 高温超压地层随钻声波速度预测方法研究[J]. 海洋石油, 2019, 9(1): 61-65.
- [2] 罗运先,赵宪生,吴雄英,等. 地震波速度的纵、横向变化分析[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2005, 32(5): 525-529.
- [3] 袁全社,周家雄,李勇,等. 声波测井曲线重构技术在储层预测中的应用[J]. 中国海上油气, 2009, 21(1): 23-26.
- [4] GARDNER G H F, GARDNER L W, GREGORY A R. Formation velocity and density at the diagnostic basics for stratigraphic traps[J]. Geophysics, 1974, 39(6): 770-780.
- [5] 熊冉,高亮,杨姣,等. 曲线重构反演在储层横向预测中的应用[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2012, 34(1): 83-89.
- [6] 贺懿,刘怀山,毛传龙,等. 多曲线声波重构技术在储层预测中的应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(5): 549-556.
- [7] 郭永恒. 随钻测井曲线预测及更新方法研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6): 25-28.
- [8] HAN D H, NUR A, MORGAN D. Effect of porosity and caly content on wave velocities in sand stone[J]. Geophysics, 1986, 51(11): 2093-2107.
- [9] 樊洪海. 适于检测砂泥岩地层孔隙压力的综合解释方法[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 90-92.
- [10] BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction[J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10(2): 89-95.
- [11] RAMDHAN A M, GOULTY N R. Overpressure and mudrock

- compaction in the Lower Kutai Basin, Indonesia: A radical re-appraisal[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(10): 1725-1744.
- [12] HUNT J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluids compartments[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74: 1-12.
- [13] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [14] 李小强, 赵彦超. 东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地超压成因[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(5): 686-694.
- [15] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中19大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 25-37.
- [16] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. *石油学报*, 2017, 38(9): 973-998.
- [17] 蒋有录, 王鑫, 于倩倩, 等. 渤海湾盆地含油气凹陷压力场特征及与油气富集关系[J]. *石油学报*, 2016, 37(11): 1361-1369.
- [18] HAO F, ZOU H Y, GONG Z S, et al. Hierarchies of overpressure retardation of organic matter maturation: Case studies from petroleum basins in China[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91: 1467-1498.
- [19] GUO X W, HE S, LIU K Y, et al. Oil generation as the dominant overpressure mechanism in the Cenozoic Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94: 1859-1881.
- [20] 薛永安, 李慧勇. 渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(3): 1-9.
- [21] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中19构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(1): 36-45.
- [22] 张善文, 张林晔, 张守春, 等. 东营凹陷古近系异常高压的形成与岩性油藏的含油性研究[J]. *科学通报*, 2009, 54(11): 1570-1578.
- [23] 王国庆, 宋国奇. 生烃增压在超压形成中的作用: 以东营凹陷西部为例[J]. *科学技术与工程*, 2014(27): 177-181.
- [24] 樊洪海. 异常地层压力分析方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [25] 刘军, 汪瑞良, 舒誉, 等. 烃源岩TOC质量分数地球物理定量预测新技术及在珠江口盆地的应用[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 9(4): 415-419.
- [26] 陈宇航, 姚根顺, 刘震, 等. 利用地震信息定量预测烃源岩TOC质量分数[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, 47(1): 159-165.
- [27] 王利, 李宗星, 刘成林, 等. 柴达木盆地德令哈坳陷石炭系烃源岩成熟度演化史[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(3): 370-381.

ANALYSIS AND PREDICTION OF ABNORMAL VELOCITY IN PALEOGENE MUDSTONE OF STRUCTURE BZ19-6 IN OFFSHORE BOHAI BAY BASIN

SUN Longfei, LI Huiyong, XU Peng, QIN Dehai, CUI Haizhong, TAO Li

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC China Limited, Tianjin 300452, China)

Abstract: The structures of BZ19-6 and BZ21/22 are located in the southwest of Bozhong Depression of the Bohai Bay Basin, where commercial oil and gas have been discovered in the glutenite layers of Early Paleogene, the Archean buried hill at structure BZ19-6 and the Paleozoic buried hill at structure BZ21/22. Drilling has revealed that abnormal high pressure generally occurs in the Paleogene mudstone, with pressure coefficient changing between 1.2 and 2.0. The pressure is so high that traditional velocity prediction methods are always invalid for undrilled blocks. Accurate formation velocity prediction is critical important to depth prediction of the top boundaries of the deep glutenite layer and buried hill reservoirs, and to safe drilling. According to the forming mechanism of overpressure, it is found that the velocity abnormalities in the area are mainly caused by undercompaction and hydrocarbon generation. Comparing the pressure and velocity affected by the change in undercompaction and hydrocarbon generation, it is found that as the buried depth increased to certain level, the influence of undercompaction on velocity will gradually become stable, and the change of velocity will be dominated by hydrocarbon generation process in the overpressured Paleogene mudstone. Accordingly, the quantitative relationship between velocity and influencing factors is established. Based on this method, the predicted depth of the top of buried hill is in good agreement with the actual drilling data, and the safety of drilling operation is also improved.

Key words: Bozhong Depression; abnormal high pressure; undercompaction; hydrocarbon generation; velocity prediction