

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.254>



# 渤海湾盆地辽中凹陷南洼超压发育特征及成因

王冰洁, 王德英, 郭涛, 王鑫, 惠冠洲, 薛明旺

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452

**摘要:** 针对渤海湾盆地辽中凹陷南洼古近系地层超压成因问题, 通过对多种地质资料和研究方法综合应用, 提出生烃作用是超压形成的主要机制, 在局部地区(W-D 构造)存在欠压实和生烃作用叠加形成的超压。主要证据如下: (1) 测井曲线除 W-D 构造外, 普遍不具备欠压实地层高孔隙度和低密度的典型特征; (2) 沉积背景分析由欠压实作用形成超压的顶面深度与实际不符; (3) 超压顶面发育在大套泥岩段内部, 深度变化范围较大(2 200~3 100 m), 与烃源岩生烃顶面基本一致; (4) 地层有效应力和速度及密度关系表明, 超压点均落在“卸载”曲线上, 为生烃超压的特征; (5) 超压段地层现今处于大量生烃阶段, 持续为超压形成提供保证; (6) 欠压实作用和生烃作用叠加形成的超压, 导致了地层的高孔隙度和低密度, 也使地层有效应力与地层速度和密度关系曲线表现出“卸载”现象。

**关键词:** 沉积; 生烃作用; 欠压实作用; 超压成因; 辽中凹陷南洼; 渤海湾盆地; 石油地质。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2024)05-1832-12

收稿日期: 2021-12-13

## Development Characteristics and Origin of Overpressure in South of Liao Zhong Depression, Bohai Bay Basin

Wang Bingjie, Wang Deying, Guo Tao, Wang Xin, Hui Guanzhou, Xue Mingwang

CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452, China

**Abstract:** This paper deals with the origin of overpressure in the Paleogene strata, in south of Liao Zhong depression, Bohai Bay Basin, through comprehensive application and analysis of various geological data and research methods, we suggest that hydrocarbon generation is the main mechanism. In some areas (W-D structure), there is overpressure formed by superposition of disequilibrium and hydrocarbon generation. The main evidences are as follows: (1) Except for W-D structure, logging curves generally do not have typical characteristics of high porosity and low density caused by disequilibrium; (2) The top depth of overpressure formed by disequilibrium in sedimentary background is inconsistent with the reality; (3) The overpressure top develops in the internal large mudstone section, with greatly varying depth range (from 2 200–3 100 m), and it is basically the same as hydrocarbon generation top of source rocks; (4) The relationship between formation effective stress with velocity and density shows that the overpressure points all fall on the “unloading” curve, and the overpressure characteristics are hydrocarbon generation; (5) The overpressure source rocks are still in large hydrocarbon generation stage, continue to provide guarantee for overpressure formation; (6) Overpressure formed by superimposition of disequilibrium and hydrocarbon generation is characterized by typical formation high porosity and low density, the relationship curves between effective stress and formation velocity and density formations show obvious unloading phenomena.

**基金项目:** 国家科技重大专项(No. 2016ZX05024-002-006)。

**作者简介:** 王冰洁(1984–), 男, 勘探地质工程师, 博士, 长期从事石油地质和勘探综合研究。ORCID: 0000-0003-1067-9363. E-mail: wangbj6@cnooc.com.cn

**引用格式:** 王冰洁, 王德英, 郭涛, 王鑫, 惠冠洲, 薛明旺, 2024. 渤海湾盆地辽中凹陷南洼超压发育特征及成因. 地球科学, 49(5): 1832–1843.

**Citation:** Wang Bingjie, Wang Deying, Guo Tao, Wang Xin, Hui Guanzhou, Xue Mingwang, 2024. Development Characteristics and Origin of Overpressure in South of Liao Zhong Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 49(5): 1832–1843.

**Key words:** deposition; hydrocarbon generation; disequilibrium; origin of overpressure; the south sag of Liaozhong depression; Bohai Bay basin; petroleum geology.

## 0 引言

随着近几年渤海油田勘探难度的不断加大,在勘探方向由凸起区向洼陷区转移的同时,探井的完钻井深逐渐增大,钻遇超压相对增多;其中,辽东湾坳陷辽中凹陷南洼中深层(2 000~4 000 m)的多口钻井实测压力显示超压发育,甚至可以达到强超压级别(解习农等,2006).目前对于该区超压的研究仅是对超压结构及其与油气分布关系方面的论述(彭靖淞等,2016),尚未开展过超压成因方面的分析.此外,研究区油气成藏期为明化镇组沉积时期,具有晚期成藏的特征(黄晓波等,2013),超压成因与该成藏期的匹配关系,对油气的充注特征也会产生重要影响(韦阿娟,2015;张鑫等,2020;宫亚军等,2021),进而影响到油气富集层系,决定探井的井位完钻深度;因此开展该方面的研究和分析具有非常重要的理论和实践意义.针对上述问题,本文以辽渤海湾盆地辽中凹陷南洼作为研究区,以超压成因作为研究内容,通过对多种资料的综合分析,提出该区超压成因方面的证据.

## 1 区域地质概况

辽东湾坳陷位于渤海湾盆地东北部,沿北东方向延伸,呈狭长形态,是在中生界基底之上发育的新生代坳陷,整体表现为“三凹两凸”的构造格局,包括:辽西凹陷、辽中凹陷、辽东凹陷三个负向构造单元和分隔凹陷的辽西南凸起、辽西凸起和辽东凸起三个正向构造单元(图 1a 所示).辽中凹陷南洼位于辽中凹陷的南部,受贯穿辽中凹陷南洼的郯庐断裂带的影响,该区断裂体系非常发育,形成了两条具有走滑-拉分性质的断裂带,西部断裂带和中央断裂带,其中钻遇中深层地层的探井主要集中在西部断裂带(图 1b 所示),也是本文研究的重点区带.区内自下而上古近系地层发育有孔店组( $E_{1-2}k$ )、沙河街组( $E_2s$ )和东营组( $E_3d$ ),新近系地层发育有馆陶组( $N_1g$ )和明化镇组( $N_2m$ ),第四系平原组( $Qp$ ).其中,该区发育了沙三段( $E_{2s}^3$ )、沙一段( $E_{2s}^1$ )和东三段( $E_{3d}^3$ )3套烃源岩,有机碳(TOC)含量为1.41%~2.23%,生烃潜力为4.38~14.2 mg/g,有机质类型以Ⅱ<sub>1</sub>和Ⅱ<sub>2</sub>型为主.

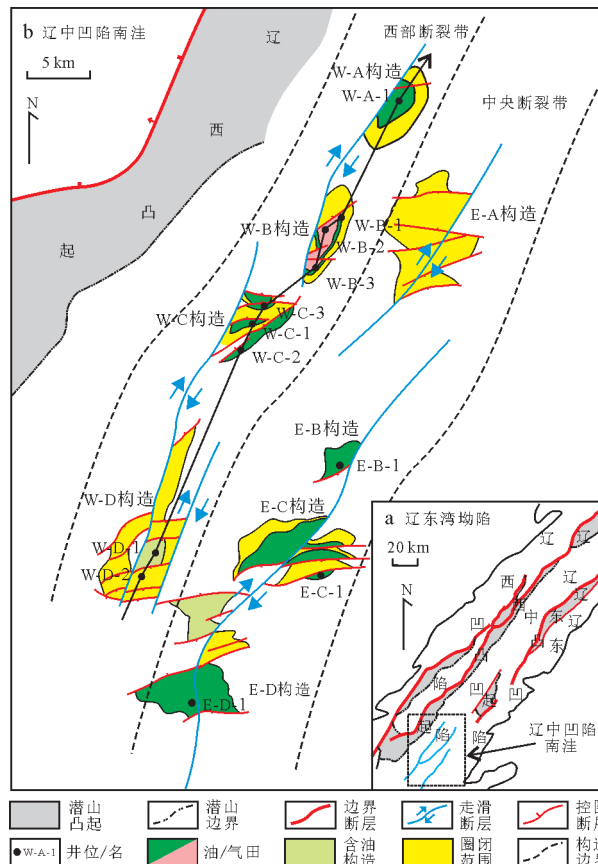


图1 研究区构造位置和构造特征

Fig.1 Structural location and characteristics of the study area

## 2 砂岩实测地层压力特征

电缆测压和钻杆测试可以获得渗透性地层的流体压力,这是反映地层超压发育最有力的证据(何生等,2012),本文收集到了研究区砂岩段共428个电缆测压数据和26个钻杆测试(DST)原始地层压力恢复数据.从地层压力随深度的变化关系散点图可以看出(图 2a 所示),超压出现的深度在2 300 m附近,层系为东营组和沙河街组,且随着深度的增加,超压的幅度不断增大.东营组实测超压分布在27.2~32.9 MPa的范围内,埋深为2 300~3 700 m;沙河街组实测超压分布在39.4~61.6 MPa的范围内,埋深为2 900~3 800 m;其中最大超压为3 600~3 700 m的沙河街组,地层压力为61.6 MPa,压力系数为1.69.从研究区通过实测和计算综合应用所得到的最大系数平面分布图可看出(图 2b 所

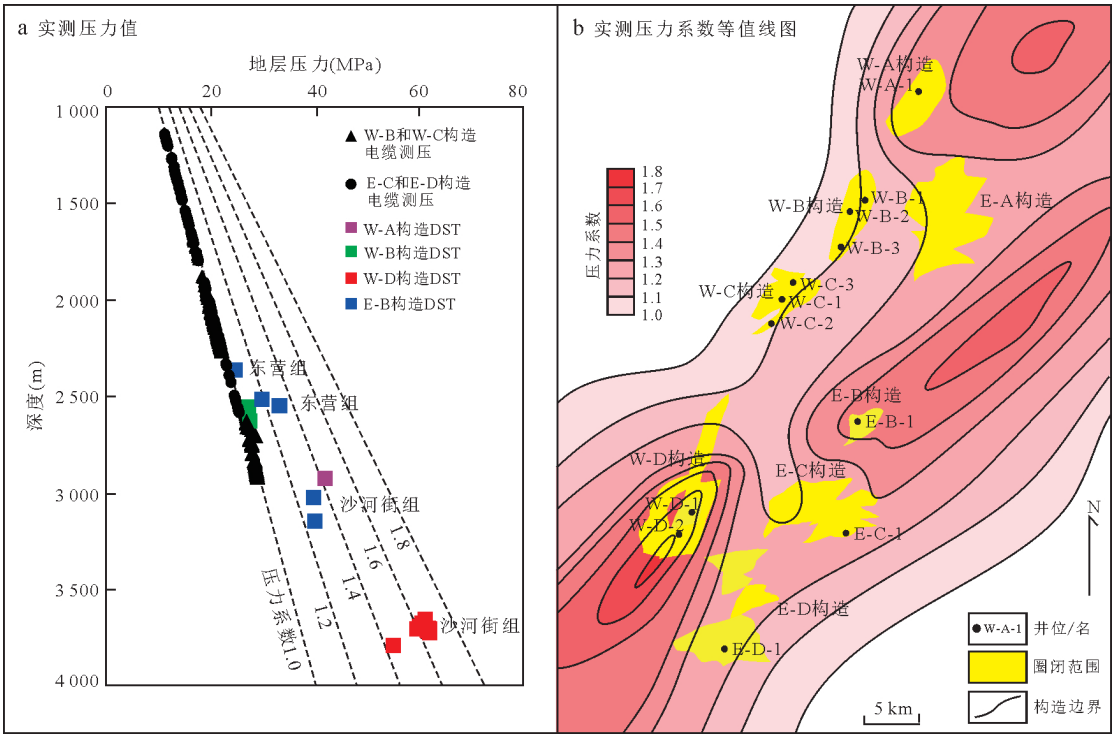


图 2 实测地层压力垂向分布特征(a)和换算压力系数平面分布特征(b)  
Fig.2 The vertical characteristics of formation pressures (a) and the plane distribution characteristics of pressure coefficients (b) from measured values

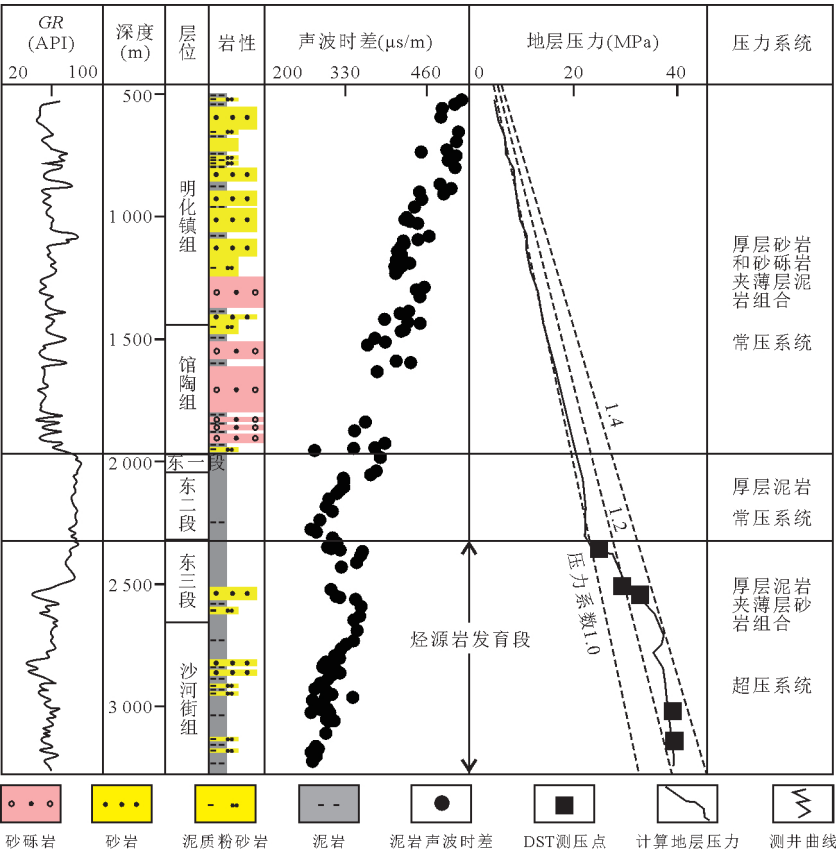


图 3 单井超压垂向分布特征(E-B-1井)  
Fig.3 Vertical distribution characteristics of overpressure in single well (Well E-B-1)

示),整个研究区内均有超压发育(压力系数1.0以上),整体上在W-A、W-D和E-B构造形成了3个超压发育中心,超压幅度相对较大.从单井地层压力结构图上来看(图3所示),大约以2 300 m为界,上部地层为常压系统,声波时差随深度逐渐增加,对应地层包括明化镇组、馆陶组、东一段和东二段,其中明化镇组和馆陶组地层以大套砂岩和砂砾岩为主,东一段和东二段发育厚层泥岩;下部地层为超压系统,实测压力系数接近1.4,声波时差出现异常低速段,对应的地层为东三段和沙河街组,整体上厚层泥岩发育,局部夹薄砂层和泥质粉砂岩.因此,研究区东三段和沙河街组的泥岩中均发育超压,形成了超压发育的主体,超压段在垂向上具有整体发育的特点,根据声波时差计算泥岩压力系数可达到1.4.

### 3 生烃作用是超压形成的主要原因及证据

#### 3.1 测井响应具有生烃增压特征

对泥岩地层或低渗透性地层,测井曲线组合响应特征是对超压进行识别的最实用和有效的方法(赵靖舟等,2017),通过泥岩段声波时差、地层密度和中子孔隙度曲线随深度的变化特征,可以对超压顶界面和超压发育段进行识别.研究区27口探井上述泥岩测井资料表明,辽中南洼普遍发育生烃作用形成的超压.从图3可以看出,实测压力显示超压发育的井段,井径曲线正常,泥岩声波时差呈现出增大的特征比较明显,对超压具有很好的响应,而对应深度的地层密度和中子孔隙度曲线表现出了两种明显的特征:一种是地层密度曲线减小,中子孔隙度曲线增大,这是欠压实超压地层的典型测井响应,在区内分布较少,仅发现两口探井(图4a和4b所示),分布在W-D构造,埋藏深度大,超压顶界面达到2 900 m,直至井底3 900 m处仍具有此现象;另一种是密度和中子孔隙度曲线均遵循正常趋势,没有发生明显变化(图4c、4d和4e所示),是生烃增压的典型测井响应,在研究区较为普遍,其原因主要是由于在沉积地层压实之后,由于压实作用的不可逆性(Issler, 1992),烃源岩的生烃作用并不会造成地层孔隙度的明显增加,只是由于干酪根转化为烃类时不能够及时排除,导致体积膨胀,遭受压缩的流体形成超压,使得反映颗粒紧密接触程度的有效应力减小,引起地层速度的

降低(Bowers, 1995; Teige *et al.*, 1999; van Ruth *et al.*, 2004; Tingay *et al.*, 2009).从整个辽中凹陷南洼的测井响应特征来看,生烃增压在泥岩测井曲线上的表现更为普遍,是研究区超压形成的一个非常重要的原因,而图4a和4b两口单井所表现出来的欠压实成因的超压,也是叠加在生烃作用的基础上而形成的(下文继续讨论).

#### 3.2 基于沉积背景分析欠压实作用形成的超压顶面深度与实际不符

研究区地层自上而下明化镇组和馆陶组厚度可以达到2 000 m以上,发育大套的砂岩和砂砾岩夹薄层泥岩沉积,含砂率分布在70%~90%的范围内,东一段和东二上亚段厚度为300 m左右,为砂泥互层的岩性组合特征,含砂率分布在75%左右,不具备欠压实超压发育的岩性基础,而东二下亚段及其下伏古近系地层的泥岩厚度可以达到1 500 m以上,是超压发育的有利层系.假设研究区超压均为欠压实作用形成,在此条件下,基于埋藏史恢复得到的理论超压顶界面的深度和形成时间与实际钻井揭示不符,因此认为欠压实作用不是超压形成的原因.图5为研究区W-C-2井计算的自东三段沉积期以来的埋藏史图和地层沉积速率曲线图,从图中可以看出东三段至东二下亚段沉积期(裂陷期)和明化镇组沉积期以来(拗陷期)是两个地层高沉积速率阶段( $>200$  m/Ma),为欠压实超压发育的有利时期,但在东三段至东二下亚段沉积期,由于地层埋深较浅( $<1 500$  m),声波测井曲线已经证实不会发生欠压实作用;而在明化镇组沉积期以来,地层沉积速率由65.5 m/Ma急剧增加至220 m/Ma,可能出现欠压实成因的超压,其出现的时间应该在5 Ma,对应的超压顶面深度为2 000 m左右,但根据W-C-2井测井资料揭示的实际超压顶面的埋深为2 600 m,对应的时间为2 Ma(图5所示),这与实际超压出现的时间相差3 Ma,而超压顶面相差了600 m.

#### 3.3 超压顶界面与烃源岩生烃顶面位置基本一致

从深度上来看,研究区基于测井资料所识别的超压顶界面的埋深变化范围较大,分布在2 200~3 100 m之间,其位置与巨厚泥岩段顶面的位置并不一致,处在泥岩段的内部,距泥岩顶界面约为200~400 m;从层位上来看,超压顶界面的位置与东二下亚段和东三段分界线的位置基本一致,其埋深的起伏与烃源岩顶面埋深起伏关系相一致(图6所示).

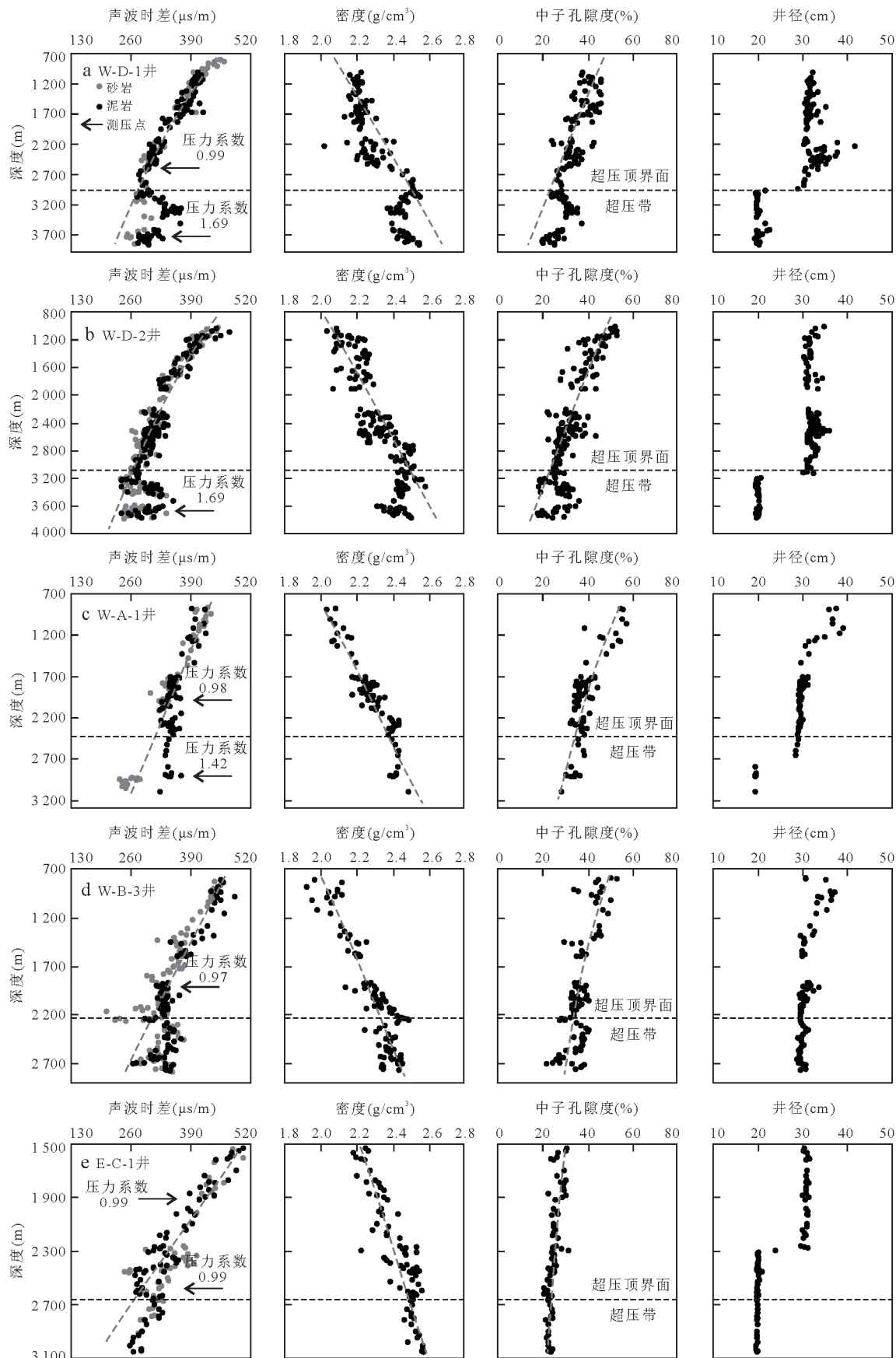


图 4 辽中南洼超压测井响应特征

Fig.4 The well logging characteristics of overpressure in South of Liaozhong depression

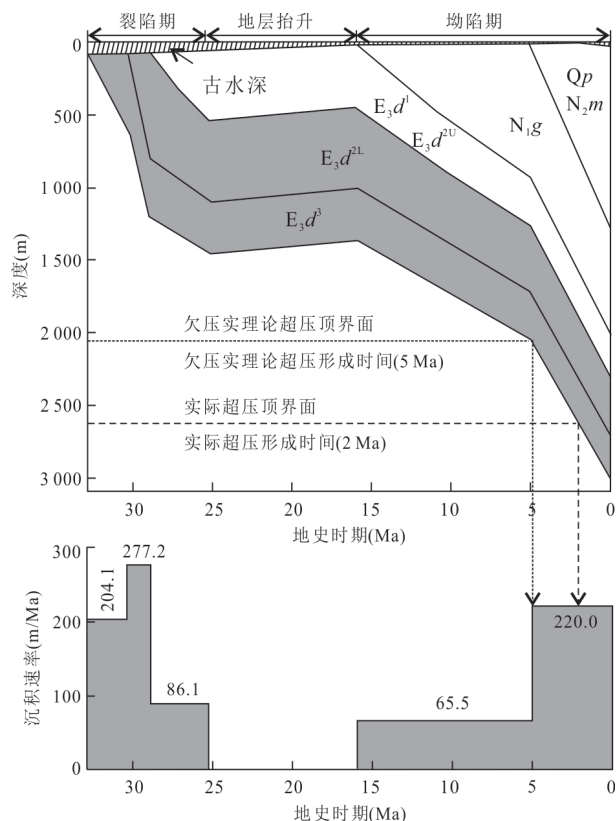


图 5 地层沉积埋藏史和沉积速率

Fig.5 The chart of sedimentary burial history and rate of stratigraphic sedimentation

辽中南洼发育东三段、沙一段和沙三段三套有利的烃源岩(周心怀等, 2009), 有机质丰度较

高, 从 W-A-1 井实测镜质体反射率( $R_o\%$ )和地层温度的关系来看(图 8a 所示), 该井超压顶界面 2 400 m 处为东三段烃源岩的顶部, 所对应的镜质体反射率为 0.5%, 地层温度为 85 °C, 开始进入生烃门限, 3 050 m 处为沙三段烃源岩, 镜质体反射率为 0.7%, 温度为 105 °C, 进入大量生烃阶段, 所以研究区整个烃源岩段现今均已生烃, 而开始生烃的深度控制了超压顶面的深度, 整个生烃的范围控制了超压发育的空间位置.

### 3.4 地层有效应力变化具有生烃增压特征

地层有效应力反映的是构成岩石骨架的颗粒所承受的载荷, 地层岩石在不断埋深的过程中, 遭受垂向负载而发生机械压实作用, 在正常压实情况下, 有效应力随着上覆岩层压力和静水压力的增加而不断增加. 当超压发育时, 孔隙流体压力会发生改变, 上覆岩层压力则一部分由构成岩石骨架的颗粒承担, 一部分由孔隙流体承担, 从而进一步引起有效应力的变化, 这种有效应力的变化对不同成因的超压, 具有不同的响应特征(王冰洁等, 2012). 在正常压实的进程中, 随着岩石骨架颗粒之间的有效应力不断增大, 地层密度和速度也不断增加, 由此在“有效应力(X坐标)-地层速度(Y坐标)”和“有效应力(X坐标)-地层密度(Y坐标)图版”上形成一条正常压实“加载”曲线, 当某一深度点开始发育欠压实成因的超压时, 由于地层水不能够及时排出, 从

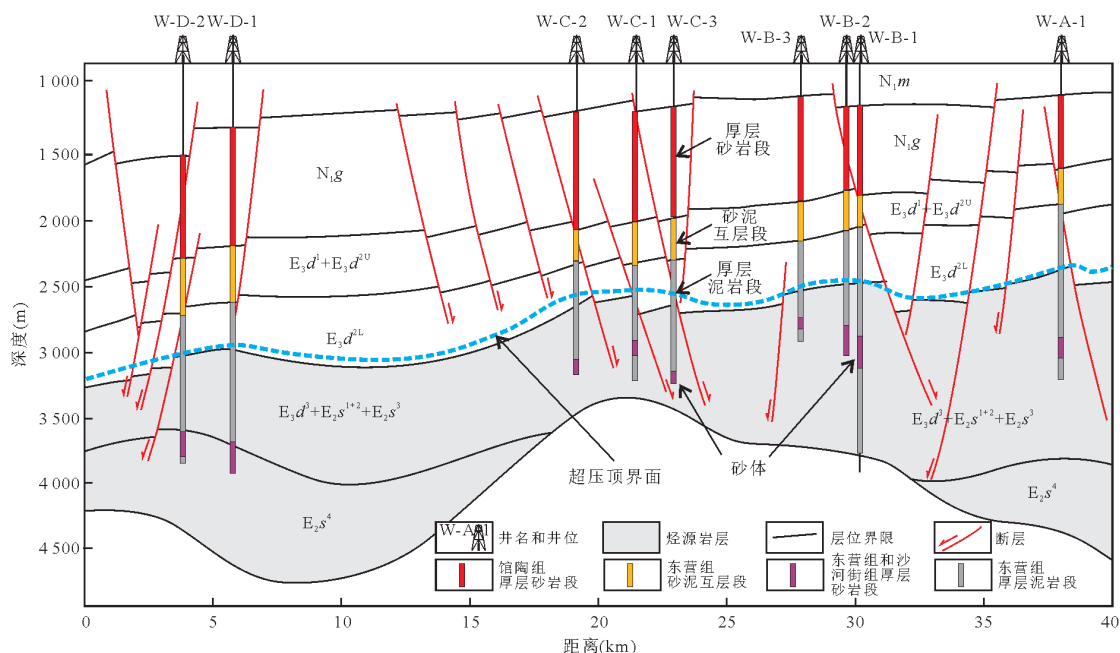


图 6 超压顶面发育的位置和岩性以及烃源岩段的对应关系(剖面位置见图 1)

Fig.6 Top of overpressure zone and distributions of mudstone, source rocks (location of cross section in Fig.1)

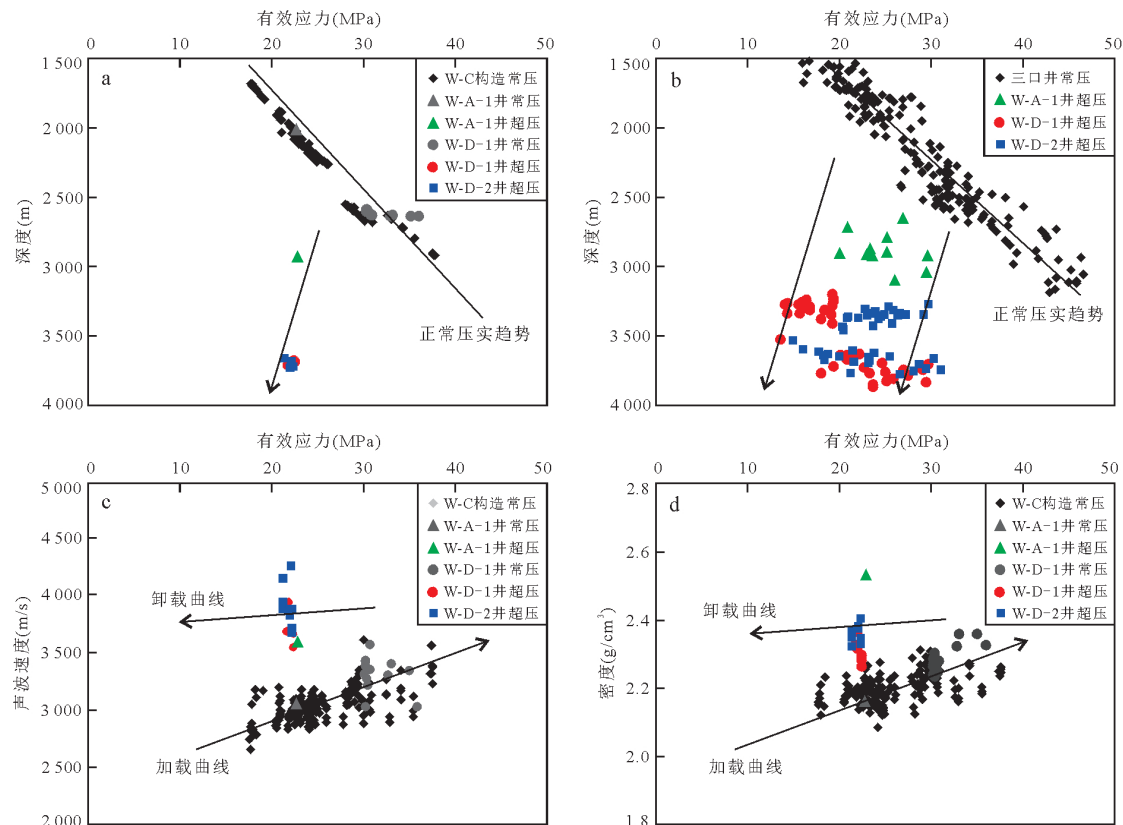


图 7 有效应力随深度变化及声波速度和密度的关系

Fig.7 Relationship between effective stress, depth, acoustic velocity and formation density

a, c, d中的有效应力值均为利用实测压力值计算;b中的有效应力值为利用声波测井计算;c和d中的声波速度和地层密度数据均来源于测井资料

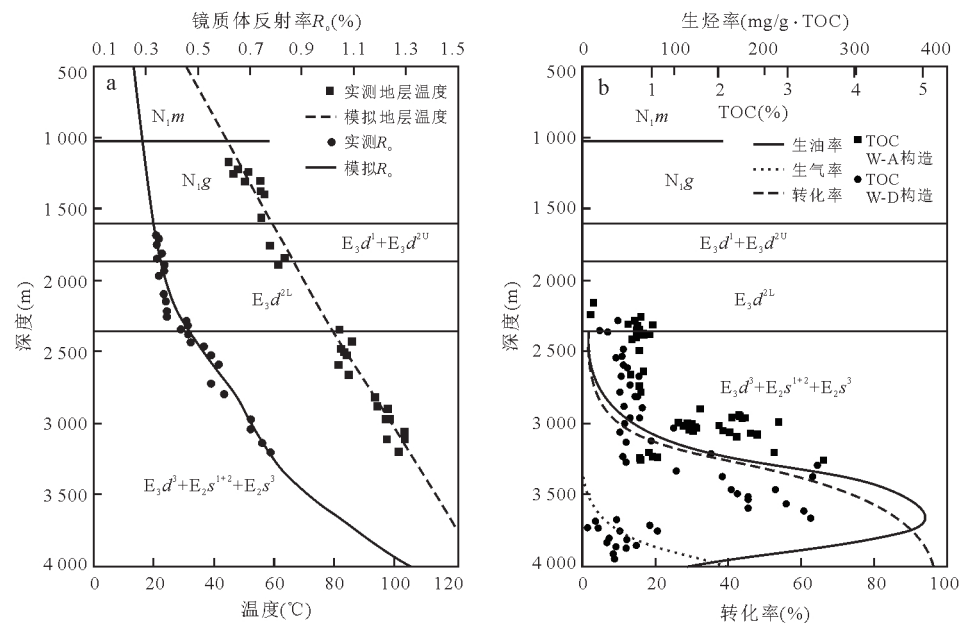


图 8 烃源岩(W-A-1井)生烃模拟结果

Fig.8 Hydrocarbon generation modelling results (Well W-A-1) for source rocks

而在埋深增加的过程中,导致地层孔隙增加,“多余”的孔隙流体承担了上覆岩层增加的压力,岩石骨架颗粒接触程度因此未随深度变化而受影响,有效应力和声波速度不随着深度的增加而增加,保持

了欠压实超压发育前的状态,所以在上述两个图版上,现今超压段的投点将会“停滞”在“加载”曲线上.生烃作用形成的超压发育在地层压实之后,随着超压的形成,将会导致有效应力减小,但受岩石压实作用不可逆的影响,其有效应力恢复不到超压发育前的状态,因此相对于同一深度的欠压实成因的超压而言,岩石骨架颗粒间的接触程度相对更为紧密,导致地层速度和密度相对于正常压实“加载”曲线有所增加,从而在上述两个图版上形成“卸载”曲线,基于这一点可以用有效应力特征来进行超压成因的判别.

本文采用式(1)计算地层有效应力的大小,其中,孔隙流体压力利用 Eaton 公式来求取(Eaton, 1972),该方法的计算基础是将发育的异常压力测井响应信息与相同深度的正常压力测井响应信息相比较,从而对地层流体压力进行计算,考虑到不同成因的超压均会对有效应力产生影响从而使得地层速度相对于正常压实现象而出现减小的现象,因此选用声波时差曲线进行预测(式2所示),不论是对欠压实还是生烃作用导致的超压均具有适用性,是一种比较普遍和实用的方法;上覆岩层压力利用地层密度对深度积分的方法来求取(式3所示).

$$\sigma = P_o - P_p, \quad (1)$$

$$P_p = P_o - (P_o - P_h) \left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t_o} \right)^N, \quad (2)$$

$$P_o = g \cdot \int_0^z \rho(z) dz, \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为有效应力,MPa; $P_o$ 为上覆地层静岩压力,MPa; $P_p$ 为孔隙压力,MPa; $P_h$ 为静水压力,MPa; $\Delta t_n$ 为正常压实趋势条件下的声波时差,ms/ft; $\Delta t_o$ 为实测的声波时差,ms/ft; $N$ 为经验系数; $g$ 为重力加速度, $m/s^2$ ; $z$ 为地层深度,m; $\rho(z)$ 为深度 $z$ 处的地层密度, $g/cm^3$ .

图7a和7b所示为研究区分别利用实测和声波测井资料计算的有效应力随深度的变化关系,如果是欠压实超压,则地层有效应力在深度上应保持相对稳定,而不会出现较大变化,从图中可以看出,超压带的有效应力随深度变化均已明显偏离正常趋势,其值整体上随着深度的增加呈现出减小的现象,尤其是通过测井资料计算的地层有效应力,由于数据丰富,这种特征更为明显,在相近的深度内,有效应力变化范围为12~32 MPa;图7c和7d所示

分别为利用实测资料计算的有效应力和声波速度及地层密度的关系,从图中可以看出,发育常压的实测点形成一条典型“加载”曲线,有效应力与声波速度和密度具有明显正相关关系,而超压点位于“卸载”曲线之上,这说明了生烃作用是超压形成的主控因素.需要指出是,W-D-1井和W-D-2井测井响应上具有欠压实超压特征,但在此处却表现出生烃增压特征,本文认为二者并不矛盾,分析认为这两口井的超压是在欠压实的基础上叠加生烃作用而形成,使得测井曲线表现出了欠压实的特征,而有效应力表现出了生烃增压的特征;所以在利用测井资料判断超压成因时,尤其是对表现出欠压实特征的测井响应,应结合有效应力进行综合判断.

### 3.5 烃源岩持续供烃提供生烃增压来源

考虑到沉积盆地超压在无补给条件下的消亡速度较快(约1 Ma左右)(Muggeridge *et al.*, 2005),所以,生烃作用形成超压的一个重要条件是烃源岩需要有持续的供烃能力(郭小文等, 2011; Guo *et al.*, 2016),为了对烃源岩的生烃特征进行评价,采用 PetroMod 含油气系统模拟软件,选取 W-A-1 井进行热史和生烃史恢复,生烃动力学模型选用 Tissot\_in\_Waples\_T<sub>II</sub>\_Crack(Waples *et al.*, 1992),该模型有机质类型为 II 型,生烃动力学参数采用系统提供的默认值;热史的恢复利用 McKenzie 瞬时均匀伸展模型进行计算(Dan, 1978),成熟度的恢复采用 Sweeney and Burnham (1990) 提出的 EASY% $R_o$  模型进行计算,模拟的终点利用实测的镜质体反射率( $R_o\%$ )和地层温度进行约束,从模拟值与实测值的结果来看(图8a所示),二者吻合较好,说明模型参数设置合理.W-A-1井模拟结果显示在4 000 m处的深度,烃源岩镜质体反射率( $R_o\%$ )为1.3%,转化率达到90%以上(图8b所示),整体上生气量较小,现今仍以生油作用为主,而在深度为3 500 m左右,烃源岩生油能力达到最大,生油量从烃源岩顶面(2 400 m)的10 mg/g·TOC增加至380 mg/g·TOC,之后随着烃源岩转化程度的降低,生油量有所减小,但在4 000 m处仍可以达到100 mg/g·TOC以上.从烃源岩有机碳含量(TOC)来看,在3 500 m左右有机碳含量最高,为3%左右,也为烃源岩大量生烃提供了有利条件.因此,持续的生烃作用成为生烃增压的重要保证,且超压的形成与烃源岩生油作用具有密切的关系,受生气作用影响较小.此外,研究区大量断层断入超压段内部,并未对现今超压的形

成产生明显的破坏作用,从靠近断层砂体的实际测压结果来看,仍可以形成较强的超压,如图 4 中 W-D-2 井在 3 700 m 附近其压力系数甚至仍可以达到 1.69(图 5 所示),推测与持续的生烃作用关系密切.

#### 4 欠压实作用与生烃作用叠加形成的超压

上文提及, W-D-1 井和 W-D-2 井的测井响应关系表明了欠压实超压的发育,从深度来看在埋深接近 4 000 m 的地层中仍然存在,说明了深层存在欠压实成因超压的可能性,但其成因并不是孤立的,而是和生烃作用叠置的,从下面两个方面来进行说明.

##### 4.1 压力垂向分布特征说明具有生烃增压作用

从烃源岩的评价结果来看, W-D-1 和 W-D-2 井烃源岩热解数据得到的生烃潜力值突然增大的深度对应着超压顶界面,同时,生烃潜力的值在 3 600~3 900 m 之间的层段相对于 3 000~3 600 m 之间的层段表现出减小的特征,而由声波时差测井资料计算的地层压力在这一深度段也出现减小的特征(图 9a 和 9b 所示),压力系数从最大 3 524 m 处的 1.71(计算地层压力, 60.2 MPa)降至 3 831.6 m 处的 1.33(计算地层压力, 50.3 MPa),上述地层压力与生烃潜力表现出一致性的现象说明了生烃作用的影响.此外,在相同的计算参数下,利用泥岩声波时差计算的地层压力在 2 500~2 630 m 之间与砂岩实测压力结果相吻合,而在

3 650~3 700 m 之间,实测地层压力明显要高于计算地层压力,这种砂岩储层压力大于围岩泥岩地层压力的情况一般与深部高压层的压力传递有关(杨皎等, 2009),但从研究区砂岩与泥岩的声波时差的对比(图 4 所示)可以看出,二者的趋势线基本一致或者砂岩偏小,说明并未发生大规模的压力传递作用,因此这种超压段泥岩计算地层压力与实测地层压力不吻合的情况属于超压成因叠加的一种响应,而对于单纯的以生烃增压为主的超压,则未出现这种不吻合现象(图 9c 所示).

##### 4.2 超压段砂岩孔隙度发育特征说明具有欠压实作用

欠压实作用和生烃作用形成超压机制不同,二者最典型的特征就是在超压发育段,欠压实地层的孔隙度值增加明显,而生烃作用的孔隙度值基本不变,因此超压段孔隙度的变化特征也是判别超压成因的最有力和最直接的一个证据,但孔隙度作为证据的前提是发育的孔隙类型必须为原生孔(Guo *et al.*, 2010),否则可能由于成岩作用的影响而形成次生孔隙使得超压成因出现误判;通过大量的薄片镜下观察,研究区超压段的孔隙溶蚀作用相对较弱,因此可以利用该方法进行超压成因分析.本文所利用的孔隙数据来自于岩心常规分析和测井解释,为了保证结果的可靠性,对于岩心分析的孔隙度,利用研究区 40 块样品的覆压孔渗将其恢复至地层条件(文中所提到的实测孔隙度值均经过覆压孔渗实验数据进行校正).

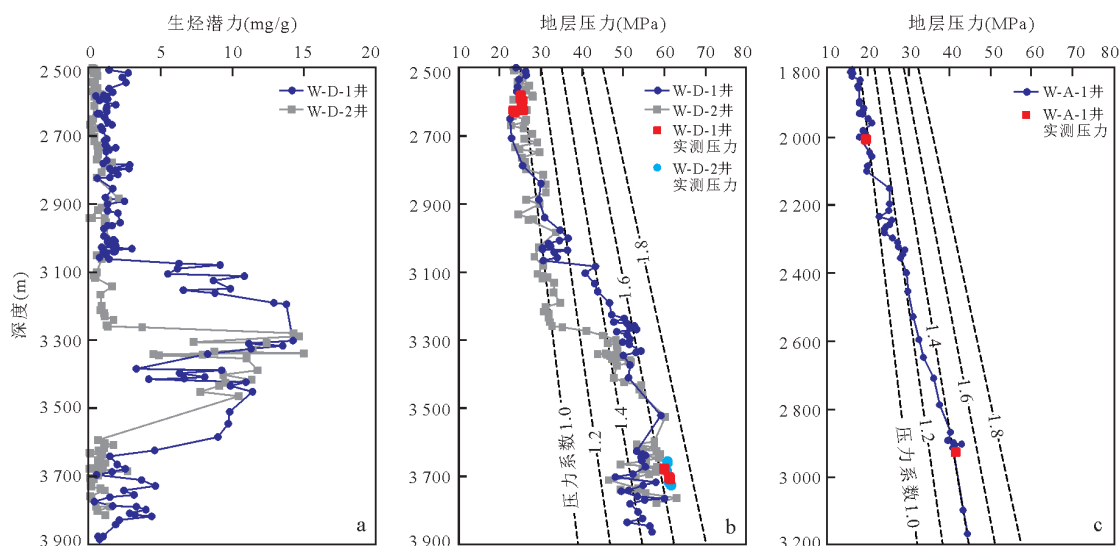


图 9 钻井生烃潜力和计算地层压力随深度变化关系

Fig.9 Hydrocarbon potential and calculated formation pressure change with depth in wells

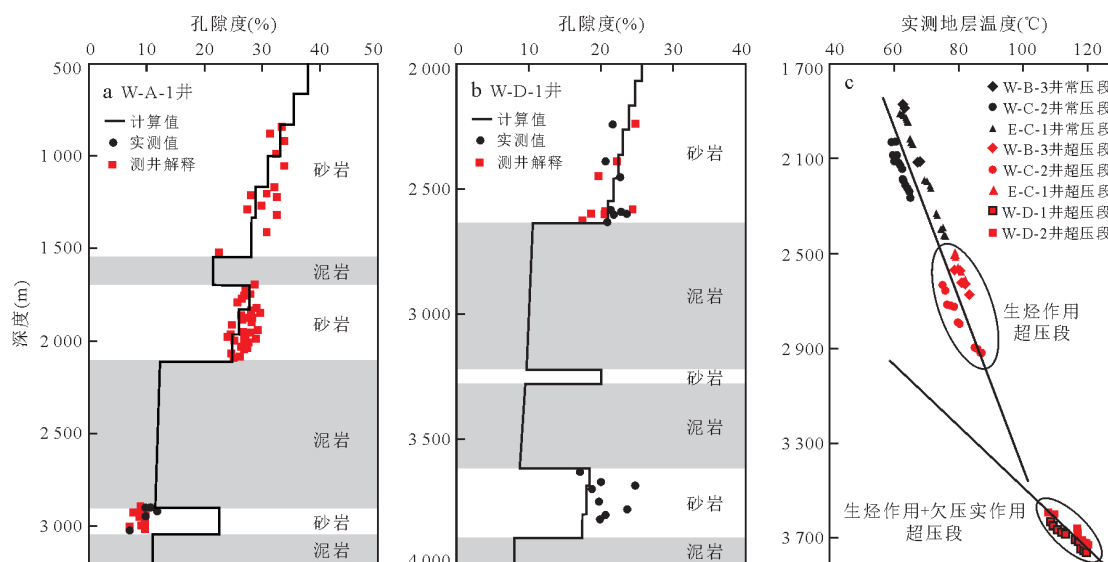


图10 孔隙度和地层温度与深度变化关系

Fig.10 The relationship between porosity, formation temperature and depth

为了明确超压段孔隙度的变化特征,本文利用基于正常压实作用求取的孔隙度作为标准值来进行对比,其值利用 Athy's Law 压实模型进行求取,地层模型根据钻井揭示岩性组合特征来进行建立。从孔隙度发育的特征来看,测井曲线组合表现为生烃作用形成超压的 W-A-1 井,其孔隙度在超压段没有出现增大现象,实测和测井解释孔隙度均要小于计算值(图 10a 所示),说明并未发生欠压实作用,而测井曲线组合表现为欠压实作用的 W-D-1 井的实测孔隙度则明显高于计算孔隙度(图 10b 所示),说明发生了欠压实的作用;从 W-D-1 井和 W-D-2 井超压段实测地层温度来看,计算的地温梯度也要高于 W-B-3 井和 W-C-2 井超压段(生烃作用)和常压段地层(图 10c 所示),这主要是因为欠压实作用会导致岩石热导率降低,从而引起地温梯度的增加。

## 5 结论

(1) 渤海海域辽中凹陷南洼普遍发育超压,整体上在超压深度段内,相对于正常压实趋势声波时差增大,地层孔隙度和中子密度未发生变化;超压顶面埋深分布在 2 200~3 100 m 的范围内,与烃源岩顶面相吻合,地层有效应力和声波速度及地层密度的关系均显示超压段具有明显的“卸载”现象;上述特征在研究区具有普遍性,说明超压的形成受生烃作用的控制,而超压段烃源岩的持续生烃能力为生烃增压的形成提供了基础。

(2) 研究区 W-D 构造两口探井发现了欠压实成

因超压和生烃成因超压相互叠加的现象,且埋深可以达到 3 900 m,测井曲线表现出相对于正常压实趋势,声波时差增大,地层密度减小和中子孔隙度增大的特征,而且地温梯度也相对增高。

(3) 欠压实成因和生烃成因的超压相互叠加,在欠压实成因超压能够保存下来的条件下,往往单纯通过测井曲线进行成因判别容易出现误判,忽略掉生烃增压作用的影响,因此在进行超压成因识别时,如果测井曲线组合具有欠压实超压响应特征,还需进一步通过有效应力、烃源岩评价结果、孔隙度及地层温度等对超压具有响应的参数进行进一步的确认,反之也不能单纯利用有效应力特征来进行超压成因判别,同样可能忽略欠压实的作用。

致谢:本文在提交后得到了评审专家和编辑部的宝贵意见,在此表示感谢!

## References

- Bowers, G.L., 1995. Pore-Pressure Estimation from Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms Besides Undercompaction. *SPE Drilling and Completion*, 10(2): 89—95. <https://doi.org/10.2118/27488-PA>
- Dan, M., 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40(1): 25—32. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(78\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0012-821x(78)90071-7)
- Eaton, B.A., 1972. Graphical Method Predicts Geopressure Worldwide. *World Oil*, 51—56. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90080-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90080-3)

- Gong, Y. J., Zhang, K. H., Zeng, Z. P., et al., 2021. Origin of Overpressure, Vertical Transfer and Hydrocarbon Accumulation of Jurassic in Fukang Sag, Junggar Basin. *Earth Science*, 46(10): 3588—3600 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. W., He, S., Liu, K. Y., et al., 2010. Oil Generation as the Dominant Overpressure Mechanism in the Cenozoic Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China. *AAPG Bulletin*, 94(12): 1859—1881. <https://doi.org/10.1306/05191009179>
- Guo, X. W., He, S., Zheng, L. J., et al., 2011. A Quantitative Model for the Overpressure Caused by Oil Generation and Its Influential Factors. *Acta Petrolei Sinica*, 32(4): 637—644 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. W., Liu, K. Y., He, S., et al., 2016. Quantitative Estimation of Overpressure Caused by Gas Generation and Application to the Baiyun Depression in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Geofluids*, 16(1): 129—148. <https://doi.org/10.1111/gfl.12140>
- He, S., Song, G. Q., Wang, Y. S., et al., 2012. Distribution and Major Control Factors of the Present-Day Large-Scale Overpressured System in Dongying Depression. *Earth Science*, 37(5): 1029—1042 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X. B., Xu, C. G., Zhou, X. H., et al., 2013. Hydrocarbon Distribution Characteristics and Accumulation Period of Second Member of Dongying Formation in the South of Liao Zhong Sag. *Petroleum Geology and Engineering*, 27(4): 16—19, 145 (in Chinese with English abstract).
- Issler, D. R., 1992. A New Approach to Shale Compaction and Stratigraphic Restoration, Deafort-Mackenzie Basin and Mackenzie Corridor, Northern Canada. *AAPG Bulletin*, 78: 1170—1189. <https://doi.org/10.1306/BDF8998-1718-11D7-8645000102C1865D>
- Muggeridge, A., Abacioglu, Y., England, W., et al., 2005. The Rate of Pressure Dissipation from Abnormally Pressured Compartments. *AAPG Bulletin*, 89(1): 61—80. <https://doi.org/10.1306/07300403002>
- Peng, J. S., Xu, C. G., Wei, A. J., et al., 2016. Hydrocarbon Migration Caused by Rupture of Pressure Compartment in South Liao Zhong Sag, Bohai Bay Basin, Offshore China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(3): 386—395 (in Chinese with English abstract).
- Sweeney, J., Burnham, A. K., 1990. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. *AAPG Bulletin*, 74(10): 1559—1570.
- Teige, G. M. G., Hermanrud, C., Wensaas, L., et al., 1999. The Lack of Relationship between Overpressure and Porosity in North Sea and Haltenbanken Shales. *Marine and Petroleum Geology*, 16(4): 321—335. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(98\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(98)00035-X)
- Tingay, M. R. P., Hillis, R. R., Swarbrick, R. E., et al., 2009. Origin of Overpressure and Pore-Pressure Prediction in the Baram Province, Brunei. *AAPG Bulletin*, 93(1): 51—74. <https://doi.org/10.1306/08080808016>
- Wang, B. J., He, S., Song, G. Q., et al., 2012. Effective Stress Characteristics of Different Overpressured Origins in Dongying Depression of the Bohai Bay Basin, China. *Geological Science and Technology Information*, 31(2): 72—79 (in Chinese with English abstract).
- Waples, D. W., Kamata, H., Suizu, M., 1992. The Art of Maturity Modeling. Part 1: Alternative Models and Sensitivity Analysis. *AAPG Bulletin*, 76(1): 47—66.
- Wei, A. J., 2015. Characteristics, Origin and Quantitative Evaluation of Overpressure in Strike-Slip and Compression-Shear Booster Zone of Tan-Lu Fault: A Case Study in JZ27 Section of Liaodong Bay, Bohai Sea. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(1): 47—52 (in Chinese with English abstract).
- van Ruth, P., Hillis, R., Tingate, P., 2004. The Origin of Overpressure in the Carnarvon Basin, Western Australia: Implications for Pore Pressure Prediction. *Petroleum Geoscience*, 10(3): 247—257. <https://doi.org/10.1144/1354-079302-562>
- Xie, X. N., Li, S. T., Liu, X. F., 2006. Basin Fluid Dynamics in Abnormally Pressured Environments. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Yang, J., He, S., Wang, B. J., 2009. Characteristics and Prediction Model of the Overpressures in the Niuzhuang Sag of Dongying Depression. *Geological Science and Technology Information*, 28(4): 34—40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Chen, H. H., Kong, L. T., et al., 2020. The Coupling Relationship between Paleofluid Pressure Evolution and Hydrocarbon-Charging Events in the Deep of Biyang Depression, Central China. *Earth Science*, 45(5): 1769—1781 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. Z., Li, J., Xu, Z. Y., 2017. Advances in the Origin of Overpressures in Sedimentary Basins. *Acta Petrolei Sinica*, 38(9): 973—998 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Liu, Z., Li, W. L., 2009. Hydrocarbon Accumulation Mechanism in Liaodong Bay Fault Depression. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

### 中文参考文献

- 宫亚军, 张奎华, 曾治平, 等, 2021. 准噶尔盆地阜康凹陷侏罗系超压成因、垂向传导及油气成藏. 地球科学, 46(10): 3588—3600.
- 郭小文, 何生, 郑伦举, 等, 2011. 生油增压定量模型及影响因素. 石油学报, 32(4): 637—644.
- 何生, 宋国奇, 王永诗, 等, 2012. 东营凹陷现今大规模超压系统整体分布特征及主控因素. 地球科学, 37(5): 1029—1042.
- 黄晓波, 徐长贵, 周心怀, 等, 2013. 辽中南洼东二段油气分布特征与成藏期次. 石油地质与工程, 27(4): 16—19, 145.
- 彭靖淞, 徐长贵, 韦阿娟, 等, 2016. 渤海湾盆地辽中南洼压力封存箱的破裂与油气运移. 石油勘探与开发, 43(3): 386—395.
- 王冰洁, 何生, 宋国奇, 等, 2012. 东营凹陷不同超压成因的有效应力特征. 地质科技情报, 31(2): 72—79.
- 韦阿娟, 2015. 郯庐断裂增压带超压特征、成因及其定量评价——以渤海海域辽东湾锦州 27 段为例. 石油实验地质, 37(1): 47—52.
- 解习农, 李思田, 刘晓峰, 2006. 异常压力盆地流体动力学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 杨姣, 何生, 王冰洁, 2009. 东营凹陷牛庄洼陷超压特征及预测模型. 地质科技情报, 28(4): 34—40.
- 张鑫, 陈红汉, 孔令涛, 等, 2020. 泌阳凹陷深凹区古流体压力演化与油气充注耦合关系. 地球科学, 45(5): 1769—1781.
- 赵靖舟, 李军, 徐泽阳, 2017. 沉积盆地超压成因研究进展. 石油学报, 38(9): 973—998.
- 周心怀, 刘震, 李潍莲, 2009. 辽东湾断陷油气成藏机理. 北京: 石油工业出版社.