

# 深层地层压力预测技术研究进展

余金秋, 孙夕平, 于永才, 李璇, 李晓明, 徐光成

中国石油勘探开发研究院

**摘要** 通过调研国内外地层压力预测技术的相关文献以及专利著作,分析深层压力预测存在的挑战和难题,总结深层压力预测技术的研究新进展和存在的问题,并对未来研究方向进行了展望。适用于中浅层的经典压力预测理论和算法已经很完善,但对深层压力研究不适用,难以预测深层压力变化特征。基于多孔弹性理论、岩石物理模型、构造增压等方法 and 理论的研究推进了深层压力预测技术的进展,但受地质条件复杂、工程难度大、超压成因机制复杂和预测算法缺乏等多方面的限制,深层压力预测仍然面临很大的挑战和难题。深层超压与构造、断裂的压力传递、生烃膨胀和盖层封闭等非欠压实机制有关,并常以多种成因共存为特点,不同的超压机制会造成压力系统的变化。从超压成因机制出发,结合实际问题改进经典公式和模型,可以使预测模型更具适应性。适应复杂岩性、多种超压机制、横向压力分布特征的深层压力地震预测技术是未来研究的主攻方向。

**关键词** 深层; 地层压力; 超压机制; 非欠压实; 压力预测技术

**中图分类号**:TE122.2\*3 **文献标识码**:A

**引用**: 余金秋, 孙夕平, 于永才, 等. 深层地层压力预测技术研究进展[J]. 海相油气地质, 2024, 29(4): 337-347.

YU Jinqiu, SUN Xiping, YU Yongcai, et al. Research progress on deep formation pressure prediction technology [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(4): 337-347.

## 0 前言

随着油气勘探开发的深入,勘探目标开始转向深层—超深层。我国四川、塔里木、准噶尔等盆地深层—超深层领域已发现了丰富的油气资源,成为中西部盆地油气勘探的现实领域。就勘探深度而言,我国东西部沉积盆地深层界限的划分不一致:东部地区深层一般为3 500~4 500 m,超过4 500 m为超深层;西部地区4 500~6 000 m为深层,超过6 000 m为超深层<sup>[1]</sup>。我国常规钻井工程将钻探深度4 500~6 000 m定义为深层,超过6 000 m为超深层<sup>[2]</sup>。本文在东部地区界定方案的基础上考虑实际钻探的难度予以细化:埋深小于2 000 m为浅层,1 000~3 000 m为中浅层,2 000~3 500 m为中深层<sup>[3]</sup>,3 500~4 500 m为深层,超过4 500 m为超深层。地层压力具有低压、常压、超压等3个状态,可通过压力系数(地层压力与静水压力之比值)衡量:<0.9为低压,0.9~1.2为常压,1.2~1.6为弱超压,≥1.6为强超压。在富油气盆地中,油气藏常与超压有关,超压识别和预测一直是油气勘探开发中的重点和难

题。因地质条件复杂、超压成因机制多样等原因,深层地层压力预测的难度进一步加大。

本文从地质条件和现有算法的限制方面系统分析了深层压力预测面临的困难与挑战,明确了现有地层压力预测技术的适用性、优缺点,探讨了针对深层的改进方法和思路,并对发展趋势作了展望,以期对深层油气识别与勘探、钻井安全保障提供参考,助推我国深层—超深层复杂储层油气勘探开发事业。

## 1 传统的地层压力预测方法

传统的地层压力预测基于有效应力原理建立的地层压力与上覆岩层压力、垂直有效应力的关系: $p_0=p_w-a\cdot\sigma$ ,其中 $p_0$ 为地层压力, $p_w$ 为上覆岩层压力, $\sigma$ 为垂直有效应力,三者单位均为MPa, $a$ 为Biot无量纲系数,常取1。传统的压力预测技术是为解决中浅层压力问题而提出。当沉积物正常沉积时,岩石颗粒有足够时间重新排列,使孔隙内的流体排出,此时地层压力等于静水压力,地层压实趋势线随着深度增加而呈线性增加;当沉积物快速堆积时,岩石颗粒没有充足时间进行重新排列,流体不能排出而

收稿日期:2024-04-22;改回日期:2024-09-02;网络出版日期:2024-11-05

本文受中国石油与天然气股份有限公司重大科技专项“中国石油重点地区风险勘探目标研究”(编号:2023YQX10101)资助

**第一作者**:余金秋,在读硕士,地球探测与信息技术专业。通信地址:100083 北京市海淀区学院路20号;E-mail:1829989502@qq.com

产生异常压力,超压体系会造成声波速度减小,旅行时增加<sup>[4-5]</sup>,从而偏离正常压实趋势线。传统的压力预测方法主要包括等效深度法、伊顿法、Bowers法、Fillippone法、纵横波参数法、Eberhart-Phillips法、Tua法等。经典的基于欠压实的预测方法有等效深度法、伊顿法等,下面介绍几个常用的方法。

### 1.1 等效深度法

Hottmann等<sup>[6]</sup>基于孔隙度测井、声波速度测井建立泥页岩地层压实趋势线,通过建立声波测井的观测值与正常压实趋势线上的理论值之差和孔隙压力梯度之间的关系得到地层压力分布范围。Foster<sup>[7]</sup>认为具有相同压实状况的地层,岩石具有相同的测井响应,并于1966年提出等效深度法。原理如下(图1):建立正常压实地层的压实趋势线,在其上取B点,然后在异常压实区取A点,假设A、B两点的孔隙结构特征相同、声波速度一致、压实程度相同,理论上该两点的骨架应力是相同的,那么就说A、B两点深度等效,具有同样的有效应力。A点的地层压力如公式(1)所示:

$$p_0 = G_w H_b + (H - H_b) G_0 \quad (1)$$

式中: $p_0$ 为地层压力,MPa; $G_w$ 为静水压力梯度,MPa/m; $G_0$ 为上覆岩层压力梯度,MPa/m; $H_b$ 为等效深度,m; $H$ 为异常压力区地层深度,m。该方法主要存在估算误差与不确定性的缺点,在油田应用不多。在柴达木盆地大风山凸起F2井下油砂山组砂岩储层的压力预测中<sup>[8]</sup>,较浅部的预测压力值与测试压力值一致性较好,深层的误差较大。

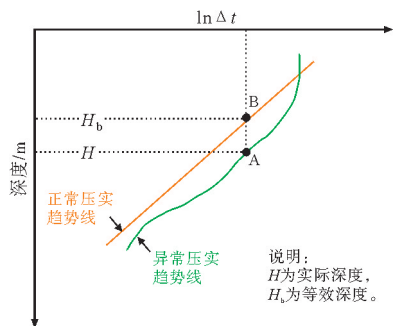


图1 等效深度法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of equilibrium depth method

### 1.2 伊顿法

伊顿法的理论和算法十分成熟,广泛用于油田中的地层压力预测。伊顿(Eaton)<sup>[9-10]</sup>研究中浅层泥页岩的欠压实,统计不同压力时声波速度或电阻率

的差异,根据其与正常泥岩压实趋势线的偏离程度来反映真实的地层压力情况,如图2所示。伊顿总结了声波速度与有效应力之间的关系:

$$\sigma = \sigma_n (v/v_n)^m \quad (2)$$

$$p_0 = p_{ov} - (p_{ov,n} - p_{o,n})(v/v_n)^m \quad (3)$$

式中: $v$ 、 $v_n$ 分别是实测声速和正常沉积时的声速,m/s; $m$ 是声波速度对地层有效应力敏感程度的指数,无量纲,通过实际工区拟合得到; $\sigma$ 为垂直有效应力, $\sigma_n$ 为正常压实的有效应力, $p_0$ 为地层压力, $p_{ov,n}$ 、 $p_{o,n}$ 分别为正常压实时的上覆岩层压力和地层压力,MPa。伊顿模型在我国渤海湾、准噶尔等含油气盆地的许多大型油田中都有应用。伊顿法需在井约束条件下构建正常压实速度,空间预测精度相对较低。从原理上讲,该方法对于深层复杂碳酸盐岩、致密砂岩、火成岩等多为非欠压实成因的岩层多不适用,预测结果误差较大。

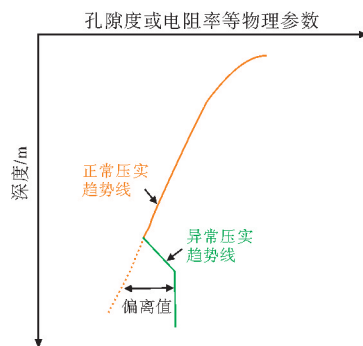


图2 伊顿法原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of Eaton method

### 1.3 Fillippone法及其改进

随着科技的进步和勘探需求的增加,学者们更加关注地震资料在压力预测中的应用。Pennebaker<sup>[11]</sup>发现地震数据能反映地层压力的变化,特别是层速度在压力预测中可以很好地被应用。Fillippone<sup>[12]</sup>通过对墨西哥湾许多油田的钻井、测井、地震和地质等资料的综合分析,提出了适用于该区的压力经验模型(式4—式6)。最初的模型如下:

$$p_0 = \frac{v_{\max} - v}{v_{\max} - v_{\min}} p_{ov} \quad (4)$$

改进后为:

$$p_0 = \frac{\ln(v/v_{\max})}{\ln(v_{\min}/v_{\max})} p_{ov} \quad (5)$$

引入速度受其他因素影响而变化的校正函数:

$$f(v) = b \cdot e^{c \cdot v} \quad (6)$$

式4—式6中: $p_0$ 为地层压力, $p_{ov}$ 为上覆岩层压力,MPa; $v_{max}$ 、 $v_{min}$ 分别为孔隙度为0和地层刚性接近0情况下的波速, $v$ 为实测声速,m/s; $b$ 、 $c$ 为模型系数。该方法涉及参数多,在不同油田参数不同,可用于碳酸盐岩地层。该方法不依赖于建立正常压实速度,通过层速度建立地下三维空间压力模型,但该公式针对性强,在其他地区适应性较弱。

## 1.4 Bowers法

Bowers<sup>[13-14]</sup>根据声波时差、密度的变化规律,通过实验室岩心测试数据来分析应力与波速的关系,用岩石加载、卸载(式7)确定异常压力:

$$\begin{aligned} \text{加载曲线: } p_0 &= p_{ov} - \left( \frac{v - v_0}{M} \right)^N; \\ \text{卸载曲线: } p_0 &= p_{ov} - \sigma_s \left[ \left( \frac{v - v_0}{M} \right)^N / \sigma_s \right]^U \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $p_0$ 为地层压力, $p_{ov}$ 为上覆岩层压力,MPa; $v$ 为实测声速, $v_0$ 为泥岩速度,m/s; $M$ 、 $N$ 为常数; $\sigma_s$ 为开始卸载时的应力,MPa; $U$ 为卸载系数。加载曲线表示历史最大的应力状态,是压实理论下的速度与应力关系;卸载曲线表示应力小于历史最大应力的状态,是其他成因下的速度与应力关系<sup>[15]</sup>。该公式涉及的变量较多,且难以准确计算,在实际工作中应用较少。根据国内外对超压机理的研究发现,该方法常用于分析超压成因,可信度高,但遗憾的是通过声波-有效应力的关系判定超压成因机制的方法在我国油田应用较少。

## 2 深层压力预测面临的困难与挑战

在压力预测模型中,原始资料可来自钻井、测井、地震以及岩石物理分析,主要是通过建立速度与压力的数理关系表征超压,例如为得到较准确的三维压力预测结果,常用地震反演得到的层速度。判定超压成因机制对压力的影响是选择预测模型的前提。中浅层的地层压力分布为常压到欠压实导致的超压,现有技术相对成熟;深层地层经历了复杂的构造-沉积演化,难以定性、定量分析各类超压成因机制带来的影响,加之算法缺乏导致深层压力预测面临诸多挑战和困难。

### 2.1 深层超压成因复杂

从浅层到深层,地层差异性增强、构造复杂程度增加<sup>[16]</sup>。深层地层经历了多期次构造-沉积演

化、不同类型的盆地叠合、海陆相沉积盆地的交互以及复杂的成岩演化,一般压实程度高,处于高温高压状态,导致成岩作用强,储层非均质性极强。深层地质条件的复杂性使得压力预测面临诸多挑战,主要表现在对超压具体成因和关键影响因子难以剖析,难以建立合适的深层压力预测算法。

对超压成因的研究具有阶段性。Osborne等<sup>[17]</sup>将超压成因划分为3大类,即流体体积变化、应力增加、流体流动及浮力作用。有学者将其划分为欠压实、流体膨胀、侧向传递及构造加载等4类<sup>[18-19]</sup>。进入21世纪,发现成岩作用中蒙脱石的脱水作用与流体膨胀的内在机制不同,赵靖舟等<sup>[20]</sup>基于对国内外超压成因的研究,将超压成因机制细分为5类:欠压实(垂向负荷为主),流体膨胀(包括水热增压、生烃作用、油裂解生气、黏土矿物成岩作用、流体充注),构造挤压(水平应力),压力传递(包括邻近超压泥岩因砂岩渗透性发生的流体转移导致压力变化、侧向传递背斜翼部埋深较大地层内的超压输导层和沟通深部超压地层的垂向断层形成优势通道使油气向上运输<sup>[21]</sup>),成岩作用(包括蒙脱石转化为伊利石、石英的溶蚀与胶结作用)。深层复杂地质条件下常常多种超压机理共存。

判断超压成因的方法包括利用测井曲线组合分析法、Bowers法、声波速度-密度交会图法、孔隙度对比法、压力计算反推法以及综合分析法等。近几十年根据实际需求发展的主要是Bowers法和声波-密度交会图法。这两种方法在国外有相关文献报道,但在我国几乎没有用于判定超压成因。Bowers法通过地层沉积加载、卸载来判断超压成因,基于建立的声波速度-垂向有效应力关系(图3a)、声波速度-密度关系(图3b),正常压实、不平衡压实成因的超压会落在加载曲线上,而流体膨胀、成岩作用、压力传递和构造挤压形成的超压均会落在卸载曲线上。在此基础上,确定超压成因机制的影响参数,选择合适的预测模型,可使压力预测结果更加准确。

对于经历了复杂构造-沉积演化的深层,特别是现今构造与原始构造发生了巨大变化的探区,横向压力系统分布复杂。准噶尔盆地FC井区二叠系风城组横向上存在不同的压力系统,受到岩相、盐岩、断裂和构造等不同因素控制的超压成因的影



响<sup>[22]</sup>。在无井或少井情况下,根据已有井资料通过插值所建立的模型,其三维压力预测结果会与实际压力分布不匹配,导致压力预测产生较大偏差。横向压力分布特征涉及油气藏横向连续性以及后续水平井设计,在油气勘探研究中十分重要,而传统压力预测技术在这方面的研究还不够深入。

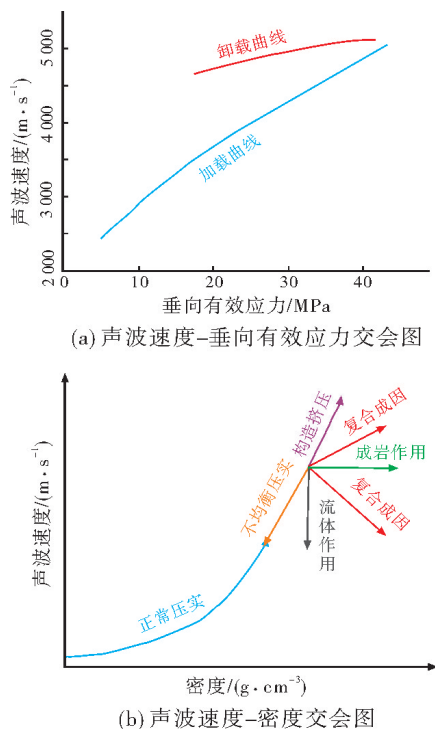


图3 超压成因机制分析图(据文献[8, 20],修改)

Fig. 3 Analysis diagram of overpressure causes  
(cited from reference [8, 20], modified)

## 2.2 深层压力预测技术缺乏

传统压力预测技术是在泥页岩欠压实原理上建立或改进的,对于砂砾岩多用基于有效应力的方法研究速度与压力的关系<sup>[23]</sup>。深层地层速度不仅受到欠压实影响,岩性、构造、断裂等因素也会引起速度变化,且深层常伴随强封闭性盖层、构造增压、断裂、流体膨胀等非欠压实因素影响形成超压,因此定量分析引起超压的主要、次要因素存在很大困难。

传统压力预测技术除了基于钻井资料的预测算法外,还有通过岩心实验研究,或者通过岩石物理模型构建岩石模量与地层压力的关系而建立的方法。然而,对于具有高温高压形成与增减压力机制共存、岩石物性差异大等特点的深层地层,尚无法真正模拟。

## 3 深层地层压力预测技术的探索和应用

### 3.1 传统压力预测方法的改进

在实际工作中发现,对传统方法改进后(保留优点,去除缺点和不确定性)在一定程度上能够解决深层压力预测问题。常用的伊顿模型具有成熟的算法理论,众多学者通过改进伊顿法以解决更复杂的压力预测问题,在实际应用中提高了精度。例如,Yan等<sup>[24-25]</sup>结合实验资料引入回归系数改进伊顿法,通过将伊顿法和Yan法结合起来消去正常压实速度<sup>[26-27]</sup>,用有效应力求地层压力。Hutomo等<sup>[28]</sup>应用神经网络算法,采用与地震数据相关的井数据来控制模型,把多种地震属性作为输入参数,从而将井中的地层压力分布到地震数据中来预测深层碳酸盐岩压力,使得井上预测与地震预测结果一致。金力新等<sup>[29]</sup>引入地层压力修正因子,分段计算深层的不同压力,并结合Fillippone公式计算三维地层压力分布,解决了传统预测方法精度低的问题。为解决非线性问题,Wei等<sup>[30]</sup>提出将传统方法和并置共克里金相结合的方法,通过地质统计随机模拟和插值方式,补充无井区的数据,以纵波速度作为协变量预测主变量地层压力,对超深层致密砂岩压力进行了预测。

此外,张志军等<sup>[31]</sup>利用叠前反演获得的弹性参数计算生烃的超压贡献,利用反演的纵波速度计算欠压实的超压贡献,形成深层欠压实和生烃混合成因的超压预测方法。熊晓军等<sup>[32]</sup>提出一种新的基于三维地震资料的地层压力预测技术,将Tau法和Fillippone法相结合消除Tau法需构建正常压实趋势线的难题,减少了主观因素的影响,预测精度比Fillippone法高。公式如下:

$$p_0 = p_{ov} - (p_{ov} - p_w) \left( \frac{(v - v_t) / (v_m - v)}{(p_{ov} - p_w) / p_w} \right)^B \quad (8)$$

式中: $p_0$ 为地层压力, $p_{ov}$ 为上覆岩层压力, $p_w$ 为静水压力,MPa; $v$ 为实测声速, $v_m$ 、 $v_t$ 分别为岩石骨架、孔隙流体速度,m/s; $B$ 为无量纲系数。

### 3.2 基于构造机制的地层压力预测方法

地层压力、地应力的变化常和构造挤压有关,而常规压力预测算法没有考虑水平挤压应力对地层压力的影响,导致深层压力预测结果与实测压力的误差较大。针对深层构造挤压的影响,罗晓容<sup>[33]</sup>

在有限元法的基础上对构造应力导致的超压进行盆地数值模拟和构造应力定量分析;杨进等<sup>[34]</sup>引入相对挤压构造应力和构造压力因子对现有的地层压力预测模型进行了修正,建立了挤压构造条件下的地层压力预测模型,提高了压力预测精度;郗诚等<sup>[35]</sup>基于薄板理论在测井数据基础上进行应力场模拟,得到的强应力场模拟结果与已钻的高产井区可建立对应关系;余夫等<sup>[36]</sup>在薄板理论基础上考虑地层弹性模量的影响,结合研究区的地质背景和深层碳酸盐岩岩性特征,建立了构造挤压背景下的压力预测方法,预测结果能很好地表示构造机制下的压力变化特征。不同探区的构造形变程度是不同的,且主要与构造运动相关,这给深层构造应力所导致的超压的量化预测带来了困难与挑战。

### 3.3 基于多孔弹性理论的地层压力预测方法

#### 3.3.1 岩石物理方法

地层压力与岩石骨架、孔隙流体相关,当发生超压或低压时,地层弹性系数会发生变化。孔隙弹性描述多孔介质中流体流动和固体形变之间的相互作用引起的弹性特征变化。胡华锋等<sup>[37]</sup>基于胡克定律应用波动方程、初等弹性理论推导有效应力与岩石速度的理论关系,它不需要构建正常压实趋势线,根据有效应力定理进行压力预测。公式如下:

$$p_0 = p_{ov} - \sigma \quad (9)$$

$$\sigma = (\Delta V/V) \cdot K_{dry} \quad (10)$$

$$K_{dry} = \frac{K_s (\varphi K_0/K_f + 1 - \varphi) - K_0}{\varphi K_0/K_f + K_s - 1 - \varphi} \quad (11)$$

式中: $p_0$ 为地层压力, $p_{ov}$ 为上覆岩层压力, $\sigma$ 为垂直有效应力,MPa; $\Delta V/V$ 为体积应变; $K_{dry}$ 、 $K_s$ 、 $K_0$ 、 $K_f$ 为干燥体积模量、流体体积模量、岩石基质模量、混合流体体积模量,由岩石物理模型求取,GPa; $\varphi$ 为孔隙度,%。上述方法根据有效应力原理建立,通过建立压力与不同响应参数之间的经验关系对地层压力的分布进行量化评价,但对孔隙结构不均一、非均质性极强、纵向上没有明显变化规律的碳酸盐岩难以建立起反映有效应力的测井、地震参数。

针对碳酸盐岩地层,刘宇坤等<sup>[38]</sup>基于岩石多孔弹性理论应用 Biot-Willis 有效应力定律(对 Biot 理论的改进)研究应力-应变-压力关系,建立地层压力与弹性参数的预测方法。公式如下:

$$p_0 = Q \cdot \bar{\sigma} \quad (12)$$

$$Q = \frac{1}{2 - \frac{K_d}{K_s} + \frac{\varphi K_d (K_s - K_0)}{K_0 (K_s - K_d)}} \quad (13)$$

式中: $p_0$ 为地层压力, $\bar{\sigma}$ 为平均主应力,MPa; $Q$ 为复合弹性模量组合项; $K_d$ 、 $K_s$ 、 $K_0$ 分别为岩石骨架体积模量、流体体积模量、岩石基质模量,GPa; $\varphi$ 为孔隙度,%。考虑到岩石往往是黏弹性介质,引入无量纲的参数  $L$  表征能量消耗的部分以校正弹性模量,可以使结果更加准确。

Sun<sup>[39-40]</sup>引入孔隙结构定量描述了岩石骨架弹性模量的变化。Nur等<sup>[41]</sup>针对低孔 Casco 花岗岩(孔隙度极低且裂缝发育)样品,研究孔隙结构和流体在不同压力下对岩石声波速度的影响(图4);实验很好地说明了由压力增大导致的裂缝闭合和孔隙结构改变可以极大地影响声波速度。郭静怡等<sup>[42]</sup>

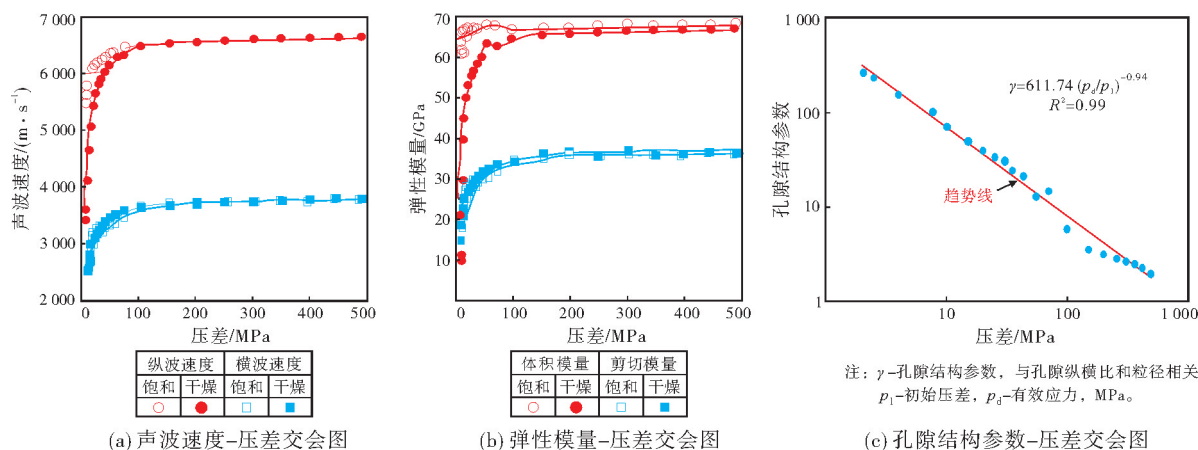


图4 Casco 花岗岩样品的物理参数随压差变化关系(引自文献[41])

Fig. 4 Relationship between physical parameter of Casco granite samples with differential pressure (cited from reference [41])

在此基础上研究压力随孔隙结构参数的变化关系,结合 Gassmann 方程计算弹性模量对压力的影响,在对于山地区五峰组—龙马溪组页岩气藏的压力预测中,使用该模型利用测井、地震资料获得了较好的应用效果。

Wei 等<sup>[43]</sup>基于 Biot-Rayleigh 理论开发了 TPP 三维岩石物理模型来预测超深层碳酸盐岩地层压力。以塔里木盆地 3 口生产井为研究对象,用该方法预测超深层碳酸盐岩地层压力,验证了高孔隙压力、低压差对应油的高产井区。

### 3.3.2 颗粒应力法

地层处于超压状态下,岩石发生微小的形变,会导致孔隙空间发生变化,故可通过岩石压缩属性研究地层压力。Atashbary 等<sup>[44]</sup>基于欠压实成因提出利用岩石压缩属性(计算孔隙压缩率)预测地层压力的方法。刘宇坤等<sup>[45-46]</sup>构建岩石压缩系数与压力的数学关系。针对多孔介质受到的压实作用,把骨架和流体受到的力按孔隙度的大小分配,则地层压力为作用在孔隙流体上的力,有效应力为骨架受到的力<sup>[47-48]</sup>,可表示为下式:

$$p_0 = \frac{100 p_{ov} - (100 - \varphi) \sigma}{\varphi} \quad (14)$$

式中: $p_0$ 为地层压力, $p_{ov}$ 为上覆岩层压力, $\sigma$ 为垂直有效应力,MPa; $\varphi$ 为孔隙度,%。

刘震等<sup>[49]</sup>通过分析孔隙性岩石的微观受力情况,提出孔隙性介质静力平衡方程:

$$p_{ov} = (1 - \varphi) \cdot \sigma_t + \varphi \cdot p_0 \quad (15)$$

式中: $p_0$ 为地层压力, $p_{ov}$ 为上覆岩层压力, $\sigma_t$ 为颗粒应力(不是有效应力,表示岩石骨架颗粒真正承担的那部分力),MPa; $\varphi$ 为孔隙度,%。该方法通过研究微观颗粒的受力情况从而反映压力的变化,但存在计算困难和难以剖析真实的颗粒受力的问题,难以用于预测油田的地层压力。

孔隙弹性理论将纵波速度分解为孔隙流体和岩石骨架的贡献。采用小波变换对纵波速度进行处理,可提取和放大那些小尺度波动和细节,进而用高频细节识别超压层,建立孔隙流体对纵波速度贡献的压力预测模型<sup>[50]</sup>。通过小波变换提取高频信息,实际上也是应用泊松比的方法,都是放大敏感参数来预测压力。孔隙弹性理论在原理上可以解决深层压力问题,但是实际工作中很少使

用,主要是因为其研究对象的岩石模量一般是在实验室中或通过反演得到,现场计算很少,且岩石模量受地层因素影响较大导致得到的结果稳定性低。

深层地层压力不是由简单的垂直应力决定,在地质演化过程中地层压力的变化也与水平应力相关。张洪学等<sup>[51]</sup>研究裂缝对地层压力变化的影响,通过高精度反演获得有效压力参数和地层速度、裂缝密度,实现深层复杂构造裂缝型储层的压力预测。

## 3.4 地震反演与人工智能在地层压力预测中的应用

目前用于地层压力预测的基础资料包括钻井、测井、地震、岩石物理等资料,随着地震资料处理、解释、属性分析及反演等技术的进步,压力预测逐步由钻井、测井走向地震三维预测,进而建立地下三维压力分布。建立三维预测模型需要高精度的速度结果来保证预测结果的准确性。深层—超深层普遍发生了或者正处于油气相态转化过程,在深层地震勘探时因存在地层吸收衰减、介质横向变化大等问题,地震资料分辨率降低<sup>[52-53]</sup>,因此高分辨率处理一直是地震资料采集处理的重点攻关方向。

低频、宽频激发是获得高分辨率地震资料的前提。低频声波具有很强的穿透能力,可改善深层地震资料分辨率及信噪比,有助于解决深层—超深层目标成像和储层预测、压力预测等问题。拓宽频带可有效提高地震分辨率,包括横向分辨率<sup>[54]</sup>。目前大多数地震反演方法基于模型,其中的关键是构建低频速度模型。反演算法模型的精进是地层压力预测的重点之一,主要基于叠前和叠后反演结果。利用波阻抗反演得到的速度的分辨率较高,但直接将波阻抗转换为密度和速度则存在误差,使压力预测增加了很大的不确定性。Riahi 等<sup>[55]</sup>基于模型反演算法由波阻抗直接估算地层压力,减少了波阻抗与速度转换步骤带来的误差;李玉凤等<sup>[56]</sup>、Satti 等<sup>[57]</sup>利用叠前反演速度进行压力预测,提高了预测精度。全波形反演利用叠前波场中的动力学与运动学信息,揭示复杂地质背景下的构造细节,适用于复杂地质构造分析。波形指示反演利用波形的横向变化指示地层的相变特征,以表征储层的空间变异程度。苏洲等<sup>[58]</sup>在相模型约束下使用高分辨率波形指示反演,有



效减小了预测结果随机性,使反演结果从完全随机走向逐步确定。地震反演预测地层压力的关键是对研究区的地质背景进行分析,甄别沉积相、构造等因素引起的速度变化,在此基础上根据纵横波速度变化特征预测地层压力变化。

随着科技发展,人工智能的应用越来越广泛。利用地震资料的钻前地层压力预测方法是未来的发展方向,但目前存在预测精度不高的问题,原因除地质条件复杂外,更重要的是井下信息过少,或根本没有有用的信息,这种情况下人工智能能够很好应对深层压力预测问题。王树华等<sup>[59]</sup>基于地震资料构建了地震标签样本库进行随机森林训练,形成决策树来预测地层压力;Hutomo等<sup>[28]</sup>将伊顿算法与神经网络结合,将声波阻抗、剪切阻抗、地震频率和地震振幅等地震属性作为神经网络的输入,将井中的地层压力应用到地震三维数据中建立神经网络模型预测压力;针对深层非线性导致预测结果的不确定性增加的问题,Hosseini等<sup>[60]</sup>提出一种非线性模型的预测模型,结合智能算法预测地层压力。人工智能需要建立标签数据库,要求的数据较多,而实际研究工区的钻井数据不多,只有几口或没有井,由此建立的标签数据库得到的预测结果会极其不稳定,客观存在的岩性变化和压力系统的差异会导致压力预测结果与实际压力产生较大误差。尽管神经网络算法的结果取决于输入资料质量,但仍为反演方法开辟了新途径。将人工智能与传统方法相结合,在特定地区的地质背景下选择合适的反演技术,打破传统方法的瓶颈,获得高精度的波阻抗、速度、密度等与地层压力相关的参数,更好应用于深层复杂压力预测。

## 4 未来研究方向展望

随着勘探目标不断向深层—超深层领域拓展,孔隙类型变得复杂,复杂的高温高压地质条件给深层压力的空间分布预测带来了极大困难。油气勘探需求、深层地质条件的复杂性和科技的持续进步决定了地层压力预测技术的未来发展具有以下3方面的趋势:

(1)增加深层约束条件以改进经典算法。从超压成因和影响因素出发,开展深层流体膨胀、构造增压、压力传递、盖层封闭、断裂的泄压等地质研究,判断超压形成机制,通过数学和物理关系,探究

压力与速度、构造、断裂、岩石模量、孔隙结构、破裂压力、地应力等地质条件和参数之间的关系,构建评价盖层封闭性、断裂连通性、构造增压影响、生烃膨胀程度等因子,作为经典算法的约束条件改进算法和预测模型,校正非欠压实成因的影响。

(2)发展形成适应复杂岩性、多种成因机制、可预测横向压力的深层地层压力地震预测技术。打破泥页岩欠压实理论的限制,或从碳酸盐岩储层特征出发,探究碳酸盐岩的一般超压形成机制与常规储层超压的不同之处,研究适用于深层碳酸盐岩储层的超压预测算法。单井模型用于三维地层压力地震预测时应考虑深层多种机制对纵、横向压力系统变化的影响以适时改进预测模型,将三维预测误差与预测结果控制在与单井模型上的一致,预测深层纵、横向油气藏的地层压力特征以判断油气藏的连续性和定位高效油气藏,为精确井位部署和钻井工程服务。

(3)应用人工智能等前沿技术和交叉学科。随着人工智能和神经网络的发展,断层与裂缝的智能识别和计算等油气勘探技术与压力预测算法的结合程度不断提高,为深层压力预测提供了新方向。通过人工智能实现深层断裂识别,判断断裂是否沟通油气、断裂附近是否重新成藏而导致超压,依据此类研究成果形成深层地层压力地震预测模型,实现深层复杂地层、多压力系统预测和定量求解,助推深层—超深层油气勘探。

## 5 结论和认识

本文从深层地质条件的复杂性和预测技术的缺陷分析了当前深层压力预测难题,综述了基于不同原理发展的地层压力预测方法及其优缺点,探讨了经典预测算法在深层的适用性,对深层地层压力预测方法的技术原理、优势和不足及应用效果进行了简要列举,总结了深层压力预测方法的新进展,对未来发展趋势进行了展望,得到以下几点认识:

(1)深层复杂的地质条件导致超压机制复杂,增加了预测深层压力变化特征的难度。现有的压力预测算法还是以经典预测算法为主探究深层压力变化,但深层超压特征比中浅层复杂,尽管适用于中浅层的经典预测理论和算法已很完善,但对深层压力研究不适用,造成预测结果误差较大。

(2) 深层压力预测技术的发展受到多方面的限制。尽管针对深层压力问题的方法研究有新的进展,如形成基于多孔弹性理论、岩石物理模型、构造增压等方法,认识的适用于深层的预测技术,但深层高温高压环境、复杂的地质条件和超压成因机制、工程难度大等因素,使得深层压力预测面临很大的挑战和难题。

(3) 从超压成因机制出发,结合实际问题改进公式和模型,可实现深层压力预测。深层超压与构造、断裂的压力传递、生烃膨胀和盖层封闭等机制有关,常常多种成因共存。针对深层实际超压情况通过增加约束条件可得到新算法与新模型,使其符合深层各层段压力特征,从而准确预测压力纵、横向变化特征以支撑油气藏的识别与钻探。

#### 参考文献

- [1] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1156-1166.  
ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration[J]. Acta petrolei sinica, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [2] 庞雄奇, 汪文洋, 汪英勋, 等. 含油气盆地深层与中浅层油气藏条件和特征差异性比较[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1167-1187.  
PANG Xiongqi, WANG Wenyang, WANG Yingxun, et al. Comparison of otherness on hydrocarbon accumulation conditions and characteristics between deep and middle-shallow in petroliferous basins [J]. Acta petrolei sinica, 2015, 36(10): 1167-1187.
- [3] 汪立君, 郝芳, 陈红汉, 等. 中国浅层油气藏的特征及其资源潜力分析[J]. 地质通报, 2006, 25(9): 1079-1087.  
WANG Lijun, HAO Fang, CHEN Honghan, et al. Characteristics of shallow petroleum accumulations in China and analysis of their petroleum resource potential [J]. Geological bulletin of China, 2006, 25(9): 1079-1087.
- [4] EL-WERR A, SHEBL A, EL-RAWY A, et al. Pre-drill pore pressure prediction using seismic velocities for prospect areas at Beni Suef oil field, Western Desert, Egypt[J]. Journal of petroleum exploration and production technology, 2017, 7(4): 1011-1021.
- [5] 路保平, 王志战, 张元春. 碳酸盐岩孔隙压力预监测理论与方法进展[J]. 石油学报, 2022, 43(4): 571-580.  
LU Baoping, WANG Zhizhan, ZHANG Yuanchun. Progress in theory and method of pre-monitoring of pore pressure in carbonate rocks[J]. Acta petrolei sinica, 2022, 43(4): 571-580.
- [6] HOTTMANN C E, JOHNSON R K. Estimation of formation pressures from log-derived shale properties[J]. Journal of petroleum technology, 1965, 17(6): 717-722.
- [7] FOSTER J B. Estimation of formation pressures from electrical surveys-offshore Louisiana[J]. Journal of petroleum technology, 1966, 18(2): 165-171.
- [8] 杨韬政, 刘成林, 田继先, 等. 柴达木盆地大风山凸起地层压力预测及成因分析[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(1): 96-107.  
YANG Taozheng, LIU Chenglin, TIAN Jixian, et al. Prediction and genesis of formation pressure in Dafengshan Uplift, Qaidam Basin[J]. Lithologic reservoirs, 2023, 35(1): 96-107.
- [9] EATON B A. The effect of overburden stress on geopressure prediction from well logs[J]. Journal of petroleum technology, 1972, 24(8): 929-934.
- [10] EATON B A. The equation for geopressure prediction from well logs[C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. Calgary: Society of Petroleum Engineer, 1975: SPE-5544-MS.
- [11] PENNEBAKER E. Detection of abnormal-pressure formations from seismic field data [J]. World oil, 1968, 166(7): 73-78.
- [12] FILLIPPONE W R. Estimation of formation parameters and the prediction of overpressures from seismic data [C]//1982 SEG Annual Meeting. Dallas: Society of Exploration Geophysicists, 1982: SEG-1982-0502.
- [13] BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction[J]. SPE drilling & completion, 1995, 10(2): 89-95.
- [14] BOWERS G L. Determining an appropriate pore-pressure estimation strategy [C]//Offshore Technology Conference. Houston, 2001: OTC-13042-MS.
- [15] 于浩. 多变量孔隙压力预测与不确定性分析方法及应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020.  
YU Hao. Multivariate pore-pressure prediction and uncertainty analysis [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020.
- [16] 王跃祥, 夏小勇, 吴燕辉, 等. 川中—川西地区沙溪庙组致密气藏地层压力研究[J]. 石油物探, 2023, 62(4): 721-730, 740.  
WANG Yuexiang, XIA Xiaoyong, WU Yanhui, et al. Stratigraphic pressure study of Shaximiao Formation tight gas reservoir in central-western Sichuan [J]. Geophysical prospecting for petroleum, 2023, 62(4): 721-730, 740.
- [17] OSBORNE M J, SWARBRICK R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation [J]. AAPG bulletin, 1997, 81(6): 1023-1041.
- [18] 何玉, 周星, 李少轩, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷古近系地层超压成因及测井响应特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 60-69.  
HE Yu, ZHOU Xing, LI Shaoxuan, et al. Genesis and logging response characteristics of formation overpressure of Paleogene in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Lithologic reser-



- voirs, 2022, 34(3): 60–69.
- [19] 张凤奇, 王震亮, 赵雪娇, 等. 库车坳陷迪那2气田异常高压成因机制及其与油气成藏的关系[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 739–747.
- ZHANG Fengqi, WANG Zhenliang, ZHAO Xuejiao, et al. Genetic mechanism of overpressure and its relationship with hydrocarbon accumulation in Dina-2 Gasfield, Kuqa Depression [J]. *Acta petrolei sinica*, 2012, 33(5): 739–747.
- [20] 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.
- ZHAO Jingzhou, LI Jun, XU Zeyang. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins [J]. *Acta petrolei sinica*, 2017, 38(9): 973–998.
- [21] 范昌育, 王震亮, 王爱国, 等. 柴达木盆地北缘鄂博梁构造带超压形成机制与高压气、水层成因[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 699–706, 714.
- FAN Changyu, WANG Zhenliang, WANG Aiguo, et al. Mechanism for overpressure generation and origin of overpressured gas and aquifer layers, Eboliang structure belt, northern Qaidam Basin [J]. *Acta petrolei sinica*, 2015, 36(6): 699–706, 714.
- [22] 庞雷, 白雨, 余兴. 准噶尔盆地FC井区基于推断模型地层压力预测技术[C]//油气田勘探与开发国际会议, 202314496.
- PANG Lei, BAI Yu, YU Xing. Formation pressure prediction technique based on extrapolation model for FC well area in Junggar Basin [C]//IFEDC, 202314496.
- [23] 王斌, 赵建国, 李伟, 等. 异常高压对砂砾岩弹性性质影响的实验机理研究与压力预测新模型: 以准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡三叠系为例[J]. 地球物理学报, 2022, 65(8): 3157–3171.
- WANG Bin, ZHAO Jianguo, LI Wei, et al. Experimental study on the effect of abnormal high pressure on the elastic properties of glutenite and a novel pressure prediction model: a case study from Triassic Formation in north slope of Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Chinese journal of geophysics*, 2022, 65(8): 3157–3171.
- [24] YAN Fuyong, HAN Dehua. Modeling of effective pressure effect on porous reservoir rocks [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2009: 2025–2029.
- [25] YAN Fuyong, HAN Dehua, REN Keyin. A new model for pore pressure prediction [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2012: 1–5.
- [26] YU Liwen, SUN Zandong, LIU Zhishuai, et al. A new method for pore pressure prediction using logging and seismic data [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2015: 3234–3238.
- [27] 陈鸣, 余立文, 秦瑞, 等. 泥页岩地层孔隙压力预测新方法[J]. 复杂油气藏, 2021, 14(3): 27–30, 69.
- CHEN Ming, YU Liwen, QIN Rui, et al. A new method for prediction of pore pressure in shale formation [J]. *Complex hydrocarbon reservoirs*, 2021, 14(3): 27–30, 69.
- [28] HUTOMO P S, ROSID M S, HAIDAR M W. Pore pressure prediction using Eaton and neural network method in carbonate field "X" based on seismic data [C]// 9th Annual Basic Science International Conference 2019. IOP conference series: materials science and engineering, 2019, 546(3): 032017.
- [29] 金力新, 徐声驰, 郑以华, 等. 阜康凹陷二叠系多成因机制地层异常高压预测方法研究与应用[J]. 录井工程, 2023, 34(1): 113–120.
- JIN Lixin, XU Shengchi, ZHENG Yihua, et al. Research and application of prediction method for abnormal high pressure in Permian polygenetic mechanism formation, Fukang Sag [J]. *Mud logging engineering*, 2023, 34(1): 113–120.
- [30] WEI Qiang, LIN Yaoting, GAO Gang, et al. Research on formation pressure prediction method for ultra-deep tight sandstone based on collocated Cokriging [J]. *Processes*, 2023, 11(7): 2010.
- [31] 张志军, 郭军, 何玉, 等. 一种欠压实与生烃混合成因地层超压的预测方法: CN202010929983.2 [P]. 2020–09–07.
- ZHANG Zhijun, GUO Jun, HE Yu, et al. A method for predicting overpressure in strata of mixed undercompaction and hydrocarbon generation: CN202010929983.2 [P]. 2020–09–07.
- [32] 熊晓军, 刘丽婷, 李亚林, 等. 新的基于三维地震资料的地层孔隙压力预测方法: CN201711320533.8 [P]. 2017–12–12.
- XIONG Xiaojun, LIU Liting, LI Yalin, et al. A new method for predicting formation pore pressure based on three-dimensional seismic data: CN201711320533.8 [P]. 2017–12–12.
- [33] 罗晓容. 构造应力超压机制的定量分析[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1086–1093.
- LUO Xiaorong. Quantitative analysis on overpressuring mechanism resulted from tectonic stress [J]. *Chinese journal of geophysics*, 2004, 47(6): 1086–1093.
- [34] 杨进, 刘书杰, 石磊, 等. 挤压构造地层压力预测模型研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 764–768.
- YANG Jin, LIU Shujie, SHI Lei, et al. Research on prediction model for formation pressure in compression structure [J]. *Acta petrolei sinica*, 2009, 30(5): 764–768.
- [35] 郝诚, 施泽进, 王长城, 等. 基于测井曲线及弹性薄板理论的应力场模拟[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(1): 76–84.
- XI Cheng, SHI Zejin, WANG Changcheng, et al. Stress field simulation based on log curves and the theory of elastic thin plate [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (science*

- & technology edition), 2015, 37(1): 76–84.
- [36] 余夫, 金衍, 陈勉, 等. 基于薄板理论的碳酸盐岩地层压力检测方法探讨[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 57–61.  
YU Fu, JIN Yan, CHEN Mian, et al. Discussion on a formation pore pressure detection method for carbonate rocks based on the thin plate theory [J]. Petroleum drilling techniques, 2014, 42(5): 57–61.
- [37] 胡华锋, 刘婵娟, 林正良, 等. 基于胡克定律的地层压力计算方法及系统: CN201910963916.X[P]. 2019–10–11.  
HU Huafeng, LIU Chanjuan, LIN Zhengliang, et al. Formation pressure calculation method and system based on Hooke's law: CN201910963916.X[P]. 2019–10–11.
- [38] 刘宇坤, 何生, 何治亮, 等. 基于多孔介质弹性理论的碳酸盐岩地层超压预测[J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 53–61.  
LIU Yukun, HE Sheng, HE Zhiliang, et al. Overpressure prediction in carbonate formations based on poroelasticity theory [J]. Geological science and technology information, 2019, 38(4): 53–61.
- [39] SUN Yuefeng. Core-log-seismic integration in hemipelagic marine sediments on the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge [M]// FISHER A, DAVIS E E, ESCUTIA C. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 2000, 168: 21–35.
- [40] SUN Yuefeng. Pore structure effects on elastic wave propagation in rocks: AVO modelling [J]. Journal of geophysics and engineering, 2004, 1(4): 268–276.
- [41] NUR A, SIMMONS G. Stress-induced velocity anisotropy in rock: an experimental study [J]. Journal of geophysical research, 1969, 74(27): 6667–6674.
- [42] 郭静怡, 李敏, 庄明伟, 等. 速度-压力岩石物理模型及其在页岩孔隙压力预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 360–372.  
GUO Jingyi, LI Min, ZHUANG Mingwei, et al. Rock physics model for velocity-pressure relations and its application to shale pore pressure estimation [J]. Petroleum exploration and development, 2023, 50(2): 360–372.
- [43] WEI Yijun, BA Jing, CARCIONE J M, et al. Temperature, differential pressure, and porosity inversion for ultradeep carbonate reservoirs based on 3D rock-physics templates [J]. Geophysics, 2021, 86(3): 1–54.
- [44] ATASHBARI V, TINGAY M, ZAREIAN M H. Compressibility method for pore pressure prediction [C]// Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2012: SPE-156337-MS.
- [45] 刘宇坤, 何生, 何治亮, 等. 碳酸盐岩超压岩石物理模拟实验及超压预测理论模型[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 716–724.  
LIU Yukun, HE Sheng, HE Zhiliang, et al. The rock physics modeling experiment under overpressure and theoretical model for overpressure prediction in carbonate rocks [J]. Oil & gas geology, 2019, 40(4): 716–724.
- [46] 刘宇坤, 何生, 杨锐, 等. 一种基于岩石压缩系数计算碳酸盐岩地层孔隙压力的方法: CN201811494993.7[P]. 2018–12–07.  
LIU Yukun, HE Sheng, YANG Rui, et al. A method for calculating the pore pressure of carbonate rock formation based on rock compressibility: CN201811494993.7[P]. 2018–12–07.
- [47] 王志宏, 郝翠果, 李健明, 等. 川西前陆盆地超压分布及成因机制[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(6): 36–43.  
WANG Zhihong, HAO Cuiguo, LI Jianming, et al. Distribution and genetic mechanism of overpressure in western Sichuan foreland basin [J]. Lithologic reservoirs, 2019, 31(6): 36–43.
- [48] 瞿建华, 王泽胜, 任本兵, 等. 准噶尔盆地环玛湖斜坡区异常高压成因机理分析及压力预测方法[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(5): 36–39, 46.  
QU Jianhua, WANG Zesheng, REN Benbing, et al. Genetic mechanism analysis and prediction method of abnormal high pressure in Mahu slope area, Junggar Basin [J]. Lithologic reservoirs, 2014, 26(5): 36–39, 46.
- [49] 刘震, 张万选, 曾宪斌. 特察模型在孔隙性岩石中应用的局限性浅析[J]. 地质科学, 1997, 32(1): 116–121.  
LIU Zhen, ZHANG Wanxuan, ZENG Xianbin. Study on static equilibrium equation of porous rocks in compaction processes [J]. Chinese journal of geology, 1997, 32(1): 116–121.
- [50] YU Fu, JIN Yan, CHEN Kangping, et al. Pore-pressure prediction in carbonate rock using wavelet transformation [J]. Geophysics, 2014, 79(4): D243–D252.
- [51] 张洪学, 印兴耀, 李坤, 等. 裂缝型储层五维地震有效压力参数预测[J]. 石油物探, 2022, 61(3): 521–542.  
ZHANG Hongxue, YIN Xingyao, LI Kun, et al. Estimation of effective stress parameters in fractured reservoirs based on 5D seismic data [J]. Geophysical prospecting for petroleum, 2022, 61(3): 521–542.
- [52] 杨金华, 张焕芝. 非常规、深层、海洋油气勘探开发技术展望[J]. 世界石油工业, 2020, 27(6): 20–26.  
YANG Jinhua, ZHANG Huanzhi. Outlook on the exploration and development technologies of unconventional, deep and offshore oil and gas [J]. World petroleum industry, 2020, 27(6): 20–26.
- [53] 谢玉洪, 袁全社. 中国近海深水深层油气地球物理勘探实践与展望[J]. 石油物探, 2023, 62(2): 183–193.  
XIE Yuhong, YUAN Quanshe. Practice and prospects of deep-water and deep-formation geophysical exploration [J]. Geophysical prospecting for petroleum, 2023, 62(2): 183–193.
- [54] 王华忠. “两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析[J]. 石油物探, 2019, 58(3): 313–324.  
WANG Huazhong. Key problem analysis in seismic exploration based on wide-azimuth, high-density, and broadband

- seismic data [J]. Geophysical prospecting for petroleum, 2019, 58(3): 313–324.
- [55] RIAHI M A, FAKHARI M G. Pore pressure prediction using seismic acoustic impedance in an overpressure carbonate reservoir [J]. Journal of petroleum exploration and production technology, 2022, 12(12): 3311–3323.
- [56] 李玉凤, 孙伟, 何巍巍, 等. 基于叠前反演的泥页岩地层压力预测方法[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(1): 113–121.  
LI Yufeng, SUN Wei, HE Weiwei, et al. Prediction method of shale formation pressure based on pre-stack inversion [J]. Lithologic reservoirs, 2019, 31(1): 113–121.
- [57] SATTI I A, FAROOQ M, HERMANA M. Integration of seismic methods and 3D basin modeling approach for improved predrill pore pressure prediction: an example from Malay Basin, Malaysia [J]. Arabian journal of geosciences, 2021, 14(18): 1924.
- [58] 苏洲, 刘永福, 韩剑发, 等. 相控约束下的超深薄层砂体预测技术在塔北隆起玉东区块中的应用[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(2): 295–306.
- SU Zhou, LIU Yongfu, HAN Jianfa, et al. Application of ultra-deep sandstone reservoirs prediction technology under seismic facies controlled in Yudong block of Tabei Uplift, Tarim Basin [J]. Natural gas geoscience, 2020, 31(2): 295–306.
- [59] 王树华, 谭绍泉, 王千军, 等. 基于随机森林回归的地层压力预测方法: CN202110029157.7[P]. 2021–01–11.  
WANG Shuhua, TAN Shaoquan, WANG Qianjun. Formation pressure prediction method based on random forest regression: CN202110029157.7[P]. 2021–01–11.
- [60] HOSSEIN M, ALI R M. A nonlinear approach for predicting pore pressure using genetic algorithm in one of the Iranian petroleum carbonate reservoirs [J]. Arabian journal of geosciences, 2020, 13(14): 688.

编辑: 董庸

## Research progress on deep formation pressure prediction technology

YU Jinqiu, SUN Xiping, YU Yongcai, LI Xuan, LI Xiaoming, XU Guangcheng

*PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development*

**Abstract:** The performance characteristics and the accurate prediction methods of overpressure in deep strata has become a hot topic in oil and gas exploration and development. Based on a lot of relevant literature and patent works of formation pressure prediction technology at home and abroad, the paper summarizes the challenges and problems in deep formation pressure prediction, the new progress and shortcomings of deep formation pressure prediction technologies, and the future research directions. The main understandings are as follows: (1) The classical pressure prediction theories and algorithms effectively applicable to the shallow and middle strata can not be directly applied to the study of more complex deep formation pressure. (2) Due to the complex geological conditions, engineering difficulties, complex overpressure genetic mechanism, and the lack of prediction algorithm in deep strata, there is still great challenges and problems although the research based on porous elastic theory, petrophysical model, and tectonic pressurization has promoted the progress of deep pressure prediction. (3) Different from the common overpressure caused by undercompaction, the overpressure in deep strata is often related to non-undercompacted mechanisms such as pressure transfer of structure and fault, hydrocarbon generation, and caprock sealing, which is often characterized by the coexistence of multiple mechanisms in the same areas and the various changes among different pressure systems. In order to accurately predict the deep overpressure, the more adaptable models are needed including the improved classical methods and formulas facing to the actual problems by analyzing the main and secondary overpressure mechanism. The seismic prediction technologies for the deep formation pressure that adapt to the complex lithology, the coexistence of multiple overpressure mechanisms and the variation of lateral pressure distributions, is the main research direction in the future.

**Key words:** deep formation; formation pressure; overpressure mechanism; non-undercompaction; pressure prediction technology

**YU Jinqiu,** First author: Master Candidate, major in geodetection and information technology. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: 1829989502@qq.com