

文章编号: 0253-2697(2022)08-1107-15 DOI:10.7623/syxb202208006

库车坳陷克拉苏—依奇克里克构造带构造挤压型超压识别与计算

王 冰^{1,2} 邱楠生^{1,2} 王 祥³ 张海祖³ 刘一锋⁴ 常 健^{1,2} 朱传庆^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;
3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000; 4. 浙江大学海洋学院 浙江舟山 316021)

摘要: 强烈的构造挤压对地层超压的形成和演化具有重要影响,对构造挤压型超压的判识与估算有待进一步深入研究。综合岩石力学特征与储集物性参数的相关性,系统分析了相同应力条件下,构造挤压型超压地层和静水压力地层在垂向有效应力、声波速度、密度测井响应等方面差异,建立了构造挤压型超压的识别模版。依据孔隙弹性理论,改进了传统的等效深度法并提出了构造挤压型超压的计算方法——平均应力法。综合实钻压力、区域地质资料和泥岩综合压实特征,在库车坳陷克拉苏—依奇克里克构造带识别出不同强度的构造挤压型超压。基于三维主应力计算,定量评估了构造挤压引起的增压量。构造挤压是克拉苏—依奇克里克构造带地层超压的重要成因机制,其对地层超压的贡献率与构造强度具明显正相关性,在克拉苏构造带 KS6 井区,构造挤压对超压的贡献率为 43.2%~44.4%,在 DB6 井区的贡献率为 34.1%~39.3%;在依奇克里克构造带 YS4 井区,构造挤压贡献率为 32.8%~34.7%,在 TX1 井区的贡献率为 21.1%~22.0%。研究方法与认识可以为预测构造挤压型盆地的地层压力提供研究思路、为有利储层的寻找提供理论指导。

关键词: 超压;构造挤压;成因识别;压力计算;库车坳陷

中图分类号:TE122 文献标识码: A

Identification and calculation of tectonic compression overpressure of Kelasu-Yiqikelike tectonic belt in Kuqa depression

Wang Bing^{1,2} Qiu Nansheng^{1,2} Wang Xiang³ Zhang Haizu³ Liu Yifeng⁴ Chang Jian^{1,2} Zhu Chuanqing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 841000, China; 4. Ocean College, Zhejiang University, Zhejiang Zhoushan 316021, China)

Abstract: Strong tectonic compression has an important influence on the generation and evolution of formation overpressure, and the identification and estimation of tectonic compression overpressure need to be further studied. Based on the correlation between rock mechanics characteristics and reservoir physical property parameters, This paper systematically analyzes the differences of vertically effective stress, acoustic velocity and density logging response between tectonic compression overpressure formation and hydrostatic pressure formation under the same stress condition, and establishes the identification template of tectonic compression overpressure. According to the pore elasticity theory, the traditional equivalent depth method has been improved, and the calculation method of tectonic compression overpressure (mean stress method) is also proposed. Based on actual drilling pressure, regional geological data and comprehensive compaction characteristics of mudstone, the paper identifies the tectonic compression overpressure with different strengths in the Kelasu-Yiqikelike tectonic belt of Kuqa depression. Based on the calculation of three-dimensional principal stress. Then a quantitative evaluation is performed on the pressurization caused by tectonic compression. Tectonic compression plays an important role in the genetic mechanism of formation overpressure in Kelasu-Yiqikelike tectonic belt, and its contribution rate for formation overpressure is obviously positively correlated with tectonic strength. The contribution rate of tectonic compression in Well KS6 area of Kelasu tectonic belt ranges from 43.2% to 44.4%, and that in Well DB6 area is from 34.1% to 39.3%. The contribution rate of tectonic compression in Well YS4 area of Yiqikelike tectonic belt ranges between 32.8% and 34.7%, and that in Well TX1 area is between 21.1% and 22.0%. The research methods and understanding will provide research ideas for the formation pressure prediction of tectonic compression basins and a theoretical guidance for seeking favorable reservoirs.

Key words: overpressure; tectonic compression; genetic identification; pressure calculation; Kuqa depression

基金项目:国家自然科学基金项目(No. U19B6003-02-03)和中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司校企合作项目(041020050021)资助。

第一作者:王 冰,男,1993年12月生,2016年获太原理工大学资源勘查工程专业学士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学学院博士研究生,主要从事沉积盆地压力场研究。Email:503041865@qq.com

通信作者:邱楠生,男,1968年7月生,1994年获中国科学院地质研究所构造地质学专业博士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学学院教授,主要从事盆地构造—热演化和油气成藏机理教学与科研工作。Email:qunsh@cup.edu.cn

引用:王冰,邱楠生,王祥,张海祖,刘一锋,常健,朱传庆.库车坳陷克拉苏—依奇克里克构造带构造挤压型超压识别与计算[J].石油学报,2022,43(8):1107-1121.

Cite: WANG Bing, QIU Nansheng, WANG Xiang, ZHANG Haizu, LIU Yifeng, CHANG Jian, ZHU Chuanqing. Identification and calculation of tectonic compression overpressure of Kelasu-Yiqikelike tectonic belt in Kuqa depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(8): 1107-1121.

挤压型盆地中岩石体积压实是包括垂向和水平应力在内的地下三维应力作用的结果,其中,构造挤压应力对孔隙压力的作用被视为一种侧向机械压实作用,导致岩石孔隙度和渗透率降低^[1-3]。构造压实作用增加了地层压实与排水不平衡的程度,从而产生更高的孔隙流体超压^[3]。前人利用盆地数值模拟和岩石物理实验等方法对构造应力与孔隙增压之间的关系开展了定量研究,认为在极端条件下构造挤压增压量可达构造应力的 50%~75%^[3-4],因此,在构造活跃地区仅考虑一维压实作用计算得到的地层压力与真实压力存在较大偏差^[5]。此外,地层封闭性对构造超压的保存起到重要作用,当地层封闭性较好时,10%的地层缩短量可使孔隙压力接近静岩压力^[6-7]。

库车坳陷克拉苏—依奇克里克构造带(克—依构造带)含油气层系普遍发育超压,在垂向埋藏和喜马拉雅晚期侧向挤压压实的共同作用下,深层碎屑颗粒趋向于共轭定向排列而更加紧密^[8],这种强烈的构造挤压作用对超压的形成和演化起到极其重要的作用^[5,9-11]。张凤奇等^[12]通过评价库车坳陷地层封闭系数,认为构造挤压作用的增压贡献率最大可达 30%。前人主要从区域构造挤压变形程度与地层超压发育关系的定性描述等方面开展库车坳陷克—依构造带构造挤压型超压的识别研究,而基于构造挤压增压机制的超压识别的研究及应用却鲜有报道。此外,针对构造挤压对克—依构造带的超压贡

献量,目前尚存较大争议^[5,13-15]。

在前人研究基础上,笔者从构造挤压增压机制出发,分析了相同应力条件下,库车坳陷克—依构造带的构造挤压型超压和静水压力对岩石力学特征和物性参数的差异性影响,梳理了构造挤压型超压与其他成因型超压在岩石物性响应方面的不同,改进了构造挤压型超压的判识模版。综合测井和钻井资料,探讨研究区典型井的泥岩综合压实特征,利用改进的超压判识模版在研究区识别出构造挤压型超压的存在。同时,考虑真实地层条件下三维应力对岩石的压实作用,提出了构造挤压型地层压力的定量计算方法,并评估了克—依构造带构造挤压引起的增压幅度及区域差异性。研究认识旨在为库车坳陷前陆褶皱带油气勘探和开发阶段的压力评估提供借鉴。

1 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北缘,北邻南天山,南至塔北隆起,进一步划分为北部单斜带、克拉苏构造带、依奇克里克构造带、乌什凹陷、拜城凹陷、阳霞凹陷和南部斜坡带^[16-17](图 1)。库车坳陷先后主要经历了晚二叠世—早三叠世的前陆盆地、晚三叠世—古近纪的断坳盆地、新近纪—第四纪的再生前陆盆地等构造演化阶段^[18-21],其中,坳陷现今构造形态主要定型于再生前陆盆地演化阶段^[22-24]。

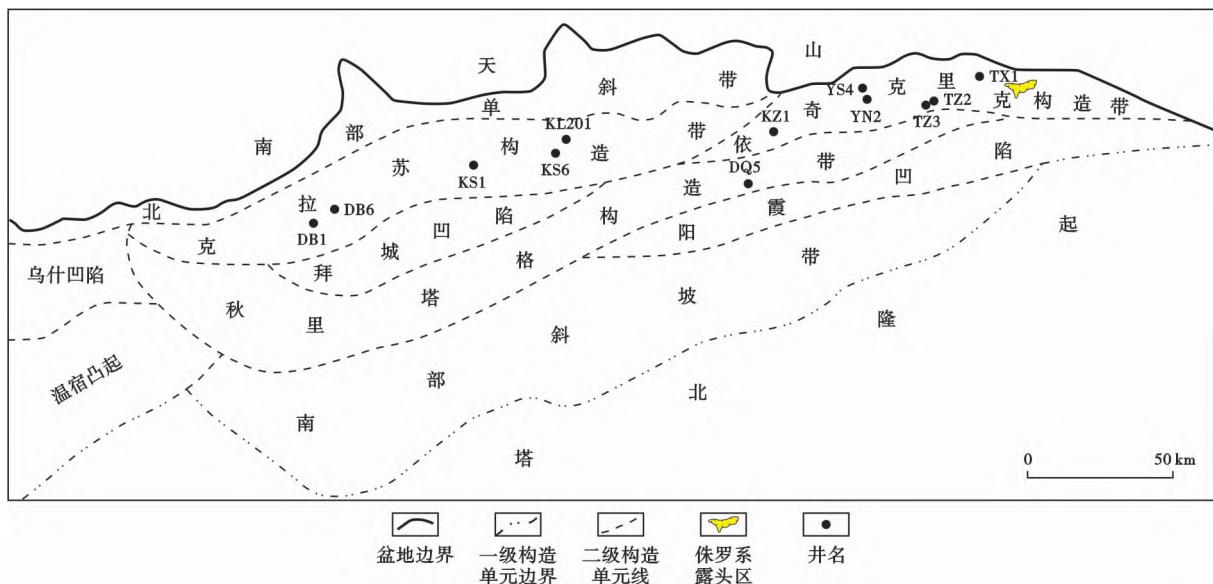


图 1 库车坳陷构造单元划分(据文献[16]修改)

Fig. 1 Tectonic units of Kuqa depression

受新生代南天山强烈隆升的影响,库车坳陷于中新世开始变形。其中,上新世是天山隆起和地壳SN向缩短的加速期,该期形成了若干排近EW走向的褶皱冲断带。平面上,库车坳陷构造演化表现为北部早、南部晚,其中,北部单斜带于中新世吉迪克组沉积期开始发育,中部的克—依构造带开始形成于康村组沉积期,南部的秋里塔格构造带于上新世库车组沉积期开始形成^[25-27],其中,克—依构造带的地层构造变形最为复杂。基于野外露头观察、地震构造解释及岩石应力实测结果^[28-30],分析认为克拉苏构造带的构造挤压强度整体大于依奇克里克构造带,且各构造带内部的地层变形程度存在区域性差异。其中,克拉苏构造带东段的克拉—克深地区的地层变形强度大于西段的博孜—大北地区;自西向东,依奇克里克构造带的地层变形强度逐渐减弱。

中新世早期开始,随着由北向南发生大规模构造

挤压,克—依构造带地层开始发育超压并逐渐增强^[31-33]。研究区主力储层为下白垩统巴什基奇克组和下侏罗统阿合组,实测压力统计结果显示(图2),克拉苏构造带主力储层的压力系数为1.52~2.20,剩余压力为23.9~68.4 MPa,其中,大北地区的压力系数为1.52~1.90,最大剩余压力为51.3 MPa,东部克深—克拉地区的压力系数为1.60~2.20,最大剩余压力为68.4 MPa,反映自东向西克拉苏构造带超压逐渐减小。依奇克里克构造带主力储层的地层压力系数为1.07~1.89,剩余压力为0.6~37.6 MPa,均小于克拉苏构造带,其中,迪北地区(依南—依深井区周围)的压力系数为1.32~1.89,剩余压力为9.7~37.6 MPa,东段的吐格尔明地区的压力系数为1.07~1.76,剩余压力为0.6~35.5 MPa,表明迪北地区的超压强度大于东部的吐格尔明地区。

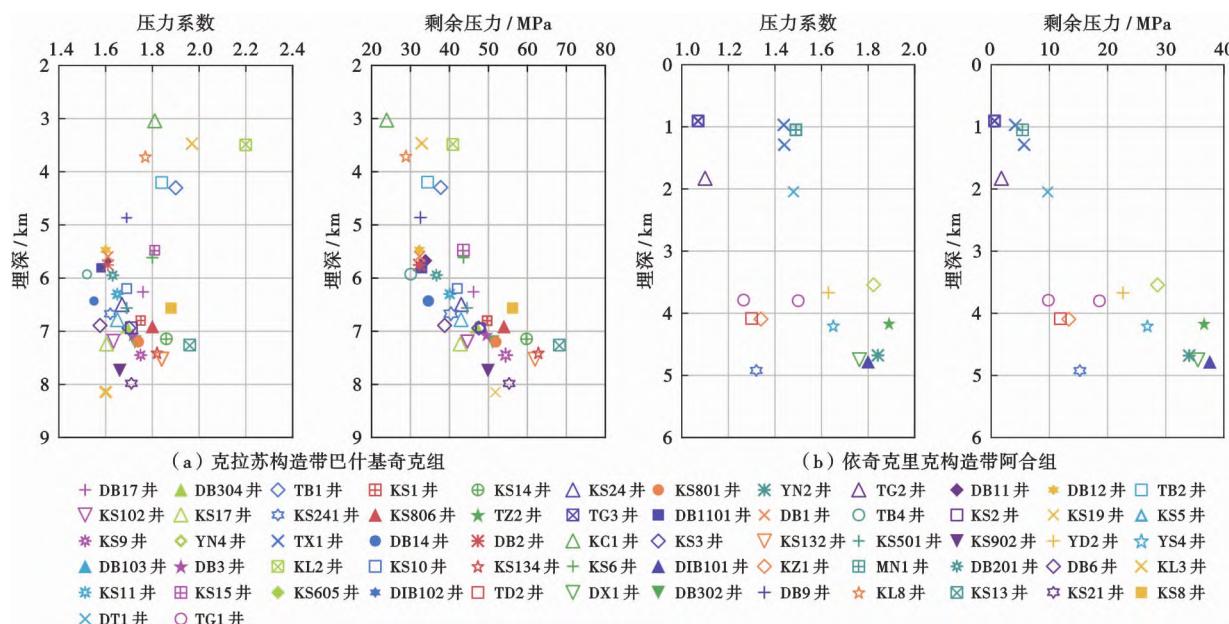


图2 库车坳陷主力储层地层压力系数和剩余压力

Fig. 2 Formation pressures and pressure coefficients of the main reservoirs in Kuqa depression

2 构造挤压型超压的判识

发育不同成因机制超压的地层中,泥岩沉积颗粒之间的有效应力和岩石物理性质(如声波速度 v_s 和岩石密度 ρ_b)表现出显著差异性^[34-35]。因此,泥岩层的垂向有效应力(σ_v')—声波速度交会图、垂向有效应力(σ_v')—岩石密度交会图常被用来判识地层超压的成因类型(图3)。泥质沉积物自沉积、逐渐埋深压实直至保持静水压力阶段,其声波速度和岩石密度随垂向有效应力的增大而有规律地增加, σ_v' — v_s 交会图、 σ_v' — ρ_b 交会图中表现为正常加载特征。

当泥岩层因孔隙降低而引起压实、排水不平衡,进

而产生不均衡压实型超压时,相较于正常压实地层,该型超压地层 σ_v' 的增加速率减小或维持不变,位于 σ_v' — v_s 交会图、 σ_v' — ρ_b 交会图中的正常加载线上。对于发育流体膨胀或传递型超压的地层,因其孔隙流体体积增大引起沉积颗粒之间的 σ_v' 减小,在 σ_v' — v_s 交会图、 σ_v' — ρ_b 交会图中呈卸载特征,随着 σ_v' 减小, v_s 显著降低,但由于泥岩压实具有不可逆特性,其应力卸载过程中 ρ_b 基本不变或仅微弱减小^[36-37]。国内外学者针对不均衡压实成因型、流体膨胀或传递成因型超压的识别开展了大量研究,并取得了良好的应用成效;相较而言,对构造挤压成因型超压的识别及应用的研究不够深入且认识不统一。范昌育等^[38]认

为挤压型超压与垂向不均衡压实型超压的本质相同,因此,发育挤压型超压的地层的 σ_v' 、 v_s 应投点在正常加载线上[图3(a)]。赵靖舟等^[39]认为构造剪切引起部分流体排出时会导致超压带的孔隙度表现为异常低值,因此,发育构造挤压型超压的地层的 σ_v' 不变,而 v_s 和 ρ_b 均增大(图3)。张凤奇等^[40]认为,

构造增压引起 σ_v' 减小而孔隙度不变,因此,在两种交会图中表现为 v_s 减小而 ρ_b 保持不变(图3)。笔者认为,要判断 v_s 和 ρ_b 在构造挤压增压阶段的响应特征,需要在假设岩石所受应力相同(即垂向、横向应力均相等)的情况下,对比 v_s 和 ρ_b 在静水压力和超压状态下的差异性。

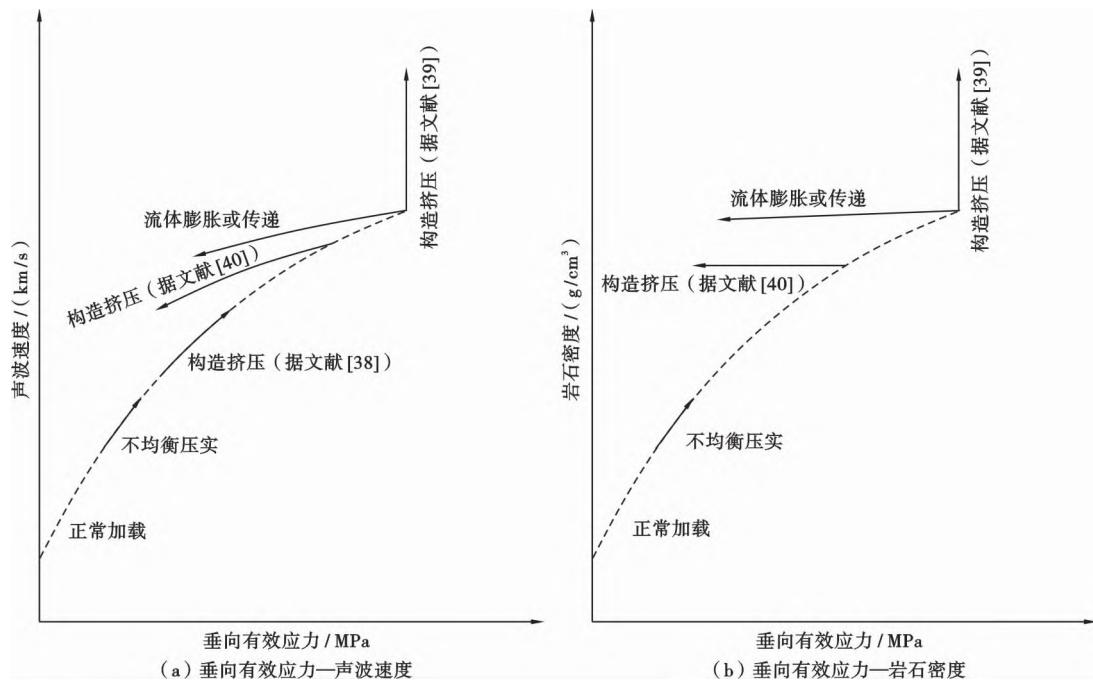


图3 不同超压成因识别图版

Fig. 3 Recognition models for overpressures generated by different mechanisms

2.1 构造挤压型超压识别方法的建立

前人研究表明,沉积物的声波速度主要受地层有效应力控制,有效应力减小,其声波速度随之降低^[41-42];岩石密度测井值与沉积颗粒间的接触面积有关^[41],接触面积越大,岩石密度也越大。在挤压变形过程中,一方面,地层孔隙压力随横向应力的增大而增加,与同深度(应力条件相同)常压泥岩相比,超压泥岩的垂向有效应力偏小,声波速度较低[图4(a)],与图3(a)中的流体膨胀或传递型超压机制具有相似的表现形式;另一方面,相较于应力松弛区,构造挤压强烈地区的浅部常压地层的岩石密度整体上受构造力的横向压实而偏大。正常加载曲线可由浅部常压段泥岩的压实趋势确定。与相同深度(应力条件相同)静水压力泥岩相比,挤压过程中孔隙流体外排滞缓可引起深部超压泥岩的压实受阻,使其沉积颗粒间的接触面积偏小,导致岩石密度测井值偏小,因此,在垂向有效应力—岩石密度判别图版中,构造挤压型超压地层显示出较小的垂向有效应力和岩石密度[图4(b)],利用这一特征可将构造挤压型超压与图3(b)中的流体膨胀或传递型超压有效区分开来。需要强调的是,构造挤压型超压识

别图版(图4)中的常压点是一个理论假设点,在实际压力演化过程中并非实际存在,笔者通过分析常压点和超压点的位置差异,可以明确两种完全不同类型的孔隙压力导致的岩石物理属性响应差异,并依此判识构造挤压型超压的存在,因此,现今的超压点并不是由相同深度的常压点演化而来。

相较于相同埋深(应力条件相同)的常压地层(图4中的正方形),构造挤压型超压地层(图4中的圆点)在判别图版中表现出较小的垂向有效应力、声波速度和岩石密度。即相较于假设的常压点,若超压点的声波速度、岩石密度和垂向有效应力均偏小,则可初步判断其可能为构造挤压型超压。

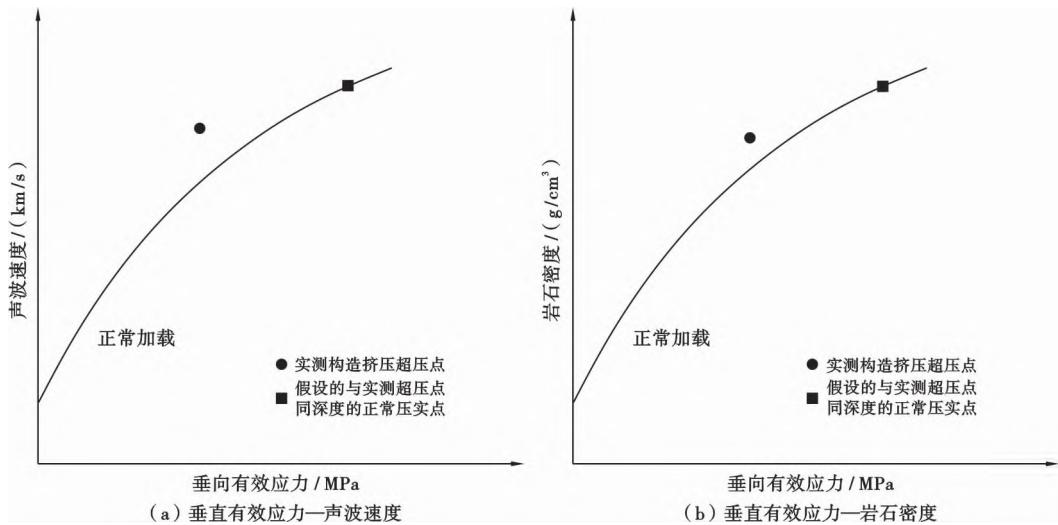
2.2 典型单井泥岩压实特征

单井泥岩压实特征分析是研究超压垂向发育规律及建立超压成因判识图版的基础。声波时差测井和岩石密度测井常被用来绘制单井压实曲线,但其常受井眼及钻井液等测井环境的影响而出现误差^[37]:井眼扩径严重或井壁几何形状不规则,可导致声波时差明显增大、岩石密度值显著降低;钻井液严重侵入、井壁上异常厚度滤饼的形成均可导致测井响应

发生较大偏差。因此,在实际应用过程中,需要对测井环境进行校正。

VSP 地震勘探方法是最为准确的时深关系分析方法,可用以校正声波时差测井可能出现的偏差^[43]。笔者以 DB6 井和 YS4 井为例,开展了声波时差测井的校正。将 VSP 层速度数据转化为时差曲线,声波时差重新采样以保持与 VSP 相同的频率,最后将声波时

差与 VSP 时差数据进行最小二乘二次拟合,从而得到校正后的声波时差曲线(图 5),其与 VSP 时差曲线的相关度较高。在读取泥岩测井数据时,筛除了井眼扩径 5 cm 以上或井径突变处的岩性密度数据,筛除了钻井液严重漏失段及滤饼厚度大于 0.5 mm 处的测井数据;对于因地层裂缝或气侵而发生“周波跳跃”的泥岩段,读取跳跃幅度二分之一处的测井值。



注:相同应力条件下,构造挤压超压泥岩与静水压力泥岩在声波速度、岩性密度以及垂向有效应力等方面具有显著差异。

图 4 构造挤压型超压识别图版

Fig. 4 Recognition models for overpressures generated by tectonic compression

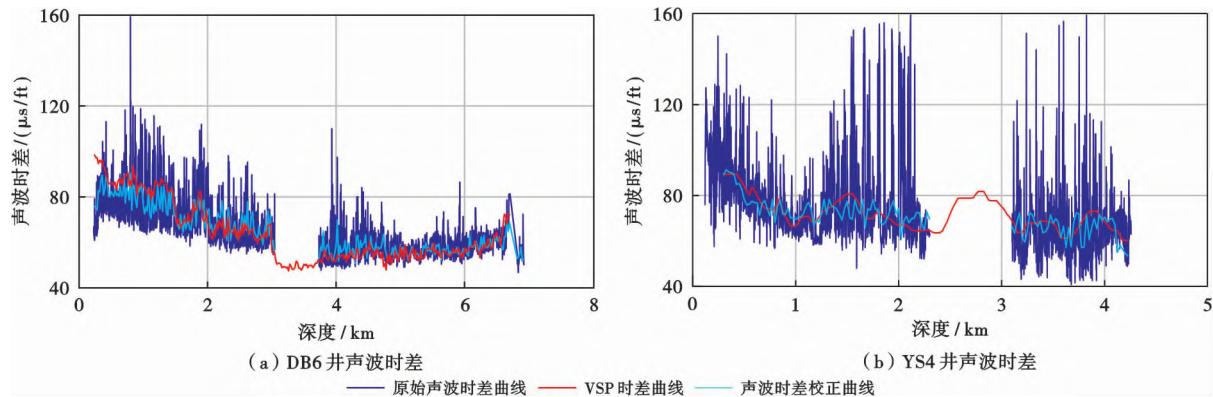


图 5 VSP 数据校正测井声波时差

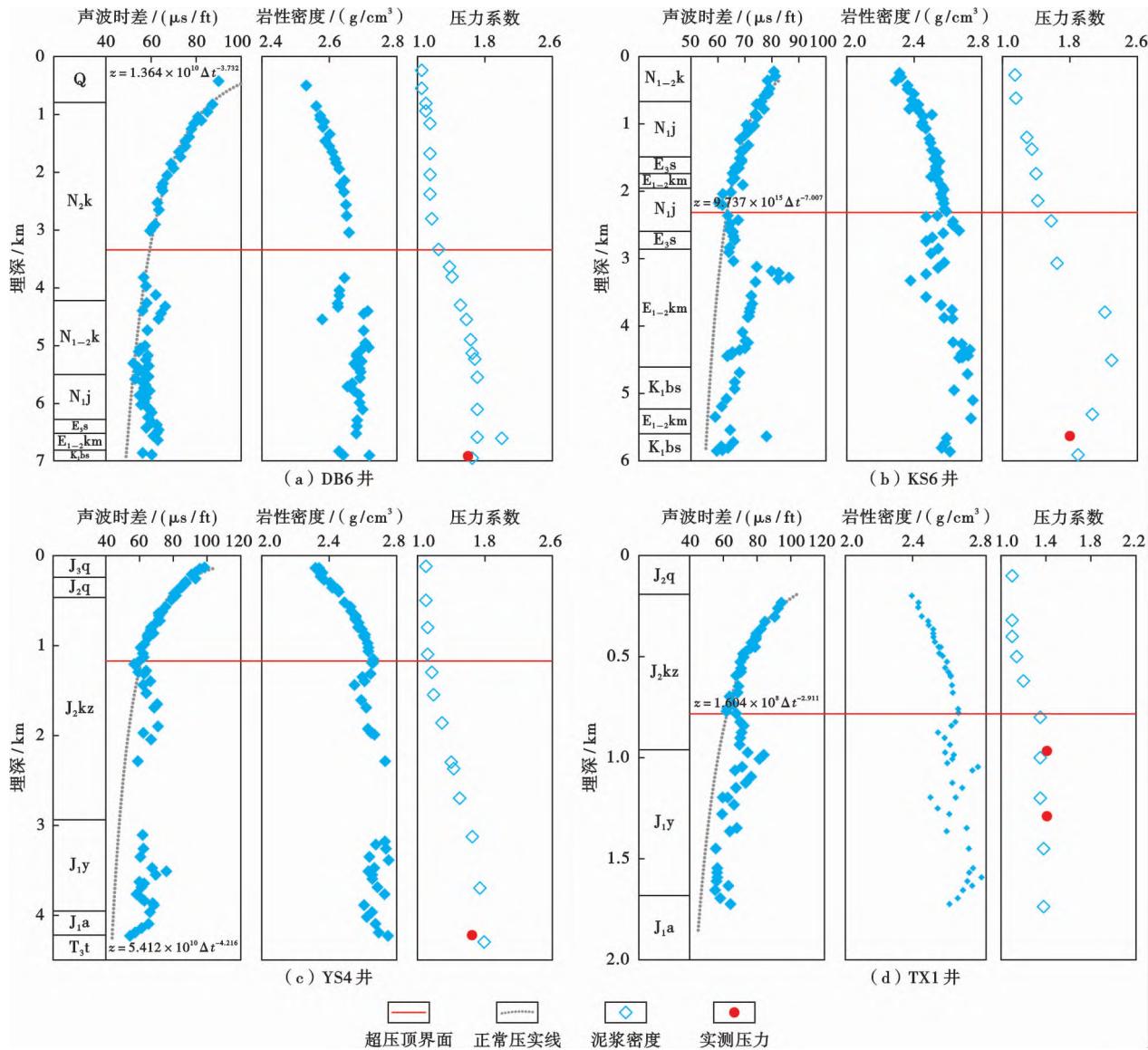
Fig. 5 Acoustic logging corrected by the VSP

选取研究区声波时差和岩性密度测井资料较为齐全的单井(克拉苏构造带的 DB6 井、KS6 井和依奇克里克构造带的 YS4 井、TX1 井),在测井环境校正的基础上,综合岩屑录井、自然伽马、电阻率和声波时差测井资料识别泥岩段,对于厚度相对较大、含砂量较低的泥岩层,按照一定的间距读取声波时差和岩性密度值,编制了单井泥岩压实趋势图(图 6)。综合单井地层压

力发育特征和泥岩压实曲线变化趋势,识别正常压实段与异常压实段。DB6 井和 KS6 井的超压顶界面深度分别为 3308 m 和 2361 m,界面对应层位分别为上新统库车组和断层下盘的中新统吉迪克组。泥浆密度和实测地层压力数据分析表明,KS6 井超压幅度整体大于 DB6 井。YS4 井和 TX1 井的超压顶界面埋深较浅,分别为 1295 m 和 771 m,界面对应层位

均为中侏罗统克孜勒努尔组。在超压顶界面以上,随着深度增加,4 口井的泥岩声波时差值总体均规律性减小,而岩性密度值则稳定增大,表现为正常压实

趋势;在超压顶界面以下,泥岩声波时差值大于同深度的正常压实地层,而岩性密度值小于正常压实地层,均指示异常压实。



注:Q—第四系;N₂k—库车组;N₁₋₂k—康村组;N₁j—吉迪克组;E₃s—苏维依组;E₁₋₂km—库姆格列木群;K₁bs—巴什基奇克组;J₃q—齐古组;J₂q—恰克马克组;J₂kz—克孜勒努尔组;J₁y—阳霞组;J₁a—阿合组;T₃t—塔里奇克组。

图 6 库车坳陷单井泥岩压实曲线及地层压力分布

Fig. 6 Depth profiles of mudstone compaction and formation pressures in Kuqa depression

2.3 构造挤压型超压的识别

(1) 垂向有效应力

依据 Terzaghi 有效应力原理可计算得到垂向有效应力 σ'_v ^[44], σ'_v 、垂向应力 σ_v 和地层压力 p 三者之间的关系可表示为:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (1)$$

其中, σ_v 近似等于上覆地层载荷^[45]:

$$\sigma_v = 10^{-3} \int_0^z \rho_b g dz \quad (2)$$

鉴于研究区开展全井段岩性密度测井的探井较

少,且不同构造部位的地层密度的纵向分布规律存在一定差异,导致不同构造单元的垂向应力与埋深的相关性不同。笔者选择研究区不同构造位置(图 1)且岩性密度测井数据较为齐全的 7 口井,利用式(2)分别建立了不同构造带的垂向应力与深度的关系式(图 7)。

(2) 构造挤压型超压的识别

基于研究区典型井泥岩压实的分析结果,编制了单井垂向有效应力—声波速度、垂向有效应力—岩性密度交会图(图 8、图 9)。利用式(1)和式(2)计算得到常压点和超压泥岩点的垂向有效应力,其中超压泥岩

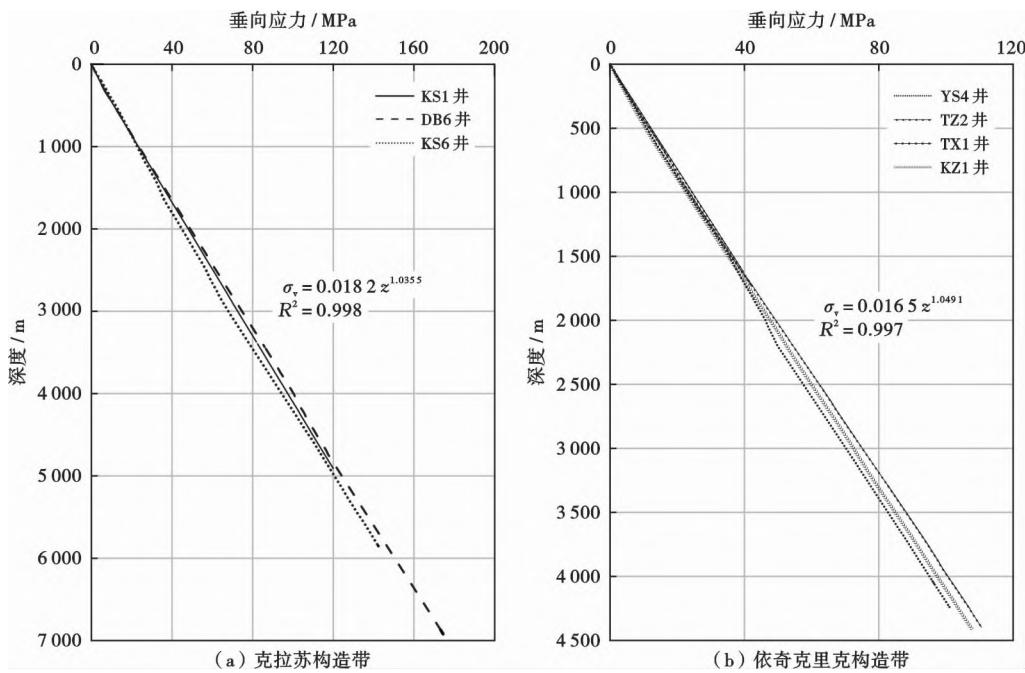


图7 库车坳陷垂向应力随深度变化关系

Fig. 7 Depth profiles of vertical stress in Kuqa depression

的压力值取自于相邻砂岩的实测压力,由于DB6井、KS6井和YS4井的地层压力实测数据较少,笔者分别选取了位于同一断层带上的相邻井的实测数据作为补充,邻井与目标井地层的构造、沉积演化背景极为相似,其地层压力可近似代替目标井相同埋深的压力值。其中,克拉苏构造带的DB6井、DB103井、DB201井实测压力点取自于下白垩统巴什基奇克组,地层压力值分别为106.4 MPa、90.8 MPa、95.1 MPa,对应剩余压力值分别为38.9 MPa、33.9 MPa、36.8 MPa;KS6井和KS605井实测压力点位于巴什基奇克组,地层压力值分别为98.8 MPa和95.2 MPa,剩余压力值分别为43.8 MPa和39.7 MPa。依奇克里克构造带的YS4井和YN4井的实测压力点位于下侏罗统阿合组,地层压力值分别为68.1 MPa和63.3 MPa,对应剩余压力值分别为26.8 MPa和28.6 MPa;TX1井的2个实测压力点位于下侏罗统阳霞组,地层压力值分别为13.7 MPa和18.3 MPa,剩余压力值分别为4.1 MPa和5.7 MPa。对邻近探井超压点的测井数据进行VSP和测井环境校正,以表征目标井的超压点的声波速度和岩性密度。假设的与超压点同深度的正常压实点在埋藏过程中始终保持静水压力,因此,依据常压泥岩的正常压实加载趋势,利用正常加载线拟合公式计算其声波速度和岩石密度(图8、图9)。

随着垂向有效应力增大,泥岩声波速度和岩石密度规律性增大(图8、图9)。当地层受挤压作用而产生超压时,地层正常压实受阻,超压点明显偏离了正常加

载线。与假设的相同深度的静水压力点相比,超压点的垂向有效应力偏小,声波速度较小,岩石密度明显偏小,结合超压成因类型判别图版(图4),可以确定研究区发育构造挤压型超压。分析表明,在相同应力条件下,实测超压点与相同深度的静水压力点在岩石测井响应与有效应力等方面存在明显差异。自喜马拉雅晚期以来,受南天山向南强烈构造挤压的影响,克拉苏—依奇克里克构造带的地层发生强烈的褶皱变形^[22,46-47],伴随着强烈的压实作用,地层超压快速增大^[48-49],而广泛分布的古近系巨厚层膏泥岩可作为良好的区域盖层^[16,50],使超压系统在大部分地区得以较好保存。

3 构造挤压型超压计算

强烈构造运动背景下,在侧向挤压和持续垂向埋藏压实的共同作用下,地层孔渗性快速变差而产生超压^[3,51]。等效深度法常用来预测与垂向机械压实作用相关的地层压力,该方法假设地层压实完全受控于垂向有效应力且垂向应力为最大主应力,获取垂向应力的便捷性使得该方法广泛应用于拉张型盆地的单井压力预测^[52]。等效深度法计算泥岩异常压力示意图(图10)中的超压观察点A,其压实施历程可假设为:①沉积物在地表沉积后,孔隙度最初随埋深增加而规律性降低,地层压力保持静水压力增长;②当地层孔渗性降低到某一临界值(图10中点B)后,沉积物排水受到阻碍并完全停止,开始形成地层超压,B点对应埋藏深度称为超

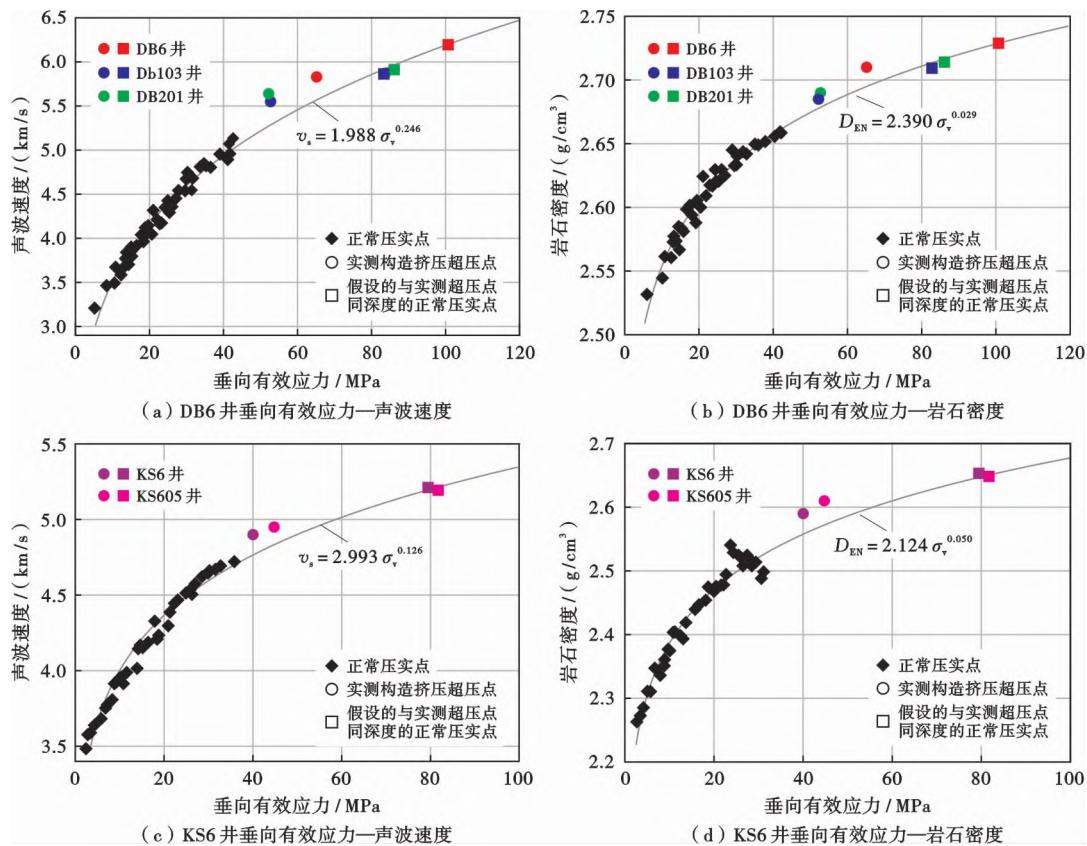


图 8 克拉苏构造带构造挤压型超压识别

Fig. 8 Identification of overpressures generated by tectonic compression in Kelasu structural belt

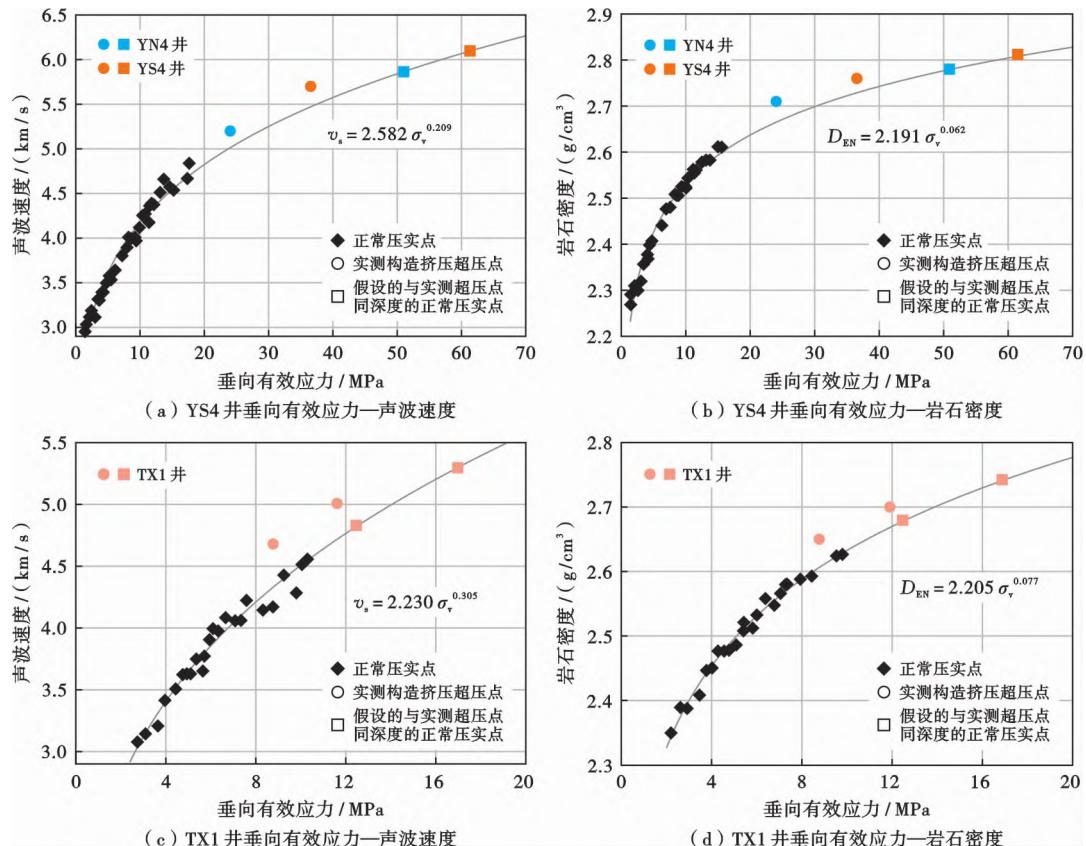
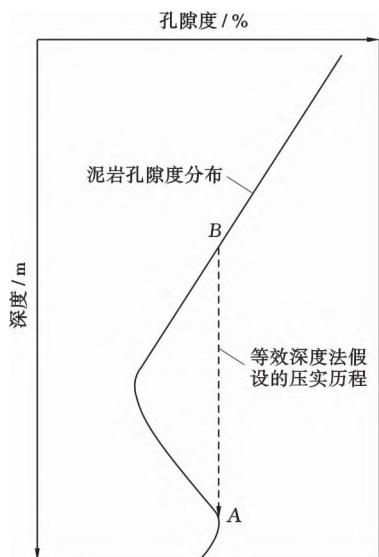


图 9 依奇克里克构造带构造挤压型超压识别

Fig. 9 Identification of overpressures generated by tectonic compression in Yiqikeli-like structural belt

压观察点 A 形成超压的等效深度;③随着埋藏深度继续增大,增加的上覆载荷将全部由孔隙流体承担,垂向有效应力将不再增加,因此,孔隙度不再随深度增加而发生变化^[53-54]。



注:A—异常压实段的超压点;B—A 的等效深度点。

图 10 等效深度法计算泥岩异常压力示意(据文献[54]修改)

Fig. 10 Schematic diagram of abnormal high pressure calculation using equivalent depth method

基于上述压实历程分析,超压观察点 A 的地层压力(p_A)为^[53]:

$$p_A = p_B + \sigma_{v,A} - \sigma_{v,B} \quad (3)$$

由此可见,等效深度法计算地层压力时,对地下应力状态进行了一维简化。而实际情况中,地层压实是三维应力共同作用的结果,尤其对于挤压型盆地,其在剧烈褶皱、逆冲变形期所经历的最大主应力方向往往为水平而非垂直,因此,最大水平主应力对沉积物的压实作用不可忽略,传统的等效深度法在估算构造挤压背景下的地层压力时会产生较大的误差甚至错误^[7,55-56]。由孔隙弹性理论可知^[41,57],岩石孔隙度的降低实际受控于平均应力而非垂向应力,因此,笔者从地层三维压实的角度对传统的等效深度法进行改进,以适用于研究区构造挤压背景下地层压力的预测,并评估由构造挤压引起的超压增量。

3.1 考虑三维压实地层压力计算方法的建立

三维应力状态下地层压实阶段,岩石孔隙度变化由平均有效应力 σ_m' 控制^[52,57-58]:

$$\phi = \phi_0 e^{-\sigma_m'} \quad (4)$$

$$\sigma_m' = \sigma_m - p \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_v + \sigma_H + \sigma_h) \quad (6)$$

构造力学研究表明,地壳中的岩体在垂直方向的变形是自由的,而沿水平方向的变形是不自由的^[59]。因此,对于构造挤压环境中的岩体,其垂向应力 σ_v 等于上覆岩层重力[式(2)],最大水平主应力(平行于构造力的水平应力, σ_H)由两部分组成[式(7)]:一部分为上覆岩层的重力在水平方向的派生应力,另一部分为近于水平的挤压构造力(S_t)在该方向引起的挤压应力(挤压应力强度等于构造力)。

$$\sigma_H = \sigma_v \frac{\nu}{1-\nu} + S_t \quad (7)$$

由于水平方向变形的不自由性,构造力在与其作用方向正交的水平方向上也会引起附加应力,因此,最小水平主应力(垂直于构造力的水平应力, σ_h)为上覆岩层重力在该方向的派生应力与 S_t 在该方向引起的附加应力之和^[59]:

$$\sigma_h = \sigma_v \frac{\nu}{1-\nu} + \nu S_t \quad (8)$$

作为一种外力, S_t 由区域构造运动产生,同一口井的不同深度段所受的挤压构造力可认为是相等的。

岩石体积压实是三维有效应力综合作用的结果,并非仅由垂向有效应力决定^[57-58]。研究区地层在库车组沉积末期达到最大埋深,之后受喜马拉雅晚期以来南天山活动的影响,克—依构造带同时经历剧烈的挤压与抬升剥蚀,该过程中虽然垂向应力在减小,但水平应力随构造挤压的进行而快速增大。Zeng 等^[49]基于实际构造演化过程和岩石力学性质,利用有限元方法定量模拟了在该构造演化阶段库车坳陷最大水平主应力和平均应力的演化过程。结果显示,自最大埋深期(2.6 Ma)至今,虽然地层发生剥蚀,但地层平均应力随水平主应力的增大而增大,表明该阶段水平应力的增加量大于上覆地层剥蚀导致的垂向应力减小量,因此,现今的地层平均应力和压实程度均达到最大。结合孔隙弹性理论,图 10 中孔隙度相等的 A、B 两个观察点的平均有效应力相同,即 $\sigma'_{m,A} = \sigma'_{m,B}$,则 A 点的孔隙压力可表示为:

$$p_A = \sigma_{m,A} - \sigma'_{m,A} = \sigma_{m,A} - \sigma'_{m,B} \quad (9)$$

利用正常压实线公式(图 6),结合 A 点声波速度,可计算得到等效深度点 B 的埋深,进而得到该埋深的静水压力(p_B),其平均应力($\sigma_{m,B}$)由式(6)得到,则垂向有效应力($\sigma'_{m,B}$)为:

$$\sigma'_{m,B} = \sigma_{m,B} - p_B \quad (10)$$

将式(10)带入式(9)可得到超压观察点 A 的孔隙压力:

$$p_A = \sigma_{m,A} - (\sigma_{m,B} - p_B) = p_B + \sigma_{m,A} - \sigma_{m,B} \quad (11)$$

在传统等效深度法的基础上改进得到的平均应

力法,综合考虑了真实地层应力条件,计算得到三维压实作用产生的地层孔隙压力。为评估构造挤压作用引起的超压量,分别计算挤压构造力 $S_t =$ 实测构造力和 $S_t = 0 \text{ MPa}$ 两种条件下的孔隙压力,这两种孔隙压力的差值可解释为构造挤压对地层超压的增量。

3.2 构造挤压型压力评估

应用平均应力法计算研究区 DB6 井等 4 口典型井在三维压实作用下产生的地层压力,并评估构造挤压引起的增压量。计算所需的岩石泊松比依据实际地层的岩性和岩石力学实验结果^[60]进行选取(表 1)。

基于前人对相邻探井岩心的 σ_H 的研究工作,利用垂向应力计算公式(图 7)和式(7)反算得到研究区 DB6 井、KS6 井、YS4 井和 TX1 井的 S_t (表 2)。前人利用构造恢复法和数值模拟法研究认为^[5,49,61-62],自喜马拉雅晚期(2.6 Ma)至今,研究区地层的构造挤压逐渐增强, σ_H 逐渐增大并达到最大值,因此,可将岩心测试 σ_H 值近似等于现今最大水平主应力,相应地,由其计算得到的 S_t 可作为现今挤压构造力。计算结果表明,克拉苏构造带的构造挤压强度整体大于依奇克里克构造带,其中,克深地区的挤压强度大于大北地区,迪北地区的挤压强度大于吐西地区,计算结果与前人关于研究区构造变形空间差异的认识相一致^[18,28,30]。同时,过井地震解释剖面显示的不同地区的地层变形特征也可反映研究区构造强度的空间变化规律(图 11)。

表 1 库车坳陷岩石泊松比(据文献[60]修改)

Table 1 Poisson's ratio of rocks in Kuqa depression

地层	泊松比
第四系	0.32
库车组	0.26
康村组	0.25
吉迪克组	0.42
苏维依组	0.30
库姆格列木组	0.35
白垩系	0.23
侏罗系	0.25

表 2 不同井挤压构造力计算结果

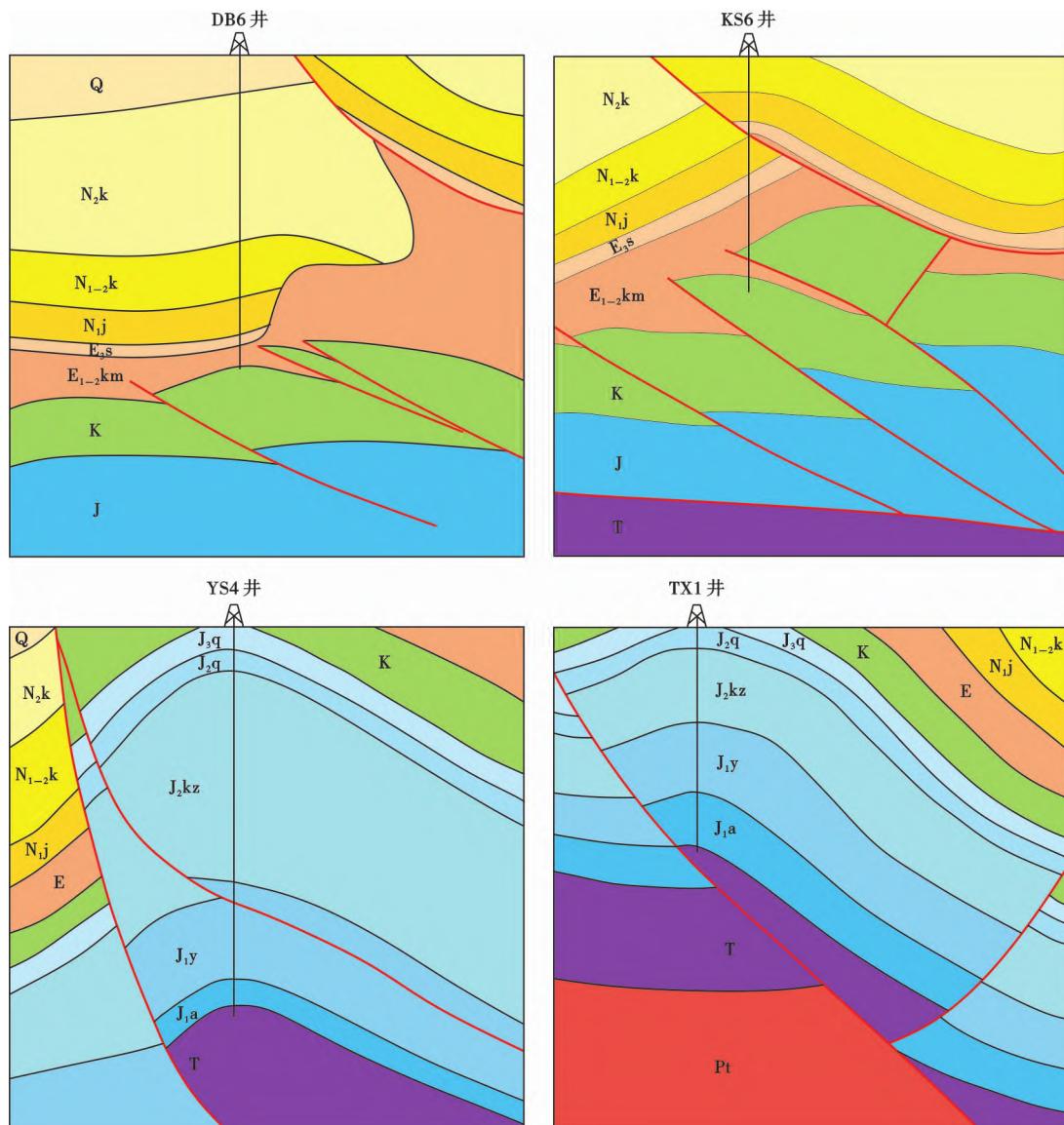
Table 2 Calculated values of tectonic compressional stress for different wells

井名	目标井挤压构造力		实测最大水平主应力			数据来源
	挤压构造力/MPa	邻井	埋深/m	最大水平主应力/MPa	地层	
DB6	58.2	DB1	5 573.0	118.3	巴什基奇克组	文献[30]
KS6	71.5	KL201	3 988.1	105.3	巴什基奇克组	文献[63]
YS4	55.1	YN2	4 702.2	105.4	阳霞组	文献[30]
TX1	36.8	TZ3	2 458.2	62.3	舒善河组	文献[32]

单井压力计算结果表明,研究区上部的正常压实段的地层压力保持静水压力增长趋势,当埋深进入异常压实段后,地层压力以平均应力梯度增长,形成超压环境(图 12)。构造挤压作用在不同构造区引起的流体增压量具有明显差异性(表 2、表 3),其中,克拉苏构造带的 KS6 井的挤压构造力为 71.5 MPa,埋深 5 613.9~5 658.5 m 段的实测总剩余压力为 39.7~43.8 MPa,相同深度的挤压增压量为 17.7~18.9 MPa,占实测总剩余压力的 43.2%~44.4%,占挤压构造力的 24.7%~26.4%;DB6 井的挤压构造力为 58.2 MPa,埋深 5 797.0~6 889.3 m 段的实测总剩余压力为 34.0~38.9 MPa,相同深度的挤压增压量为 11.6~15.3 MPa,占实测总剩余压力的 34.1%~39.3%,占挤压构造力的 19.9%~26.3%。依奇克里克构造带的 YS4 井的挤压构造力为 55.1 MPa,埋深 3 544.3~4 210.0 m 段的实测总剩余压力为 26.8~28.6 MPa,相同深度的挤压增压量为 9.3~9.4 MPa,与实测总剩余压力的比值为 32.8%~34.7%,与挤压构造力的比值为 16.9%~17.1%;TX1 井的挤压构造力为 36.8 MPa,埋深 970.7~1 289.6 m 段的实测总剩余压力为 4.1~5.7 MPa,相同深度的挤压增压量较小,为 0.9~1.2 MPa,与实测总剩余压力的比值为 21.1%~22.0%,与挤压构造力的比值仅为 2.4%~3.3%。

研究区典型井地层压力分析结果表明,地层增压量在很大程度上取决于构造强度:构造力越大,其引起的地层增压量越大,在总剩余压力中的占比也就越高。克深、大北以及迪北地区的构造挤压增压幅度均超过 30%,其中,克深地区最大幅度接近 45%,表明构造挤压是这些地区形成地层超压的主要驱动机制之一。相较而言,TX1 井地层超压发育程度较弱,构造应力的增压效率较低,这可能是由于该井区靠近东侧的侏罗系剥蚀露头区,地层埋深浅、封闭性差,不利于超压条件的保存。

值得一提的是,利用等效深度法估算的异常压实段的地层压力明显大于平均应力法计算的结果,甚至大于实测地层压力和钻井泥浆压力(图 12),这从侧面证实等效深度法不能用于构造挤压背景下的地层压力的计算。对比等效深度法与平均应力法的计算原理发现,研究区地层垂向应力梯度大于平均应力梯度(图 12),造成观察点 A 与其等效深度点 B 之间的垂向应力之差($\sigma_{v,A} - \sigma_{v,B}$)大于二者平均应力的差值($\sigma_{m,A} - \sigma_{m,B}$),导致等效深度法计算的地层压力被“夸大”。相较而言,平均应力法充分考虑了地层内部真实的应力状态,以岩石压实变形受控于三维应力综合作用的理论认识,同时考虑了地壳内部岩体变形在水平方向受限、在垂直方向自由的特点,因此,该方法更适用于构造挤压型盆地地层压力的计算。



注:Q—第四系;N₂k—库车组;N₁₋₂k—康村组;N₁j—吉迪克组;E₃s—苏维依组;E₁₋₂km—库姆格列木群;K—白垩系;J₃q—齐古组;J₂q—恰克马克组;J₂kz—克孜勒努尔组;J₁y—阳霞组;J₁a—阿合组;T—三叠系;Pt—元古界。

图 11 过井地震解释剖面模式

Fig. 11 Schematic diagram of cross well seismic interpretation section

表 3 典型井构造挤压增压量计算结果

Table 3 Overpressures by tectonic compression for typical wells

井名	实测压力埋深/ m	构造挤压增压/ MPa	实测总剩余压力/ MPa	构造挤压增压与实测 总剩余压力之比/%	构造挤压增压与 构造力之比/%
KS6	5 613. 9	18. 9	43. 8	43. 2	26. 4
	5 658. 5	17. 7	39. 7①	44. 4	24. 7
DB6	6 889. 3	15. 3	38. 9	39. 3	26. 3
	5 797. 0	11. 6	34. 0②	34. 1	19. 9
YS4	5 944. 7	13. 2	36. 8③	35. 8	22. 7
	4 210. 0	9. 3	26. 8	34. 7	16. 9
TX1	3 544. 3	9. 4	28. 6④	32. 8	17. 1
	970. 7	0. 9	4. 1	22. 0	2. 4
	1 289. 6	1. 2	5. 7	21. 1	3. 3

注:①—④实测数据分别取自于邻井 KS605 井、DB103 井、DB201 井和 YN4 井的地层压力。

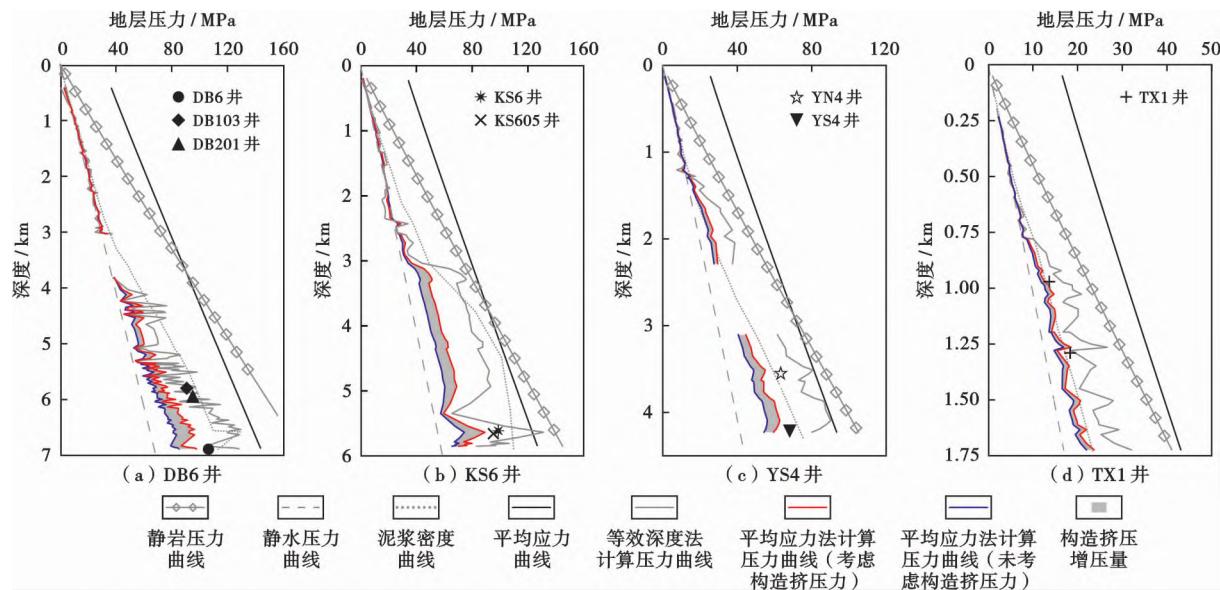


图 12 平均应力法和等效深度法估算地层压力对比

Fig. 12 Comparison of pore pressures estimated by mean stress method and equivalent depth method

4 结 论

(1) 综合考虑地层压实规律和库车坳陷克—依构造带的构造与沉积特征,建立了声波速度—垂向有效应力、岩石密度—垂向有效应力两种构造挤压型超压的判识图版。与相同深度正常压实的泥岩相比,构造挤压型超压一方面使泥岩具有较小的地层有效应力、声波速度,另一方面减小了沉积颗粒间的接触面积,导致岩性密度测井值偏低。综合有效应力、声波速度、岩性密度等参数的差异性,可将构造挤压型超压与流体膨胀或传递等卸载型超压明显区分开来。

(2) 地层压实是三维应力共同作用的结果,构造挤压背景下,地层压实受平均有效应力控制。利用改进的平均应力法分别计算有、无构造挤压应力条件下的地层压力,二者的差值即为构造挤压作用引起的地层压力增加量。随着构造挤压强度的增大,其对地层现今总剩余压力的贡献率也随之增大。构造挤压是库车坳陷克—依构造带超压地层的主要成因,构造挤压对克拉苏构造带 KS6 井、DB6 井的超压贡献率分别为 43.2%~44.4%、34.1%~39.3%,对依奇克里克构造带 YS4 井、TX1 井的超压贡献率分别为 32.8%~34.7%、21.1%~22.0%。

(3) 等效深度法计算的地层压力偏大甚至明显大于实钻地层压力,相较而言,平均应力法充分考虑了地层真实三维应力状态以及地层变形在不同方向上的差异性,更适用于构造挤压型地层超压的预测。

符号注释: z —埋深, m; Δt —声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; σ_v' —垂向有效应力, MPa; σ_v —垂向应力, MPa; σ_{v_A} 、

σ_{v_B} —A、B 两点的垂向应力, MPa; p —地层压力, MPa; p_A 、 p_B —A、B 两点的地层压力, p_B 值等于静水压力, MPa; ρ_0 —岩石密度, g/cm^3 ; g —重力加速度, m/s^2 ; v_s —声波速度, km/s ; D_{EN} —测井密度, g/cm^3 ; ϕ —孔隙度; ϕ_0 —初始孔隙度; b —压实系数; σ_H —最大水平主应力, MPa; σ_h —最小水平主应力, MPa; ν —岩石泊松比; S_t —挤压构造力, MPa; σ_m —平均应力, MPa; σ_{m_A} 、 σ_{m_B} —A、B 点的平均应力, MPa; σ_m' —平均有效应力, MPa; σ'_{m_A} 、 σ'_{m_B} —A、B 点的平均有效应力, MPa。

参 考 文 献

- [1] OSBORNE M J, SWARBRICK R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1023-1041.
- [2] SWARBRICK R E, OSBORNE M J, YARDLEY G S. Comparison of overpressure magnitude resulting from the main generating mechanisms [J]. AAPG Memoir, 2002, 76: 1-12.
- [3] 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.
- [4] LUO Xiaorong. Quantitative analysis on overpressuring mechanism resulted from tectonic stress [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(6): 1086-1093.
- [5] 曾联波, 刘本明. 塔里木盆地库车前陆逆冲带异常高压成因及其对油气成藏的影响 [J]. 自然科学进展, 2005, 15(12): 1485-1491. ZENG Lianbo, LIU Benming. Origin of abnormal high pressure and its influence on oil and gas accumulation in Kuqa foreland thrust belt of Tarim Basin [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(12): 1485-1491.
- [6] BERTHELON J, BRÜCH A, COLOMBO D, et al. Impact of tectonic shortening on fluid overpressure in petroleum system mod-

- elling: insights from the Neuquén Basin, Argentina[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 127: 104933.
- [6] BURGREEN-CHAN B, MEISLING K E, GRAHAM S. Basin and petroleum system modelling of the East Coast Basin, New Zealand: a test of overpressure scenarios in a convergent margin [J]. *Basin Research*, 2016, 28(4): 536-567.
- [7] OBRADORS-PRATS J, ROUAINIA M, APLIN A C, et al. Assessing the implications of tectonic compaction on pore pressure using a coupled geomechanical approach[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 31-43.
- [8] 高志勇, 崔京钢, 冯佳睿, 等. 埋藏压实—侧向挤压过程对库车坳陷深层储层物理性质的改造机理[J]. *现代地质*, 2017, 31(2): 302-314.
- GAO Zhiyong, CUI Jinggang, FENG Jiarui, et al. Modification mechanism of physical properties of deeply-buried sandstone reservoir due to the burial compaction and lateral extrusion in Kuqa depression[J]. *Geoscience*, 2017, 31(2): 302-314.
- [9] 曾联波, 周天伟, 吕修祥. 构造挤压对库车坳陷异常地层压力的影响[J]. *地质论评*, 2004, 50(5): 471-475.
- ZENG Lianbo, ZHOU Tianwei, LÜ Xiuxiang. Influence of tectonic compression on the abnormal formation pressure in the Kuqa depression[J]. *Geological Review*, 2004, 50(5): 471-475.
- [10] 张晓强. 库车坳陷流体动力场模拟及分析[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- ZHANG Xiaoqiang. Simulation and analysis of hydrodynamic field in Kuqa depression[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [11] 文晨曦. 库车坳陷不同成因超压的识别与定量评价[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- WEN Chenxi. Identification and quantitative evaluation of overpressure of different origin in Kuqa depression [D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [12] 张凤奇, 王震亮, 宋岩, 等. 库车坳陷构造挤压增压定量评价新方法[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2011, 35(4): 1-7.
- ZHANG Fengqi, WANG Zhenliang, SONG Yan, et al. New method of quantitative evaluation on pressurization resulted from tectonic compression in Kuqa depression[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2011, 35(4): 1-7.
- [13] 周兴熙. 塔里木盆地库车油气系统中、新生界的流体压力结构和油气成藏机制[J]. *地学前缘*, 2001, 8(4): 351-361.
- ZHOU Xingxi. The Mesozoic-Cenozoic fluid pressure structure and reservoir-forming machine process in the Kuqa petroleum system in the Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(4): 351-361.
- [14] 王震亮, 张立宽, 施立志, 等. 塔里木盆地克拉2气田异常高压的成因分析及其定量评价[J]. *地质论评*, 2005, 51(1): 55-63.
- WANG Zhenliang, ZHANG Likuan, SHI Lizhi, et al. Genesis analysis and quantitative evaluation on abnormal high fluid pressure in the Kela-2 gas field, Kuqa depression, Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 2005, 51(1): 55-63.
- [15] 石万忠, 陈红汉, 何生. 库车坳陷构造挤压增压的定量评价及超压成因分析[J]. *石油学报*, 2007, 28(6): 59-65.
- SHI Wanzhong, CHEN Honghan, HE Sheng. Quantitative evaluation on contribution of structural compression to overpressure and analysis on origin of overpressure in Kuqa depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(6): 59-65.
- [16] JIA Chengzao, LI Qiming. Petroleum geology of Kela-2, the most productive gas field in China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(4/5): 335-343.
- [17] 王珂, 杨海军, 李勇, 等. 塔里木盆地库车坳陷北部构造带地质特征与勘探潜力[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 885-905.
- WANG Ke, YANG Haijun, LI Yong, et al. Geological characteristics and exploration potential of the northern tectonic belt of Kuqa depression in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 885-905.
- [18] 卢华富, 贾东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间[J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 215-221.
- LU Huafu, JIA Dong, CHEN Chuming, et al. Nature and timing of the Kuqa Cenozoic structures[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(4): 215-221.
- [19] 魏国齐, 贾承造, 施央申, 等. 塔里木新生代复合再生前陆盆地构造特征与油气[J]. *地质学报*, 2000, 74(2): 123-133.
- WEI Guoqi, JIA Chengzao, SHI Yangshen, et al. Tectonic characteristics and petroleum prospects of Cenozoic compound rejuvenated foreland basins in Tarim[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(2): 123-133.
- [20] 何登发, 李德生, 何金有, 等. 塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷油气地质特征类比及勘探启示[J]. *石油学报*, 2013, 34(2): 201-218.
- HE Dengfa, LI Desheng, HE Jinyou, et al. Comparison in petroleum geology between Kuqa depression and Southwest depression in Tarim Basin and its exploration significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(2): 201-218.
- [21] 史超群, 许安明, 魏红兴, 等. 构造挤压对碎屑岩储层破坏程度的定量表征——以库车坳陷依奇克里克构造带侏罗系阿合组为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(2): 205-215.
- SHI Chaoqun, XU Anming, WEI Hongxing, et al. Quantitative characterization on the clastic reservoir destruction by tectonic compression: a case study of the Jurassic Ahe Formation in Yiqikelike structural belt, Kuqa depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(2): 205-215.
- [22] 张仲培, 林伟, 王清晨. 库车坳陷克拉苏—依奇克里克构造带的构造演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(4): 327-336.
- ZHANG Zhongpei, LIN Wei, WANG Qingchen. Progressive structural evolution of Kelasu-Yiqikelike structural belt in Kuqa depression [J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 2003, 27(4): 327-336.
- [23] HUANG Baochun, PIPER J D A, PENG Shoutao, et al. Magnetostratigraphic study of the Kuche depression, Tarim Basin, and Cenozoic uplift of the Tian Shan range, western China[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2006, 251(3/4): 346-364.
- [24] 杨克基. 库车坳陷中段盐构造差异变形及其控制因素研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
- YANG Keji. Differential structural deformations and controlling factors of salt tectonic in the Middle segment of the Kuqa depression[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [25] 王清晨, 张仲培, 林伟. 库车盆地—天山边界的晚第三纪断层活动性质与应力状态[J]. *科学通报*, 2003, 48(24): 2553-2559.
- WANG Qingchen, ZHANG Zhongpei, LIN Wei. Tertiary fault active features and stress state in the boundary of Kuqa Basin and Tianshan

- [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(24): 2553-2559.
- [26] 张仲培, 王清晨. 库车坳陷节理和剪切破裂发育特征及其对区域应力场转换的指示[J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(S1): 63-73.
- ZHANG Zhongpei, WANG Qingchen. Development of joints and shear fractures in the Kuqa depression and its implication to regional stress field switching[J]. Science China Earth Sciences, 2004, 34(S2): 74-85.
- [27] QIU Nansheng, CHANG Jian, LI Jiawei, et al. New evidence on the Neogene uplift of South Tianshan: constraints from the (U-Th)/He and AFT ages of borehole samples of the Tarim Basin and implications for hydrocarbon generation[J]. International Journal of Earth Sciences, 2012, 101(6): 1625-1643.
- [28] 王清晨, 李忠. 库车—天山盆山系统与油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- WANG Qingchen, LI Zhong. The basin-range system of Kuqa depression and Tianshan and its petroleum significance[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [29] 李曰俊, 吴根耀, 雷刚林, 等. 新疆库车新生代前陆褶皱冲断带的变形特征、时代和机制[J]. 地质科学, 2008, 43(3): 488-506.
- LI Yuejun, WU Genyao, LEI Ganglin, et al. Deformational features, ages and mechanism of the Cenozoic Kuqa foreland fold-and-thrust belt in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 488-506.
- [30] 李忠, 张丽娟, 寿建峰, 等. 构造应变与砂岩成岩的构造非均质性——以塔里木盆地库车坳陷研究为例[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2320-2330.
- LI Zhong, ZHANG Lijuan, SHOU Jianfeng, et al. Structural strain and structural heterogeneity of sandstone diagenesis: a case study for the Kuqa subbasin in the northern Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2320-2330.
- [31] 宋岩. 库车坳陷异常高压成因与异常高压大气田成藏模式研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2002.
- SONG Yan. Research on origin of abnormal high pressure in the Keche depression and the modeling of generation of huge gas field[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2002.
- [32] 郝芳, 孙雄伟, 石万忠, 等. 库车前陆盆地异常高压成因与分布规律[R]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- HAO Fang, SUN Xiongwei, SHI Wanzhong, et al. Origins and distribution of abnormal high pressure in Kuqa foreland basin[R]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [33] GUO Xiaowen, LIU Keyu, JIA Chengzao, et al. Effects of early petroleum charge and overpressure on reservoir porosity preservation in the giant Kela-2 gas field, Kuqa depression, Tarim Basin, Northwest China[J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(2): 191-212.
- [34] BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction[J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10(2): 89-95.
- [35] TINGAY M R P, MORLEY C K, LAIRD A, et al. Evidence for overpressure generation by kerogen-to-gas maturation in the northern Malay Basin[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(4): 639-672.
- [36] TINGAY M R P, HILLIS R R, SWARBRICK R E, et al. Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram prov-
- ince, Brunei[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(1): 51-74.
- [37] 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.
- FAN Honghai. Analysis methods and applications of abnormal formation pressures[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [38] 范昌育, 王震亮, 张凤奇. 库车坳陷克拉苏冲断带传递型超压的识别、计算及其主控因素[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(3): 32-38.
- FAN Changyu, WANG Zhenliang, ZHANG Fengqi. Identification, calculation and main controlling factors of overpressure transferred by fault in Kelasus thrust belt of Kuqa depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(3): 32-38.
- [39] 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.
- [40] 张凤奇, 鲁雪松, 卓勤功, 等. 准噶尔盆地南缘下组合储层异常高压成因机制及演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1004-1016.
- ZHANG Fengqi, LU Xuesong, ZHUO Qingong, et al. Genetic mechanism and evolution characteristics of overpressure in the lower play at the southern margin of the Junggar Basin, northwestern China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1004-1016.
- [41] WEBSTER M, O'CONNOR S, PINDAR B, et al. Overpressures in the Taranaki Basin: distribution, causes, and implications for exploration[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(3): 339-370.
- [42] BOWERS G L, KATSUBE T J. The role of shale pore structure on the sensitivity of wire-line logs to overpressure[J]. AAPG Memoir, 2004, 76, 43-60.
- [43] 殷文, 唐建云, 朱剑兵, 等. VSP 时差分析及时深关系校正[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(6): 2823-2830.
- YIN Wen, TANG Jianyun, ZHU Jianbing, et al. Analysis of VSP travel-time difference and calibration of time-depth relationship[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(6): 2823-2830.
- [44] ZHANG Fengqi, LU Xuesong, BOTTERILL Scott, et al. Horizontal tectonic stress as a cause of overpressure in the southern margin of the Junggar Basin, Northwest China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 205: 108861.
- [45] ENGELDER T. Stress regimes in the lithosphere[M]. Princeton: Princeton University Press, 1993.
- [46] 王清晨, 张仲培, 林伟, 等. 库车—天山盆山系统新近纪变形特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(S1): 45-55.
- WANG Qingchen, ZHANG Zhongpei, LIN Wei, et al. The feature of Neogene deformation of Kuqa-Tianshan system[J]. Science China Earth Sciences, 2004, 34(S1): 45-55.
- [47] 曾联波, 刘国平, 朱如凯, 等. 库车前陆盆地深层致密砂岩储层构造成岩强度的定量评价方法[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1601-1609.
- ZENG Lianbo, LIU Guoping, ZHU Rukai, et al. A quantitative evaluation method of structural diagenetic strength of deep tight sandstone reservoirs in Kuqa foreland basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1601-1609.
- [48] 张立宽, 王震亮, 孙明亮, 等. 库车坳陷克拉 2 气田异常流体压力

- 演化史[J]. 地质科学, 2007, 42(3): 430-443.
- ZHANG Likuan, WANG Zhenliang, SUN Mingliang, et al. Evolution of abnormal fluid pressure in the Kela 2 gasfield, Kuqa depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(3): 430-443.
- [49] ZENG Lianbo, WANG Hongjun, GONG Lei, et al. Impacts of the tectonic stress field on natural gas migration and accumulation: a case study of the Kuqa depression in the Tarim Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(7): 1616-1627.
- [50] 卓勤功, 赵孟军, 李勇, 等. 青盐岩盖层封闭性动态演化特征与油气成藏——以库车前陆盆地冲断带为例[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 847-856.
- ZHUO Qingong, ZHAO Mengjun, LI Yong, et al. Dynamic sealing evolution and hydrocarbon accumulation of evaporite cap rocks: an example from Kuqa foreland basin thrust belt[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5): 847-856.
- [51] GOULTY N R. Relationships between porosity and effective stress in shales[J]. First Break, 1998, 16(12): 413-419.
- HANTSCH T, KAUERAUF A I. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [53] MAGARA K. Compaction and fluid migration: practical petroleum geology[M]. Amsterdam: Elsevier, 1978.
- [54] 陈荷立. 泥岩压实过程中孔隙流体异常高压的形成及其地质意义[J]. 石油地质科技情报, 1982(1): 1-23.
- CHEN Heli. Formation of abnormal overpressure of pore fluid and its geological significance during mudstone compaction[J]. Petroleum Geology Science and Technology Information, 1982(1): 1-23.
- [55] SCHMALHOLZ S M, PODLADCHIKOV Y Y. Tectonic overpressure in weak crustal-scale shear zones and implications for the exhumation of high-pressure rocks[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(10): 1984-1988.
- [56] HARROLD T W D, SWARBRICK R E, GOULTY N R. Pore pressure estimation from mudrock porosities in Tertiary basins, Southeast Asia[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(7): 1057-1067.
- [57] WANG H F. Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology[M]. New Jersey: Princeton University Press, 2000.
- [58] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Malden: Blackwell Publishing, 2007.
- [59] 王平. 含油盆地构造力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- WANG Ping. Tectonic mechanic principles of oil-bearing basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [60] 张明利, 谭成轩, 汤良杰, 等. 库车坳陷克拉 2 气藏异常高地层压成因力学分析[J]. 地球科学, 2004, 29(1): 93-95.
- ZHANG Mingli, TAN Chengxuan, TANG Liangjie, et al. An analysis on mechanical genesis of overpressure at Kala 2 gas pool in Kuqa down-warping region[J]. Earth Science, 2004, 29(1): 93-95.
- [61] 李军, 王贵文, 欧阳健. 利用测井信息定量研究库车坳陷山前地区地应力[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 93-95.
- LI Jun, WANG Guiwen, OUYANG Jian. Using logging data to quantitatively study terrestrial stress of Kuqa field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 93-95.
- [62] 漆家福, 张玮, 余海波, 等. 库车前陆冲断带重点区带构造解析及中生界原型盆地研究[R]. 北京: 中国石油大学, 2015.
- QI Jiafu, ZHANG Wei, YU Haibo, et al. Structural analysis of key areas and study of Mesozoic prototype basin of Kuqa foreland thrust belt[R]. Beijing: China University of Petroleum, 2015.
- [63] 杨海军, 李勇, 石万忠, 等. 库车前陆盆地异常高压成因与分布规律[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- YANG Haijun, LI Yong, SHI Wanzhong, et al. Genesis and distribution of abnormal high pressure in Kuqa foreland basin[M]. Beijing: Science Press, 2018.

(收稿日期 2021-07-01 改回日期 2022-02-12 编辑 肖飞)