

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.366>



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

官亚军, 张奎华, 曾治平, 秦峰, 牛靖靖, 范婕, 刘慧

中石化股份胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257200

摘要: 沉积盆地中超压广受关注, 但对超压传导规律认识的不足制约了高压领域的油气勘探. 以准噶尔盆地阜康凹陷侏罗系为例, 通过超压类型地质综合判识、关键超压表征参数的理论计算及流体包裹体压力恢复, 首次认识到了垂向传导对于储集层超压的重要贡献, 结合压力垂向传导机制及过程, 探讨了油气藏的运聚及泄露意义. 研究表明, 侏罗系超压由 4 类超压环境中 7 种致压因素引起, 经历 2 期大规模压力跨层垂向传导, 储集层段发育以垂向传导为主因的复合超压, 形成 3 类不同动力特征的油气藏. 压力垂向传导是储集层超压的主要成因机制, 断—盖的力学性质、差应力及流体压力等 3 类因素控制压力垂向传导, 传导背景下, 形成 3 类与传导作用有关的油气藏: 受断层垂向传导控制的超压油藏、受连通砂体侧向传导控制的超压油藏以及超压界面上的常压油藏, 上述 3 类油气藏的运聚及泄露特征差异较大.

关键词: 超压成因; 垂向传导; 断层; 油气成藏; 阜康凹陷; 准噶尔盆地; 油气.

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2021)10-3588-13

收稿日期: 2020-08-01

Origin of Overpressure, Vertical Transfer and Hydrocarbon Accumulation of Jurassic in Fukang Sag, Junggar Basin

Gong Yajun, Zhang Kuihua, Zeng Zhiping, Qin Feng, Niu Jingjing, Fan Jie, Liu Hui

Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257200, China

Abstract: Overpressure in sedimentary basins is widely concerned, but the lack of understanding of mechanism of the overpressure transfer restricts the exploration of oil and gas in the over-pressured reservoir of sedimentary basins. Taking Jurassic overpressure of Fukang sag in Junggar basin as an example, the important contribution of vertical transfer overpressure to reservoirs was recognized for the first time through the comprehensive geological studies of overpressure type, the theoretical calculation of characterization parameters of overpressure and the fluid inclusion pressure recovery. Combined with the overpressure vertical transfer mechanism and process, the application for oil migration and accumulation and leakage in the over-pressured reservoir is discussed. The research results indicate that the Jurassic overpressure in Fukang sag is caused by seven kinds of pressure factors in four different overpressure environments. Furthermore, basin modelling and fluid inclusions pressure recovery results show that two stages of overpressure vertical transfer in Jurassic can be conformed to well explain the superposition phenomenon of multiple cause types of over-pressured reservoirs. Theoretical analysis indicates that pressure vertical transfer are controlled by three kinds of factors, such as the geomechanical properties of the seals or sealing faults, the differential stress and the fluid pressure. Under the control of the factors above, three types reservoirs related to the overpressure vertical transfer are formed: over-pressured reservoirs related to fault vertical transfer; hydrostatic pressure reservoirs related to oil and water differentiation on overpressure

基金项目: 国家重大科技攻关项目(No.2016ZX05002-002); 中国石油化工股份有限公司重点课题(Nos. P20062-5, P19016-1).

作者简介: 官亚军(1984-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事区域油气成藏研究. ORCID:0000-0003-4505-5358. E-mail:278365907@qq.com

引用格式: 官亚军, 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.

interface and over-pressured reservoirs related to sandstone lateral transfer. The migration, accumulation and leakage characteristics of the above three types of reservoirs are quite different in their potential beneficial target areas.

Key words: origin of overpressure; vertical transfer; fault; hydrocarbon migration and accumulation; Fukang sag; Junggar basin; hydrocarbon.

油气的生运聚过程也是超压形成、传导、泄露及保存的过程,深刻理解超压传导机制、过程及其控藏作用等对油气勘探具有重要意义(Hunt, 1990; Law and Spencer, 1998; Hao *et al.*, 2015; 罗晓容等, 2016; 张鑫等, 2020; 尤丽等, 2019)。过去三十年来,随着油气勘探向深层高压领域的推进,沉积盆地中由欠压实、生烃、粘土矿物转化、水热作用、盖层封盖及构造挤压等所引起的超压被广泛证实(Dugan and Flemings, 2000; Swarbrick *et al.*, 2002, Lahann and Swarbrick, 2011)。与此同时,地层压力也在不断的传导调整过程中,而压力传导多具有幕式、瞬时、易泄露的特征(Talwani *et al.*, 2007; Pollyea, 2020),故上述各类型超压的传导过程往往难以有效识别和表征。另外,砂岩等渗透性层多不具备大规模增压条件,故由断层垂向或砂体横向传导所引起的传导超压可能是砂岩储集层的主导型超压类型,随着对超压发育规律认识的逐步深入,有多个地区超压被证实主要是由传导引起的,如东南亚第三系盆地(Grauls and Baleix, 1994)、北海盆地(Yardley and Swarbrick, 2000)、文莱巴拉姆三角洲地区(Dugan and Flemings, 2000)、美国新泽西大陆斜坡地区(Tingay *et al.*, 2007)及柴达木盆地等(Fan *et al.*, 2016)。目前,关于由断层等输导作用所引起传导超压的有效判识、特征、机制及其控藏作用不甚清楚。

准噶尔盆地阜康凹陷侏罗系普遍超压,中上侏罗统有丰富的油气发现,油气源对比证实其油气来自下侏罗统八道湾组及中二叠统平地泉组(石好果, 2017),这说明含烃流体已发生了大规模的垂向运移,并极有可能伴随超压的垂向传导。但前人研究表明,欠压实、生烃、盖层封盖及构造挤压等因素导致工区超压(刘震等, 2002; 文钢锋等, 2012; 于景维等, 2015; 曾治平, 2017),研究并未关注超压的传导作用,近年来的勘探效果不理想。本文以准噶尔盆地阜康凹陷侏罗系为例,运用综合地质分析、有效应力—密度—声速交会图法等,综合判识了超压成因类型;通过盆地模拟、流体包裹体压力测试及理论计算等技术方法,分析了压力传导机制及过程;最后,探讨了传导背景下油气藏的充注、聚集及泄露意义。

1 阜康凹陷地质背景

阜康凹陷是准噶尔盆地二级构造单元,北至白家海凸起,南到阜康断裂带,东为帐北隆起带,西接沙湾凹陷,两者共同构成北天山山前凹陷(图 1)。自晚古生代以来,阜康凹陷经历 4 期演化:晚石炭世—早二叠世的陆内裂谷—断陷盆地阶段、晚二叠世晚期—中侏罗世早中期的弱缩短扰曲凹陷盆地阶段、中侏罗世末期—古近纪的陆内凹陷盆地阶段及新近纪的陆内前陆盆地阶段(关宝文, 2015)。受新近纪以来的陆内前陆盆地阶段主控,阜康凹陷现今以单斜构造为主,发育 3 个次级构造单元:凹陷中心、阜北斜坡和阜东斜坡(图 1)。凹陷内目的层侏罗系自下而上依次沉积八道湾组(J_{1b})、三工河组(J_{1s})、西山窑组(J_{2x})、头屯河组(J_{2t})及齐古组(J_{3q})等 5 个层段(图 1),累计厚度达 2 000 m,现今埋深在 1~7 km 之间。侏罗系地层断层较发育,沟通下伏的主力源岩层系(石好果, 2017),断裂带附近的多口探井钻遇油气显示或油层(图 1)。凹陷内侏罗系各层段均有不同程度的超压发育,为典型的埋深跨度极大的超压含油气层系。

2 侏罗系地层压力特征

在众多表征压力特征的参数中,压力系数、剩余压力、超压比值及流体系数具有较好的代表性(Hao *et al.*, 2015)。压力系数(C_p)是孔隙压力与静水压力的比值。剩余压力(ΔP)是孔隙压力(P_p)减去静水压力(P_h)。超压比值(λ_v^*)是剩余压力与垂向应力和静水压力之间差值的比值($\lambda_v^* = \Delta P / (S_v - P_h)$)(Hao *et al.*, 2015),依据有效应力原理,该式中分母($S_v - P_h$)所代表的地质意义是流体承担的剩余压力(ΔP)与骨架承担的有效应力(σ_e)之和,该式可进一步表征为 $\lambda_v^* = \Delta P / (\Delta P + \sigma_e)$,故 λ_v^* 一定程度上反映了剩余压力与有效应力的相对变化。据该参数的地质意义可知,当 $\lambda_v^* \geq 0.5$ 时,剩余压力占比超过有效应力,其值越大,有效应力越小,即发生应力卸载;与之相反;当 $\lambda_v^* < 0.5$ 时,且其值越小,有效应力占比变大,即表明发生了加载过程。

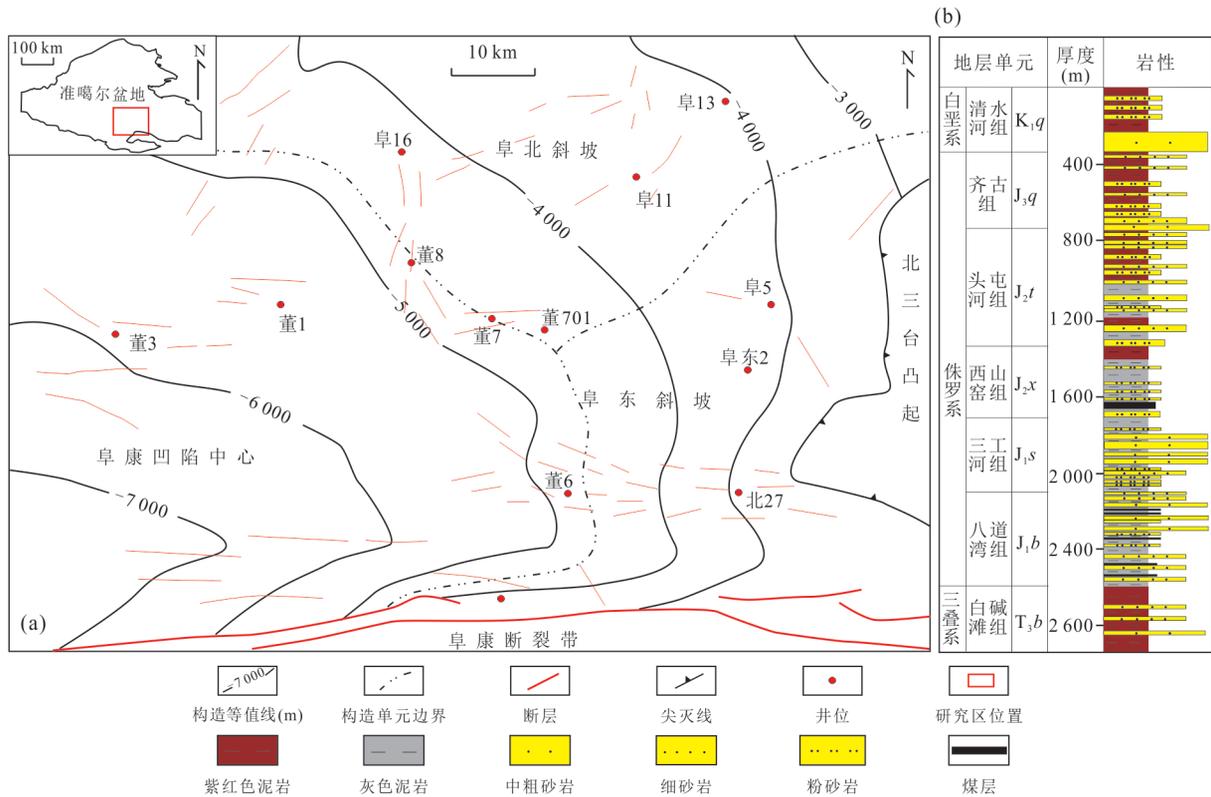
图1 阜康凹陷构造图(J_2t 底)及侏罗系岩性柱状图

Fig.1 Regional structural map and strata histogram of Fukang sag

流体系数(λ_v),指孔隙压力与垂向应力的比值($\lambda_v = P_p/S_v$), $\lambda_v = 0.4$ 为静水压力(其中,地层水密度取值 1.002 g/cm^3 ,上覆地层密度为 2.5 g/cm^3 ,地层密度取值依据见图5);当 $\lambda_v > 0.4$,且其值越大,地层越易发生破裂,越易形成压力传导,即地层所能保持最大压力随 λ_v 大小变化,而 λ_v 主要取决于地区差应力(最大主应力与最小主应力之间的差值)(Sibson and Rowland, 2003; Cox, 2010).下文从上述4个参数维度对阜康凹陷3个构造单元的压力特征进行总结, λ_v^* 和 λ_v 等参数的计算详见后文说明.

2.1 阜北斜坡

阜北斜坡侏罗系埋深在1~4 km之间,超压处于1.5~3.0 km深度段. $C_p < 1.4$ (图2a)、 $\Delta P < 10 \text{ MPa}$ (图2b),表明工区有一定幅度的超压,但同时, $\lambda_v^* < 0.5$ (图2c)、且多处于0.05~0.20的区间,表明超压的同时, λ_v^* 并未显著增大.依据 λ_v^* 定义,流体超压的同时,较小的 λ_v^* 说明地层骨架有效应力处于加载过程,这一特征与工区以欠压实超压为主相一致(刘震等,2002),即快速埋藏过程中,欠压实引起超压,同时有效应力也随埋深增加而增大,且有效应力增大的幅度要较剩余压力增加的幅度大,从而使得 λ_v^* 值相对变小.另外, λ_v 多在0.30~0.55之间

(图2d),地层所能保持最大流体压力沿差应力为60 MPa时流体系数线(λ_v)分布.

2.2 阜东斜坡

阜东斜坡侏罗系超压在1.5~4.0 km之间. C_p 在1.1~1.9之间(图2a), ΔP 多位于5~25 MPa之间(图2b).前人认为,其大幅超压由欠压实和构造挤压引起(刘震等,2002;于景维等,2015),但进一步采用 λ_v^* 和 λ_v 两个新评价参数时,两者所反映的地质特征与上述压力成因明显不一致:①部分 $\lambda_v^* \geq 0.5$ (图2c),表明存在流体压力增加、有效应力减小的卸载效应,而欠压实和构造挤压一般会引起有效应力增加, λ_v^* 所反映的超压特征与前人成因上的矛盾表明工区超压可能由非欠压实或非挤压条件所引起;② λ_v 多在0.4~0.8之间(图2d),地层所能保持最大流体压力多沿差应力为20~40 MPa时 λ_v 线分布,即20 MPa差应力可导致由断层活化所引起的超压垂向传导.另外,工区紧邻淮南缘东段博格达山山前带,较大的差应力也极易引起断层再活化和深层流体传导,外源超压流体承担了部分骨架有效应力,使得被传导层的有效应力减小, λ_v^* 值增大.

2.3 凹陷中心

凹陷中心侏罗系从4.8 km开始超压, C_p 多在

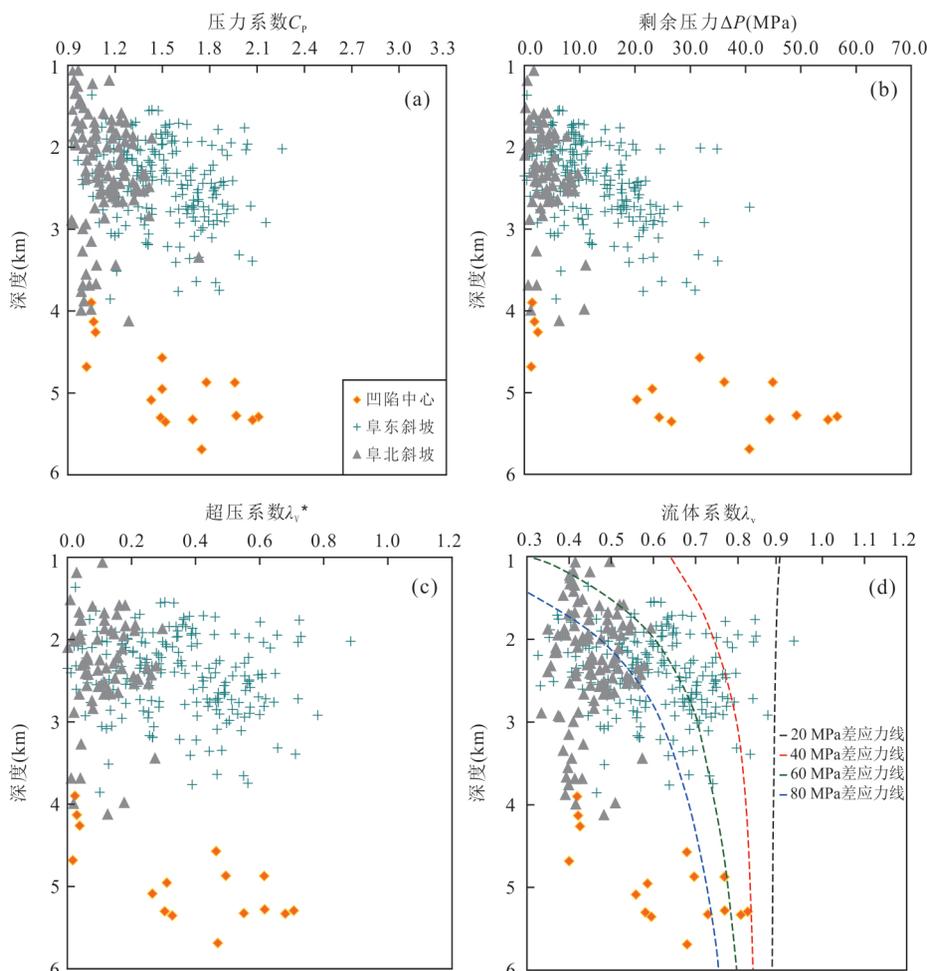


图 2 阜康凹陷侏罗系地层压力特征

Fig. 2 Characteristics of the Jurassic pressure in Fukang sag

1.4~2.1之间(图 2a), ΔP 主要在 20~58 MPa 之间(图 2b). 相对于阜北地区, 凹陷中心侏罗系埋深已超过 2~3 km 的欠压实段(赵靖舟等, 2017), 相对于阜东地区, 工区距离阜康断裂带较远, 构造挤压影响小, 其超压被认为主要是生烃造成的(曾治平, 2017). 但同时, λ_v^* 在 0.25~0.65 之间, 大部分 ≥ 0.5 (图 2c), 说明目的层超压具有一定卸载特征, λ_v 多在 0.55~0.82 之间, 且最大压力处于断层再活化的差应力线上(图 2d), λ_v 受控于断层再剪切差应力线和 λ_v^* 所反映的卸载特征均表明工区极有可能发生了压力垂向传导, 从而引起目的层压力的卸载现象, 这一运移特征也被工区目的层中有机地球化学参数所反映的油气以垂向跨层运移为主所佐证(石好果, 2017).

3 超压成因类型综合判识

Osborne and Swarbrick(1997)将超压成因环境

分为 3 类. 第 1 类与构造应力等有关, 如欠压实、构造挤压及地层抬升等; 第 2 类为流体体积膨胀, 如生烃增压、粘土矿物脱水、水热膨胀等; 第 3 类与流体流动有关, 如断层垂向传导、水头压差及浮力等. 另外, 也有学者将成岩所引起的超压归为第 4 类超压, 该类型也称“载荷转移”超压, 如, 石英溶蚀和胶结等(Jeans, 1994; Bowers, 1995; Hoesni, 2004), 上述 4 类环境中发育的超压在盆地中得到广泛证实(Dugan and Flemings, 2000; Swarbrick *et al.*, 2002, Lahann and Swarbrick, 2011). 对具体地区而言, 超压成因往往具有复杂性, 故下文采用多种技术方法对工区目的层的超压成因进行综合判识.

3.1 超压储层段的综合地质特征

一般认为, 欠压实和生烃作用是沉积盆地超压的重要因素(赵靖舟等, 2017), 故可通过压力、孔隙度及镜质体反射率及生烃潜力等参数在深度上的对应性来初步判断是否存在上述类型超压. 如图 3,

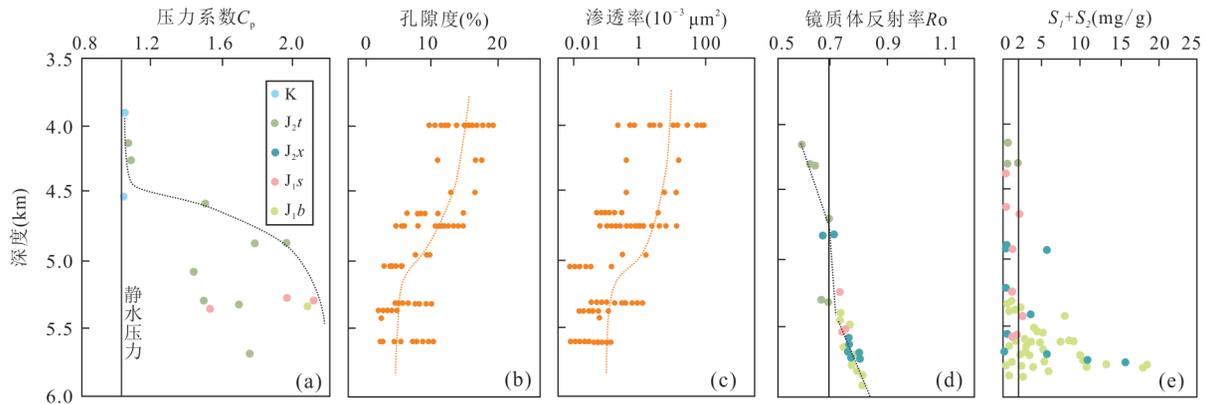


图3 阜康凹陷中心侏罗系超压段孔隙度、渗透率与镜质体反射率特征

Fig.3 The measured pressure coefficient with porosity and vitrinite reflectance in Fukang sag

工区超压储层段孔隙度已低至10%及以下,异常高孔隙的消失至少说明欠压实不是工区储层主要超压成因.同时也有研究认为,欠压实主要形成于新生代的年轻盆地,多处于2~3 km范围(Osborne and Swarbrick, 1997; 赵靖舟等, 2017),而工区侏罗系主力超压段埋藏深度已达4 800 m,且进入致密化阶段(图3),这预示着随异常高孔的消失,浅埋藏阶段(>3 000 m)形成的早期欠压实超压也可能随之衰减,现今目的层处于非欠压实超压阶段.

工区 J_1b 为主力生烃层,故 J_1b 生烃作用被认为是工区超压的主因(曾治平, 2017).但从压力与镜质体反射率(R_o)对比来看(图3d),在4~6 km超压层段内, R_o 分布有“三段式”特征,从深到浅依次为:①在5.4~5.9 km的 J_1b 生烃层, R_o 从0.70增大到0.85,表明存在生烃所引起的超压贡献;②在4.6~5.4 km主力含油气储层段(J_2t 、 J_2x 及 J_1s), R_o 随深度极缓增加,主要沿 $R_o=0.7$ 的线分布,这表明上述储集层段并无明显生烃过程,但该层段内的压力增长最快,并对其 R_o 产生抑制效应;③在4.0~4.6 km的常压段, R_o 介于0.6~0.7的正常演化过程;④进一步结合生烃潜力(S_1+S_2)来看(图3e),除 J_1b 以外,其他层系基本为 $S_1+S_2 \leq 2$ mg/g(TOC约为1.5),不具备较大生烃潜力.综合物性与 R_o 来看,含油超压储层段目前处于非欠压实阶段(图3),其本身作为储集层而无明显生烃过程,故渗透性的储层大幅超压由非欠压实和非生烃作用引起.

进一步研究表明,超压储层段有以下特征(图4):①对应4 800 m超压界面,该处存在粘土矿物相对含量的转换界面,即高岭石开始相对减小、而伊利石及伊蒙混层相对增加(图4b),表明有矿物转化脱水增压(图4c);②矿物转化脱出的低矿化度水在

超压界面处形成低矿化度带(图4d)(宫亚军, 2017);③低矿化度水对超压界面下储层中碳酸盐岩产生溶蚀,并于超压界面上再沉淀,导致超压界面上下碳酸盐岩含量突变(图4e),类似现象在盆地其他地区也得到证实(杨智等, 2010);④碳酸盐岩的溶蚀和再沉淀过程导致超压界面渗透性急剧减小,孔隙度从20%减低至10%左右(图3b),渗透率减低至 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图3c).如上述的“矿物转换脱水—溶蚀再胶结—渗透性减低”这一“载荷转移”(Jeans, 1994; Hoesni, 2004)机制可能是储层超压的有效机制,如墨西哥湾盆地被认为是该类型超压的典型代表(赵靖舟等, 2017).

综上所述,矿物转换脱水和成岩胶结封闭可能是储层超压的2个重要致压因素,但普遍认为,两者超压幅度往往有限(Osborne and Swarbrick, 1997; Swarbrick *et al.*, 2002; Lahann and Swarbrick, 2011),且工区粘土矿物转换及有关的成岩胶结仅局部分布(刘震等, 2002),地温梯度仅 $2.1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$,水热增压有限,故上述因素均不具备大幅、大范围超压条件.更重要的是,另外两个关键证据也不支持将其作为主要机制:一是如前述(2.0)的表征压力特征的参数 λ_v^* 和 λ_v 指示了压力的垂向传导;二是在如下述的有效应力—密度—声速交会图上(图5),目的层压力与“载荷转移”造成的超压特征也有所不同.

3.2 有效应力—密度—声速交会图

Bowers(1995)提出声波速率与有效应力交会图法能有效识别非欠压实超压(Bowers, 1995),即欠压实超压处于加载曲线上,而非欠压实超压处于卸载曲线上(图5a).Hoesni(2004)研究表明,声速与密度交会图可区分欠压实、构造挤压、成岩作用及

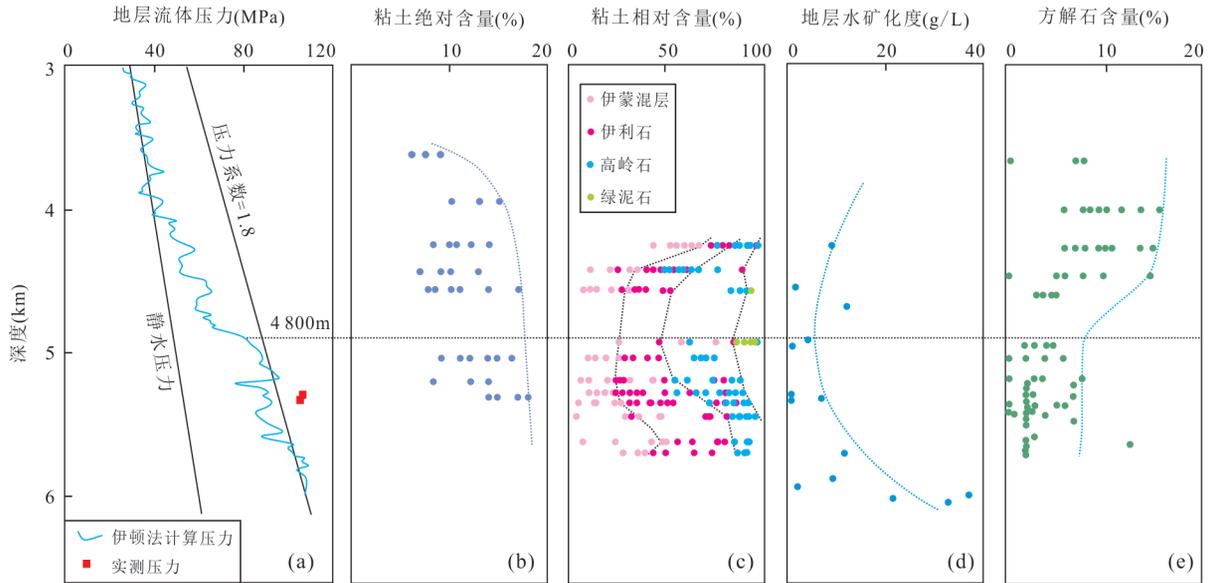


图 4 阜康凹陷侏罗系储层超压段地质特征

Fig.4 Geological characteristics of the non-source rock overpressure section in the center Fukang sag

流体膨胀等成因的超压(Hoesni, 2004),具体如下(图5b):声速与密度同时增加、且位于正常压实关系范围,为欠压实超压(BC),两者同时增加、且超过正常压实段为构造挤压(CD),声速不变而密度增加、密度不变而声速减小为流体膨胀超压或传导超压(BG)、处于上述趋势线过渡带的为复合超压(BF),上述方法得到多个研究证实(Tingay *et al.*, 2007; Lahann and Swarbrick, 2011; Fan *et al.*, 2016; 赵靖舟等, 2017).本次选择了凹陷中心受构造影响较小的董1、董7及董701等3口井,结合两种方法,进一步区分不同层段压力成因类型特征.

据 Terzaghi(1943)有效应力原理,地层骨架的有效应力可表示为(公式1):

$$\sigma_e = S_v - P_p, \quad (1)$$

式中: σ_e 为垂向有效应力,MPa; S_v 为垂向应力,MPa; P_p 为流体压力,MPa.据董1、董7及董701等3口井密度与深度关系拟和,工区垂向应力 S_v 为(公式2):

$$S_v = 0.01523 \times Z^{1.05842} (R^2 = 0.95), \quad (2)$$

式中: S_v 为垂向应力,MPa; Z 为深度,m.将静水压力与公式(2)代入公式(1)即可得到常压段有效应力,声速依据声波测井求取,有效应力与声速两者符合指数关系(公式3),即图5a中的正常加载曲线:

$$V_p = 2.4796e^{0.0092\sigma_e}, \quad (3)$$

式中: V_p 为声波速度,km/s; σ_e 为垂向有效应力,MPa.对于重点关注的超压段,压力(P_p)为实测点或据伊顿公式得到,其中,伊顿公式引自Zhang(2011)

(公式4):

$$P_p = S_v - (S_v - P_h)(\Delta t_n / \Delta t)^{2.0}, \quad (4)$$

式中: P_h 为静水压力,MPa; Δt_n 为常压段声波时差,s/m, Δt 为实际深度段声波时差,s/m.其中,垂向应力据公式(2)计算, P_h 中水密度取值 1.002 g/cm^3 ,常压段声波时差依据董1等3口井统计,实际深度段声波时差据测井曲线读取,伊顿指数通过迭代法确定为2.0,压力计算结果见图4a.并将 P_p (公式4)、 S_v (公式2)代入公式(1),得到超压段有效应力,同样,声速依据声波测井求取,两参数联合得到图5a中的卸载曲线.

以董701超压段为例,对照Bowers法, J_2t 部分声速与有效应力关系位于正常加载曲线,说明欠压实有一定贡献,而 J_2t 部分、 J_2x 、 J_1s 及 J_1b 等均偏离加载曲线,位于卸载曲线上,表明在构造抬升有限的情况下,储层超压主要由非欠压实引起,进而导致有效应力卸载(图5a).

同理,依据Hoesni法原理,对上述3口井进行拟合,首先建立常压段声速及密度关系(图5b,AB):

$$V_p = 1.2291e^{0.5150\rho_z} (R^2 = 0.8519), \quad (5)$$

式中: V_p 为声波速度,km/s; ρ_z 为地层密度, g/cm^3 .

进而,利用测井数据求取超压段声速及密度,与Hoesni法所展示的超压成因对比,目的层声速和密度关系所揭示的超压类型有其特殊性(图5b):①埋藏较浅的 J_2t 先沿声波速率与密度增加的欠压实路径上分布(BC),而后沿声波速率与密度均减小的卸载路径上分布,说明 J_2t 发育欠压实超压,并有卸

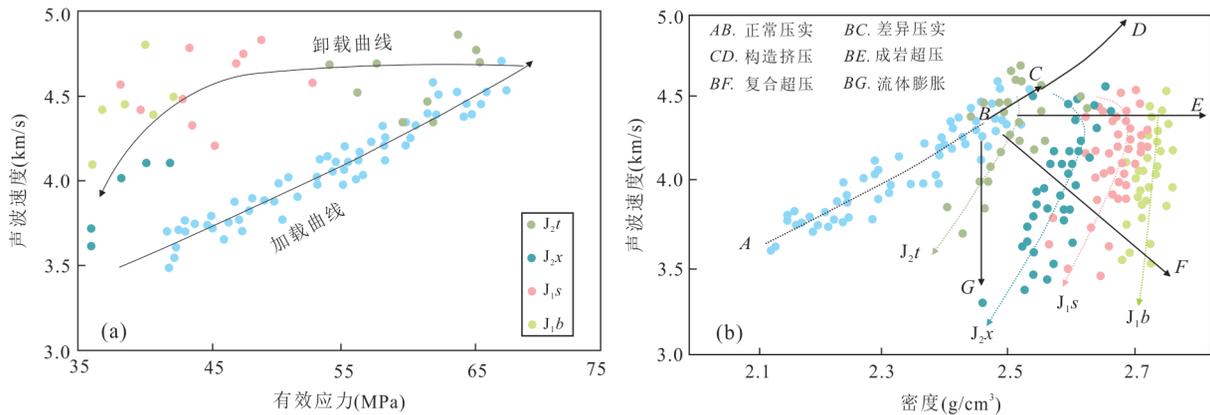


图 5 阜康凹陷董 701 井侏罗系声速—有效应力—密度关系

Fig.5 Relationship between acoustic velocity, effective stress and density of well Dong701

载超压叠加,这与图 5a 所展示的特征类似;②埋藏较深的 J_{2x} 和 J_{1s} 沿先成岩超压(BE)后卸载超压的路径上分布,表明欠压实超压消失,成岩超压出现,这与图 4 所展示的特征类型,但同时也显示了有效应力卸载特征;③埋藏最深的 J_{1b} 与 J_{2x} 及 J_{1s} 的压力路径特征相近,不同的是 J_{1b} 的声波速度减小的同时,密度仅有微弱减小,与流体膨胀趋势一致(BG),结合 J_{1b} 的 R_o 特征(图 3),认为 J_{1b} 主要为生烃膨胀超压。

3.3 储层中垂向传导超压的判别

工区超压段普遍具有有效应力卸载特征,在前文所述的 4 类超压环境中,造成应力卸载的致压因素主要有:构造抬升、生烃膨胀、粘土矿物脱水及断层垂向传导等(Lahann and Swarbrick, 2011). 由于凹陷中心抬升十分有限,因此,抬升造成的应力卸载可忽略;生烃作用及粘土矿物脱水引起的超压多限于生压层内,且与邻近砂岩多处于平衡状态(Lee and Deming, 2002),而工区砂岩压力大于泥岩压力(图 4a),指示了深层高压流体向砂体传导的特征;特别是,欠压实、生烃作用及矿物脱水等处于持续埋藏背景下,地层密度应保持不变或增加,而工区有明显的声波和密度减小的卸载效应(图 5).

综上所述,断层垂向传导是凹陷卸载超压的重要原因,即超压的垂向传导,大量微裂缝形成或断裂开启,声速减小,孔隙空间略有回弹,密度变小,同时,被传导层流体体积增加,并承担了部分骨架有效应力,发生应力卸载现象. 区别于欠压实等层内横向传导扩散机制(伴有向邻层的扩散垂向扩散),超压跨层垂向传导是工区储集层的一种重要的压力发育机制. 阜康凹陷普遍存在含烃流体的跨层运移是该机制的重要表现,这也得到工区油气地

球化学研究的支持(石好果, 2017).

需要说明的是,以上是以渗透性储层段为研究对象,结论并不否认泥岩的欠压实作用,这是由于泥岩早期压实速率快,容易形成不均衡压实,而随后期渗透性急剧减小,传导超压也极难进入,这在前人以泥岩为对象的研究已被充分证实(刘震等, 2002; 于景维等, 2015; 曾治平, 2017). 同时,具有生烃能力的泥岩则以生烃超压为主,如工区的 J_{1b} (图 3, 图 5b). 另外,在阜北斜坡埋深在 1.5~3.0 km 储层中(图 2c、2d)和凹陷中心较浅的 J_{2t} 局部储层中也识别了欠压实超压(图 5),该深度范围与其他地区欠压实 2~3 km 的发育深度范围基本一致(赵靖舟等, 2017),这说明储层也可以局部发育或发育过欠压实超压(图 6).

4 侏罗系压力垂向传导过程

本次利用包裹体法与盆地模拟法恢复了 J_{1s} 和 J_{2t} 压力演化,依据压扭背景下压力传导的理论公式(公式 6),同时考虑到工区的差应力($S_{H1}-S_{H2}$)约为 20~45 MPa,以 λ_v 为 0.80 作为工区岩石破裂条件(图 2d),具体见第 5 节的详述. 结合超压成因类型(图 4, 图 5),重建了侏罗系主要储层段的超压演化传导过程(图 6).

第 1 期超压在距今 160~140 Ma, J_{1s} 快速埋藏,如前述,在该深度范围一般形成欠压实超压,其包裹体记录的超压小于地层破裂压力,故超压仅限于 J_{1s} 内(图 6b). 此时, J_{2t} 埋藏浅,无超压记录(图 6a).

第 2 期超压在距今 115~60 Ma, J_{1s} 欠压实超压持续增强,同时下伏生烃层 J_{1b} 达到生烃门限(图 3),生烃与欠压实超压为垂向传导提供了充足的压

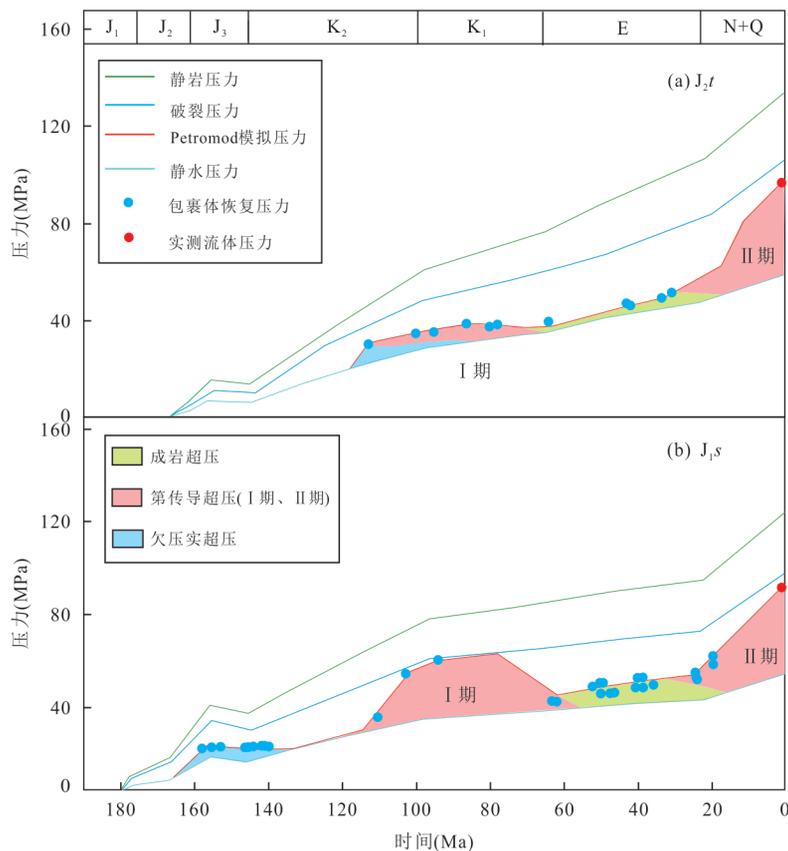
图 6 阜康凹陷 J_{2t} (a) 和 J_{1s} (b) 的压力演化

Fig.6 The pressure evolution model for the Jurassic in Fukang sag

力源. 该阶段, J_{1s} 储层包裹体的 λ_v 达 0.72~0.81 的破裂条件, 且 λ_v^* 在 0.51~0.73 之间, 具有传导卸载特征, J_{1s} 与 J_{2t} 的同步超压也指示了快速的垂向传导过程, 即超压穿透 J_{1s} , 进入 J_{2t} , 形成第 I 期传导超压 (图 6). 随沉降减缓、生烃减弱及成岩致密 (欠压实超压消失), 压力随之衰减 (80 Ma), 但致密化过程中的矿物脱水及成岩胶结使得地层持续保持了一定幅度的超压.

第 3 期超压距今 20~0 Ma, 侏罗系再次快速埋藏, J_{1s} 包裹体剩余压力仅 9 Ma, 而现今 λ_v 接近破裂压力, 表明 J_{1s} 正处于增压过程, 形成第 II 期传导 (图 6). 该阶段, 欠压实超压随孔隙度的减小而消失, J_{1s} 本身进入成岩超压阶段 (图 4), 故与该期传导超压叠加, 形成先成岩、后传导的超压路径; 此时, J_{2t} 局部为成岩超压阶段, 而局部仍处于欠压实阶段, 与传导超压叠加, 形成 J_{2t} 欠压实—成岩—传导的复合超压特征 (图 5b).

两期垂向传导背景下, 阜康凹陷侏罗系砂岩储层普遍具有卸载特征. 需要说明的是, 该过程中生烃超压、成岩超压、欠压实等其他类型超压可一

并传导. 尤其是, 当地层经历欠压实后或致密化后, 横向水力传导性变差, 横向连通性难以再次恢复, 故垂向传导是欠压实、成岩超压及生烃超压等泄露的重要机制. 垂向传导的结果是, 传导超压优先充注浅层渗透性好的砂岩储层, 储层压力大幅增加, 整体表现为持续埋藏背景下的大规模应力卸载特征, 下文将详细讨论压力垂向传导机制和受控因素.

5 压力垂向传导机制及影响因素

泥岩等低渗透层的水力传导性最差, 因此, 低渗透层盖层的封盖条件最终决定流体的垂向传导过程. 目前已知有 3 种低渗透层中流体渗流机制: 扩散流、毛细管界面力驱动流及通过断—缝的压差驱动流 (Plümpner *et al.*, 2017), 其中, 扩散流和毛细管界面力驱动流是十分缓慢的过程, 通过断—缝的压差驱动流是流体垂向传导或泄露的主要方式 (Hildenbrand *et al.*, 2005), 压力垂向传导与断层再剪切密切相关 (Cox, 2010; Hao *et al.*, 2015), 故断—盖 (泥岩) 的封盖性是垂向传导超压的基础性保存因素.

5.1 地层最大流体压力

工区侏罗系工程压裂表明,目的层处于压扭性应力状态($S_h < S_v < S_H$),最大水平应力(S_H)与最小水平应力(S_h)的应力差($S_H - S_h$)为 20~45 MPa,垂向应力(S_v)为中间应力(公式 3),故易发生压剪破裂.依据广泛应用的岩石破裂准则,当 $S_H - S_h > 5.66 T$ 和 $P_p = S_h + [8T - (S_H - S_h)]/3$ 时,发生压剪破裂(Sibson and Rowland, 2003;Cox, 2010),式中 P_p 为地层能保持的最大流体压力, T 为抗张强度,泥岩抗张强度平均约 2.5 MPa.以此准则计算,工区地层能维持的最大流体压力在 95~128 MPa 之间,实测压力基本处于该上限范围内(图 3a),说明泥岩封盖对压力具有一定的保存作用,但泥岩盖层往往是不完整的,多发育断层及相关裂缝.

5.2 先存断层的再剪切

当泥岩盖层存在先存断层时,地层能保存的最大流体压力为先存断层再剪切的临界压力(P_c),依据广义应力摩尔圆和修正的格里菲斯破裂线,先存断层再剪切依赖于断层剪切角(θ)、断层摩擦系数(μ)、差应力和流体压力等(Sibson and Rowland, 2003;Cox, 2010;Hao *et al.*, 2015).如图 7a,静水条件下,摩尔圆和破裂线未相交,不发生破裂(①);当流体压力增加(P_p),摩尔圆左移,沿最佳剪贴角方向(θ_0),摩尔圆与断层再剪切包络线相交,断层再剪切(②);当有构造作用时,随差应力增加,应力圆半径增大,并与再剪切包络线相交,发生压剪破裂(③),后二类情况下,均发生压力垂向传导.

Cox(2010)研究表明,压扭构造环境中,断层再剪切时地层所能保持的最大流体压力是断层再剪

切角、断层摩擦系数、地层应力及岩石内聚强度的函数(公式 6),公式 6 两边同除以垂向应力(公式 3)即可得到的不同等差应力条件下等流体系数线 λ (图 2d).

$$P_c = C \tan 2\theta_0 - \frac{(1 - \cos 2\theta_0)}{2 \cos 2\theta_0} S_H - \frac{(1 + \cos 2\theta_0)}{2 \cos 2\theta_0} S_h, \quad (6)$$

式中: P_c 为先存断层临界活化压力,MPa; C 为内聚强度,MPa; μ 为摩擦系数,无量纲; $\theta_0 = 0.5 \tan \mu$ 为最佳剪切角($^\circ$); S_H 为最大水平应力,MPa; S_h 为最小水平应力,MPa.

据公式(6)计算了沿最佳剪切角方向、 $T = 2.5$ MPa、 $C \approx 2T$ 、 $\mu = 0.75$ 时,不同差应力条件下地层能保持的最大压力,图 7b 展示了差应力为 20、40、60 及 80 MPa 时的计算结果:①相同差应力,深度增加,地层能保持的最大流体压力增加;②相同深度,差应力增加,地层能保持的最大流体压力减小;③部分超压沿地层能保持的最大流体压力线分布,即落于断层再剪切线上;④部分超压小于地层能保持的最大流体压力,且与静水压力线平行;⑤所有实测压力均小于相应深度点的静岩压力,表明工区发生了不同程度的压力传导泄露.

6 油气藏的充注、泄露及保存

基于压力成因类型,结合传导过程重建,通过传导机制及控制因素综合分析,研究表明,工区二期大规模垂向压力传导过程伴随油气藏充注、泄露及保存,受不同的超压传导机制影响,含油性差异

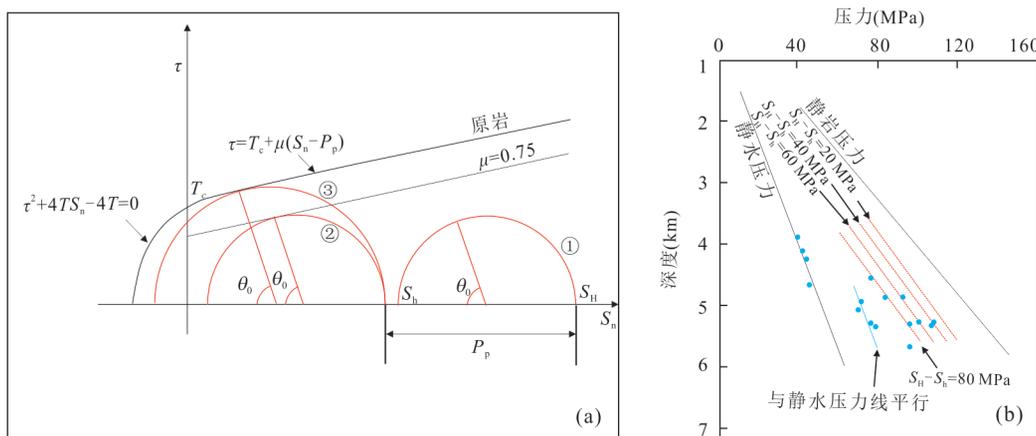


图 7 不同差应力条件下断层再活化与地层流体压力关系

Fig.7 Relationship between fault reactivation and fluid pressure under differential stress in Fukang sag
 τ 为剪应力,MPa; S_h 为剪应力,MPa; T_c 为抗张强度,MPa;①静水压力;②超压- P_p ;③超压+构造应力

较大.以董1井区为例,将8个圈闭实测压力与理论计算结果对比(图7b),识别3类不同压力特征的油气藏(图8):①落于断层再剪切线上的超压油气藏;②超压界面上的常压油气藏;③与静水压力线平行的超压油气藏.

第①类超压油藏的压力落于断层再剪切线上,说明该类油藏受断层再剪切控制.如,董1井落于60 MPa差应力线上的2个圈闭产水,而落于40 MPa差应力线上的圈闭日产油25 m³(图8a),对于同一口井、相近深度段,应该是落于40 MPa应力差线上的圈闭首先破坏,实则相反.勘探证实,40 MPa线上圈闭的油气高度由两部分封盖构成:断层封盖高度和盖层封盖高度,断层再活化仅破坏了断层封盖的油气柱,而未被断层断穿或破坏的盖层封盖的油气柱得到保存(图8b).上述说明,较大的差应力易导致断层再剪切和油藏泄露,但较大的差应力也说明储层裂缝处于临界状态,开启度高,故未被断穿的油藏极有可能高产.

第②类为超压顶界面上的常压油藏,压力垂向传导造成深层油气藏破坏及调整,随着压力的衰减,含烃流体于超压顶界面附近产生油水分离,并形成常压油气藏(石好果,2017;曾治平,2017;杨智等,2010),如董101井J₂t岩性油藏,日油1.3 m³,日

气1 565 m³(图8c),而距超压界面较远的圈闭不含油(图8a).

第③类是与静水压力线平行的超压油气藏,该类油藏压力小于地层能保持最大流体压力,并具有相同剩余压力(与静水压力线平行).如董1井J₂t中的2个圈闭,其剩余压力相同,均产水,见油花(图8a),这说明2个油藏具有水力连通性,并发生了压力泄露,导致压力小于地层所能保持的最大压力,且油藏破坏,但其压力并不受断层再剪切的垂向泄露机制控制.上述压力特征被证实为连通性砂体横向传导泄露的结果(Mann and Mackenzie, 1990; Yardley and Swarbrick, 2000; Dugan and Flemings, 2000),即连通性好的砂体水动力也相连通,剩余压力相同,压力横向传导泄露也导致油气横向运移,故其能保持的油柱有限,显示丰富但产水(图8d),因此,该类型动力特征的连通砂体上倾尖灭带极有可能是十分有利目标.

7 结论

阜康凹陷侏罗系超压由4类环境中7种致压因素引起:欠压实、生烃作用、黏土转化、成岩胶结、构造挤压、盖层封盖和垂向传导等,研究区多为复合成因超压,且砂泥岩的超压有较大差异.其中,砂岩

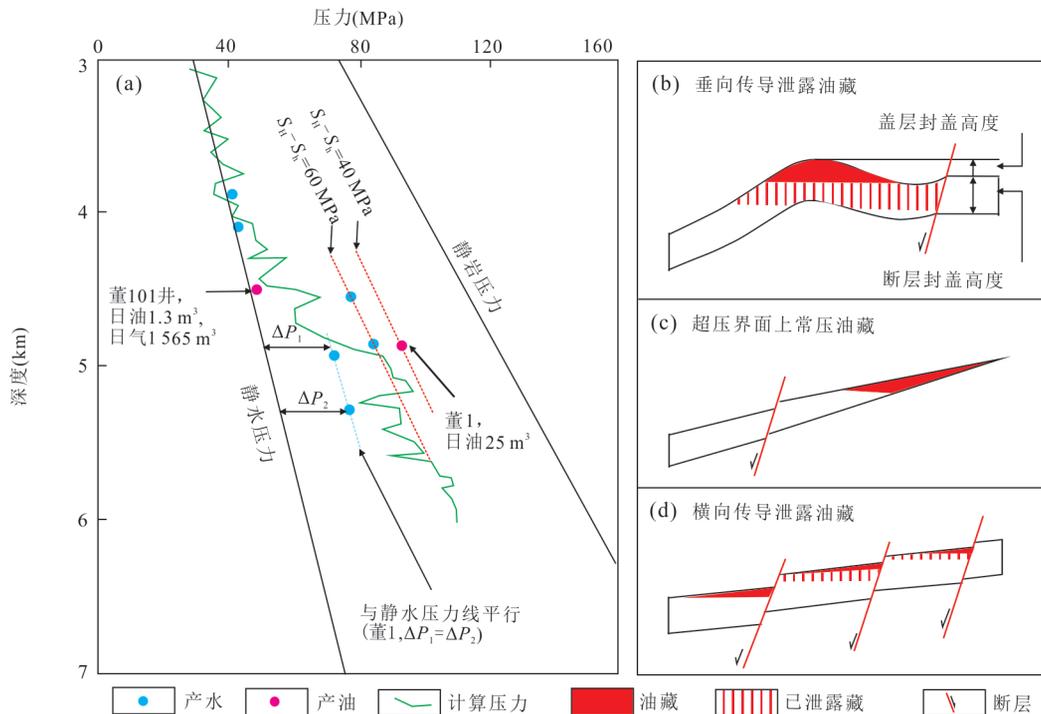


图8 阜康凹陷不同压力条件下油气藏的保存与泄露特征

Fig.8 Characteristics of reservoir preservation and leakage under different dynamic conditions in Fukang sag

储集层属于垂向传导为主导因素的第 3 类超压(与流体流动有关),其次为由粘土转化脱水和成岩胶结引起的第 2 类(与流体膨胀有关)和第 4 类超压(与载荷转移有关),局部伴有欠压实引起的第 1 类超压(与构造应力有关).与砂岩储集层不同,泥岩则多属于欠压实引起的第 1 类超压,其次是以生烃膨胀为代表的第 2 类超压,并伴有与矿物转化、成岩胶结等有关的第 4 类超压,未见明显由传导引起的第 3 类超压.

工区经历 2 期垂向传导,各储层段压力复合特征是不同类型超压叠加演化的结果,其中, J_{2t} 经历了欠压实超压、I 期传导超压、成岩超压及 II 期传导超压的演化路径,故现今为欠压实—成岩—传导等复合成因超压; J_{1s} 与 J_{2x} 的压力演化类似,但欠压实超压已消失,故现今为成岩与传导超压的叠加; J_{1b} 为生烃膨胀超压.

盖层的封盖性对压力的垂向传导至关重要,通过盖层中断一缝的压差驱动流是垂向传导主要方式,断一缝的再剪切决定了超压能否垂向传导,再剪切受控于断—盖力学性质、差应力和流体压力等 3 类因素.

传导背景下,形成 3 类不同动力特征的油气藏:受断层垂向传导控制的超压油气藏、受砂体侧向传导控制的超压油气藏及超压界面上的常压油气藏.其中,垂向传导油气藏易垂向泄露,但断裂带未被断层断穿的圈闭保存较好、裂缝开启度高,故易高产;侧向传导油气藏易侧向泄露,而砂体上倾尖灭带是有利的聚集带;超压界面上有断层沟通的圈闭是十分有利的目标.

References

- Bowers, G. L., 1995. Pore Pressure Estimation from Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms besides Undercompaction. *SPE Drilling & Completion*, 10(2): 89—95. <https://doi.org/10.2118/27488-PA>
- Cox, S. F., 2010. The Application of Failure Mode Diagrams for Exploring the Roles of Fluid Pressure and Stress States in Controlling Styles of Fracture-Controlled Permeability Enhancement in Faults and Shear Zones. *Geofluids*, 10(1): 217—233. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00281.x>
- Dugan, B., Flemings, P. B., 2000. Overpressure and Fluid Flow in the New Jersey Continental Slope: Implications for Slope Failure and Cold Seeps. *Science*, 289(5477): 288—291. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.288>
- Fan, C. Y., Wang, Z. L., Wang, A. G., et al., 2016. Identification and Calculation of Transfer Overpressure in the Northern Qaidam Basin, Northwest China. *AAPG Bulletin*, 100(1): 23—39. <https://doi.org/10.1306/08031514030>
- Gong, Y. J., 2017. Mesozoic Formation Water Characteristics and Hydrocarbon Geological Significance in the Hinterland of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 38(5): 524—529(in Chinese with English abstract).
- Grauls, D. J., Baleix, J. M., 1994. Role of Overpressures and In Situ Stresses in Fault-Controlled Hydrocarbon Migration: A Case Study. *Marine and Petroleum Geology*, 11(6): 734—742. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0264-8172(94)90026-4)
- Guan, B. W., 2015. Research of Structural Evolution of the Eastern Slope of Fukang Sag and Beisantai Region(Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zhu, W. L., Zou, H. Y., et al., 2015. Factors Controlling Petroleum Accumulation and Leakage in Overpressured Reservoirs. *AAPG Bulletin*, 99(5): 831—858. <https://doi.org/10.1306/01021514145>
- Hildenbrand, A., Krooss, B. M., Urai, J. L., 2005. Relationship between Pore Structure and Fluid Transport in Argillaceous Rocks. *Solid Mechanics & Its Applications*, 125(2): 231—237.
- Hoesni, J. M., 2004. Origins of Overpressure in the Malay Basin and Its Influence on Petroleum Systems. *University of Durham*, 35(12):12397—12401.
- Hunt, J. M., 1990. Generation and Migration of Petroleum from Abnormally Pressured Fluid Compartments. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74(1): 1—12.
- Jeans, C. V., 1994. Clay Diagenesis, Overpressure and Reservoir Quality: An Introduction. *Clay Minerals*, 29(4): 415—423. <https://doi.org/10.1180/claymin.1994.029.4.02>
- Lahann, R. W., Swarbrick, R. E., 2011. Overpressure Generation by Load Transfer Following Shale Framework Weakening Due to Smectite Diagenesis. *Geofluids*, 11(4): 362—375. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2011.00350.x>
- Law, B. E., Spencer, C. W., 1998. Abnormal Pressure in Hydrocarbon Environments. *AAPG Memoir*, 70:1—11.
- Lee, Y., Deming, D., 2002. Overpressures in the Anadarko Basin, Southwestern Oklahoma: Static or Dynamic? *AAPG Bulletin*, 86: 145—160. <https://doi.org/10.1306/08031514030>

- 10.1306/61eeda62-173e-11d7-8645000102c1865d
- Liu, Z., Jin, B., He, W. Y., et al., 2002. Generation and Distribution of Abnormal Formation Pressures in Eastern Part of the Junggar Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 37(S1): 91–104(in Chinese with English abstract).
- Luo, X.R., Zhang, L.K., Fu, X.F., et al., 2016. Advances in Dynamics of Petroleum Migration and Accumulation in Deep Basins. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(5): 876–889, 806(in Chinese with English abstract).
- Mann, D.M., MacKenzie, A.S., 1990. Prediction of Pore Fluid Pressures in Sedimentary Basins. *Marine and Petroleum Geology*, 7(1): 55–65.
- Osborne, M.J., Swar, R.E., 1997. Mechanisms for Generating Overpressure in Sedimentary Basins: A Reevaluation. *AAPG Bulletin*, 81(2): 1023–1041. <https://doi.org/10.1306/522b49c9-1727-11d7-8645000102c1865d>
- Plümper, O., Botan, A., Los, C., et al., 2017. Fluid-Driven Metamorphism of the Continental Crust Governed by Nanoscale Fluid Flow. *Nature Geoscience*, 10(9): 685–690. <https://doi.org/10.1038/ngeo3009>
- Pollyea, R. M., 2020. Explaining Long-Range Fluid Pressure Transients Caused by Oilfield Wastewater Disposal Using the Hydrogeologic Principle of Superposition. *Hydrogeology Journal*, 28(2): 795–803. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02067-z>
- Shi, H.G., 2017. Jurassic Reservoir Development in Fukang Deep Sag, Central Junggar Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(2): 238–246(in Chinese with English abstract).
- Sibson, R. H., Rowland, J. V., 2003. Stress, Fluid Pressure and Structural Permeability in Seismogenic Crust, North Island, New Zealand. *Geophysical Journal International*, 154(2): 584–594. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01965.x>
- Swarbrick, R.E., Osborne, M.J., Yardley, G.S., 2002. Comparison of Overpressure Magnitude Resulting from the Main Generating Mechanisms. *AAPG Memoir*, 76(2): 1–12.
- Talwani, P., Chen, L. Y., Gahalaut, K., 2007. Seismogenic Permeability, k_s . *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(7): B07309. <https://doi.org/10.1029/2006JB004665>
- Tingay, M.R.P., Hillis, R.R., Swarbrick, R.E., et al., 2007. ‘Vertically Transferred’ Overpressures in Brunei: Evidence for a New Mechanism for the Formation of High-Magnitude Overpressure. *Geology*, 35(11): 1023–1026. <https://doi.org/10.1130/g23906a.1>
- Tingay, M.R.P., Hills, 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.
- Wen, G.F., Lin, C.Y., Tian, F.C., et al., 2012. Formation Mechanism of Abnormal Pressure in Fukang Fault Belt-Beisantai Area in Eastern Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 33(2): 149–151(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Zou, C.N., He, S., et al., 2010. Formation Mechanism of Carbonate Cemented Zones Adjacent to the Top Overpressured Surface in the Central Junggar Basin, NW China. *Science China Earth Sciences*, 40(4): 439–451(in Chinese).
- Yardley, G. S., Swarbrick, R. E., 2000. Lateral Transfer: A Source of Additional Overpressure? *Marine and Petroleum Geology*, 17(4): 523–537. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(00\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(00)00007-6)
- You, L., Zhao, Z.J., Dai, L., et al., 2019. Reservoirs Characteristics and Formation Mechanism of High Temperature and Overpressure Reservoirs from Miocene in Ying-Qiong Basin. *Earth Science*, 44(8): 2654–2664(in Chinese with English abstract).
- Yu, J.W., Ren, W., Wang, W.X., et al., 2015. Formation Mechanism of Toutunhe Abnormal Pressure of Middle Jurassic in Fudong Slope Area, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(5): 521–525(in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z.P., 2017. Characteristics of Formation Pressure System and Its Effect on Petroleum Distribution in Jurassic of Fukang Sag. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 24(3): 337–341(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.C., 2011. Pore Pressure Prediction from Well Logs: Methods, Modifications, and New Approaches. *Earth-Science Reviews*, 108(1/2): 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.06.001>
- 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 Petroleologica Sinica*, 38(9): 973–998(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 宫亚军, 2017. 准噶尔盆地腹部中生界地层水特征及油气地质意义. *新疆石油地质*, 38(5): 524–529.

关宝文, 2015. 阜康凹陷东斜坡及北三台地区构造演化研究 (博士学位论文). 北京: 中国科学院大学, 2-3.

刘震, 金博, 贺维英, 等, 2002. 准噶尔盆地东部地区异常压力分布特征及成因分析. 地质科学, 37(增刊 1): 91-104.

罗晓容, 张立宽, 付晓飞, 等, 2016. 深层油气成藏动力学研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 35(5): 876-889, 806.

石好果, 2017. 准噶尔盆地腹部阜康深凹带侏罗系成藏规律. 石油实验地质, 39(2): 238-246.

文钢锋, 林承焰, 田福春, 等, 2012. 准东阜康断裂带-北三台地区异常高压形成机理. 新疆石油地质, 33(2): 149-151.

杨智, 邹才能, 何生, 等, 2010. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近碳酸盐胶结带的成因机理. 中国科学: 地球科学, 40

(4): 439-451.

尤丽, 招湛杰, 代龙, 等, 2019. 莺-琼盆地中新统高温超压储层特征及形成机制. 地球科学, 44(8): 2654-2664.

于景维, 任伟, 王武学, 等, 2015. 阜东斜坡中侏罗统头屯河组异常高压形成机理. 新疆石油地质, 36(5): 521-525.

曾治平, 2017. 阜康凹陷侏罗系压力系统特征及对油气分布的影响. 断块油气田, 24(3): 337-341.

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.

《地球科学》

2021年11月 第46卷 第11期 要目预告

甘蒙北山后红泉地区海相玄武岩地球化学、年代学特征及成因..... 郭小刚等

富碲化物金矿床中碲的成矿作用研究进展..... 胡新露等

长江中游沿岸地下水有机质分子组成特征及其对碘富集的指示..... 薛江凯等

华北克拉通南缘古元古代晚期汝阳群微体化石及其古环境意义: 来自微细构造和生物标志化合物的证据
..... 李 猛等

湖南水口山多金属矿区废石堆重金属污染评价及赋存形态分析..... 陈佳木等

甘肃北山野马大泉志留纪花岗岩的成因和构造意义..... 黄博涛等

含水层非均质性不同刻画方法对地下水流和溶质运移预测的影响..... 蒋立群等

鄂东伍家冲剖面乐平世牙形石生物地层及大隆组的时代..... 郝少波等