

超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力研究方法及其应用

胡慧婷¹, 王 龙², 刘 岩¹, 秦培锐³, 付红军³

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 大庆油田分公司 第四采油厂, 黑龙江 大庆 163355; 3. 中国石油 大庆油田分公司 海拉尔石油勘探开发指挥部, 内蒙古 海拉尔 021000)

摘要:为了研究断裂在油气聚集与保存中的作用,在有、无超压泥岩盖层中断裂垂向封闭油气作用及差异性研究的基础上,针对断层垂向封闭能力的对比,利用围岩排替压力与其泥质含量和压实成岩埋深之间的经验关系,计算并求取断层岩排替压力,从而建立了一套超压泥岩盖层中断裂垂向封闭能力的研究方法,并将其应用于海拉尔盆地乌尔逊凹陷苏仁诺尔断裂带内,定量得出断层岩排替压力,完成苏仁诺尔断裂超压泥岩盖层内的垂向封闭性评价。结果表明,苏仁诺尔断裂在大磨拐河组一段具有较弱的封闭能力,不利于油气聚集与保存,这与该断裂带油气分布广但储量丰度低这一现象吻合较好,由此证实,该方法用于定量研究超压泥岩盖层中断裂垂向封闭能力是可行的。

关键词:超压泥岩盖层;断裂;垂向封闭能力;大磨拐河组;苏仁诺尔断裂;乌尔逊凹陷;海拉尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Research method of fault vertical sealing capacity in overpressure mudstone caprock and its application

Hu Huiting¹, Wang Long², Liu Yan¹, Qin Peirui³, Fu Hongjun³

(1. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. The 4th Oil Production Plant of PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163355, China; 3. Hailar Oil Exploration and Development Headquarters of PetroChina Daqing Oilfield Company, Hailar, Inner Mongolia 021000, China)

Abstract: In order to study the role of fault in hydrocarbon accumulation and preservation, a comparative study was carried out on vertical sealing capacity of faults between overpressure and normal pressure mudstone caprocks. On this basis, displacement pressure of fault rock was calculated by using the empirical relationship between displacement pressure and shale content and buried depth. A set of methods for evaluating the vertical sealing capacity of fault in overpressure mudstone caprock was established and applied to Surennuoer fault zone of Wuertun Sag in Hailar Basin. The displacement pressure of faults was quantitatively calculated, and the vertical sealing ability of overpressure mudstone caprock was evaluated. The results indicate that K₁d¹ overpressure mudstone caprock has a weak sealing capacity in Surennuoer fault zone and is unfavorable for hydrocarbon accumulation and preservation. This result is in good agreement with the phenomenon that oil/gas are widely distributed in this fault zone but the reserves abundance is low. This shows that this method is feasible for quantitative calculation of the vertical sealing capacity of fault in overpressure mudstone caprock.

Key words: overpressure mudstone caprock, fault, vertical sealing capacity of fault, Damoguaihe formation, Surennuoer Fault zone, Wuertun Sag, Hailar Basin

油气勘探实践表明,在含油气盆地或凹陷内厚度相对较大的泥岩地层中或多或少地存在着一定的超压。这种超压不仅对其内油气生成和运移起着重要作用^[1-6],而且对其下油气的聚集与保存也起着重要的控制作用^[7-10],这不仅表现在超压对盖层封闭油气所起的作用上^[11-13],而且更重要的是表现在超压对其内断层封闭油气的作用上。关于超压对泥岩盖层内断层

封闭作用的研究目前虽有探讨,但由于受人们认识水平和研究手段的影响,考虑的问题还不全面,仅仅考虑了断层岩压实成岩程度对断层垂向封闭能力的影响,而没有考虑断层岩成分(泥质含量)对断层垂向封闭能力的影响。此外,在考虑断层岩压实成岩程度对断层垂向封闭能力的影响时,也仅仅考虑的是压实成岩压力对断层垂向封闭能力的影响,而没有考虑压实成

收稿日期:2014-03-24。

第一作者简介:胡慧婷(1983—),女,博士、讲师,油气成藏与保存。E-mail:hht-214@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41372153)。

岩作用时间对断层垂向封闭能力的影响。这些无疑都会造成研究结果与地下实际存在着一定的偏差,从而影响了对油气聚集与保存能力的正确认识。因此,开展超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力的方法研究,对于油气勘探具有重要意义。

1 有、无超压泥岩盖层中断层垂向封闭油气作用机理及差异性

在含油气盆地或凹陷内原始沉积的泥岩盖层,无论是否存在超压,其在后来的构造运动中或多或少都将受到断裂的破坏,通常情况下,断裂对泥岩盖层将产生以下两种情况的破坏:一种是断距较大,将泥岩盖层完全错开,不仅使其失去横向分布的连续性,而且也丧失了对下伏油气的封闭能力;另一种是断距较小,未将泥岩盖层完全错开,仍保持横向分布的连续性,但泥岩盖层封闭油气能力已不再取决于泥岩盖层本身的封闭能力,而是取决于其内断层岩的封闭能力,断层岩封闭能力越强,断裂对盖层封闭能力的破坏作用越弱;反之则越强。然而,如果泥岩盖层有超压存在,表明泥岩塑性强,在相同条件下不易被断裂破坏,即使被断裂破坏,因其内存在超压而易形成封闭,对无超压泥岩盖层来说(图1a),其内孔隙流体与上覆地层中的孔隙流体应属于同一压力系统,即上、下流体是相互连通的,上覆流体对断层岩的压力可被下伏孔隙流体承担,此时断层岩所受到的正压力应为上覆沉积载荷的骨架压力,公式(1)。

$$N = G \cos \theta = (\rho_r - \rho_w) Z \cos \theta \quad (1)$$

式中: N ——断层岩所受到的正压力,MPa;

G ——上覆沉积载荷重量,kg;

θ ——断层倾角,°;

ρ_r ——沉积岩平均密度, g/cm^3 ;

ρ_w ——地层水密度, g/cm^3 ;

Z ——断层岩埋深,m。

如果泥岩盖层存在超压,其内孔隙流体与上覆地层中孔隙流体属于不同的压力系统,即上、下流体是不连通的,已被超压泥岩盖层的致密层相隔(图1b),上覆孔隙流体对断层岩的压力已不能被下伏孔隙流体所承担,此时断层岩所受到的正压力应为上覆沉积载荷(除了骨架重量还有孔隙流体的重量)的静岩压力,公式(2):

$$N' = G' \cos \theta = \rho_r Z \cos \theta \quad (2)$$

式中: N' ——超压泥岩中断层岩所受到的正压力,MPa;

G' ——上覆沉积载荷重量,kg;

其余符号意义同公式(1)。

由公式(1)和公式(2)可以看出,在埋深和断层倾角相同的条件下,超压泥岩盖层中断层岩所受到的正压力明显大于无超压泥岩盖层中断层岩所受到的正压力,表明超压泥岩盖层中断层岩封闭能力应强于无超压泥岩盖层中断层岩的封闭能力。

2 超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力的研究方法

由上述可知,超压泥岩与无超压泥岩盖层一样,其内断层垂向封闭能力的强弱主要取决于断层岩封闭能力的强弱,而断层岩封闭能力强弱又受到其排替压力大小的影响,断层岩排替压力越大,断层垂向封闭能力越强;反之则越弱。因此,要研究超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力,就必须首先确定断层岩排替压力。

大量实测数据结果^[14]表明,岩石排替压力主要受到沉积岩压实成岩埋深(若上覆地层没有明显抬升剥蚀,而用其现今埋深反映)和其成分(可用泥质含量反映)的影响,随着岩石埋深增加,其排替压力增加;反之则减小。其经验函数关系如公式(3)所示。

$$p_c = a e^{bZ_c R_c} \quad (3)$$

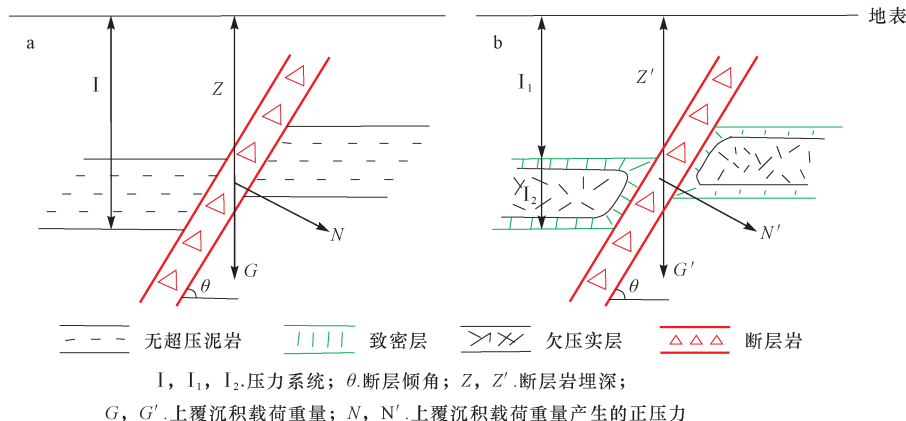


图1 超压和无超压泥岩盖层断层岩所受压实成岩压力对比示意图

Fig.1 Schematic diagram showing comparison of diagenetic compaction pressure of fault rock between overpressure mudstone caprock with normal pressure mudstone caprock

式中: p_c ——沉积岩石排替压力,MPa;
 Z_c ——沉积岩石压实成岩埋深,m;
 R_c ——沉积岩石泥质含量,小数;
 a, b ——与地区有关的常数。

通过公式(3),只要获取沉积岩石压实成岩埋深 Z_c 和泥质含量 R_c ,便可以确定出沉积岩石的排替压力,再根据其大小,便可以对其封闭能力进行评价。如果把断层视为断裂后期活动形成的,倾置于沉积岩地层中由断层岩构成的倾斜岩层,那么就可以按照上述研究方法来确定超压泥岩盖层中断层岩的排替压力。

由于断层岩的压实成岩埋深既要受到其压实成岩压力的影响,又要受到其成岩作用时间的影响,因此首先应确定其所受到的压实成岩压力和压实成岩作用时间。由于超压泥岩盖层中断层岩压实成岩是其停止活动后才开始的,明显晚于与其具有相同埋深的超压泥岩盖层的压实成岩作用时间。可首先利用断裂生长指数法^[15]或断裂活动速率法^[16]确定出断裂活动时期,然后便可以确定出断层岩开始压实成岩作用时间。超压泥岩盖层中断层岩所受到压实成岩压力应为其上覆沉积载荷重量的正压力,如公式(2)所示。其值也应小于与其具有相同埋深超压泥岩盖层的压实成岩压力,如公式(4)所示。

$$N_m = \rho_f Z_m \quad (4)$$

式中: N_m ——超压泥岩盖层压实成岩压力,MPa;
 Z_m ——超压泥岩盖层埋深,m。

超压泥岩盖层中断层岩压实成岩压力、作用时间和与其具有相同埋深泥岩盖层压实成岩压力、作用时间具有对应关系,如公式(5)所示。

$$\frac{N_f}{N_m} = \frac{T_f}{T_m} \quad (5)$$

式中: N_f ——断层岩压实成岩压力,MPa;
 T_f ——断层岩压实成岩作用时间,Ma;
 T_m ——超压泥岩盖层压实成岩作用时间,Ma。

进而可以求得断层岩压实成岩埋深,如公式(6)所示。

$$Z_f' = \frac{1}{\cos\theta} Z \frac{T_f}{T_m} \quad (6)$$

式中: Z_f' ——断层岩压实成岩埋深,m。

断层岩泥质含量既要受到断裂本身断距大小的影响,又要受到被断裂错断地层中泥质成分的影响,可由式(7)计算求得。

$$R_f = \frac{\sum_{i=1}^n H_{si} R_{si}}{L} \quad (7)$$

式中: R_f ——断层岩泥质含量,小数;
 H_{si} ——被断裂错断第*i*层岩层厚度,m;
 R_{si} ——被断裂错断第*i*层岩层泥质含量,小数;

n ——被断裂错断岩层层数;
 L ——断裂断距,m。

将上述确定的断层岩的压实成岩埋深(Z_f')和泥质含量(R_f)代入公式(3)中,便可以计算得到其断层岩排替压力(p_f),如公式(8)所示。

$$p_f = ae^{bZ_f'R_f} \quad (8)$$

由文献[17]中盖层封闭能力的评价标准,按照 $p_f \geq 5, 3 \leq p_f < 5, 1 \leq p_f < 3$ 等级划分标准,便可以对超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力进行评价。

3 实例应用

本文选取海拉尔盆地乌尔逊凹陷北部苏仁诺尔断裂为例,利用上述方法研究其大磨拐河组一段超压泥岩盖层中断层岩的垂向封闭能力,并通过评价结果与油气分布之间关系,验证该方法的可行性。

苏仁诺尔断裂位于乌尔逊凹陷北部,是一条北东东走向的正断层,断裂倾向自西南向东北由东南转为东南南方向,平面上延伸长度为37.25 km,可分为西南部和东北部两部分。其中西南部延伸24.75 km,东北部延伸12.5 km(图2)。苏仁诺尔断裂西南部断距相对较大,为10~475 m,而苏仁诺尔断裂东北部断距相对较小,为5~20 m。苏仁诺尔断裂西南部倾角相对较陡,倾角为 $5^\circ \sim 40^\circ$,而东北部相对较缓,倾角为 $3^\circ \sim 8^\circ$ 。它们均错断了主要目的层下白垩统南屯组油气盖层—大磨拐河组一段泥岩。由图3中可以看出,苏仁诺尔断裂仅西南部边部断距大于大磨拐河组一段泥岩盖层厚度,完全错开了大一段泥岩盖层,其余大部分皆未错开大一段泥岩盖层。由文献[18]可知,乌尔逊凹陷北部大一段泥岩盖层目前普遍存在着超压,异常孔隙流体压力最大可达到5 MPa,主要分布在苏132井处,由此向其四周大一段泥岩异常孔隙流体压力逐渐减小(图4)。由文献[18]可知,乌尔逊凹陷北部大一段泥岩盖层本身又具有相对较高的排替压力,最大可达到14 MPa以上,由东北向西南大一段泥岩盖层排替压力由小于8 MPa逐渐增大至14 MPa以上,(图5)。这些均表明苏仁诺尔断裂处大一段泥岩盖层本身具有较强的封闭油气能力,其能否对下伏南屯组油气起到封闭作用,完全取决于苏仁诺尔断裂在大一段超压泥岩盖层内断层岩的垂向封闭能力。

由表1提供的数据,通过公式(6)与公式(7)计算得到了相关参数。在计算过程中,取大一段泥岩盖层的压突成岩作用时间为127.5 Ma(大一段沉积末期),取苏仁诺尔断裂内大一段超压泥岩盖层的压突成岩作用时间为94 Ma(伊敏组沉积末期)。再根据该区沉积岩排替压力与其泥质含量和压实成岩埋深之间经验关

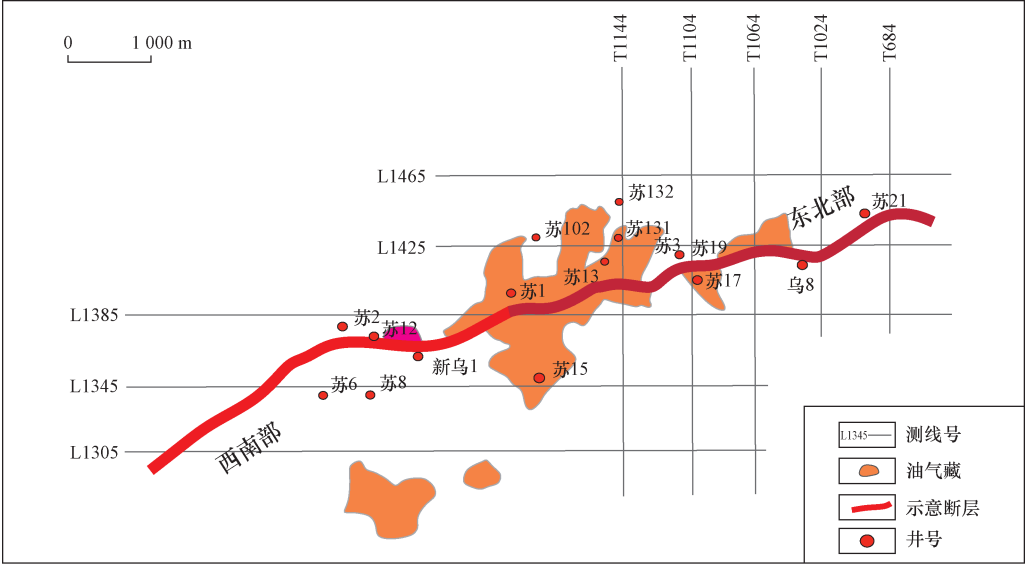


图 2 乌尔逊凹陷苏仁诺尔断裂与油气分布关系

Fig. 2 Diagram of the relationship between hydrocarbon distribution and Surennuoer Fault in Wuerxun Sag

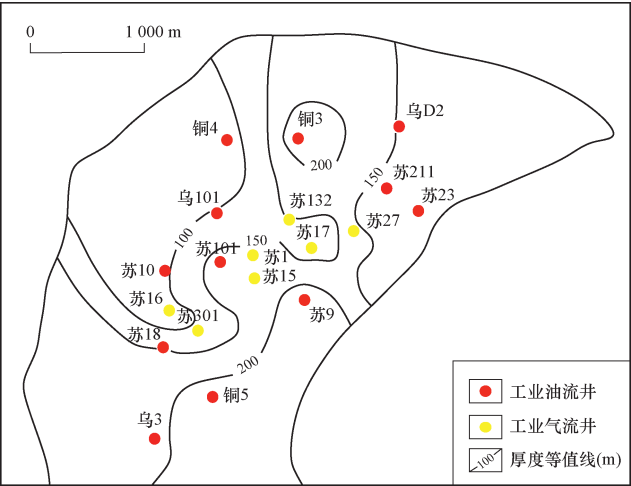


图 3 乌尔逊凹陷北部大磨拐河组一段泥岩厚度

Fig. 3 Isopach of K_1d_1 mudstone in northern Wuerxun Sag

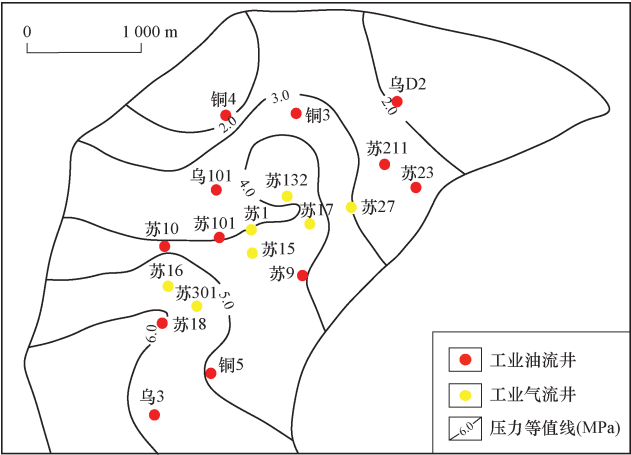


图 4 乌尔逊凹陷北部大磨拐河组一段泥岩异常
孔隙流体压力分布

Fig. 4 Distribution of abnormal pore fluid pressure of K_1d_1 mudstone in northern Wuerxun Sag

系式(公式 9),便可以计算得到苏仁诺尔断裂在不同测线处大一段超压泥岩盖层内断层岩的排替压力。

$$p_e = 0.197e^{0.1124Z_c R_c} \quad (9)$$

式中: p_e ——沉积岩石排替压力压力,MPa;
 Z_c ——沉积岩石压实成岩埋深,m;
 R_c ——沉积岩中泥质含量,小数。

由表 1 可以看出,苏仁诺尔断裂在不同测线处,大一段超压泥岩盖层内断层岩排替压力为 0.37 ~ 0.89 MPa,西南部断层岩排替压力明显大于其东北部断层岩排替压力。按照上述评价标准,苏仁诺尔断裂垂向封闭能力相对较弱,为差封闭能力。由图 2 可以看出,苏仁诺尔断裂附近目前虽然在南屯组发现了许多油气,且中部和东北部南屯组油气明显多于西南部,但总体油气储量丰度却不高,(表 2),明显低于呼和诺仁油田,这可能与该断裂断层岩封闭能力相对较差有关。南屯组

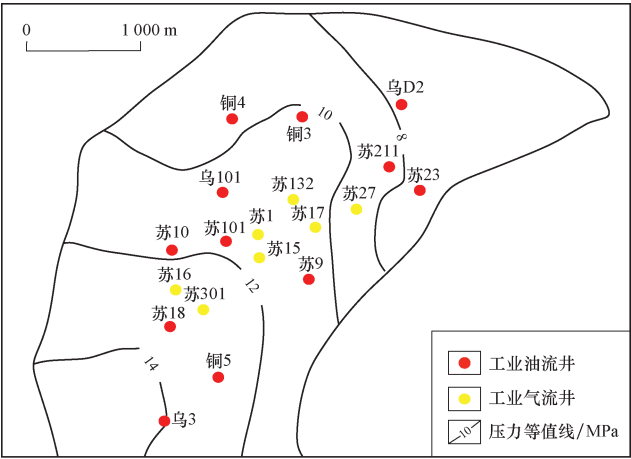


图 5 乌尔逊凹陷北部大磨拐河组一段泥岩排替压力分布
Fig. 5 Distribution of displacement pressure in K_1d_1 mudstone in northern Wuerxun Sag

表 1 苏仁诺尔断裂在大一段泥岩盖层内断层岩排替压力
Table 1 Displacement pressure of fault rock of Surennuoer Fault in K_1d^1 mudstone

断裂部位	测线号	断裂 断距/m	断裂 倾角/(°)	大一段泥 岩盖层埋 深/m	断层岩泥 质含量/ %	断层岩压实 成岩埋深/m (考虑超压)	断层岩压实成 岩埋深/m (不考虑超压)	断层岩排替压 力/MPa (考虑超压)	断层岩排替压 力/MPa (不考虑超压)
西南部	305	375	34.91	1 524.5	96.7	1 386.5	529.0	0.89	0.35
	325	475	39.56	1 602.5	83.3	1 532.0	516.7	0.83	0.32
	345	345	24.08	1 477.5	83.3	1 193.0	564.0	0.60	0.33
	365	205	32.24	1 497.5	50.0	1 305.1	529.7	0.74	0.34
	405	75	33.68	1 202.5	86.7	1 065.2	418.5	0.56	0.30
	425	10	6.45	1 235.0	96.7	916.5	513.0	0.53	0.34
	445	10	5.73	1 255.0	98.3	929.9	522.1	0.55	0.35
	465	15	6.83	1 242.5	96.7	922.6	515.8	0.54	0.35
东北部	808	10	35.00	1 175.0	86.0	1 057.3	402.5	0.55	0.29
	848	20	11.30	1 140.0	66.7	857.1	467.4	0.37	0.28
	888	10	6.54	1 125.0	66.7	834.8	467.3	0.37	0.28
	928	10	7.61	1 065.0	66.7	792.1	441.4	0.36	0.27
	1 008	5	3.80	985.0	95.0	727.8	410.9	0.43	0.31
	1 048	10	7.61	915.0	99.7	680.6	379.2	0.42	0.30
	1 088	10	7.61	915.0	96.7	680.6	379.2	0.41	0.30

表 2 苏仁诺尔和呼和诺仁油田储量丰度对比
Table 2 Reserves abundance comparison between
Surennuoer and Huhenuoer oilfields

油田	工业 油流井	层位	含油面积/ km ²	地质储量/ (10 ⁴ t)	储量丰度/ (10 ⁴ t·km ⁻²)
苏仁诺尔	苏 1	南二段	4.5	159	35
	海参 4	南二段	4.1	133	32
	苏 131	南二段	2.9	169	58
	苏 31	南二段	1.7	92	34
	苏 21	南二段	1.8	51	48
	苏 301	南一段	2.9	133	45
呼和诺仁	贝 302	南二上	0.5	24	48
	贝 3-1	南二上	3.8	573	150.9
	贝 3-1	南二中	3.8	739	194.9

中部分油气沿苏仁诺尔断裂发生了向上逸散,如苏 13 井、苏 19 井、苏 3 井和乌 8 井在上覆大磨拐河组均见到了油气显示。苏仁诺尔断裂西南部由于断裂将大一段泥岩盖层完全错开,油气更易散失,油气聚集明显少于中部和东部。上述评价结果与油气分布关系是吻合的。由表 1 可以看出,按照上述方法计算得到的超压泥岩盖层内断层岩排替压力明显高于不考虑超压的断层岩排替压力值,而前者可能更接近地下实际情况,同时表明原来不考虑超压计算得到大一段泥岩盖层内断层岩封闭能力可能低估了其实际封闭能力,降低了油气勘探远景。

4 结论

1) 超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力主要取决于断层岩的排替压力,断层岩排替压力越大,断层垂向封闭能力越强;反之则越弱。与无超压泥岩盖层相比,最大差异是前者断层岩所受到压实成岩压力增大,断层垂向封闭性相对较好。

2) 本文利用围岩排替压力与其泥质含量和压实成岩埋深之间的经验关系,通过计算求取断层岩排替压力,建立了一套超压泥岩盖层内断层岩垂向封闭能力的研究方法,其应用结果表明,苏仁诺尔断裂在大一段超压泥岩盖层内垂向上具较弱的封闭能力,与其附近有多处油气分布但不富集的现象有着较好的吻合关系,表明该方法用于定量研究超压泥岩盖层内断层垂向封闭能力是可行的。

3) 利用所建立的超压泥岩盖层内断裂垂向封闭能力研究方法,得到的断层岩排替压力明显大于不考虑超压得到的断层岩排替压力,可能更接近地下实际,而不考虑超压的得到的断层岩排替压力低估了断层垂向封闭能力,降低了油气资源远景。

参 考 文 献

[1] 李小强,赵彦超. 东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地超压成因[J]. 石油与天然气地质,2012,33(5):686-694.
Li Xiaoqiang,Zhao Yanchao. Overpressure genesis in the Liutun salt-

- lake sag, Dongpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 686–694.
- [2] 李梅, 金爱民, 楼章华, 等. 准噶尔盆地地层流体特征与油气运聚成藏[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 607–615.
- Li Mei, Jin Aimin, Lou Zhanghua, et al. Formation fluid characteristics and hydrocarbon migration and accumulation in Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 607–615.
- [3] 姜建群, 胡建武, 李明葵. 莺琼盆地高温超压环境有机质热演化及成烃模式探讨[J]. 特种油气藏, 2000, 7(2): 4–7.
- Jiang Jianqun, Hu Jianwu, Li Mingkui. Thermal evolution and hydrocarbon-generating model of organic matter in high temperature and overpressure setting of Yingqiong basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2000, 7(2): 4–7.
- [4] 王国民, 付广, 庚琪. 松辽盆地北部嫩一段泥岩超压形成与演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(5): 765–770.
- Wang Guomin, Fu Guang, Geng Qi. Formation and evolution of overpressure of $K_1 n^1$ mudstone in the north of Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(5): 765–770.
- [5] 付广, 王有功. 三肇凹陷青山口组源岩生成油向下“倒灌”运移层位及其研究意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 355–360.
- Fu Guang, Wang Yougong. Migration horizons downward of oil from $K_1 qn$ source rock of F, Y Oil Layer in Sanzhao Depression and its significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 355–360.
- [6] 殷积峰, 谷志东, 李秋芬. 四川盆地大川中地区深层断裂发育特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 376–382.
- Yin Jifeng, Gu Zhidong, Li Qiufen. Characteristics of deep rooted faults and their geological significances in Dachuanzhong area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 376–382.
- [7] 付广, 雷林. 泥岩超压不同演化阶段开始及释放深度规律及其研究意义[J]. 特种油气藏, 2008, 15(6): 16–19.
- Fu Guang, Lei Lin. The beginning and release depth of mudstone overpressure in different evolution stages and its implication[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(6): 16–19.
- [8] 蔡周荣, 夏斌, 万志峰, 等. 珠江口盆地与莺琼盆地油气运聚特征的差异性[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 9–12.
- Cai Zhourong, Xia Bin, Wan Zhifeng, et al. Differences in hydrocarbon migration and accumulation between the Pearl River Mouth and the Yinggehai-Qiongdongnan basins on the northern margin of South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(11): 9–12.
- [9] 孙同文, 吕延防, 刘宗堡, 等. 大庆长垣以东地区扶余油层油气运移与富集[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 700–707.
- Sun Tongwen, Lv Yanfang, Liu Zongbao, et al. Hydrocarbon migration and enrichment features of the Fuyu oil layer to the east of the Daqing placanticline[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 700–707.
- [10] 付广, 孟庆芬. 乌尔逊凹陷大一段异常孔隙流体压力及其对油气保存的作用[J]. 断块油气田, 2004, 11(2): 4–6.
- Fu Guang, Meng Qingfen. Abnormal pore fluid pressure of $K_1 d^1$ in Wuerxun Depression and its effect to Oil and Gas Preservation[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2004, 11(2): 4–6.
- [11] 黄劲松, 刘长国, 牟广山. 贝尔凹陷大一段下部旋回泥岩盖层封闭能力综合评价[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(6): 19–24.
- Huang Jinsong, Liu Changguo, Mu Guangshan. Comprehensive evaluation of seal ability of mudstone cap rocks in Lower cycle of $K_1 d^1$ in Beier Depression in Hailaer Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum institute, 2009, 33(6): 19–24.
- [12] 付广, 张楠. 超压泥岩盖层中断裂垂向封闭性的定量评价[J]. 断块油气田, 2009, 16(4): 1–3.
- Fu Guang, Zhang Nan. Quantitative evaluation for vertical sealing ability of faults in overpressure mudstone cap rock[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(4): 1–3.
- [13] 付广, 王有功, 苏玉平. 超压泥岩盖层封闭性演化规律及其研究意义[J]. 矿物学报, 2006, 26(4): 453–459.
- Fu Guang, Wang Yougong, Su Yuping. Evolution law for sealing of overpressured mudstone caprock and its research significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26(4): 453–459.
- [14] 吕延防, 黄劲松, 付广, 等. 砂泥岩薄互层段中断层封闭性的定量研究[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 824–829.
- Lv Yanfang, Huang Jinsong, Fu Guang, et al. Quantitative study on fault sealing ability in sandstone and mudstone thin interbed[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 824–829.
- [15] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海中、新生代盆地构造活动与沉积作用的时空关系[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 201–206.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. Space-time relationship between tectonics and sedimentation of Meso-Cenozoic Bohai Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 201–206.
- [16] 史冠中, 王华, 徐备, 等. 南堡凹陷柏各庄断层活动特征及对沉积的控制[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(1): 85–90.
- Shi Guanzhong, Wang Hua, Xu Bei, et al. Activity of Baigezhuang Fault of Nanpu Depression and its controlling on sedimentation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitates Pekinensis, 2011, 47(1): 85–90.
- [17] 付广, 于丹. 苏仁诺尔断裂垂向封闭时空分布及其与油气聚集的关系[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 40–45.
- Fu Guang, Yu Dan. Time-space distribution of vertical seal in Shurenouer Fault and its relation with oil-gas accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 40–45.
- [18] 付广, 康德江. 乌尔逊凹陷大一段泥岩盖层封闭能力及其研究意义[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 269–273.
- Fu Guang, Kang Dejiang. Seal characteristics of $K_1 d^1$ mudstone caprock and research significance in Wuerxun Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 269–273.

(编辑 董立)