

文章编号:1673-5005(2015)03-0030-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2015.03.004

断裂带盖层油气封盖断接厚度下限的 预测方法及其应用

付广,王浩然,胡欣蕾

(东北石油大学地球科学学院,黑龙江大庆163318)

摘要:在含油气盆地盖层未被断裂完全错开的条件下,采用断层岩石封闭能力与下伏储层岩石封闭能力比较的研究方法,建立一套盖层封闭油气所需断接厚度下限的预测方法,并将其应用于南堡凹陷南堡1号构造,研究馆三段火山岩盖层封闭下伏东一段油气所需断接厚度下限。结果表明:馆三段火山岩盖层在 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 断裂处封闭油气所需断接厚度均小于实际盖层的断接厚度,因此对下伏东一段储层中的油气均是封闭的,这与目前东一段油气分布有着较好的吻合关系;该方法用于研究盖层封闭油气所需断接厚度下限是可行的。

关键词:盖层;断接厚度;预测方法;南堡1号构造;馆三段;火山岩盖层

中图分类号:TE 121.2 **文献标志码:**A

引用格式:付广,王浩然,胡欣蕾.断裂带盖层油气封盖断接厚度下限的预测方法及其应用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):30-37.

FU Guang, WANG Haoran, HU Xinlei. Prediction method and application of caprock faulted-contact thickness lower limit for oil-gas sealing in fault zone [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 30-37.

Prediction method and application of caprock faulted-contact thickness lower limit for oil-gas sealing in fault zone

FU Guang, WANG Haoran, HU Xinlei

(College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Under the condition that caprock was not completely disconnected by fault in oil-gas bearing basins, a prediction method of caprock faulted-contact thickness lower limit for oil-gas sealing was established by comparing the sealing ability of fault rock and underlying reservoir rock. The method was applied to the No. 1 structure of Nanpu sag, where a prediction on the lower limit of the Ng_3 volcanic caprock faulted-contact thickness for sealing the oil-gas in underlying Ed_1 was made. The results indicate that the caprock faulted-contact thickness required by oil-gas sealing at fault f_1 , f_2 , f_3 and f_4 are all less than the actual faulted-contact thickness of Ng_3 volcanic caprock, thus oil-gas are all sealed in the underlying Ed_1 reservoir, which is consistent with the current oil-gas distribution in the Ed_1 . This method is thus applicable to study the caprock faulted-contact thickness lower limit required by oil-gas sealing.

Keywords: caprock; faulted-contact thickness; prediction method; No. 1 structure of Nanpu; Ng_3 ; volcanic caprock

随着油气勘探的深入,人们对盖层在油气聚集与分布中所起作用的认识逐渐深入。盖层不仅在一定程度上控制着含油气盆地或凹陷油气聚集的空间分布,而且控制着油气聚集的数量^[1]。在断裂带地区,盖层对油气聚集与分布的控制作用不仅受到自身发育特征的影响,更受到后期断裂对盖层破坏作

用的影响。断裂对盖层的破坏不仅表现在空间分布连续性上,也表现在盖层封闭能力上,二者之间又是相互联系的^[2]。如果断裂将盖层完全错开(即断裂断距大于盖层厚度),那么盖层不仅失去空间分布的连续性,还会失去对油气的封闭能力,对油气聚集与分布将不再起作用。相反,如果断裂虽然错断了

收稿日期:2014-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41372153,41372154);东北石油大学研究生创新科研项目(YJSCX2014-007NEPU)

作者简介:付广(1962-),男,教授,博士生导师,从事油气藏形成与保存研究。E-mail:fuguang2008@126.com。

盖层,但并未将其完全错开(断裂断距小于盖层厚度),那么盖层仍然可以在一定程度上保持横向分布的连续性,只是盖层断接厚度(盖层厚度减去断裂断距)较原始盖层厚度明显变小,盖层封闭能力也因断裂错断形成的断层岩而降低,对油气聚集与分布所起的作用明显降低^[2-8]。在这种情况下,盖层还能否对油气聚集与分布起到封闭作用关键取决于盖层断接厚度。盖层断接厚度越大,横向分布的连续性越好,断层岩泥质成分越高,盖层封闭油气能力越强;反之则越弱^[3]。能否准确地确定出盖层封闭油气所需要断接厚度的下限值,是正确认识含油气盆地,特别是在断裂带地区油气分布规律的关键。

虽然前人曾对盖层封油气所需断接厚度的下限值进行过研究和探讨^[2-8],但这些研究主要是通过海拉尔盆地贝尔凹陷和渤海湾盆地南堡凹陷已知井泥岩盖层上下油气分布与盖层断接厚度之间关系统计,将盖层之上无油气分布井的最小盖层断接厚度作为其封油气的下限值,所确定出的盖层封油气所需断接厚度下限值对认识南堡凹陷中浅层油气分布规律起到了非常重要的作用。然而,文献[2-8]中这种方法得到的盖层封闭油气所需断接厚度的下限值由于受到勘探程度的影响,其值与地下真值并不一致,油气勘探程度越高,其值可能越接近真值,反之二者差值越大。由此看出,这种方法确定出的盖层封闭油气所需断接厚度的下限值只具统计意义,缺少理论依据,这不利于对含油气盆地或凹陷油气分布规律正确认识。开展盖层封油气所需断接厚度下限的预测方法研究,对于正确认识含油气盆地或凹陷油气分布规律和指导油气勘探均具有重要意义。

1 盖层断接厚度及其确定方法

所谓盖层断接厚度是当盖层被断裂破坏后,断层两盘盖层被错开,彼此仍对接的那部分厚度,如图1所示,其值取决于断裂断距和盖层厚度的相对大小,可由图1中的几何关系求得:

$$H_f = H - L \quad (1)$$

式中, H_f 为盖层断接厚度,m; H 为盖层厚度,m; L 为断距,m。

由式(1)可知,盖层厚度越大,断裂断距越小,盖层被断裂错断后的断接厚度越大;反之则越小。要研究盖层的断接厚度,就必须首先获得盖层厚度和断距。盖层厚度可以通过钻井数据获取,但由于钻井所获得的盖层厚度并非盖层的真厚度,而是铅直厚度,所以盖层真厚度可由图1中的几何关系求得:

$$H = h \cos \alpha \quad (2)$$

式中, h 为盖层铅直厚度,m; α 为盖层倾角,(°)。

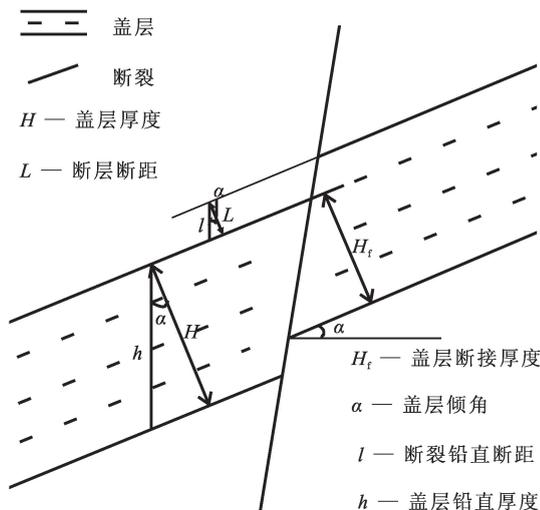


图1 盖层断接厚度与盖层厚度、断距之间关系

Fig.1 Relationship between faulted thickness of caprock, thickness of caprock and fault distance

断裂断距可以通过经过时深转化的三维地震剖面或构造图上直接量取,但通常情况下是读取铅直断距,并不是断裂的真断距,所以断裂断距也可由图1中的几何关系求得:

$$L = l \cos \alpha \quad (3)$$

式中, l 为断裂铅直断距,m。

2 盖层封闭油气所需断接厚度下限的预测方法

当断裂未将盖层错开时,虽然盖层仍保持横向分布的连续性,但由于断裂的破坏作用,使盖层出现薄弱带——断裂带。断裂带中的断层岩与盖层岩石相比:①泥质含量变低,这是因为断层岩中除了盖层岩石的泥岩成分充填外,还有两盘砂岩成分的充填,二者在断层岩中的混合结果使其泥质含量较盖层变低;②压实成岩程度变低,这首先表现在压实成岩作用时间上,因为断层岩只有断裂停止活动后,方可开始压实成岩,其压实成岩作用时间明显晚于与其具有相同埋深盖层岩石的压实成岩作用时间^[9];其次还表现在压实成岩作用压力上,由于断裂处于倾斜状态,断层岩压实成岩受到的压力应为相同埋深盖层岩石压实成岩压力在垂直于断层方向的分力,明显小于盖层岩石压实成岩压力^[9]。正是上述这两点差异造成断层岩封闭能力(排替压力)明显较盖层岩石封闭能力(排替压力)降低^[10]。此种情况下盖层是否能封闭住下伏储层岩石中的油气,已不再取决于盖层岩石排替压力,而是取决于断层岩排替压力,如果

断层岩排替压力大于或等于下伏储层岩石排替压力,盖层就可以封闭住下伏储层中的油气;相反,如果断层岩排替压力小于下伏储层岩石排替压力,盖层则不能封闭下伏储层中的油气。由此可以得到,被断裂错断的盖层要封闭住其下储层中的油气,其必须满足条件

$$P_{df} \geq P_{dr} \tag{4}$$

式中, P_{df} 为盖层中断层岩排替压力, P_{dr} 为下伏储层岩石排替压力, MPa。

由式(4)中可以看出,要确定盖层封闭油气所需断接厚度的下限值,必须先确定断层岩和下伏储层岩石的排替压力,再建立它们与盖层断接厚度之间的关系。如果将断裂视为断裂后期活动形成的倾置于沉积岩地层中的由断层岩构成的倾斜岩层,那么就可以按沉积岩地层岩石排替压力的研究方法^[11]研究断层岩排替压力。大量实测数据统计结果^[12]表明,沉积岩石排替压力大小主要受到其成分(泥质含量)和压实成岩埋深(若上覆地层无明显的抬升剥蚀,可用其现今埋深表示)的影响,泥质含量越高,埋深越大,沉积岩石排替压力越大;反之则越小。沉积岩石排替压力与泥质含量和埋深之间的经验函数关系^[12]为

$$P_s = ae^{bzR_s} \tag{5}$$

式中, P_s 为沉积岩石的排替压力, MPa; Z_s 为沉积岩石压实成岩埋深, m; R_s 为沉积岩石中的泥质含量; a, b 为与地区有关的常数,主要受到沉积岩埋深和岩性的影响。

由式(5)根据下伏储层岩石的埋深(条件是上覆地层无明显的抬升剥蚀)和泥质含量(可利用自然伽马测井资料利用文献^[13]中泥质含量预测公式计算得到)便可以求取其排替压力值。用式(5)求取断层岩的排替压力,必须先确定断层岩泥质含量和压实成岩埋深。断层岩中的泥质成分通常可以认为来自被断裂错断的两盘地层岩石,被错断的两盘地层岩石中泥质成分越高,充填在断层岩中的泥质成分也就越高;反之则越低。为了简化和建立断层岩排替压力与盖层断接厚度之间的关系,假设断层岩中的泥质成分只来自断层两盘被错断的地层岩石,且均匀地充填在断层岩中,将图2中 H_f+2L 作为断裂带的拉开空间,两盘 $2H$ 厚的泥岩盖层的破碎物质均匀地落入断裂带中,便可得到在断裂未完全将盖层错开的条件下断层岩平均泥质含量与盖层断接厚度之间的关系:

$$R_f = \frac{H}{H_f+2L} \tag{6}$$

式中, R_f 为断层岩泥质含量。

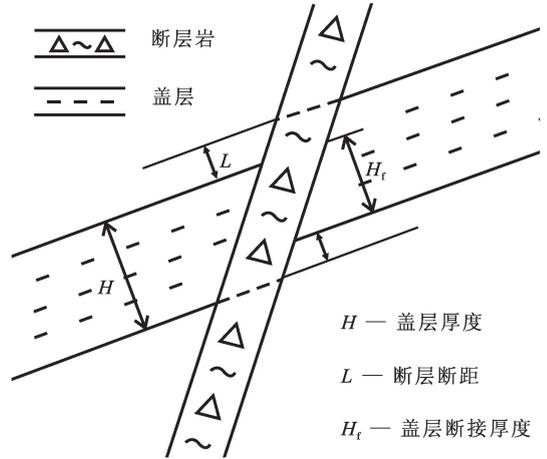


图2 断层岩泥质含量预测模型
Fig. 2 Prediction model diagram of mudstone content in fault-rock

由式(6)中可以看出,断层岩泥质含量与盖层厚度成正比,与盖层断接厚度和断距成反比。利用盖层厚度、断接厚度和断裂断距由式(6)便可以近似地计算得到断层岩中的泥质含量。断层岩的压实成岩埋深是其压实成岩程度的反映,其受到压实成岩压力和压实成岩作用时间的影响,按照正常沉积岩压实成岩机制,断层岩所受到的压实成岩压力应为上覆岩层骨架重量的正压力^[14](因断层岩上下地层孔隙水是连通的,上覆地层水对断层岩的压力被下伏地层孔隙水所承担)为

$$N_f = (\rho_r - \rho_w) g Z \cos \theta \tag{7}$$

式中, N_f 为断层岩所受到的正压力, MPa; Z 为断层岩埋深, m; θ 为断裂倾角, ($^\circ$); ρ_r 为沉积岩平均密度, g/cm^3 ; ρ_w 为地层水密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

相同埋深条件下,盖层岩石所受到的压实成岩压力也为上覆沉积载荷重量产生的正压力^[14],即

$$N_c = \rho_r Z_c g \tag{8}$$

式中, N_c 为与断层岩具有相同埋深盖层所受到的正压力, MPa; Z_c 为盖层的埋深, m。

断层岩的压实成岩开始时间应从断裂停止活动算起,直至现今或某一时,明显晚于与其具有相同埋深盖层岩石的压实成岩作用时间。根据断层岩和具有相同埋深盖层岩石之间压实成岩压力大小与作用时间之间的比例关系,便可以得到断层岩的压实成岩埋深^[14],即

$$Z_f = \frac{(\rho_r - \rho_w) T_f Z_c \cos \theta}{\rho_r T_c} \tag{9}$$

式中, Z_f 为断层岩压实成岩埋深, m; T_f 为断层岩压

实成岩作用时间, Ma; T_c 为与断层岩具有相同埋深的盖层压实成岩作用时间, Ma。

将根据上式确定出的 R_f 和 Z_f 代入式(5)中便可以得到断层岩排替压力, 再将获得的断层岩和下伏储层岩石的排替压力代入式(4)中, 便可以得到盖层垂向封闭油气的条件:

$$R_f Z_f \geq R_r Z_r \quad (10)$$

式中, R_r 为下伏储层岩石泥质含量; Z_r 为下伏储层岩石埋深, m。

通过求解上述方程便可以得到盖层封闭油气所需断接厚度的下限值(H_{\min})的计算公式为

$$H_{\min} = \frac{\rho_r - \rho_w}{\rho_r} \frac{T_c}{T_f} H \cos \theta - 2L \quad (11)$$

由式(11)中可以看出, 盖层封闭油气所需断接厚度的下限值受到多种因素的影响, 与盖层厚度和其压实成岩作用时间成正比, 与断层断距、倾角和压实成岩作用时间成反比。它并非是一个定值, 而是随其影响因素的改变而改变。

只要实际盖层断接厚度大于或等于其封闭油气所需断接厚度的下限值, 则盖层对下伏储层中油气封闭; 否则不能形成封闭。

3 实例应用

如上所析, 要准确预测研究断裂带地区盖层封盖的有效性, 理论上可以通过盖层厚度、压实成岩时间和断裂倾角、断距和压实成岩时间由式(11)计算盖层封闭油气所需断接厚度下限来完成, 但实际研究过程中, 需要分析的参数很多, 这些参数的准确获取均会影响到这一研究方法的有效性。通过实例分析该研究方法的应用。

如图3, 选取渤海湾盆地南堡1号构造馆三段火山岩盖层为例, 利用上述方法确定其被 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 这4条断裂破坏后封闭油气所需断接厚度的下限值, 并通过其与实际断接厚度比较以及与油气分布之间关系分析, 验证该方法用于定量研究盖层封闭油气所需断接厚度下限值的可行性。

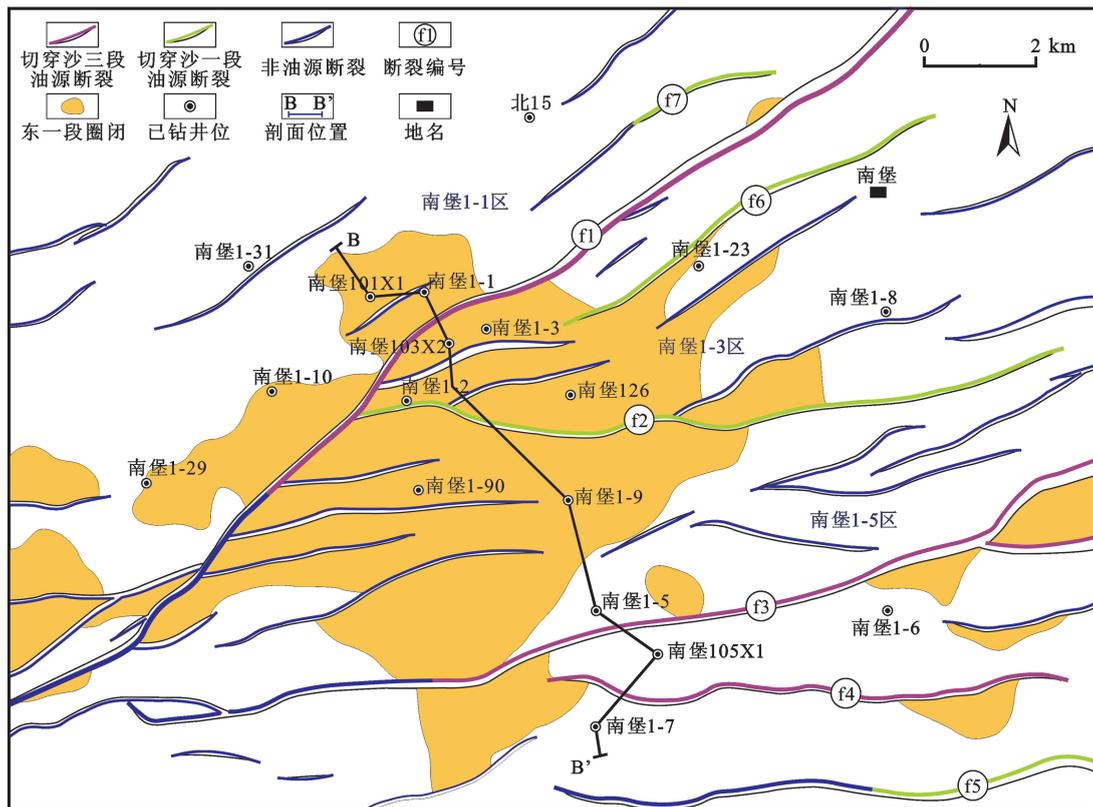


图3 南堡1号构造带平面展布

Fig. 3 Plane distribution chart of No. 1 structure zone of Nanpu sag

南堡1号构造位于南堡凹陷的西南斜坡上, 构造形态总体上为一发育在潜山背景之上被断层复杂化的披覆背斜构造, 构造走向为北东方向, 被北东向及近南北向的断层切割复杂化, 断层平面分布呈“帚状”展布(图3), 以 f_1 和 f_2 断裂为界, 可将

南堡1号构造大体分为3个区, f_1 断裂上升盘为南堡1-1断块区, f_1 和 f_2 断裂所夹区域为南堡1-3断块区, f_2 断裂以南为南堡1-5鼻状构造区。该构造自下而上发育有古近系沙河街组、东营组, 新近系馆陶组、明化镇组和第四系。该构造油气资

源丰富,从下部东三段至上部明下段皆有油气分布,但油气主要分布在东一段。油气源对比结果^[15]表明,南堡1号构造油气主要来源于下伏沙三段或沙一段—东三段源岩。东一段砂岩储层油气的盖层主要是馆三段发育的大套火山岩(其岩性为沉凝灰岩,具有与泥岩相似的孔渗性,岩石中凝灰质成分含量越高,孔渗性越差;反之则越高,

故可将凝灰质当成泥质来研究其对盖层封闭性的影响)盖层,厚度为100~550 m^[16]。f₁、f₂、f₃、f₄ 4条大断裂皆错断了馆三段地层,如图4所示,但并未将馆三段火山岩盖层完全错开,失去横向分布的连续性,如图5所示。馆三段火山岩盖层目前的断接厚度能否封闭下伏东一段中的油气,是南堡1号构造东一段油气成藏与保存的一个关键。

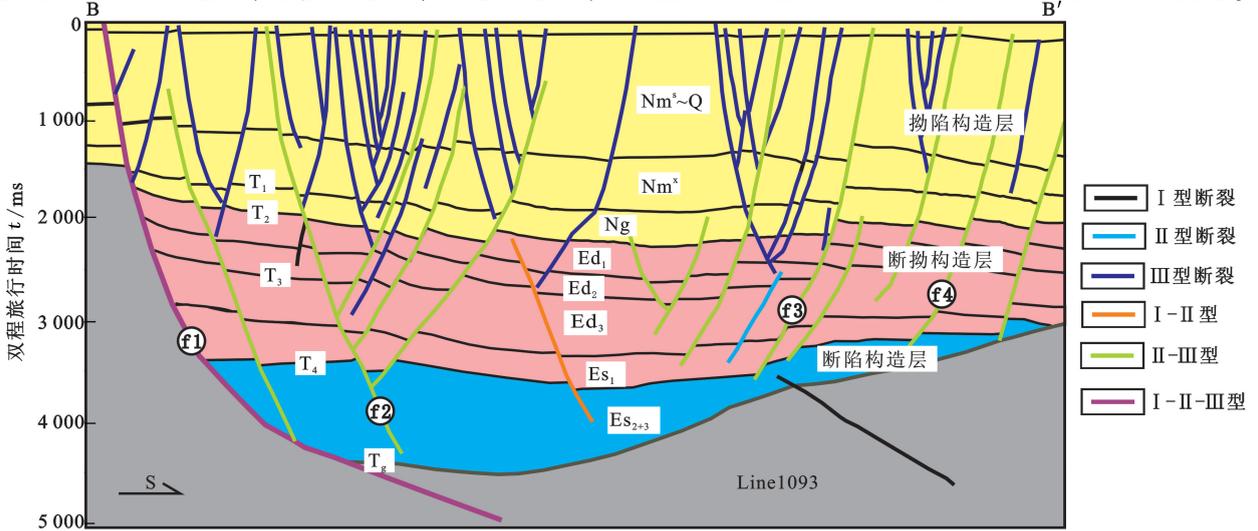


图4 南堡1号构造 f₁、f₂、f₃、f₄ 断裂剖面示意图

Fig. 4 Sectional schematic drawing of fault f₁, f₂, f₃ and f₄ in No. 1 structure zone of Nanpu sag

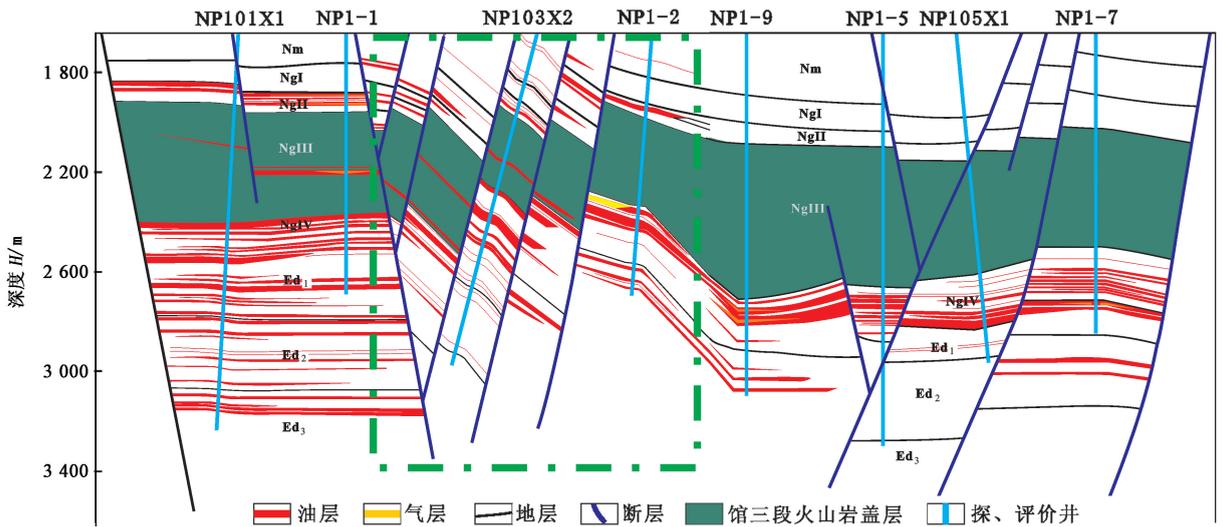


图5 南堡凹陷1号构造盖层与油气分布关系示意图

Fig. 5 Sketch map of relation between caprock and oil-gas distribution in No. 1 structure of Nanpu sag

由图3和图4中可以看出, f₁ 断裂为北东走向展布,贯穿整个南堡1号构造,断裂延伸长度为20 km,断裂倾角为60°,上陡下缓,断距一般为200 m。f₂ 断裂为近东西向展布,横穿南堡1号构造中东部,断裂延伸长度为13 km,断裂倾角为70°,上陡下缓,断距一般为50 m。f₃ 断裂为北东东向展布,贯穿南堡1号构造中南部,断裂延伸长度为18 km,断裂倾

角为65°,上陡下缓,断距一般为120 m。f₄ 断裂为东西向展布,位于南堡1号构造东南部,断裂延伸长度为10 km,断裂倾角为60°,上陡下缓,断距一般为60 m。由图4中可以看出,4条断裂皆为长期继承性发育的断裂,除 f₁ 断裂向下断至基岩,其他3条断裂皆从沙三段一直断至上部第四系,皆为下伏沙三段或沙一段—东三段源岩生成油气向上覆东一段

运移的输导通道。

由 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 条断裂在馆三段火山岩盖层中的倾角、断距、开始压实成岩作用时间(明化镇组沉积晚期)、馆三段火山岩盖层压实成岩作用时间、厚度、东一段储层岩石泥质含量(可利用自然伽马测井曲线资料由文献[13]中泥质含量预测公式计算求得)(表 1),由式 9 对南堡 1 号构造馆三段火山岩盖层在 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 条主要断裂处封闭油气所需断接厚度的下限值进行计算,结果如表 1 所示。由表 1 中可以看出,馆三段火山岩盖层在 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 条断裂处封闭油气所需的断接厚度下限分别是 85.44、114.64、183.50 和 184.30 m。它们均小于 4 条断裂在馆三段火山岩盖层处目前实际的断接厚度

(表 1),表明馆三段火山岩盖层在 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 处对下伏东一段油气均是封闭的,这可能是南堡 1 号构造目前在东一段找到大量油气的一个重要原因。虽然由图 3 中可以看出 f_3 、 f_4 处目前在东一段没有油气分布,但这并不是盖层原因,可能是圈闭不发育和油气供给不足等原因造成的。另外本文中所计算得到的馆三段火山岩盖层封闭油气所需断接厚度的下限值(55 ~ 130 m)也明显不同于利用统计方法得到的馆三段火山岩盖层封闭油气所需断接厚度的下限值^[2](图 6 中的 130 ~ 150 m),较其值偏低。表明理论计算值较统计值要小,说明统计值偏大,这是因为统计值不能去掉由油气发生侧向运移所造成的影响,理论计算值是不同井处盖层封闭油气所需断接厚度,

表 1 南堡 1 号构造馆三段火山岩盖层封闭油气所需断接厚度下限及其参数计算

Table 1 Lower limit of faulted thickness required by Ng₃ volcanic caprock oil-gas sealing and its parameter calculation in No. 1 structure zone of Nanpu sag

断层号	断层倾角 $\theta/^\circ$	铅直断距 l/m	真断距 L/m	铅直盖层厚度 h/m	盖层真厚度 H/m	盖层倾角 $\alpha/^\circ$	东一段储层泥质含量 $R_f/\%$	断层岩压实成岩作用时间 T_f/Ma	与断层岩具相同埋深盖层压实成岩作用时间 T_e/Ma	盖层封闭油气所需断接厚度下限值 H_{min}/m	盖层实际断接厚度 m
f_1	65.93	108.00	98.58	185.06	184.02	6.07	17	24.0	23.8	55.63	85.44
f_2	61.83	246.00	216.80	333.03	331.44	4.09	19	25.3	23.8	63.36	114.64
f_3	64.42	101.04	91.11	274.94	274.61	2.82	22	24.3	23.8	130.21	183.50
f_4	70.37	60.62	57.08	245.77	241.38	10.84	20	23.8	23.8	116.16	184.30

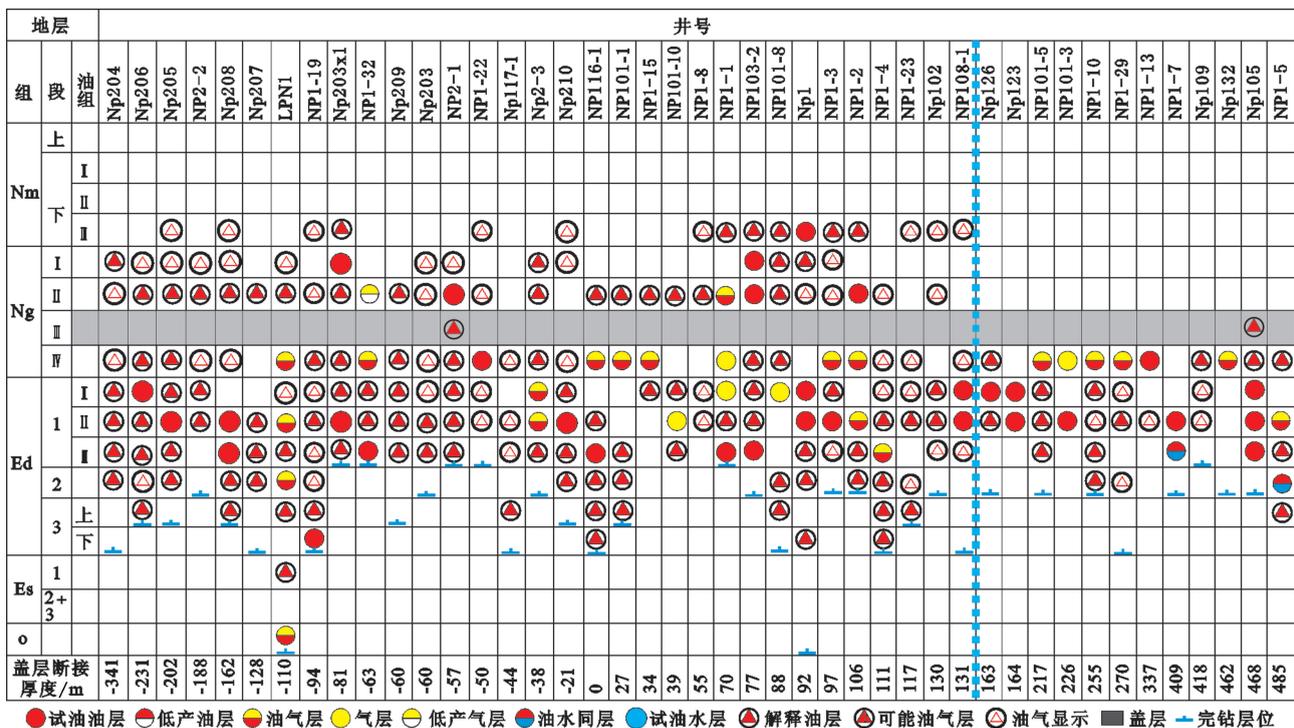


图 6 南堡凹陷馆三段火山岩盖层断接厚度与油气纵向分布关系

Fig. 6 Relation between effective thickness of Ng₃ volcanic caprock faulted and oil-gas distribution in Nanpu sag

其值在各井处是不同的,而统计值一个地区只能给出一个值,这无疑不符合地下的实际情况。从这一

点上看,用本文方法确定出的盖层封闭油气所需断接厚度下限值应更接近地下真值。

4 研究方法有效性分析

由上述应用结果可知,本文中方法在预测断裂带地区盖层封盖的有效性时是有条件的,首先该方法只能预测泥岩或凝灰岩盖层,不能预测膏盐岩、碳酸盐岩和火山侵入岩盖层,因为这3类盖层内断层岩泥质含量不能用盖层厚度、断接厚度和断距预测,而且其盖层岩石排替压力也不受压实成岩埋深、泥质含量的影响,所以不能利用上述方法预测盖层封闭油气所需断接厚度的下限值,也就不能预测断裂带地区盖层封盖的有效性。其次,该方法只能适用于正断层,因为只有正断层的断层岩中泥质含量才会完全来自断层两盘的泥岩地层,而逆断层的断层岩中泥质含量除了来自断层两盘泥岩地层,还会来自断裂活动过程中被断裂错动形成的泥质成分,故不能利用上述方法预测断层岩泥质含量和盖层封闭油气所需断接厚度的下限值,也就无法预测断裂带地区盖层封盖的有效性。由上述分析不难看出,该方法应主要适用于中国东部张性碎屑岩盆地,而不适用于中国西部挤压性碳酸盐岩盆地。

5 结论

(1)当断裂未将盖层完全错开时,盖层断接厚度是决定其是否封闭油气的根本原因,它不仅影响着盖层空间分布的连续性,而且影响着盖层封闭油气能力。

(2)盖层封闭油气所需断接厚度的下限值并非是一个固定值,它受到各种因素的影响,既有来自断裂本身特征的影响,又有盖层和下伏储层特征的影响。

(3)该方法用于研究盖层封闭油气所需断接厚度的下限是可行的,但须注意其只能应用于中国东部张性碎屑岩盆地中泥岩或凝灰岩盖层,而不能用于中国西部挤压性盆地碳酸盐岩或膏盐岩盖层。

参考文献:

- [1] 付广,付晓飞,吕延防. 盖层对油气聚集的控制作用[J]. 天然气地球科学,1999,10(5):17-22.
FU Guang, FU Xiaofei, LÜ Yanfang. The controlling of caprock to oil-gas accumulation[J]. Natural Gas Geoscience,1999,10(5):17-22.
- [2] 付广,杨敬博. 断盖配置对沿断裂运移油气的封闭作用:以南堡凹陷中浅层为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2013,38(4):783-791.
FU Guang, YANG Jingbo. Sealing of matching between

fault and caprock to oil-gas migration along fault: an example from middle and shallow strata in Nanpu Depression[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences,2013,38(4):783-791.

- [3] 吕延防,万军,沙子萱,等. 被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J]. 地质科学,2008,43(1):162-174.
LÜ Yanfang, WAN Jun, SHA Zixuan, et al. Evaluation method for seal ability of cap rock destructed by faulting and its application [J]. Chinese Journal of Geology, 2008,43(1):162-174.
- [4] 孙永河,赵博,董月霞,等. 南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质,2013,34(4):540-549.
SUN Yonghe, ZHAO Bo, DONG Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(4):540-549.
- [5] 牟敦山,李润琪,孙源,等. 贝尔凹陷大一段下旋回泥岩盖层内断层垂向封闭性评价[J]. 大庆石油学院学报,2010,34(3):1-5.
MU Dunshan, LI Runqi, SUN Yuan, et al. Vertical sealing ability evaluation of faults in mudstone caprock of D1 member lower cycle in Beier Depression [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute,2010,34(3):1-5.
- [6] 孙青,高平,赵新国,等. 东濮凹陷深层气泥岩盖层封闭性研究[J]. 内蒙古石油化工,2004,30(4):89-91.
SUN Qing, GAO Ping, ZHAO Xinguo, et al. Research on sealing ability of mudstone caprock to deep reservoir gas in Dongpu sag [J]. Inner Mongolian Petrochemical Industry,2004,30(4):89-91.
- [7] 刘性全,侯吉瑞,付博. 断—盖时空匹配及其对油气聚集与分布的控制作用:以南堡凹陷中浅层东营组为例[J]. 东北石油大学学报,2013,37(1):8-15.
LIU Xingquan, HOU Jirui, FU Bo. Controlling of time and space match in fault transporting oil-gas and caprocks to oil and gas accumulation and distribution; an example from middle and shallow strata in Nanpu Depression [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013,37(1):8-15.
- [8] LIU Yuming, ZHANG Yingying. Research on fault controlling petroleum accumulation in Nanpu Sag [J]. Telkonnika, 2013,11(4):2231-2238.
- [9] 吕延防,沙子萱,付晓飞,等. 断层垂向封闭性定量评价方法及其应用[J]. 石油学报,2007,28(5):34-38.
LÜ Yanfang, SHA Zixuan, FU Xiaofei, et al. Quantitative evaluation method for fault vertical sealing ability and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(5):

- 34-38.
- [10] 史集建,付广,吕延防,等. 歧口凹陷沙河街组一段中部区域盖层封气能综合评价[J]. 石油与天然气地质,2011,32(5):659-681.
SHI Jijian, FU Guang, LÜ Yanfang, et al. Comprehensive evaluation of regional seal in the middle of the first member of Shahejie Formation in the Qikou Sag[J]. Oil and Gas Geology,2011,32(5):659-681.
- [11] 付广,史集建,吕延防. 断层侧向封闭性定量研究方法的改进[J]. 石油学报,2012,33(3):414-418.
FU Guang, SHI Jijian, LÜ Yanfang. An improvement in quantitatively studying lateral seal of faults[J]. Acta Petrolei Sinica,2012,33(3):414-418.
- [12] 史集建,李丽丽,付广,等. 盖层内断层垂向封闭性定量评价方法及应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2012,42(增2):162-170.
SHI Jijian, LI Lili, FU Guang, et al. Quantitative evaluation method and application of vertical sealing property of faults in caprock[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2012,42(sup 2):162-170.
- [13] 吴国平,苏江玉,成实,等. 基于自然伽马测井信号的维纳滤波法求取泥质含量[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2008,33(4):572-576.
WU Guoping, SU Jiangyu, CHENG Shi, et al. A method for obtaining shaliness using Wiener filtering based on logging data natural Gamma ray [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences,2008,33(4):572-576.
- [14] 付广,杨勉,吕延防,等. 断层古侧向封闭性定量评价方法及其应用[J]. 石油学报,2013,34(增1):78-83.
FU Guang, YANG Mian, LÜ Yanfang, et al. A quantitative evaluation method for ancient lateral sealing of fault[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(sup 1):78-83.
- [15] 朱光有,张水昌,王拥军,等. 渤海湾盆地南堡大油田的形成条件与富集机制[J]. 地质学报,2011,85(1):97-113.
ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, WANG Yongjun, et al. Forming condition and enrichment mechanism of the Nanpu Oilfield in the Bohai Bay Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica,2011,85(1):97-113.
- [16] 付广,郭玉超,董亚南,等. 南堡凹陷油气成藏的有利地质条件[J]. 油气地质与采收率,2013,20(3):1-4.
FU Guang, GUO Yuchao, DONG Yanan, et al. Favorable geological conditions for oil and gas accumulation in Nanpu depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2013,20(3):1-4.

(编辑 徐会永)