

doi:10.3799/dqkx.2017.514

# 被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史恢复方法及其应用

付 广, 李世朝

东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318

**摘要:**前人研究泥岩盖层封闭性时并没有考虑断裂的破坏程度,且对已被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史的研究目前尚未见到文献报道,而这些问题对含油气盆地断裂发育区油气勘探至关重要。在被断裂破坏泥岩盖层封闭机理及其封闭演化特征研究的基础上,通过比较泥岩盖层断接厚度与其封油气所需的最小断接厚度的相对大小,将被断裂破坏泥岩盖层封闭分为未被断裂破坏和已被断裂破坏泥岩盖层封闭2种,并通过泥岩盖层和断层岩古排替压力恢复,确定泥岩盖层封闭能力形成距今时间、断层岩开始压实成岩距今时间和封闭能力形成距今时间,建立了一套被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史的恢复方法,并将其应用于渤海湾盆地南堡5号构造被 $f_2$ 断裂破坏东二段泥岩盖层封闭性演化史的恢复中。结果表明:在 $L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$ 和 $L_9$ 测线处, $f_2$ 断裂未破坏东二段泥岩盖层封闭,仍是东二段泥岩盖层封闭,其封闭性演化经历了不封闭和封闭阶段,目前具有较强的封闭能力。在 $L_2$ 和 $L_8$ 测线处 $f_2$ 断裂已破坏了东二段泥岩盖层封闭,为 $f_2$ 断裂断层岩封闭,其封闭能力演化经历了压实不封闭、成岩不封闭和成岩封闭3个阶段,目前也已具较强封闭能力,均有利于油气在东二段泥岩盖层之下储层中聚集与保存。与目前东二段泥岩盖层之下储层中已发现油气分布相吻合,表明该方法用于恢复被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史是可行的。

**关键词:**泥岩盖层; 断裂破坏; 封闭性; 演化史; 恢复方法; 石油地质。

中图分类号: P631.8

文章编号: 1000-2383(2017)09-1590-09

收稿日期: 2016-12-12

## Restoration Method of Closed Evolution History of Fractured Mudstone Cap Rock and Its Application

Fu Guang, Li Shizhao

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

**Abstract:** The failure degree of mudstone caprock was not considered in the previous study, and the study on the evolution history of the sealing characteristics of fractured mudstone caprock has not been reported in the literature, however, these problems are very important for oil and gas exploration in fault development area of petrolierous basin. On the basis of the study of the sealing mechanism and the closed evolution characteristics of fractured mudstone cap rock, by comparing the relative size of the fault contact thickness of the mudstone cap rock and the minimum fault contact thickness required for sealing oil and gas, the fractured mudstone cap rock sealing type is divided into 2 kinds, including non-fractured and fractured mudstone cover. And the mudstone cap rock sealing formation time, fault rock compaction time and sealing capacity formation time were determined by recovering the ancient displacement pressure of mudstone cap rock and fault rock. A restoration method of the closed evolution history of fractured mudstone cap rock is established, then it was applied on the restoration of closed evolution history of the fractured mudstone cap rocks damaged by  $f_2$  fault of  $Ed_2$ , Nanpu 5 structure, Bohai Bay basin. The results show that fault  $f_2$  did not destroy the  $Ed_2$  mudstone cap rock sealing ability in  $L_1$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$ ,  $L_6$ ,  $L_7$  and  $L_9$  test line, and is still mudstone cap rock sealing of  $Ed_2$ , its closed evolution has experienced non-closed and closed phases. At present, it has strong sealing ability. The  $Ed_2$  mudstone cap rock sealing in  $L_2$  and  $L_8$  test lines was destroyed by fault  $f_2$ , its sealing ability comes from  $f_2$  fault rock, the evolution of its sealing ability has experienced 3 stages: compaction period not closure, diagenetic period

基金项目:国家自然基金项目(No.41372153)。

作者简介:付广(1962—),男,教授,博士生导师,现从事油气藏形成与保存研究。ORCID:0000-0003-3760-9162。E-mail: fuguang2008@126.com

引用格式:付广,李世朝,2017.被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史恢复方法及其应用.地球科学,42(9):1590-1598.

not closure and diagenetic period closure. At present, it has a strong ability of closure, which is favorable for the accumulation and preservation of oil and gas in the reservoir under the mudstone caprock of  $Ed_2$ . The prediction results are consistent with the discovered oil and gas distribution in the reservoir under the  $Ed_2$  mudstone cap rock, which shows this method is feasible to restore the closed evolution history of mudstone cap rock.

**Key words:** mudstone cap rock; fracture failure; sealing property; evolution history; recovery method; petroleum geology.

## 0 引言

油气勘探的实践表明,在含油气盆地中任何一套泥岩盖层形成后,或多或少会受到断裂的破坏,只是被破坏程度不同而已。由于泥岩盖层被断裂破坏程度不同,其封闭油气机理及能力的演化特征不同,对油气聚集与保存所起的作用也就不同。能否正确认识此问题,对含油气盆地断裂发育区油气勘探至关重要。关于被断裂破坏泥岩盖层封闭性前人曾做过一定研究和探讨(Andersson *et al.*, 1991; Bolton *et al.*, 1998; 吕延防等, 2008; Childs *et al.*, 2009; Welch *et al.*, 2009; 袁玉松等, 2011; 秦建中等, 2013; 付晓飞等, 2015),认为被断裂破坏后泥岩盖层的封闭性已不再取决于其本身,而应取决于断裂的封闭性,而断裂的封闭性则主要取决于断层岩的排替压力。在假设断裂为倾置于围岩中的岩层的基础上,通过确定断层岩压实成岩埋深(付广等, 2013)和泥质含量(Schmatz *et al.*, 2010),再利用围岩实测排替压力及其压实成岩埋深和泥质含量之间经验关系,便可以求得断层岩排替压力,最后根据断层岩排替压力大小,便可对被断裂破坏泥岩盖层封闭性进行评价(付广和杨勉, 2000; 牟敦山等, 2011; 付广等, 2012; 周雁等, 2012)。这些研究成果对正确认识含油气盆地断裂发育区油气分布规律起到了非常重要的作用。然而,这些研究在探讨泥岩盖层封闭性时并没有考虑断裂的破坏程度,将未被断裂破坏的泥岩盖层的封闭性也按已被断裂破坏泥岩盖层封闭性进行研究,使其研究结果明显不符合地下的实际情况,给油气勘探带来风险。此外,前人虽对未被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史进行了研究(李双建等, 2011; 卓勤功等, 2013),但对已被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史的研究目前尚未见到文献报道,这些均不利于含油气盆地断裂发育区油气勘探的深入。因此,开展被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史恢复方法研究,对于正确认识含油气盆地断裂发育区油气分布规律和指导油气勘探均具有重要意义。

## 1 被断裂破坏泥岩盖层封油气机理及其封闭性演化特征

被断裂破坏泥岩盖层封油气机理主要取决于其被断裂破坏程度,如果泥岩盖层断接厚度(残留厚度,其大小等于泥岩盖层厚度减去断裂断距)大于或等于其封油气所需的最小断接厚度,那么断裂在泥岩盖层内上下分段生长不连接(Kim and Sanderson, 2005; 刘哲等, 2012),不能破坏泥岩盖层封闭性,仍是泥岩盖层封闭油气,其实例可详见付广等(2016)报道的松辽盆地三肇凹陷青一段泥岩盖层;相反,如果泥岩盖层断接厚度小于其封油气所需的最小断接厚度,那么断裂在泥岩盖层内上下分段生长连接,破坏了泥岩盖层封闭性,此种情况下已不再是泥岩盖层封闭油气,而应是断层岩封闭油气。

泥岩盖层本身并非一经沉积就具有封油气能力,而是随着埋深增加,压实成岩作用增强,孔渗性逐渐降低,排替压力逐渐增大到一定程度(等于1 MPa)时,开始形成封闭能力(周心怀等, 2009; 胡明等, 2010; 吴伟涛等, 2011; 段威等, 2015; 汤建荣等, 2016)。其封闭能力演化可以分为2个阶段(图1a):第1个阶段为不封闭阶段,该时段从沉积开始至封闭能力形成距今时间,泥岩盖层埋深相对较浅,孔渗性相对较高,排替压力相对较低,小于1 MPa,未形成封闭能力;第2个阶段为封闭阶段,该阶段从封闭形成距今时间至现今,泥岩盖层埋藏相对较深,孔渗性相对较低,排替压力相对较高,已大于1 MPa,形成封闭能力。如果断裂破坏泥岩盖层,但其断接厚度大于或等于其封油气所需的最小断接厚度,其封闭机理及能力不变,仍按图1a进行演化。如果断裂破坏泥岩盖层,且其断接厚度小于其封油气所需的最小断接厚度,其封闭性已被破坏,不再是泥岩盖层封闭,而是断层岩封闭,断层岩封闭性的演化可以划分为3个阶段,如图1b所示。第1个阶段为压实不封闭阶段,从断裂停止活动距今时间至开始压实成岩距今时间,断裂填充物未开始成岩,封闭能力弱,排替压力小于1 MPa;第2个阶段为成岩不封闭阶段,从断层岩开始压实成岩距今时间至其封闭

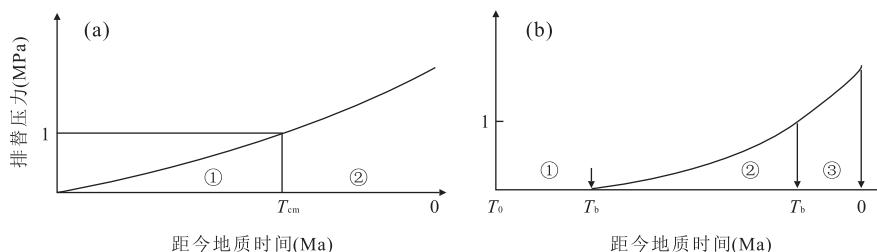


图 1 被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化示意图

Fig.1 Schematic of closed evolution of fractured mudstone cap rock

a.未被断裂破坏; b.已被断裂破坏; 图 a 中,  $T_{cm}$ .断裂形成封闭能力距今时间; ①泥岩盖层不封闭阶段; ②泥岩封闭阶段; 图 b 中,  $T_0$ .断裂停止活动距今时间;  $T_b$ .断层岩开始压实成岩距今时间;  $T_c$ .断层岩形成封闭能力距今时间; ①断层岩压实不封闭阶段; ②断层岩成岩不封闭阶段; ③断层岩成岩封闭阶段

能力形成距今时间,断层岩开始压实成岩,但封闭能力仍弱,排替压力小于 1 MPa; 第 3 个阶段为成岩封闭阶段,从断层岩封闭能力形成距今时间至现今,断层岩排替压力大于 1 MPa,已形成封闭能力。

## 2 被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史恢复方法

由上可知,要恢复未被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史,就必须确定泥岩盖层封闭能力形成距今时间,而要恢复已被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史,就必须确定断层岩开始压实成岩距今时间和封闭能力形成距今时间。

通过泥岩盖层古埋深恢复(谭开俊等,2005; 张仲培等,2014),在假设其泥质含量不变的条件下,由公式(1)便可以对泥岩盖层距今不同时期的古排替压力进行计算,再做出泥岩盖层排替压力随时间变化关系曲线,取排替压力等于 1 MPa 的时间,即为泥岩盖层封闭能力形成距今时间,根据目前泥岩盖层排替压力是否大于 1 MPa 便可以得到未被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化是处于不封闭阶段还是处于封闭阶段,从而达到研究未被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史的目的。

$$P_m = a \left( \frac{ZR}{100} \right)^b, \quad (1)$$

式中: $P_m$  为围岩实测排替压力, MPa;  $Z$  为围岩埋深, m;  $R$  为围岩泥质含量, 小数;  $a$ 、 $b$  为与地区有关常数。

为了确定断层岩开始压实成岩距今时间,本文假设断层岩中的物质成分主要来自断层两盘地层岩石,且在其压实成岩过程中无外来物质的加入,是在上覆沉积载荷重量作用下压实成岩的,那么断层岩

的压实成岩历史应与围岩相似,即具有与围岩相同的初始孔隙度和压实成岩系数,且不论是围岩还是断层岩,其压实成岩程度均可视为其压实成岩压力和时间两者共同作用的结果,可用二者的乘积来表示。通过公式(2),可以推导得到断层岩现今压实成岩埋深,如公式(3)所示。由公式(3)取  $Z_f = 0$ ,便可以得到断层岩开始压实成岩时间,如公式(4)所示。

$$\frac{\rho_r Z T_f}{\rho_r Z T_s} = \frac{\Phi_0 e^{-cz}}{\Phi_0 e^{-cz_f}}, \quad (2)$$

$$Z_f = Z - \frac{1}{c} \ln \frac{T_s}{T_f}, \quad (3)$$

$$T_b = T_s e^{-cz} (Z_f = 0), \quad (4)$$

式中: $Z$  为断层岩埋深, m;  $T_f$  为断层岩压实成岩时间, Ma;  $Z_f$  为断层岩压实成岩埋深, m;  $T_s$  为与断层岩具有相同深度围岩的压实成岩时间, Ma;  $\Phi_0$  为围岩初始孔隙度, 小数;  $C$  为围岩压实成岩系数;  $\rho_r$  为沉积岩平均密度, g/cm<sup>3</sup>;  $T_b$  为断层岩开始压实成岩时间, Ma。

由断裂停止活动距今时间减去断层岩开始压实成岩距今时间,即可得到断层岩压实成岩距今时间,将其代入公式(3)中,便可以计算得到断层岩现今的压实成岩埋深。再由断裂断距和被其错断岩层厚度和泥质含量,由公式(5)计算断层岩的泥质含量。将断层岩的压实成岩埋深和泥质含量代入研究区围岩实测排替压力与其压实成岩埋深和泥质含量之间经验关系(公式(1))中,便可以得到断层岩现今排替压力值。如果断层岩排替压力小于 1 MPa,说明其尚未进入封闭能力形成时期,没有必要确定断层岩封闭能力形成距今时间。如果断层岩排替压力大于 1 MPa,说明其已进入封闭能力形成时期,可在断层岩古埋深恢复的基础上,按照上述方法恢复断层岩的古压实成岩埋深,在假设断层岩泥质含量不变的条件下,由公式(1)便

可以计算得到不同地质时期断层岩古排替压力,作出断层岩古排替压力随时间变化关系(图1),取其排替压力等于1 MPa所对应的时间即为断层岩封闭能力形成距今时间。由上述已确定出的断层岩开始压实成岩距今时间和封闭能力形成距今时间,得到已被断裂破坏泥岩盖层的封闭性演化是处于压实封闭阶段还是处于压实不封闭阶段,从而达到研究区已被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史的目的。

$$R_f = \frac{\sum_{i=1}^n H_i R_i}{L}, \quad (5)$$

式中: $R_f$ 为断层岩泥质含量,小数; $H_i$ 为被断裂错断第*i*层岩层厚度,m; $R_i$ 为被断裂错断第*i*层岩层泥质含量,小数; $L$ 为断裂断距,m; $n$ 为被断裂错断岩层系数。

### 3 实例应用

本文选取渤海湾盆地南堡凹陷南堡5号构造东二段泥岩盖层为例,利用以上方法恢复被 $f_2$ 断裂破坏东二段泥岩盖层封闭性演化史,并通过其恢复结果与目前东二段泥岩盖层之下已发现油气分布之间

关系分析,验证该方法用于恢复被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史的可行性。

南堡5号构造位于南堡凹陷西北部,是南堡凹陷一个重要含气构造,构造形态总体上为一发育在古潜山背景上的披覆构造,构造方向为北北东向,被北北东向断裂切割复杂化,如图2所示。该构造从下至上发育的地层有古近系的孔店组、沙河街组、东营组和新近系的馆陶组、明化镇组及第四系。目前该构造已在沙一段至东一段见到了油气显示,但油气主要分布在东二段泥岩盖层之下的储层中,东二段泥岩为古近系的湖泊相沉积的泥岩,与胡明等(2010)所研究的泥岩不仅沉积环境相似,而且埋深相当,可以用排替压力等于1 MPa作为其封闭能力形成时期。东二段泥岩盖层在南堡5号构造发育,厚度可达到198~305 m,是一套区域性盖层。 $f_2$ 断裂位于南堡5号构造的中南部地区,是一条北东东向展布的正断层,发育规模总体上是下部大、上部小,断距可达70~160 m,断层倾角变化范围为30°~70°,如图3所示, $f_2$ 断裂是在东三段中期发育起来的断裂,主要活动时期为东营组沉积时期,馆陶组沉积中期停止活动至今。 $f_2$ 断裂错断了东二段泥岩盖层,但并未将其完全错开,东二段泥岩盖层仍保持横向分布

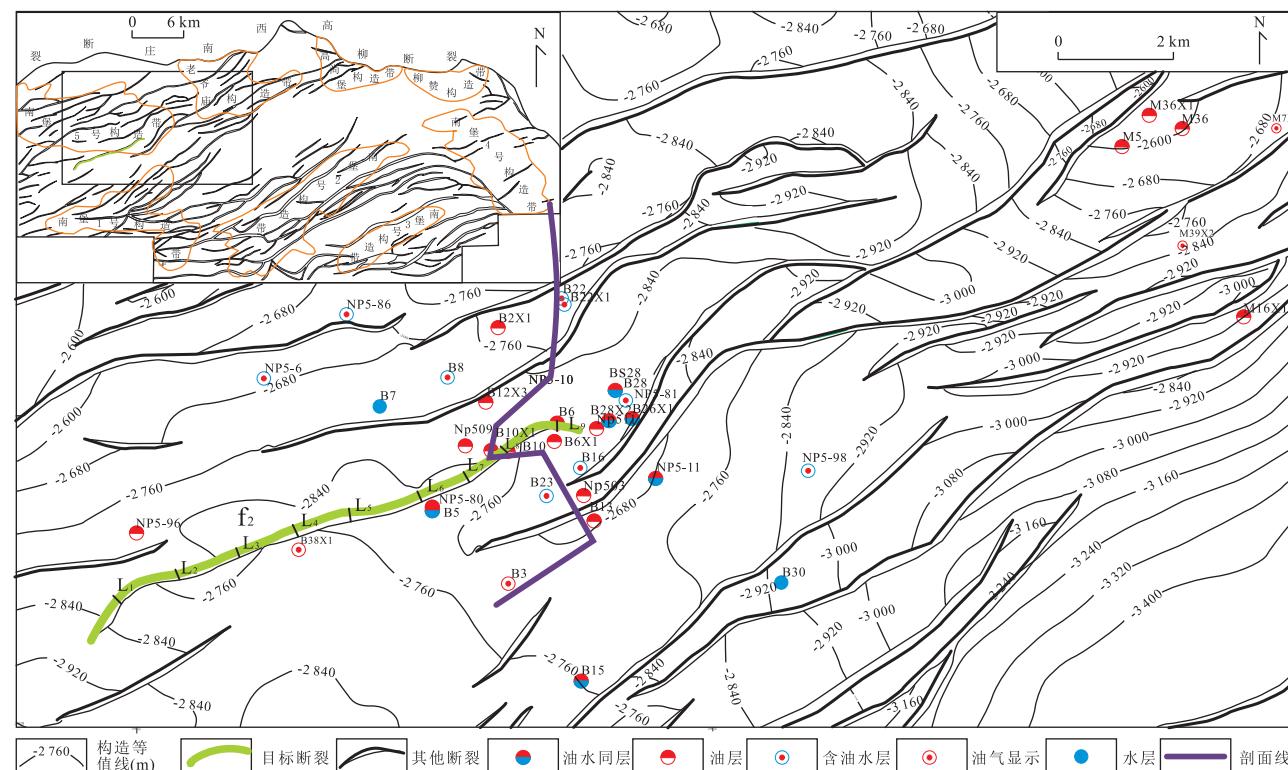


图2 南堡5号构造 $f_2$ 断裂分布

Fig.2 Plane distribution of fault  $f_2$  in 5th Structure of Nanpu sag

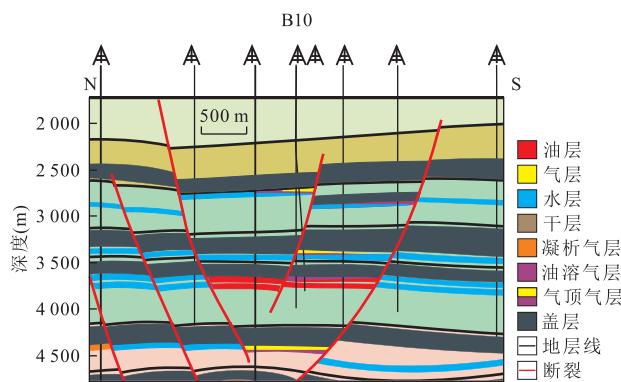
图 3 南堡 5 号构造  $f_2$  断裂的油藏剖面

Fig.3 Section of reservoirs among fault  $f_2$  in 5th structure of Nanpu sag

的连续性,能否正确认识被  $f_2$  断裂破坏东二段泥岩盖层的封闭性演化史,对于南堡 5 号构造东二段泥岩盖层之下天然气勘探至关重要。

通过统计  $f_2$  断裂在 9 条测线的断距和对应处东二段泥岩盖层的厚度,计算其断接厚度,得到在  $L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$  和  $L_9$  测线处东二段泥岩盖层断接厚度为 125~249 m,均大于其封油气所需的最小断接厚度(120~140 m, 图 4),  $f_2$  断裂未破坏东二段泥岩盖层封闭,仍是东二段泥岩盖层封闭油气。在

$L_2$  和  $L_8$  测线处东二段泥岩盖层断接厚度分别为 25 m 和 118 m, 均小于其封油气所需的最小断接厚度,  $f_2$  断裂破坏了东二段泥岩盖层封闭,应是断层岩封闭。

由  $f_2$  断裂在  $L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$  和  $L_9$  测线处东二段泥岩盖层埋深和利用自然伽马测井资料按照文献中泥质含量计算方法计算得到泥质含量(付广等, 1997; Heslop, Heslop, 2003; 杨智等, 2005; 吴国平等, 2008; Ezz et al., 2013; 司马立强, 2013),代入南堡凹陷实测排替压力与其埋深和泥质含量之间的经验关系式中(公式(6)),计算  $L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$  和  $L_9$  测线处东二段泥岩盖层的排替压力为 2.018~4.558 MPa, 在古埋深恢复的基础上,利用上述方法对  $L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$  和  $L_9$  测线处东二段泥岩盖层的古排替压力进行了计算,由其平均值随时间变化关系曲线(图 5)可以看出,未被  $f_2$  断裂破坏的东二段泥岩盖层在其沉积后,随着埋深增加,压实成岩作用增强,孔渗性变差,排替压力逐渐增大,约在馆陶组沉积中期达到 1 MPa,形成封闭能力,之后封闭能力逐渐增强,至今均可达到 3.6 MPa。

$$P_d = 0.031 \left( \frac{ZR}{100} \right)^{1.057}, \quad (6)$$

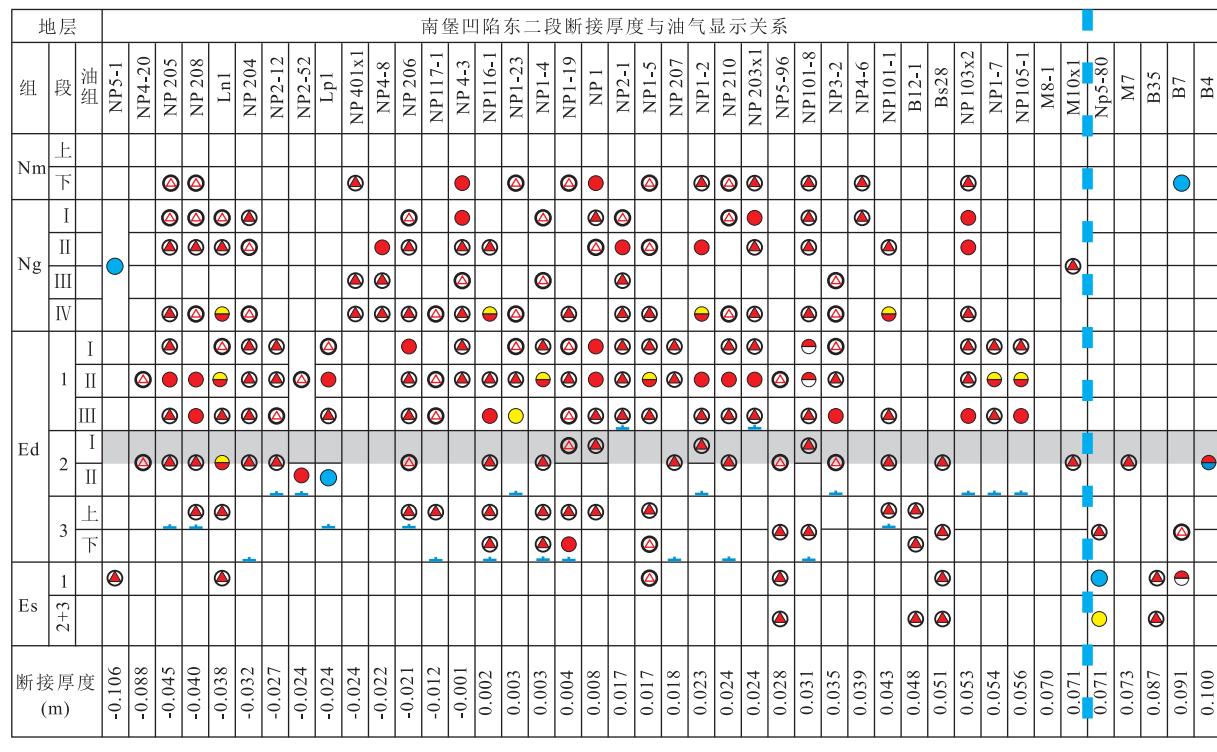


图 4 南堡凹陷东二段泥岩盖层封油气所需的小断接厚度厘定

Fig.4 The determination of minimum faulted thickness of  $Ed_2$  mudstone caprock in Nanpu sag

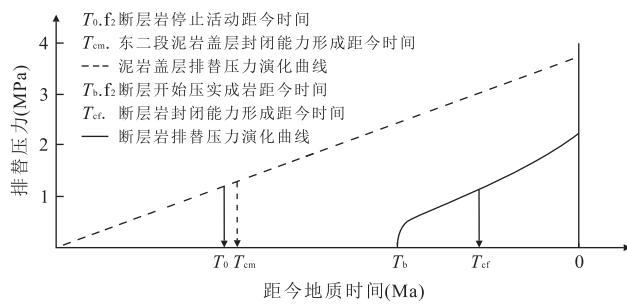
图 5 南堡 5 号构造被  $f_2$  断裂破坏泥岩盖层封闭性演化曲线

Fig.5 The closed evolution curve of the mudstone cap rock of No. 5 structure was destroyed by fault  $f_2$  of Nanpu sag

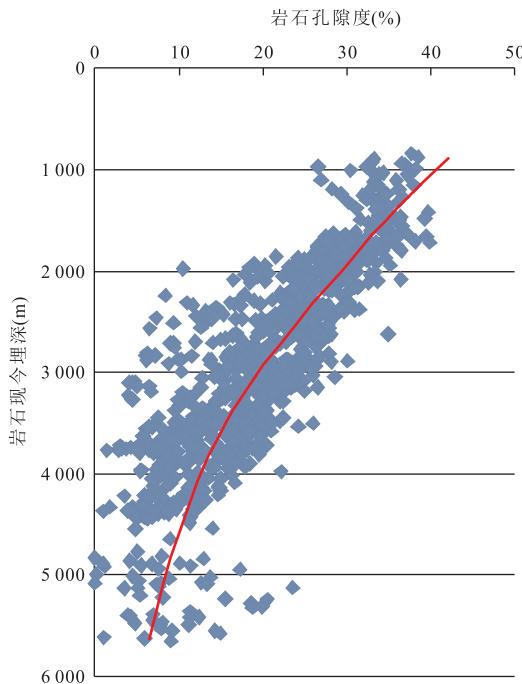


图 6 南堡凹陷围岩孔隙度随埋深变化关系

Fig.6 Relation of porosity and burial depth of surrounding rocks in Nanpu sag

式中:  $P_d$  为南堡凹陷实测泥质岩盖层排替压力, MPa;  $Z$  为南堡凹陷实测泥质岩盖层埋深, m;  $R$  为南堡凹陷实测泥质岩盖层泥质含量, 小数。

由  $f_2$  断裂在  $L_2$  和  $L_8$  测线处东二段泥岩盖层埋深, 通过其地质年代表可以确定出东二段泥岩盖层压实成岩距今时间为开始沉积至今的时间。由南堡凹陷地层孔隙度随埋深变化关系(图 6)可以得到  $C$  为 0.000 47, 由公式(4)得到  $f_2$  断裂断层岩开始压实成岩距今时间约为 6.85 Ma, 而由图 3 得到的  $f_2$  断裂停止活动距今时间 17 Ma,  $f_2$  断裂停止活动距今时间早于其开始压实成岩距今时间, 其已开始压

实成岩, 二者相减可以得到  $f_2$  断裂压实成岩距今时间为 6.78 Ma。为了方便研究  $f_2$  断裂在东二段内断层岩封闭性演化史, 将 6.85 Ma、10 Ma、14 Ma、17 Ma 作为  $f_2$  断裂古封闭能力研究的时间点, 首先根据研究点的压实成岩距今时间, 由公式 3 计算在  $L_2$  和  $L_8$  测线处断层岩的压实成岩埋深, 再利用断层距和被其错断地层厚度、泥质含量, 由公式(5)计算断层岩的泥质含量, 最后将断层岩压实成岩埋深和泥质含量代入公式(6)中, 便可以计算得到  $f_2$  断裂在  $L_2$  和  $L_8$  测线处不同研究点东二段泥岩盖层内断层岩古排替压力。由其平均值随时间变化关系(图 5)可以看出, 南堡凹陷 5 号构造在距今 6.78 MPa 时,  $f_2$  断裂在东二段泥岩盖层内断层岩开始压实成岩, 其后排替压力逐渐增大, 在明化镇组沉积晚期达到 1 MPa, 形成封闭能力, 之后断层岩排替压力逐渐增大, 达到现今 2.1 MPa。

由图 2 中可以看出, 南堡 5 号构造在  $f_2$  断裂处东二段泥岩盖层之下储层目前已发现了油气, 这是因为  $f_2$  断裂虽然破坏了东二段泥岩盖层, 在  $L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$  和  $L_9$  测线处  $f_2$  断裂未破坏东二段泥岩盖层封闭, 仍是东二段泥岩盖层封闭, 其现今封闭能力强, 有利于油气聚集与保存, 且其封闭形成时期也早于油气成藏期—明化镇组晚期(付广和杨敬博, 2013), 有利于油气大规模聚集与保存。而在  $L_2$  和  $L_8$  测线处  $f_2$  断裂已破坏了东二段泥岩盖层封闭, 应是  $f_2$  断裂断层岩封闭,  $f_2$  断裂断层岩现今封闭能力也较强, 也有利于油气聚集与保存, 且其封闭能力形成时期与油气成藏期同期, 有利于油气大规模聚集与保存。以上可能造成南堡 5 号构造东二段泥岩盖层之下储层中油气聚集的重要原因, 但  $f_2$  断裂附近东二段泥岩盖层之下目前已发现的油气主要分布在东北部, 是由于构造及砂体发育造成的, 并不是盖层原因造成的。

#### 4 结论

(1) 被断裂破坏泥岩盖层按其断接厚度与其油气所需最小断接厚度的相对大小, 可以分为 2 种: 一种是未被断裂破坏泥岩盖层封闭, 其仍是泥岩盖层封闭, 封闭性演化经过不封闭和封闭 2 个阶段, 封闭能力逐渐增强; 另一种是已被断裂破坏泥岩盖层封闭, 其封闭为断层岩封闭, 封闭性演化经历压实不封闭、成岩不封闭和成岩封闭 3 个阶段, 封闭能力也逐渐增强。

(2)通过确定泥岩盖层封闭能力形成距今时间和断层岩压实成岩距今时间,封闭能力形成距今时间,建立了一套被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史的恢复方法,并将其应用于渤海湾盆地南堡凹陷 5 号构造被  $f_2$  断裂破坏东二段泥岩盖层封闭性演化史的恢复中。结果表明:在  $L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$  和  $L_9$  测线处  $f_2$  断裂未破坏东二段泥岩盖层封闭,仍是东二段泥岩盖层封闭,其封闭性演化经历了不封闭至封闭阶段,目前具有较强的封闭能力。而在  $L_2$  和  $L_8$  测线处  $f_2$  断裂破坏了东二段泥岩盖层封闭,已不再是东二段泥岩盖层封闭,而是  $f_2$  断裂断层岩封闭,其封闭能力演化经历了压实不封闭、成岩不封闭和成岩封闭 3 个阶段,目前也已具有较强的封闭能力,均有利于油气在东二段泥岩盖层之下储层中聚集与保存,与目前东二段泥岩盖层之下储层中已发现油气分布相吻合,表明该方法用于恢复被断裂破坏泥岩盖层封闭性演化史是可行的。

## References

- Andersson, J. E., Ekman, L., Nordqvist, R., et al., 1991. Hydraulic Testing and Modelling of a Low-Angle Fracture Zone at Finnsjön, Sweden. *Journal of Hydrology*, 126 (1–2): 45–77. doi:10.1016/0022-1694(91)90200-2
- Bolton, A. J., Maltman, A. J., Clennell, M. B., 1998. The Importance of Overpressure Timing and Permeability Evolution in Fine-Grained Sediments Undergoing Shear. *Journal of Structural Geology*, 20 (8): 1013–1022. doi:10.1016/s0191-8141(98)00030-3
- Childs, C., Manzocchi, T., Walsh, J. J., et al., 2009. A Geometric Model of Fault Zone and Fault Rock Thickness Variations. *Journal of Structural Geology*, 31 (2): 117–127. doi:10.1016/j.jsg.2008.08.009
- Dong, J., Zhang, S. H., Jiang, Y. B., 2004. The Displacement-Length Relationship of Faults and Its Significance. *Earth Science Frontiers*, 11 (4): 575–584 (in Chinese with English abstract).
- Duan, W., Luo, C. F., Liu, J. Z., et al., 2015. Effect of Overpressure Formation on Reservoir Diagenesis and Its Geological Significance to LD Block of Yinggehai Basin. *Earth Science*, 40 (9): 1517–1528 (in Chinese with English abstract).
- El-Din, E. S., Mesbah, M. A., Kassab, M. A., et al., 2013. Assessment of Petrophysical Parameters of Clastics Using Well Logs: The Upper Miocene in El-Wastani Gas Field, Onshore Nile Delta, Egypt. *Petroleum Exploration and Development*, 40 (4): 488–494. doi:10.1016/s1876-3804(13)60062-2
- Fu, G., Chen, Z. M., Wang, P. Y., et al., 1997. A Method for Comprehensively Evaluating the Sealing Ability of Overlying Mudstone by Analysing Log Data, and Its Application Effect. *Oil Geophysical Prospecting*, 32 (2): 271–276, 302–304 (in Chinese with English abstract).
- Fu, G., Chen, Z. M., Wang, P. Y., et al., 1998. The Formation Period of the Sealing Ability of Mudstone Caprocks of the Qingshankou Formation in the Sanzhao Depression of the Songliao Basin. *Geological Review*, 44 (3): 295–301 (in Chinese with English abstract).
- Fu, G., Shi, J. J., Lü, Y. F., 2013. Study of Ancient Displacement Pressure of Fault Rock Recovery and Its Sealing Characteristics. *Journal of China University of Mining & Technology*, 42 (6): 996–1001 (in Chinese with English abstract).
- Fu, G., Wang, Q., Shi, J. J., 2012. Sealing Oil-Gas Time and Ability Effectiveness of Mudstone Caprocks in Middle Es<sub>1</sub> in Dagang Oilfield. *Journal of Central South University*, 43 (8): 3142–3148 (in Chinese with English abstract).
- Fu, G., Yang, J. B., 2013. Sealing of Matching between Fault and Caprock to Oil-Gas Migration along Faults: An Example from Middle and Shallow Strata in Nanpu Depression. *Earth Science*, 38 (4): 783–791 (in Chinese with English abstract).
- Fu, G., Yang, M., 2000. Development Characteristics of Caprock and Its effect for Formation of Oil or Gas Fools. *Natural Gas Geoscience*, 11 (3): 18–24 (in Chinese with English abstract).
- Fu, G., Zhang, B. W., Wu, W., 2016. Mechanism and Detection of Regional Mudstone Caprock Sealing Oil and Gas Migration along Transporting Fault. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 40 (3): 36–43 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. F., Jia, R., Wang, H. X., et al., 2015. Quantitative Evaluation of Fault-Caprock Sealing Capacity: A Case From Da-bei-Kelasu Structural Belt in Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42 (3): 300–309 (in Chinese with English abstract).
- Heslop, K., Heslop, A., 2003. Interpretation of Shaly Sands. (2003–04–08)[2013–03–19]. [http://www.lps.org.uk/docs/heslop\\_shaly\\_sands.pdf](http://www.lps.org.uk/docs/heslop_shaly_sands.pdf).
- Hu, M., Fu, G., Lü, Y. F., et al., 2010. The Fault Activity Period and Its Relationship to Deep Gas Accumulation in the Xu-jiawei Depression, Songliao Basin. *Geological Review*, 56 (5): 710–718 (in Chinese with English abstract).
- Kim, Y. S., Sanderson, D. J., 2005. The Relationship between Displacement and Length of Faults: A Review. *Earth-*

- Science Reviews*, 68(3—4): 317—334. doi: 10.1016/j.earscirev.2004.06.003
- Li, S.J., Wo, Y.J., Zhou, Y., et al., 2011. Controlling Factors Affect Sealing Capability of Well-Developed Muddy Cap Rock. *Acta Geologica Sinica*, 85(10): 1691—1697 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., Lü, Y.F., Sun, Y.H., et al., 2012. Characteristics and Significance of Syngenetic Fault Segmentation in Hydrocarbon Accumulation, an Example of Yuanyanggou Fault in Western Sag, Liaohe Depression. *Journal of China University of Mining & Technology*, 41(5): 793—799 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Y.F., Wan, J., Sha, Z.X., et al., 2008. Evaluation Method for Seal Ability of Cap Rock Destructed by Faulting and its Application. *Chinese Journal of Geology*, 43(1): 162—174 (in Chinese with English abstract).
- Mou, D.S., Fu, G., Hu, M., 2011. Research on Sealing Gas Effectiveness of Cap Rock in Xushen Gasfield. *Acta Geologica Sinica*, 29(1): 158—163 (in Chinese with English abstract).
- Qin, J.Z., Liu, W.X., Fan, M., et al., 2013. Shale Research Progress and Achievements in Seal Appraisal Technology. *Petroleum Geology and Experiment*, 35(6): 689—693, 706 (in Chinese with English abstract).
- Schmatz, J., Vrolijk, P.J., Urai, J.L., 2010. Clay Smear in Normal Fault Zones—The Effect of Multilayers and Clay Cementation in Water-Saturated Model Experiments. *Journal of Structural Geology*, 32(11): 1843—1849. doi: 10.1016/j.jsg.2009.12.006
- Si-Ma, L.Q., Luo, X., Zhang, F.S., et al., 2013. On the Method of Clay Content Calculation Based on the Curve Reconstruction of the Formation with High Gamma Value. *Well Logging Technology*, 37(3): 244—248 (in Chinese with English abstract).
- Tan, K.J., Wei, P.S., Lü, X.M., 2005. Research on Quantitative Resumption Method of Stratum Paleothickness and Its Application—Taking Ludong Area in Zhunge'er Basin as an Example. *Natural Gas Industry*, 25(10): 24—26, 35 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J.R., Wang, H., Meng, L.J., et al., 2016. Pressure Evolution and Its Effect on Petroleum Accumulation in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 41(5): 809—820 (in Chinese with English abstract).
- Welch, M.J., Knipe, R.J., Souque, C., et al., 2009. A Quadshear Kinematic Model for Folding and Clay Smear Development in Fault Zones. *Tectonophysics*, 471(3—4): 186—202. doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.008
- Wu, G.P., Su, J.Y., Cheng, S., et al., 2008. A Method for Obtaining Shaliness Using Wiener Filtering Based on Logging Data Natural Gamma Ray. *Earth Science*, 33(4): 572—576 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W.T., Gao, X.Z., Lu, X.J., et al., 2011. Pathway System and Their Matching Relations with Buried Hill Reservoir in Jizhong Depression. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(1): 78—83, 88 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., He, S., Wang, J.X., et al., 2005. Shale Gouge Ratio and Its Application in the Fault Seal Estimation across the Faulted Zone. *Natural Gas Geoscience*, 16(3): 347—351 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y.S., Fan, M., Liu, W.X., et al., 2011. Several Discussions of Sealing Capacity Studies of Caprock. *Petroleum Geology and Experiment*, 33(4): 336—340, 347 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.P., Wang, Y., Li, J.J., et al., 2014. Dynamic Evolution Assessment of the Paleozoic Hydrocarbon Cap Rocks in Bachu-Magati Area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 35(6): 839—852 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.H., Niu, C.M., Teng, C.Y., 2009. Relationship between Faulting and Hydrocarbon Pooling during the Neotectonic Movement around the Central Bohai Bay. *Oil & Gas Geology*, 30(4): 469—475, 482 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Jin, Z.J., Zhu, D.Y., et al., 2012. Current Status and Progress in Research of Hydrocarbon Cap Rocks. *Petroleum Geology and Experiment*, 34(3): 234—245, 251 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo, Q.G., Li, Y., Song, Y., et al., 2013. Evolution of Paleogene Saline Deposits and Effectiveness of Traps in Kelas Tectonic Zone, Kuqa Depression, Tarim Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 35(1): 42—47 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- El-Din, E.S., Mesbah, M.A., Kassab, M.A., et al., 2013. 利用测井曲线评价碎屑岩岩石物理参数——以埃及尼罗河三角洲 El-Wastani 气田上中新统为例. 石油勘探与开发, 40(4): 455—461.
- 董进, 张世红, 姜勇彪, 2004. 正断层位移—长度关系及其研究意义. 地学前缘, 11(4): 575—584.
- 段威, 罗程飞, 刘建章, 等, 2015. 莺歌海盆地 LD 区块地层超压对储层成岩作用的影响及其地质意义. 地球科学, 40(9): 1517—1528.
- 付广, 陈章明, 王朋岩, 等, 1997. 利用测井资料综合评价泥质岩盖层封闭性的方法及应用. 石油地球物理勘探, 32(2): 271—276, 302—304.

- 付广,陈章明,王朋岩,等,1998.松辽盆地三肇凹陷青山口组泥岩盖层封闭能力形成时期.地质论评,44(3):295—301.
- 付广,史集建,吕延防,2013.断层岩古排替压力恢复及其封闭性能研究.中国矿业大学学报,42(6):996—1001.
- 付广,王岐,史集建,2012.大港油田沙一段中部泥岩盖层封闭油气能力和时间有效性.中南大学学报(自然科学版),43(8):3142—3148.
- 付广,杨敬博,2013.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.地球科学,38(4):783—791.
- 付广,杨勉,2000.盖层发育特征及对油气成藏的作用.天然气地球科学,11(3):18—24,5.
- 付广,张博为,吴伟,2016.区域性泥岩盖层阻止油气沿输导断裂运移机制及其判别方法.中国石油大学学报(自然科学版),40(3):36—43.
- 付晓飞,贾茹,王海学,等,2015.断层—盖层封闭性定量评价——以塔里木盆地库车坳陷大北—克拉苏构造带为例.石油勘探与开发,42(3):300—309.
- 胡明,付广,吕延防,等,2010.松辽盆地徐家围子断陷断裂活动时期及其与深层气成藏关系分析.地质论评,56(5):710—718.
- 李双建,沃玉进,周雁,等,2011.影响高演化泥岩盖层封闭性的主控因素分析.地质学报,85(10):1691—1697.
- 刘哲,吕延防,孙永河,等,2012.同生断裂分段生长特征及其石油地质意义——以辽河西部凹陷鸳鸯沟断裂为例.中国矿业大学学报,41(5):793—799.
- 吕延防,万军,沙子萱,等,2008.被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用.地质科学,43(1):162—174.
- 牟敦山,付广,胡明,2011.徐深气田盖层封气有效性研究.沉积学报,29(1):158—163.
- 秦建中,刘伟新,范明,等,2013.泥岩研究与盖层评价技术.石油实验地质,35(6):689—693,706.
- 司马立强,罗兴,张凤生,等,2013.基于曲线重构的高伽马地层泥质含量计算方法.测井技术,37(3):244—247.
- 谭开俊,卫平生,吕锡敏,2005.地层古厚度定量恢复方法研究及应用——以准噶尔盆地陆东地区为例.天然气工业,25(10):24—26,35.
- 汤建荣,王华,孟令箭,等,2016.渤海湾盆地南堡凹陷地层压力演化及其成藏意义.地球科学,41(5):809—820.
- 吴国平,苏江玉,成实,等,2008.基于自然伽马测井信号的维纳滤波法求取泥质含量.地球科学,33(4):572—576.
- 吴伟涛,高先志,卢学军,等,2011.冀中坳陷潜山油气输导体系及与油气藏类型的匹配关系.地球科学与环境学报,33(1):78—83,88.
- 杨智,何生,王锦喜,等,2005.断层泥比率(SGR)及其在断层侧向封闭性评价中的应用.天然气地球科学,16(3):347—351.
- 袁玉松,范明,刘伟新,等,2011.盖层封闭性研究中的几个问题.石油实验地质,33(4):336—340,347.
- 张仲培,王毅,李建交,等,2014.塔里木盆地巴—麦地区古生界油气盖层动态演化评价.石油与天然气地质,35(6):839—852.
- 周心怀,牛成民,滕长宇,2009.环渤海地区新构造运动期断裂活动与油气成藏关系.石油与天然气地质,30(4):469—475,482.
- 周雁,金之钧,朱东亚,等,2012.油气盖层研究现状与认识进展.石油实验地质,34(3):234—245,251.
- 卓勤功,李勇,宋岩,等,2013.塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带古近系膏盐岩盖层演化与圈闭有效性.石油实验地质,35(1):42—47.