

断盖配置封闭性演化阶段恢复方法 及其应用



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

吴雨农¹⁾,袁红旗¹⁾,张亚雄²⁾,王汉强³⁾

1) 东北石油大学地球科学学院,黑龙江大庆,163318;

2) 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院,北京,100083;

3) 大庆油田有限责任公司第一采油厂第四油矿,黑龙江大庆,163114

内容提要: 为了研究含油气盆地断盖配置上下油气分布规律,在断盖配置封闭性演化阶段划分的基础上,通过明确断盖配置断接厚度与时间之间的关系和断裂破坏盖层封闭性所需要的最大断接厚度,确定断裂破坏盖层封闭性开始时期;通过断层岩排替压力随时间的变化关系和储层岩排替压力随时间的变化关系,确定断层岩封闭开始时期,据此建立了一套断盖配置封闭性演化阶段恢复方法,并将其应用于海拉尔盆地贝尔凹陷呼和诺仁构造 F5 断裂与下白垩统大磨拐河组一段下亚段(大一下段)盖层配置在测点 4、6、9、10、11、12、14 这 7 处封闭性演化阶段恢复中。结果表明,F5 断裂与大一下段盖层配置在以上 7 处测点处不发育盖层封闭阶段,从大一下段沉积末期至上白垩统青元岗组沉积早期为不封闭阶段,从青元岗组沉积早期至现今为断层岩封闭阶段。因其在油气成藏期为不封闭阶段,且断层岩封闭开始时期晚于油气成藏期(下白垩统伊敏组沉积末期),不利于油气在其下白垩统南屯组二段(南二段)聚集和保存,与目前 F5 断裂附近南二段油气分布相吻合,表明该方法用于恢复断盖配置封闭性演化阶段是可行的。

关键词: 断盖配置;封闭性;演化阶段;恢复方法

油气勘探实践表明,在含油气盆地同一断盖配置(通常是指长期发育的输导断裂与区域性盖层的配置)不同部位其上下油气分布特征也不尽相同,这主要是受到了其封闭性不同的影响,封闭性相对较好的断盖配置部位油气主要在其下分布,封闭性相对较差的断盖配置部位油气在其上下分布。而断盖配置封闭性好坏又与其所处的演化阶段有着密切关系,断盖配置所处的封闭性演化阶段不同,其封闭特征也不同,造成其上下油气分布特征也就不同。因此,能否准确地恢复断盖配置封闭性演化阶段,对于正确认识含油气盆地断盖配置上下油气分布规律具有重要意义。

有关断盖配置封闭油气性研究前人已做过一定研究与探讨,表现有以下几个方面:第一个方面是根据断裂在盖层内分段生长上下是否连接,研究断盖配置封闭油气机理(付晓飞等,2012;王海学等,

2014),认为若断裂来破坏盖层封闭性时,油气不能穿过盖层运移,断盖配置封闭;相反,若断裂破坏盖层封闭性时,断裂可成为油气穿过盖层运移,断盖配置不封闭(袁红旗等,2019,2021a;于英华等,2021)。第二个方面是利用断盖配置断接厚度(盖层厚度与断裂断距的差值)与断盖配置封闭油气所需的最小断接厚度的相对大小的比较(袁红旗等,2021b),研究断盖配置封闭性(吕延防等,2014;付广等,2014a,2016),如果断盖配置断接厚度大于或等于断盖配置封闭要求的最小断接厚度时,断盖配置封闭;反之,断盖配置不封闭。第三个方面是根据断层岩排替压力随时间变化关系和下伏储层岩排替压力随时间变化关系,研究断盖配置封闭性形成时期(付广等,2013,2014b,2020a;胡慧婷等,2014),将断层岩排替压力与下伏储层岩排替压力相等时期作为断盖配置封闭性形成时期。这些成果对研究含油

注:本文为黑龙江省教育科学规划课题(编号:GJC1319016)、教育部产学研合作育人项目(编号:201902302045)、国家自然科学基金资助项目(编号:41572126)和国家大型油气田及煤层气开发专项(编号:2016ZX05006-005)的成果。

收稿日期:2021-07-29;改回日期:2021-10-29;网络首发:2021-11-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.11.041

作者简介:吴雨农,男,1990年生,博士研究生;Email:382212719@qq.com。通讯作者:袁红旗,男,1979年生,博士,教授,主要从事油气地质勘探的教学与研究工作;Email:18131939@qq.com。

气盆地断盖配置上下油气分布规律具有非常重要作用。

目前这些研究对断盖配置封闭性演化阶段的恢复研究相对较少,有也仅仅是盖层或断层岩封闭性演化阶段研究(张喜等,2007;吕延防等,2016;付广等,2017),缺少二者结合研究,这无疑不利于含油气盆地断盖配置上下油气勘探的深入。因此,开展断盖配置封闭性演化阶段恢复方法研究,对于正确认识含油气盆地断盖配置上下油气分布规律及丰富完善断裂控藏理论均具有重要意义。

1 断盖配置封闭性演化及阶段划分

大量研究成果表明,断裂对盖层的破坏作用是逐渐形成的,开始时期,由于断裂活动相对较弱,断距相对较小,断裂未破坏盖层封闭性,油气不能穿过盖层运移,断盖配置仍是盖层封闭(图 1a)。随着断裂活动强度加大,断距相对较大,断裂破坏盖层封闭性,油气穿过盖层运移,此时断裂已完全破坏了盖层封闭性,断盖配置已无封闭性(图 1b)。由于断裂停止活动后,在各种因素的共同作用下断裂填充物紧闭愈合,不再是油气运移输导通道,开始封闭,但此时断盖配置不再是盖层封闭,而是断层岩封闭,如图 1c 所示,据断裂在盖层内分段生长上下连接时期和断层岩开始封闭时期,通常可以把断盖配置封闭性演化划分为 3 个阶段,第一个阶段为盖层封闭阶段,从断裂开始活动至断裂破坏盖层封闭性开始时期,如图 2a 中的 t_a-t_1 时期,封闭性相对较好;第二个阶段为不封闭阶段,从断裂破坏盖层封闭性开始时期至断层岩开始封闭时期,如图 2a 中 t_1-t_2 时

期,无封闭性;第三个阶段为断层岩封闭阶段,从断层岩封闭开始时期至现今(图 2a 中 $t_2\sim$ 现今),封闭性相对较差。

2 断盖配置封闭性演化阶段恢复方法

由上可知,要恢复断盖配置封闭性演化阶段,就必须确定出 2 个时间节点,一个是断裂破坏盖层封闭性开始时期和断层岩封闭开始时期,便可以恢复断盖配置封闭性阶段。

要确定断裂破坏盖层封闭性开始时期,就必须确定断盖配置断接厚度与时间关系和断裂破坏盖层封闭性所需的最大断接厚度。利用钻井和地震资料读取断裂在盖层内断距和对应处盖层厚度,二者相减求取现今断盖配置断接厚度,由最大断距相减法(刘哲等,2012)和地层古厚度恢复方法(曹强等,2007)恢复断裂在其活动期古断距和盖层古厚度,二者相减求取不同时期断盖配置古断接厚度。据此便可以得到断盖配置断接厚度随时间变化关系(图 2b)。统计研究区已知井点处断盖配置古断接厚度及其上下油气分布特征,取油气分布在断盖配置下的最大古断接厚度,作为断裂破坏盖层封闭性所需的最大断接厚度(付广等,2020b)。据此由图 2b 便可以得到断裂破坏盖层封闭性开始时期。

要确定断层岩封闭开始时期,就必须确定断层岩排替压力随时间变化关系和储层岩排替压力随时间变化关系,可按照文献(付广等,2020a)中的方法求取断层岩排替压力随时间变化关系和储层岩排替压力随时间变化关系,取二者相交处所对应的时期,便可求取断层岩封闭开始时期(图 2a)。

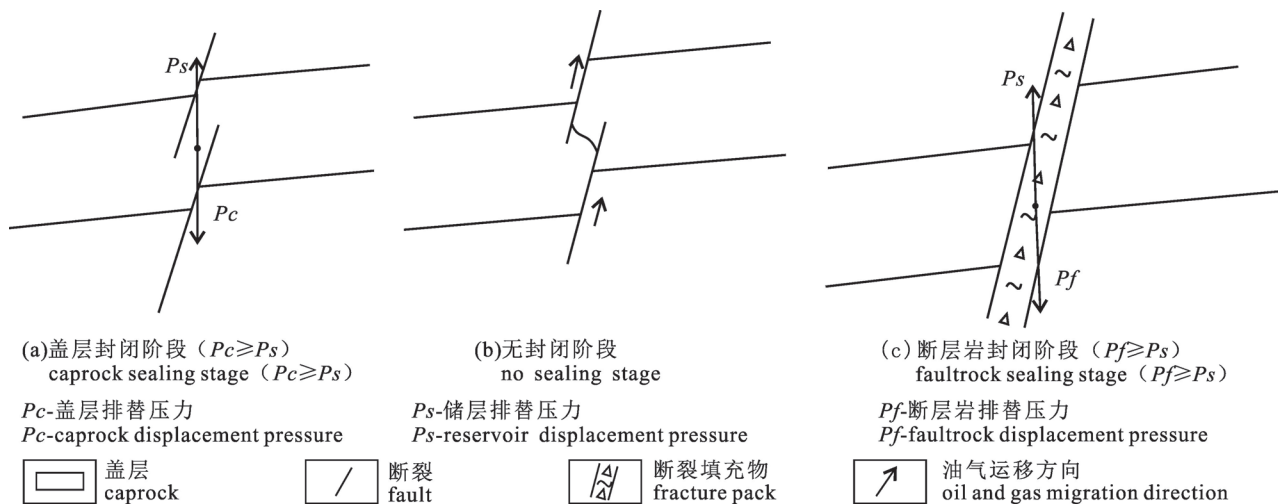
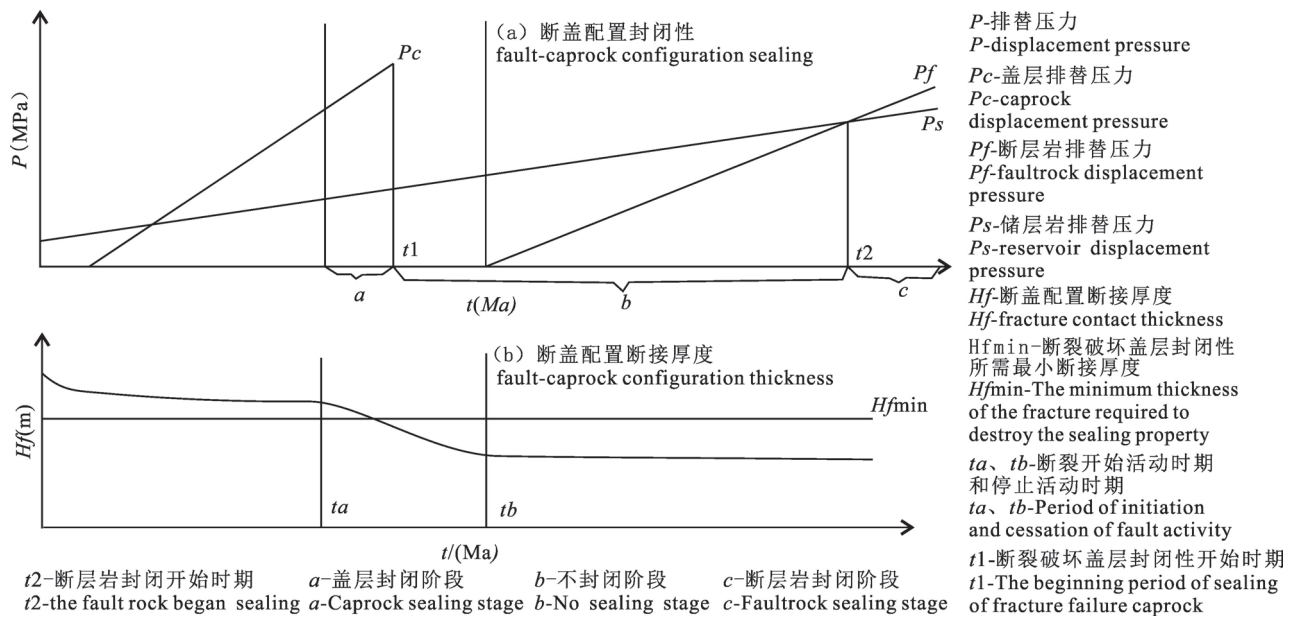


图 1 断盖配置封闭性演化阶段示意图

Fig. 1 The sealing evolution stage of fault—caprock configuration



有了断裂破坏盖层封闭性时期和断层岩开始封闭时期,结合断裂开始时期,便可以恢复断盖配置封闭性演化阶段,即断裂开始活动时期至断裂破坏盖层封闭性开始时期为盖层封闭阶段,断裂破坏盖层封闭性开始时期至断层岩封闭开始时期为不封闭阶段,断层岩封闭开始时期至今为断层岩封闭阶段。

3 实例应用

本文以海拉尔盆地贝尔凹陷呼和诺仁构造 F5 断裂为例,利用上述方法恢复不同测点处其与下白垩统大磨拐河组一段下亚段(大一下段)盖层配置封闭性演化阶段,并通过恢复结果与目前呼和诺仁构造 F5 断裂附近下白垩统南屯组二段(南二段)油气分布之间关系,验证该方法恢复断盖配置封闭性演化阶段的可行性。

呼和诺仁构造位于贝尔凹陷贝西斜坡西部,是一个被 F5 断裂破坏北东东走向的背斜构造,是贝尔凹陷贝西斜坡的主要含油气构造(图 3a)。该区钻井所揭示的地层从下至上有下白垩统、上白垩统及新生界,下白垩统地层从下至上有南屯组、大磨拐河组和伊敏组,上白垩统仅为青元岗组,该构造目前主要在南二段发现了油气,其来自东侧西洼槽下白垩统南屯组一段(南一段)源岩(李文科等,2015),盖层为大一下段发育的大套泥岩盖层,属于下生上储

式生储盖组合。由图 3 中可以看出,呼和诺仁构造目前已发现油气主要分布在 F5 断裂的中部,少量分布在北部,这除了受到砂体和圈闭发育的影响外,主要是受到了 F5 断裂与大一下段盖层配置封闭性演化阶段不同的影响。因此,能否准确地恢复 F5 断裂与大一下段盖层配置封闭性演化阶段,应是指导呼和诺仁构造南二段油气勘探的关键。

由三维地震资料解释成果,F5 断裂位于呼和诺仁构造中部,走向为北东向,平面延伸长度约为 13.4 km,断裂向西倾,倾角为 15°~50°,上陡下缓,断距在中部最大,次极值断距分布在南部,由 2 个极值点向其南北两侧断距逐渐减小(图 4a)。由图 3b 中可以看出,F5 断裂从下伏基岩一直向上断至下白垩统伊敏组二段和三段(伊二、三段),是一条长期活动断裂,由图 5 中可以看出,其主要活动时期为南一、二段和大二段—伊二、三段沉积时期。由钻井资料统计可以得到 F5 断裂不同测点大一下段盖层厚度(图 4b),由图 4b 中可以看出,F5 断裂处大一下段盖层厚度南部大于北部,但最小值位于测点 6 处,小于 40 m。由 F5 断裂不同测点处大一下段盖层厚度和断距,由地层古厚度恢复方法(曹强等,2007)和最大断距相减法(刘哲等,2012)恢复其在油气成藏期盖层古厚度和古断距,二者相减求取不同测点 F5 断裂与大一下段盖层配置古断接厚度(图 4c),

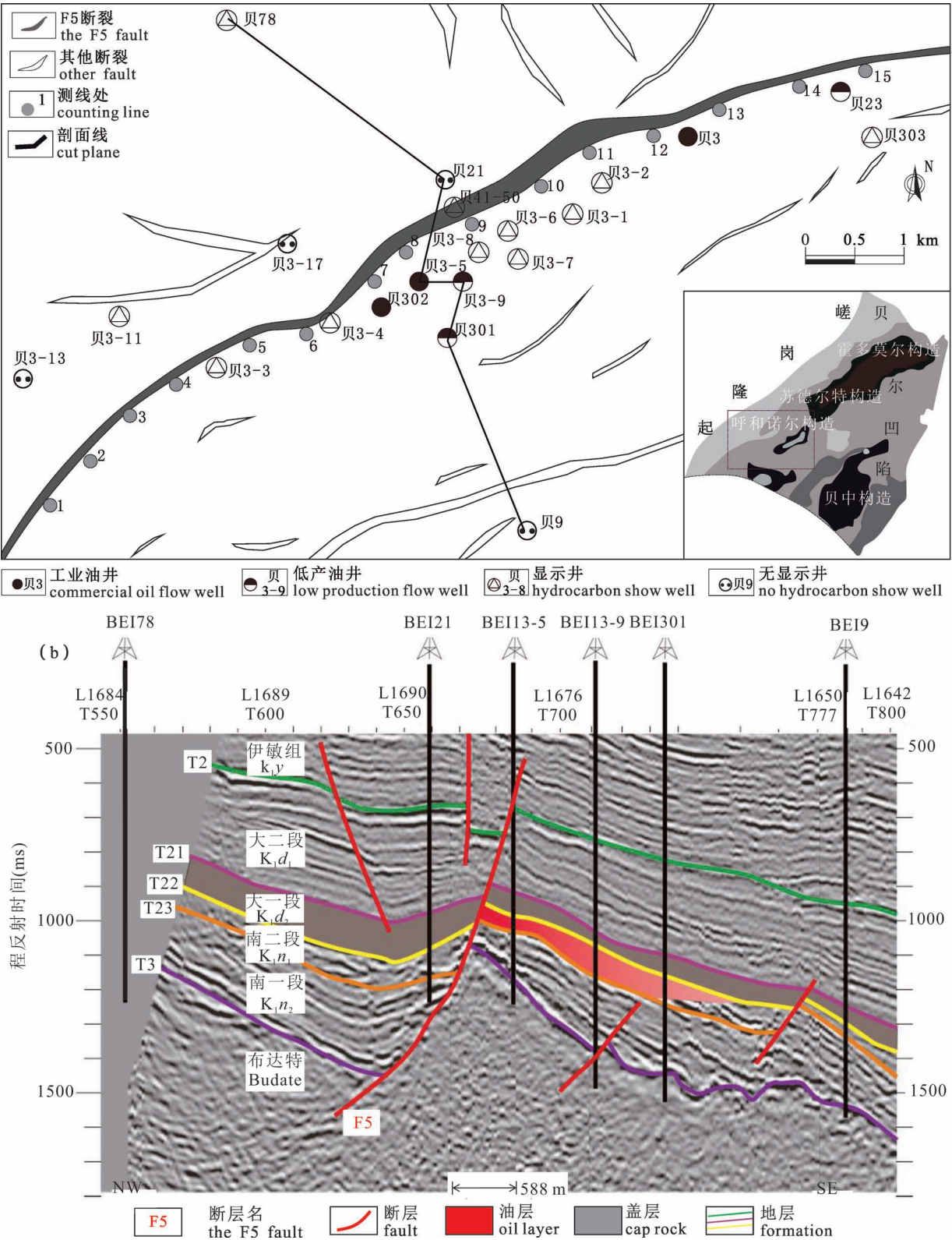


图 3 海拉尔盆地贝尔凹陷呼和诺仁构造 F5 断裂与下白垩统南屯组二段(南二段)油气分布关系:
(a) F5 断裂平面位置;(b) F5 断裂与油气关系剖面图

Fig. 3 Hydrocarbon distribution map of F5 fault and the 2nd Member, Nantun Formation, Lower Cretaceous, in the Huhenuoren Structure, Beier Sag, Hailar Basin: (a) the F5 fault plane location map; (b) the F5 fault and hydrocarbon relationship section

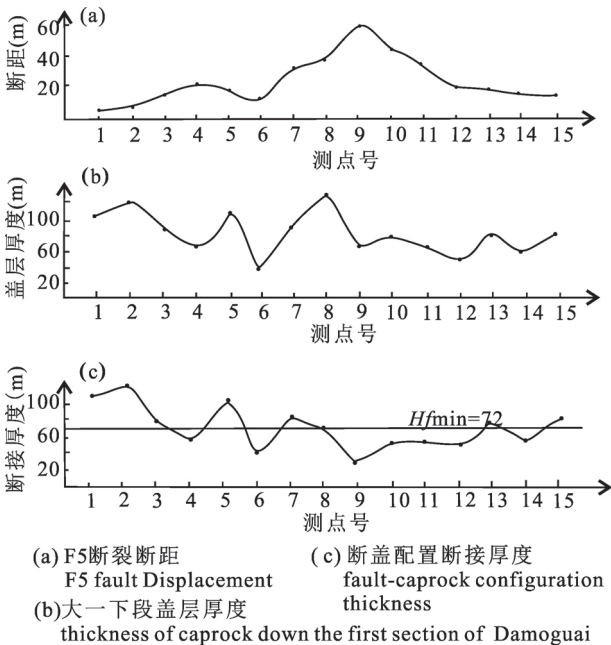


图 4 海拉尔盆地贝尔凹陷呼尔诺仁构造不同测点处 F5 断裂与下白垩统大磨拐河组一段下亚段(大一下段)盖层配置断接厚度分布特征:(a) F5 断裂断距;(b) 大一下段盖层厚度;(c)断盖配置断接厚度

Fig. 4 The thickness distribution characteristics of F5 fault at different measuring points in the Huhenuoren Structure, Beier Sag, Hailar Basin, and cover layer of the Lower Submember, 1st Member, Damoguaihe Formation, Lower Cretaceous (Da-1-L): (a) F5 fault displacement; (b) caprock thickness of the Da-1-L; (c) fault contact thickness of fault—caprock

由图 4c 中可以看出,南部 F5 断裂与大一下段盖层配置古断接厚度相对较大,北部相对较小,由贝尔凹陷断裂破坏大一下段盖层封闭性所需的最大断接厚

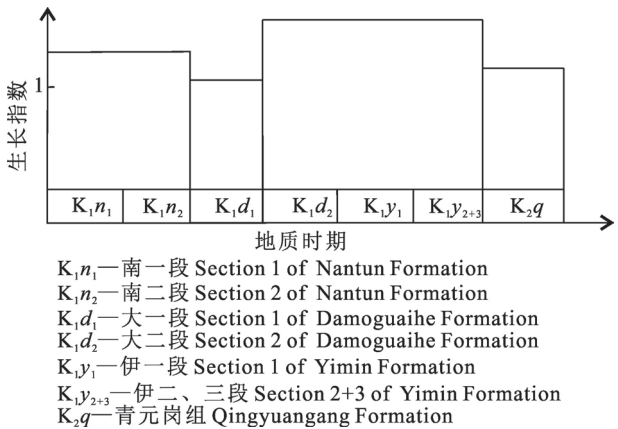


图 5 海拉尔盆地贝尔凹陷不同时期断裂生长指数分布图

Fig. 5 The distribution of fracture growth index in the Beier Sag, Hailaer Basin, in different periods

度(图 6)约为 72 m,在测点 1、2、3、5、7、8、13 和 15 处 F5 断裂与大一下段泥岩盖层配置断接厚度大于断裂破坏大一下段泥岩盖层封闭性所需的最大断接厚度,未破坏大一下段泥岩盖层封闭性,不必恢复其封闭性演化阶段。而测点 4、6、9、11、12 和 14 处 F5 断裂与大一下段盖层配置古断接厚度小于断裂破坏大一下段盖层封闭性所需的最大断接厚度,破坏了大一下段泥岩盖层封闭,须对其封闭性演化阶段进行恢复。

作测点 4、6、9、11、12 和 14 处 F5 断裂与大一下段盖层配置古断接厚度与不同时期的变化关系图(图 7),可以得到除测点 10 处 F5 断裂破坏沙一下盖层封闭性时期略晚于断裂开始时期外,其余测点 4、6、9、11、12 和 14 处 F5 断裂破坏大一下段盖层封闭性几乎在断裂开始活动时期,故可以认为 F5 断裂

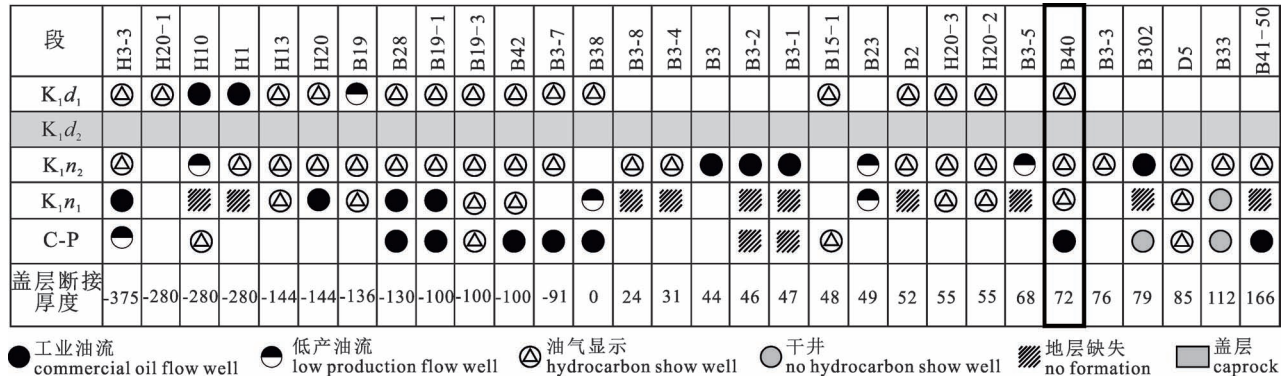


图 6 海拉尔盆地贝尔凹陷断裂破坏盖层封闭性所需的最大断接厚度厘定示意图

Fig. 6 Determination of the maximum faulted thickness required for caprock sealing at the fracture failure in the Beier Sag, Hailaer Basin

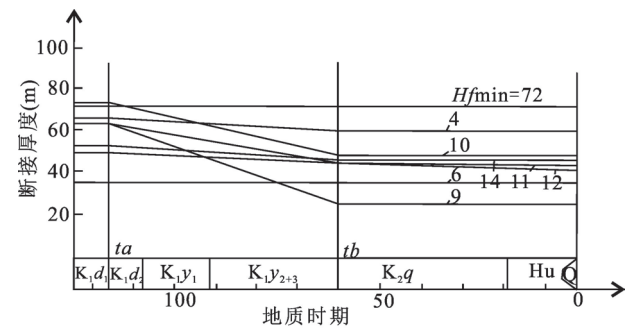


图 7 海拉尔盆地贝尔凹陷呼和诺仁构造 F5 断裂破坏大一下段盖层封闭性厘定图

Fig. 7 Sealing determination of the caprock in the Da-1-L under the fracture failure of the F5 fault in the Huhenuoren Structure, Beier Sag, Hailaer Basin

破坏大一下盖层封闭性时期约为其开始活动时期。即大一段沉积末期。

鉴于上述 7 个测点断裂断距和大一下段盖层厚度等特征差异不大,取测点 12 为代表研究其断层岩封闭开始时期。由测点 12 处 F5 断裂在大一下段盖层内断距(图 4a)、大一段盖层厚度(图 4b)和泥质含量。利用式(1)求取 F5 断裂在大一下段盖层内断层岩泥质含量,约为 0.72,将其代入到海拉尔盆地实测砂泥岩排替压力随其压实成岩埋深和泥质含量之间经验关系式(式 2)中,便可以得到与断层岩泥质含量相同围岩排替压力随压实成岩埋深之间关系,并通过压实成岩埋深与时间之间关系,将其变成与断层岩泥质含量相同围岩排替压力随时间变化关系(图 8),将其由其停止沉积(大一下段沉积末期)移至 F5 断裂停止活动时期(伊敏组沉积末期),作为断层岩排替压力与时间关系(图 8)。

$$R_f = \frac{\sum_{i=1}^n H_i R_i}{L} \tag{1}$$

式中: R_f 为断层岩泥质含量, (%) ; H_i 被断裂错断第 i 层岩层厚度, (m) ; R_i 被断裂错断第 i 层岩层泥质含量, (%) ; n 被断裂错断岩层层数; L 断裂断距, (m) ;

$$P_c = 0.880 e^{0.0172Z_c R_c} \tag{2}$$

式中: P_c 砂泥岩排替压力, (MPa) ; Z_c 砂泥岩压实成

岩埋深, (m) ; R_c 砂泥岩的泥质含量, (%) ;

$$P_s = 0.098 e^{0.0203Z_s R_s} \tag{3}$$

式中: P_s 储层岩排替压力, (MPa) ; Z_s 储层岩压实成岩埋深, (m) ; R_s 储层岩泥质含量, (%) ;

取 F5 断裂在大一下段盖层内断层岩排替压力等于下伏南二段储层岩排替压力所对应的时期,约为青元岗组沉积早期作为断层岩开始封闭时期(图 8)。

由已确定出的 F5 断裂破坏大一下段盖层封闭性开始时期和 F5 断裂在大一下段盖层内断层岩封闭开始时期,可以恢复测点 4、6、9、10、11、12 和 14 点处 F5 断裂在大一下段盖层配置封闭性演化阶段,即不发育盖层封闭阶段,从大一段沉积末期~青元岗组沉积早期为不封闭阶段,从青元岗组沉积早期至今为断层岩封闭阶段。

由图 3a 中可以看出,目前 F5 断裂附近南二段已发现油气主要分布在测点 7、8、13、15 点处封闭的 F5 断裂与大一下段盖层配置部位及附近,而未见油气井主要分布在测点 6、9、10、11 点处不封闭的断盖配置部位附近,这是因为在测点 7、8、13、15 点处 F5 断裂与大一下段盖层配置在油气成藏期一直为盖层封闭,南二段储层中油气不能通过 F5 断裂与大一下段盖层配置向上运移散失,只能在其下附近的圈闭中聚集成藏,油气钻探才显油气。而在测点 6、9、

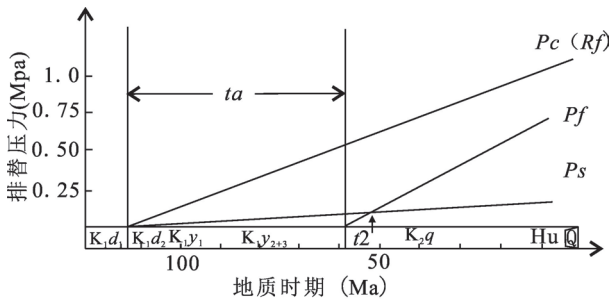


图 8 海拉尔盆地贝尔凹陷呼和诺仁构造 F5 断裂在大一下段盖层内断层岩开始封闭时期厘定图

Fig. 8 The beginning of fault sealing in the caprock of the Da-1-L under the fracture failure of the F5 fault in the Huhenuoren Structure, Beier Sag, Hailaer Basin

Fig. 8 The beginning of fault sealing in the caprock of the Da-1-L under the fracture failure of the F5 fault in the Huhenuoren Structure, Beier Sag, Hailaer Basin

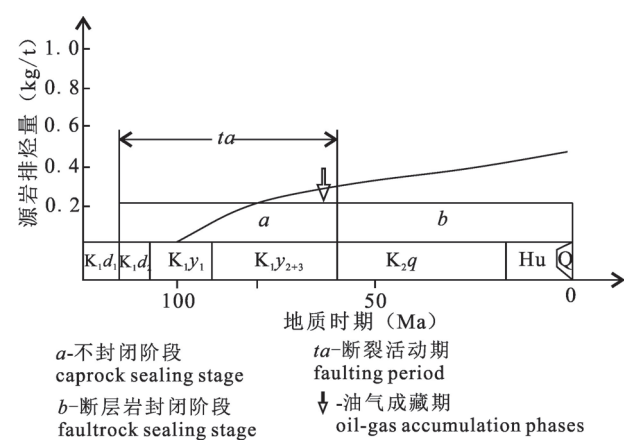


图9 海拉尔盆地贝尔凹陷呼和诺仁构造 F5 断裂与大一下盖层配置不封闭部位封闭性演化阶段与源岩排烃、油气成藏关系图

Fig. 9 Hydrocarbon expulsion of source rock, petroleum entrapment and sealing evolution stage of unsealing parts in the caprock configuration of the Da-1-L under the fracture failure of the F5 fault in the Huhenuoren Structure, Beier Sag, Hailaer Basin

10、11 点处由于 F5 断裂与大一下段盖层配置在油气成藏期处于不封闭阶段,且进入断层岩封闭阶段时期晚于油气成藏期(图 9),无法封闭南一段下部源岩排出的油气,不利于油气在其下南二段聚集成藏,油气钻探未见油气。

4 结论

- (1) 断盖配置封闭性演化通常可以分为 3 个阶段,第一个阶段为盖层封闭阶段,从断裂开始活动至断裂破坏盖层封闭性开始时期;第二个阶段为不封闭阶段,从断裂破坏盖层封闭性开始时期至断层岩封闭开始时期;第三个阶段为断层岩封闭阶段,从断层岩封闭开始时期至今。
- (2) 通过断盖配置断接厚度与时间之间关系和断裂破坏盖层封闭性所需的最大断接厚度,确定断裂破坏盖层封闭性开始时期,通过断层岩排替压力随时间变化关系和储层岩排替压力随时间变化关系,确定断层岩封闭开始时期,据此建立了一套断盖配置封闭性演化阶段恢复方法,并通过实例应用,验证了该方法用于恢复断盖配置封闭性演化阶段的可行性。
- (3) 海拉尔盆地贝尔凹陷呼和诺仁构造 F5 断裂在 4、6、9、10、11、12 和 14 处与大一下盖层配置为不封闭型。其断盖配置不发育盖层封闭阶段,在大

一段沉积末期至青元岗组沉积早期为断盖配置不封闭阶段,在青元岗组沉积早期至现今为断盖配置断层岩封闭阶段,因其在油气成藏期为不封闭阶段,且断盖配置断层岩封闭开始时期晚于油气成藏期(伊敏组沉积末期),不利其下南二段油气聚集与保存,与目前 F5 断裂附近南二段已发现油气分布相吻合。

(4) 该方法主要适用于砂泥岩含油气盆地断盖配置封闭性演化阶段的恢复。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

曹强,叶加仁,王巍. 2007. 沉积盆地地层剥蚀厚度恢复方法及进展. 中国石油勘探, (6): 41~46+76~77.

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,王浩然,胡欣蕾. 2014a. 断层垂向封闭的断—储排替压力差法及其应用. 石油学报, 35(4): 685~691.

付广,历娜,胡明. 2014b. 盖层断接厚度封气下限及其对天然气分布的控制——以松辽盆地徐家围子断陷为例. 天然气地球科学, 25(7): 971~979.

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.

付广,董金梦,彭万涛. 2020a. 断盖配置渗漏与封闭转换时期的确定方法及其应用. 沉积学报, 38(4): 868~875.

付广,梁木桂,邹倩,牟大伟,李乔乔. 2020b. 断盖时间匹配有效性的研究方法及其应用. 中国石油大学学报(自然科学版), 44(1): 25~33.

付晓飞,董晶,吕延防,孙永河. 2012. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷断裂构造特征及控藏机理. 地质学报, 86(6): 877~889.

胡慧婷,王龙,刘岩,秦锐铭,付红军. 2014. 超压泥岩盖层中断层垂向封闭能力研究方法及其应用. 石油与天然气地质, 35(3): 359~364.

李文科,张研,方杰,王君,刘冬民. 2015. 海拉尔盆地贝尔凹陷岩性油藏成藏控制因素. 石油学报, 36(3): 337~346.

刘哲,吕延防,孙永河,李彦彬,张东伟. 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,黄劲松,付广,付晓飞. 2009. 砂泥岩薄互层段中断层封闭性的定量研究. 石油学报, 30(6): 824~829.

吕延防,许辰璐,付广,刘乃瑜,崔守凯,庞磊. 2014. 南堡凹陷中浅层盖—断组合控油模式及有利含油层位预测. 石油与天然气地质, 35(1): 86~97.

吕延防,王伟,胡欣蕾,付广,史集建,王超,刘哲,姜文亚. 2016. 断层侧向封闭性定量评价方法. 石油勘探与开发, 43(2): 310~316.

王海学,付晓飞,付广,吕延防,杜微,刘桐汐. 2014. 三肇凹陷断层垂向分段生长与扶杨油层油源断层的厘定. 地球科学(中国地质大学学报), 39(11): 1639~1646.

于英华,陈达,袁红旗,张亚雄,曹文瑞. 2021. 渤海湾盆地冀中坳陷大柳泉地区 F8 断裂不同时期输导油气能力对油气成藏贡献.

- 地质论评, 67(5): 1478~1486.
- 袁红旗, 张珊珊, 于英华, 周天旗. 2019. 油气沿断裂垂向倒灌运移最大深度的研究方法及其应用. 地质论评, 65(2): 445~452.
- 袁红旗, 曹文瑞, 于英华, 张亚雄. 2021a. 断盖配置渗漏油气时期确定方法及其应用. 地质论评, 67(2): 420~428.
- 袁红旗, 魏鸣禄, 于英华. 2021b. 油源断裂油气成藏期优势运移通道输导能力综合评判方法及其应用. 吉林大学学报(地球科学版), 51(3): 694~703.
- 张喜, 王贵文. 2007. 断层垂向封闭演化史及其研究意义. 大庆石油地质与开发, 26(4): 51~54.
- Cao Qiang, Ye Jiaren, Wang Wei. 2007&. Methods of eroded strata thickness restoration in sedimentary basins and its advancement. China Petroleum Exploration, (6): 41~46+76~77.
- Fu Guang, Shi Jijian, Lü Yanfang. 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.
- Fu Guang, Wang Haoran, Hu Xinlei. 2014a&. Modification and application of fault—reservoir displacement pressure differential method for vertical sealing of faults. Acta Petrolei Sinica, 35(4): 685~691.
- Fu Guang, Li Na, Hu Ming. 2014b&. Gas sealing limit of faulted thickness of caprock and its controlling effect on gas distribution: An example from Xujiaweizi Depression of Songliao Basin. Natural Gas Geoscience, 25(7): 971~979.
- Fu Guang, Zhang Bowei, Wu Wei. 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.
- Fu Guang, Li Shizhao. 2017&. Restoration method of closed evolution history of fractured mudstone cap rock and its application. Editorial Committee of Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 42(9): 1590~1598.
- Fu Guang, Dong Jinmeng, Peng Wantao. 2020a&. Determination method and application for the conversion period of fault—caprock configuration leakage and sealing. Acta Sedimentologica Sinica, 38(4): 868~875.
- Fu Guang, Liang Mugui, Zou Qian, Mu Dawei, Li Qiaoqiao. 2020b&. Research method and its application to effectiveness of time matching of source—fault—caprock. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 44(1): 25~33.
- Fu Xiaofei, Chen Zhe, Yan Baiquan, Yang Mian, Sun Yonghe. 2013&. Analysis of main controlling factors for hydrocarbon accumulation in central rift zones of the Hailar—Tamsag Basin using a fault—caprock dual control mode. Science China (Earth Sciences). 56(8): 1357~1370.
- Fu Xiaofei, Dong Jing, Lü Yanfang, Sun Yonghe. 2012&. Fault structural characteristics of Wuerxun—Beier Depression in the Hailar Basin and their reservoir-controlling mechanism. Acta Geologica Sinica, 86(6): 877~889.
- Hu Huiting, Wang Long, Liu Yan, Qin Peirui, Fu Hongjun. 2014&. Research method of fault vertical sealing capacity in overpressure mudstone caprock and its application. Oil & Gas Geology, 35(3): 359~364.
- Li Wenke, Zhang Yan, Fang Jie, Wang Jun Liu Dongmin. 2015&. Control factors of hydrocarbon accumulation for lithologic reservoirs in Beier depression, Hailar Basin. Acta Petrolei Sinica, 36(3): 337~346.
- Liu Zhe, Lü Yanfang, Sun Yonghe, Li Yanbin, Zhang Dongwei. 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.
- Lü Yanfang, Huang Jinsong, Fu Guang, Fu Xiaofei. 2009&. Quantitative study on fault sealing ability in sandstone and mudstone thin interbed. Acta Petrolei Sinica, 30(6): 824~829.
- Lü Yanfang, Xu Chenlu, Fu Guang, Liu Naiyu, Cui Shoukai, Pang Lei. 2014&. Oil-controlling models of caprock—fault combination and prediction of favorable horizons for hydrocarbon accumulation in middle—shallow sequences of Nanpu sag. Oil & Gas Geology, 35(1): 86~97.
- Lü Yanfang, Wang Wei, Hu Xinlei, Fu Guang, Shi Jijian, Wang Chao, Jiang Wenya. 2016&. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing. Petroleum Exploration and Development, 43(2): 310~316.
- Wang Haixue, Fu Xiaofei, Fu Guang, Lü Yanfang, Du Wei, Liu Tongxi. 2014&. Vertical segmentation growth of fault and oil source fault determination in Fuyang oil layer of Sanzgao Depression. Editorial Committee of Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 39(11): 1639~1646.
- Yu Yinghua, Chen Da, Yuan Hongqi, Zhang Yaxiong, Cao Wenrui. 2021&. Contribution of hydrocarbon transport capacity of the fault F8 to hydrocarbon accumulation in different periods in Daliuquan area, Langgu Sag, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin, Geological Review, 67(5): 1478~1486.
- Yuan Hongqi, Zhang Shanshan, Yu Yinghua, Zhou Tianqi. 2019&. The research method and its application of the maximum depth of oil and gas vertically downward migr. Geological Review, 65(2): 445~452.
- Yuan Hongqi, Cao Wenrui, Yu Yinghua, Zhang Yaxiong. 2021a&. Determination method and application of leakage period for oil and gas of fault—caprock configuration. Geological Review, 67(2): 420~428.
- Yuan Hongqi, Wei Minglu, Yu Yinghua. 2021b&. Comprehensive evaluation method for oil and gas transmission capacity of oil source fracture dominant channel in oil and gas accumulation period and its application. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 51(3): 694~703.
- Zhang Xi, Wang Guiwen. 2017&. Evolution history of vertical seal of faults and its research significance. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 42(9): 1590~1598.

Restoration method of fault—caprock configuration sealing evolution stage and its application

WU Yunong¹⁾, YUAN Hongqi¹⁾, ZHANG Yaxiong²⁾, WANG Hanqiang³⁾

1) School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318;

2) China Petroleum and Chemical Corporation, Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing, 100083;

3) No. 4 Oil Mine of No. 1 Oil Production Plant of Daqing Oil Field Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163114

Objectives: To study the oil and gas distribution law of the fault—caprock configuration in the petroliferous basin.

Methods: The sealing evolution stages of fault—caprock configuration was divided; the relationship between the faulted thickness of fault—caprock configuration and time was analyzed, and the maximum faulted thickness required for caprock sealing in the fracture failure was obtained; then the starting period of caprock sealing in the fracture failure was determined. According to the displacement pressure of fault rock and reservoir rock with time, the starting period of fault sealing was determined. Based on this, a set of restoration methods for the sealing evolution stage of fault—caprock configuration was established, and these methods were applied to the restoration of sealing evolution stage at measuring points 4, 6, 9, 10, 11, 12 and 14 in the F5 fault of the Huhenuoren Structure, Beier Sag, Hailaer Basin, and the caprock configuration in the Lower Submember, 1st Member, Damoguaihe Formation, Lower Cretaceous(Da-1-L).

Results: The results showed that the caprock sealing stage was not developed at measuring points 4, 6, 9, 10, 11, 12 and 14 in the F5 fault and the caprock configuration of the Da-1-L. The unsealing stage was from the late deposition of the Da-1-L to the early deposition of the Qingyuangang Formation, Upper Cretaceous, and the fault sealing stage was from the early deposition of the Qingyuangang Formation to the present. The stratigraphic trap in the study area was in unsealing stage during the hydrocarbon accumulation period, and the beginning of fault sealing was later than the period of oil and gas accumulation (the late deposition of the Yimin Formation, Lower Cretaceous). As a result, it was not conducive to the accumulation and preservation of oil and gas in the Second Member of the Nantun Formation, Lower Cretaceous.

Conclusions: The results of the proposed methods are consistent with the current oil and gas distribution in the Second Member of the Nantun Formation, Lower Cretaceous, near the F5 fault, indicating that this method is feasible to restore the sealing evolution stage of fault—caprock configuration.

Keywords: Fault—caprock configuration; sealing; evolution stage; restoration method

Acknowledgements: This article was financially supported by the Reform of Higher Education in Heilongjiang Province (No. GJC1319016), the Industry—University Cooperation Education Project of the Ministry of Education(No. 201902302045), the National Natural Science Foundation of China (No. 41572126), and the National large Oil and Gas Field and Coalbed Methane Development Project (No. 2016ZX05006-005)

First author: WU Yunong, male, born in 1990, doctor student; Email: 382212719@qq. com

Corresponding author: YUAN Hongqi, male, born in 1979, professor, mainly engaged in the teaching and research of oil and gas geology and exploration; Email: yuan_flag@ 163. com

Manuscript received on: 2021-07-29; Acceptedon: 2021-10-29; Network published on: 2021-11-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 11. 041

Edited by: LIU Zhiqiang

