

断裂诱发砂体输导油气变径部位预测方法及其应用

何春波¹, 张亚雄², 于英华¹, 袁红旗¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要:为了揭示含油气盆地斜坡区浅层油气分布规律,研究了断裂在改变砂体输导油气运移路径方面的作用。通过将盖层渗漏部位、断裂输导油气优势运移路径和砂体输导油气优势运移路径三者叠合,建立了一套预测断裂诱发砂体输导油气运移路径变化(变径)部位的方法,并将其应用于渤海湾盆地歧口凹陷,预测赵北断裂诱发沙河街组一段下亚段(沙一下亚段)砂体输导的油气变径进入浅层馆陶组的部位。结果表明:赵北断裂诱发的变径部位仅有1处,分布在沙一下亚段的中部,沙一下亚段砂体输导的油气在此处变径沿赵北断裂运移至上覆的浅层馆陶组中汇聚成藏。这一预测结果与赵北断裂附近浅层馆陶组已发现油气主要分布在中部相吻合,表明该方法用于预测断裂诱发砂体输导油气变径部位是可行的。

关键词:砂体输导油气;变径部位;预测方法;断裂;油气运移;歧口凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

A method for predicting fault-induced changes of hydrocarbon migration pathways along sand carrier beds and its application

HE Chunbo¹, ZHANG Yaxiong², YU Yinghua¹, YUAN Hongqi¹

(1. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: To reveal the distribution patterns of shallow hydrocarbons in slope zones of petroliferous basins, we explore the role of faults in changing the pathways for hydrocarbon migration along sand carrier beds, as well as the exact change. By matching the hydrocarbon leakage location of the cap rock with the dominant migration pathway along faults and sand carrier beds, we establish a method for predicting the fault-induced changes of hydrocarbon migration pathways along the sand carrier beds. By applying this method to the Qikou Sag in the Bohai Bay Basin, we predict the Zhaobei fault-induced change of pathways for hydrocarbon migration along the sand carrier beds in the lower submember of the 1st member of the Shahejie Formation where hydrocarbons migrate into the shallow Guantao Formation. The results indicate only one change in the migration pathways induced by the Zhaobei fault, lying in the middle of the lower submember of the 1st member of the Shahejie Formation. In this part, hydrocarbons migrating via the sand carrier beds in the lower submember migrate upward along the Zhaobei fault and accumulate in the overlying shallow Guantao Formation. This prediction result aligns with the fact that hydrocarbons found in the shallow Guantao Formation near the Zhaobei fault are predominantly distributed in the middle of the lower submember. Therefore, the method proposed in this study is feasible in predicting fault-induced changes of the hydrocarbon migration pathways along the sand carrier beds.

Key words: hydrocarbon migration along sand carrier bed, change of hydrocarbon migration pathway, prediction method, fault, hydrocarbon migration, Qikou Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:何春波,张亚雄,于英华,等. 断裂诱发砂体输导油气变径部位预测方法及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1300-1307. DOI: 10.11743/ogg20230518.

收稿日期:2023-02-07;修回日期:2023-08-02。

第一作者简介:何春波(1980—),男,博士、讲师,盆地构造分析。E-mail:hechunbo@nepu.edu.cn。

通讯作者简介:于英华(1979—),女,博士、教授,油气成藏与储层地质。E-mail:42530546@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572126);黑龙江省自然科学基金项目(LH2022D013, LH2023D005);黑龙江省中央支持地方高校青年骨干人才项目(14011202101);黑龙江省重点研发计划项目(JD22A022)。

HE Chunbo, ZHANG Yaxiong, YU Yinghua, et al. A method for predicting fault-induced changes of hydrocarbon migration pathways along sand carrier beds and its application[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1300–1307. DOI: 10. 11743/ogg20230518.

含油气盆地油气勘探实践表明,断裂对油气运移具有重要控制作用。在凹陷区,断裂可以将烃源岩生成的油气直接输导至浅部地层;在斜坡区,油气侧向运移所赋存的砂体被断裂切割时,断裂导致砂体输导油气运移路径改变(变径),使油气向浅部调整,变径不但控制着斜坡区油气运聚层位,而且变径部位还控制着斜坡区油气运聚部位。因此,对于斜坡区浅层油气勘探工作,准确地判识断裂诱发砂体输导油气变径部位是至关重要的。

目前,学者对断裂诱发砂体输导油气变径作用及部位进行了一定的研究,概括为两方面认识:一是根据断-盖配置关系,确定断裂诱发砂体输导油气变径的条件^[1-4],只有断裂贯通盖层情况下,油气由砂体输导的侧向运移变为断裂输导的垂向运移,即断裂对砂体输导油气起变径作用;二是根据油气成藏期,基于断-盖配置的古断接厚度和盖层内断裂分段生长上下连接所需的最大断接厚度的比较,研究断裂对砂体输导油气变径分布区^[5-8],将断-盖配置古断接厚度小于盖层内断裂垂向分段生长连接所需最大断接厚度的部位圈定在一起,即为油气在沿砂体输导过程中断裂起到变径的部位。但是,前人主要侧重于源内油气沿断裂运移至浅层有利部位的预测研究^[9-12],对于源外油气沿砂体运移过程中,断裂诱发砂体输导油气变径部位的研究仍较薄弱。

1 断裂诱发砂体输导油气变径作用

在含油气盆地内,断裂垂向分段生长连接较为普遍。如果位于盖层上部和下部的断裂在盖层内相互连接(硬连接),盖层之下砂体输导的油气遇到断裂后则不再继续侧向运移,而是沿着连接的断裂穿过盖层垂向运移,断裂对砂体输导的油气起到变径作用。如果位于盖层上部和下部的断裂在盖层内没有相互连接(软连接),此时盖层是封闭的,那么油气就不能通过盖层继续向上运移,盖层之下砂体输导的油气遇到断裂后仍然穿过断裂继续侧向运移,断裂对砂体输导的油气不起变径作用。

2 断裂诱发砂体输导油气变径部位预测方法

断裂诱发砂体输导油气变径部位是盖层渗漏部位、断裂输导油气优势路径及砂体输导油气优势路径

的耦合部位。

2.1 盖层渗漏部位

断接厚度是盖层被断裂切割后、断裂两盘盖层仍然对接的厚度,是表征受断裂切割的盖层封闭能力的重要参数。利用地震及钻井资料求取现今盖层厚度和断裂错开盖层的断距,通过地层古厚度定量恢复方法^[13]和最大断距相减法^[14]分别恢复油气成藏期盖层古厚度和断裂错开盖层的古断距,由前者减去后者求取盖层古断接厚度(图1)。由文献^[15]中断裂在盖层内分段生长上、下连接所需的最大断接厚度确定断裂在盖层内垂向分段生长连接所需的最大断接厚度。盖层古断接厚度小于断裂在盖层内垂向分段生长连接所需的最大断接厚度的部位是盖层渗漏部位(图1)。

2.2 断裂输导油气优势路径

输导断裂是油气成藏过程中活动、且连接烃源岩与目的层的断裂,断裂输导油气优势路径与输导断裂的活动速率密切相关。在地震解释基础上,进行层位、断裂时-深转换,读取现今输导断裂的断距,由文献^[14]中断裂古断距复原方法恢复油气成藏过程中输导断裂在目的层内的古断距,用古断距除以断裂活动时期,最终就可以求得输导断裂在目的层内不同部位古活动速率,由文献^[15]中的方法确定研究区断裂输导油气所需的最小活动速率,断裂古活动速率大于最小古活动速率所对应的部位就是断裂输导油气优势路径(图2)。

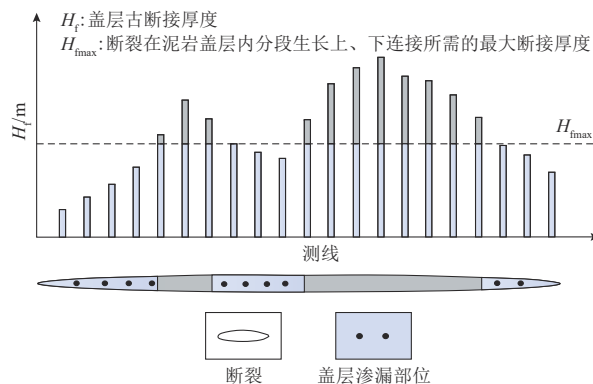


图1 盖层渗漏部位厘定示意图

Fig. 1 Schematic diagram for determining hydrocarbon leakage position of cap rocks

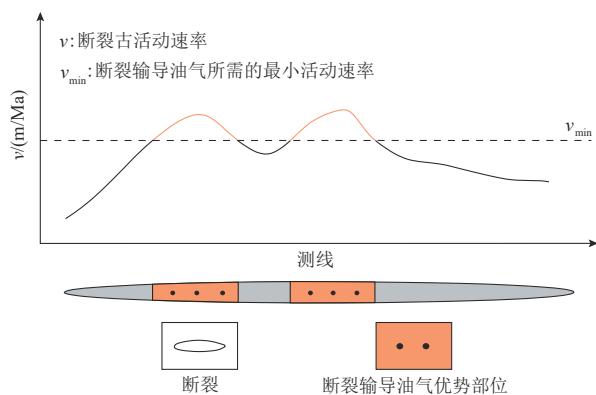


图2 断裂输导油气优势路径厘定示意图

Fig. 2 Schematic diagram for determining dominant pathways for hydrocarbon migration along faults

2.3 砂体输导油气优势路径

砂体连通分布区内古构造脊的分布范围是砂体输导油气优势路径,因此,首先确定砂体连通分布区。应利用钻井资料统计目的层的砂地比值,根据文献[16]所述方法确定出目的层砂体连通分布所需的最小砂地比值,在平面图中,将大于砂体连通分布所需的最小砂地比值连在一起,就能确定出目的层砂体连通分布区。在此基础上,再确定砂体所在地层顶面古构造脊的分布范围。利用地震资料读取现今砂体地层顶面埋深,通过文献[17]中地层古埋深复原方法复原其在形成油气藏的过程中的古埋深,根据[公式(1)]求得古油气势能值,并制作古油气势能等值线,其法线汇聚线便是砂体所在地层顶面古构造脊的分布范围。最后将砂体连通分布区和砂体所在地层顶面古构造脊分布范围叠合,得到砂体输导油气优势路径(图3)。

$$\Phi = gZ + \frac{p}{\rho} \quad (1)$$

式中: Φ 为古油气势能,kJ; Z 为古埋深,m; p 为流体压力,MPa(其大小等于 $\rho_w Z$, ρ_w 为地层水密度, g/cm^3); ρ 为油气密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

将上述确定出的盖层渗漏部位、断裂输导油气优势路径与砂体输导油气优势路径叠合,取三者重合部位,就能获得油气沿砂体运移过程中断裂诱发的变径部位。

3 实例应用

本次以渤海湾盆地歧口凹陷赵北断裂为研究对象,根据上述方法,预测其诱发的沙一下亚段砂体向浅层馆陶组输导油气变径部位,将所得结果与实际研究区馆陶组的油气分布特征进行对比,证明本文所述方法用来研

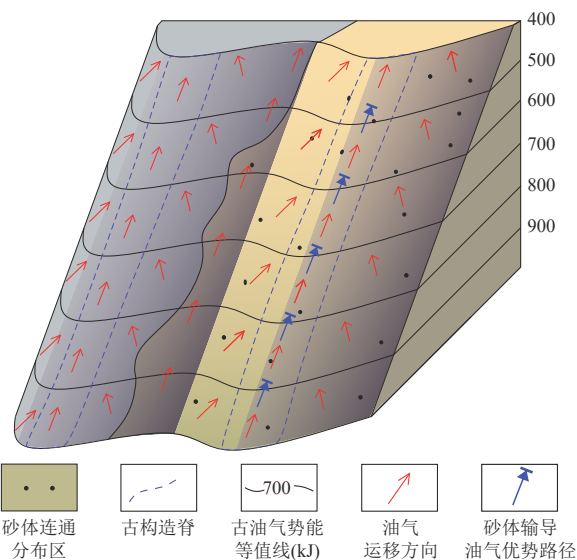


图3 砂体输导油气优势路径厘定示意图

Fig. 3 Schematic diagram for determining dominant pathways for hydrocarbon migration along sand carrier beds

究断裂诱发砂体输导油气变径部位是可行的。

赵北断裂是一条位于歧口凹陷歧南斜坡区的正断裂,走向NEE,倾向NNW,倾角 $22^\circ \sim 77^\circ$,长约20.3 km,从基底一直延伸到地表附近,具有长期继承性发育特点(图4)。研究区地层自下而上发育古近系、新近系和少量第四系,古近系自下而上发育孔店组(Ek)、沙河街组(Es)、东营组(Ed);新近系自下而上发育馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm)。目前研究区的油气大量分布在沙河街组,沙一下亚段油气最为发育,明化镇组和馆陶组油气发育较少。由于研究区处于歧南次凹沙三段源岩区的东南部,源岩生成油气通过油源断裂运移至沙一下亚段,再被沙一下亚段内砂体侧向运移至歧南斜坡区;侧向运移的油气在遇到赵北断裂时,由于赵北断裂破坏了其沙一中亚段和东二段区域性泥岩盖层,沙一下亚段砂体输导的油气不再继续侧向运移,而是沿赵北断裂向浅层馆陶组垂向运移,目前赵北断裂处馆陶组油气仅分布在中部(图4a),这除了与圈闭和砂体发育有关外,更主要的是受到了赵北断裂诱发的沙一下亚段砂体输导油气变径部位的影响,因此准确地预测变径部位是赵北断裂附近浅层馆陶组油气勘探的关键。

利用井-震资料确定出赵北断裂在东二段和沙一中亚段区域性泥岩盖层内断距和被赵北断裂所断开的东二段和沙一中亚段泥岩盖层厚度,由文献[13-14]中断裂古断距和地层古厚度复原方法求得明化镇组沉积中后期赵北断裂在沙一中亚段和东二段区域性泥岩盖层内古断距和被赵北断裂错断沙一中亚段区域性泥岩盖层古厚度,通过盖层古厚度减去古断距得到研究

区沙一中亚段与东二段泥岩盖层古断接厚度^[18-19]。因歧口凹陷沙一中亚段和东二段泥岩盖层封闭油气所需的最小断接厚度分别约为139 m和236 m(图5),其与赵北断裂在沙一中亚段和东二段区域性泥岩盖层内古

断接厚度分别相比较,可以确定赵北断裂除了西部局部外,沙一中亚段区域性泥岩盖层皆为渗漏油气部位;东二段区域性泥岩盖层西部为封闭油气部位,中部和东部皆为渗漏油气部位(图6)。

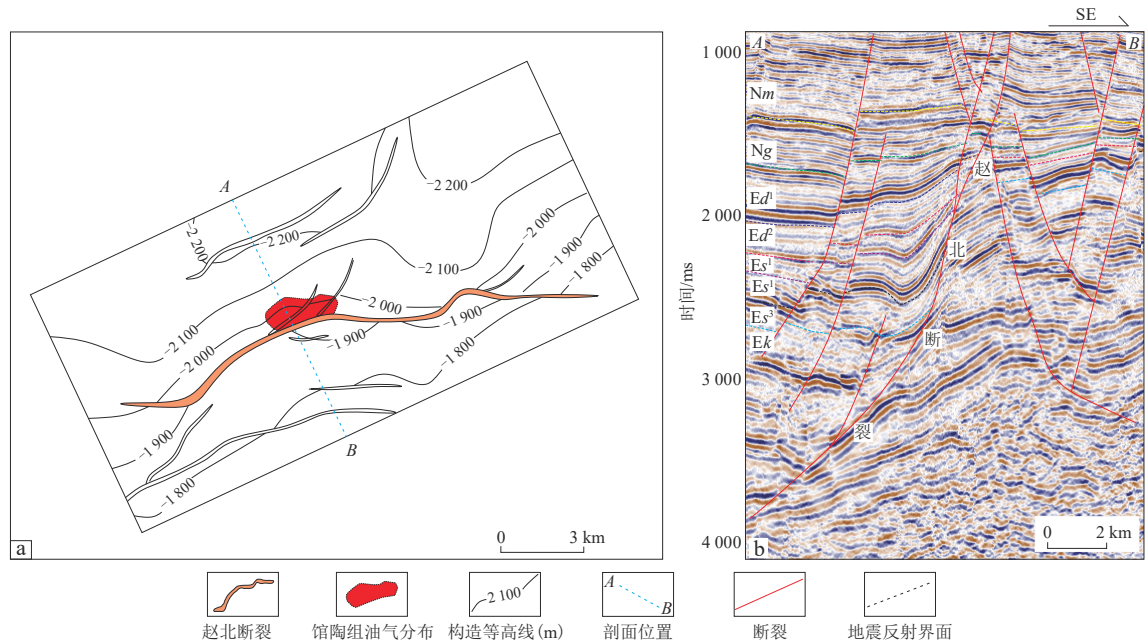


图4 赵北断裂与馆陶组油气分布关系

Fig. 4 Relationships between the Zhaobei fault and the hydrocarbon distribution in the Guantao Formation

a. 赵北断裂与馆陶组油气分布关系;b. 过赵北断裂地震剖面

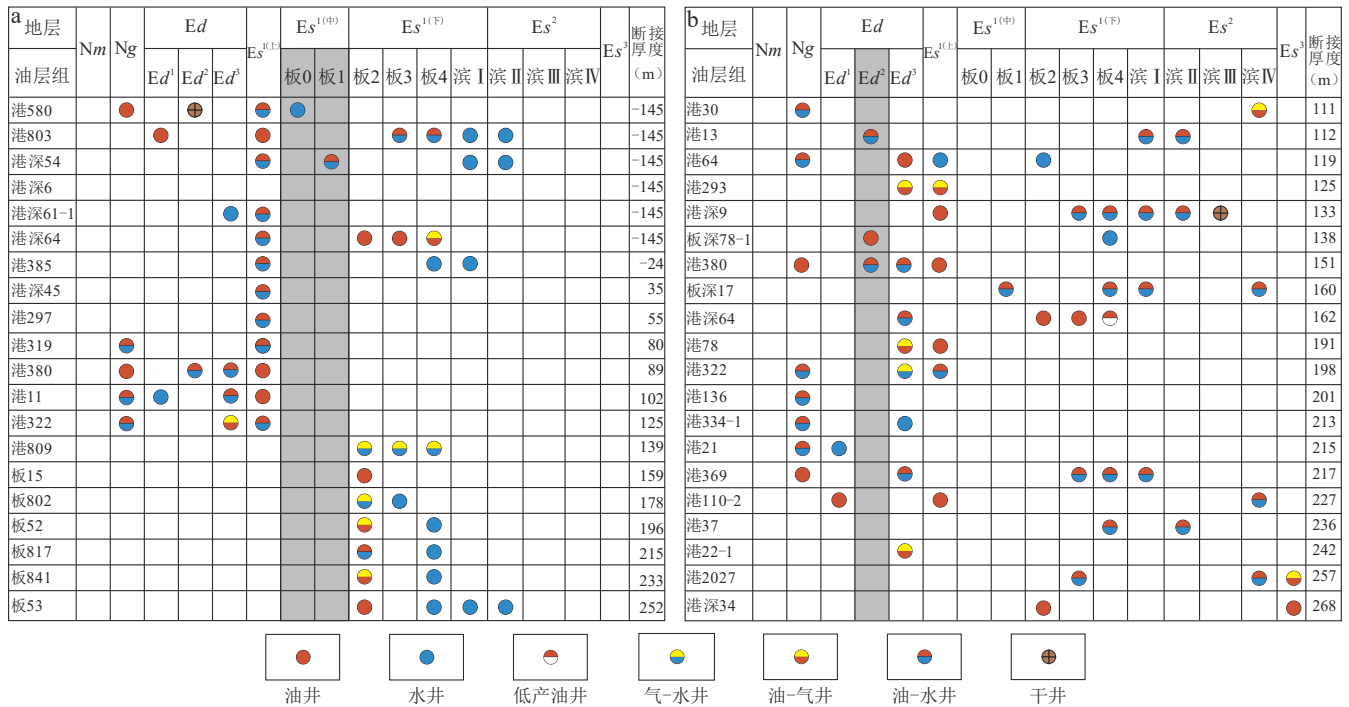


图5 歧口凹陷沙一中亚段和东二段区域性泥岩盖层封闭油气所需的最小断接厚度厘定

Fig. 5 Determination of the minimum juxtaposition thicknesses of the regional mudstone cap rocks for hydrocarbon sealing in the middle submember of the 1st member of the Shahejie Formation and the 2nd member of the Dongying Formation in the Qikou Sag

a. 沙一中亚段;b. 东二段

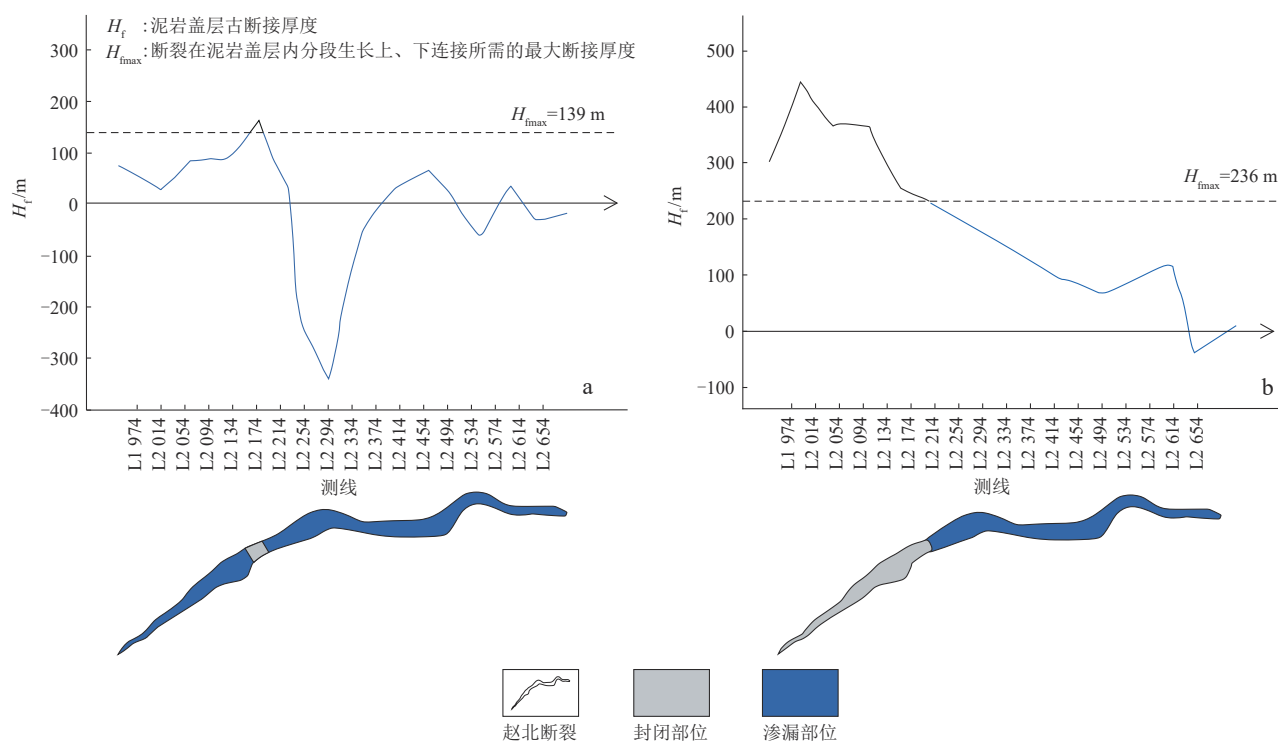


图6 被赵北断裂破坏的沙一中亚段(a)和东二段(b)区域性泥岩盖层渗漏油气部位厘定

Fig. 6 Determination of the hydrocarbon leakage position in the regional mudstone cap rocks destroyed by the Zhaobei fault in the middle submember of the 1st member of the Shahejie Formation and the 2nd member of the Dongying Formation

依据文献[20]可知歧口凹陷断裂输导油气所需的最小活动速率约为4 m/Ma(图7)。利用三维地震资料确定赵北断裂在沙一下亚段内断距,由文献[13]中断裂古断距复原方法复原明化镇组沉积中后期油气成藏过程中赵北断裂在沙一下亚段内古断距,再利用所求得的古断距除以断裂具体活动时期,就能获得赵北断裂在沙一下亚段内古活动速率,赵北断裂走向上不同部位在沙一下亚段内古活动速率均大于4 m/Ma

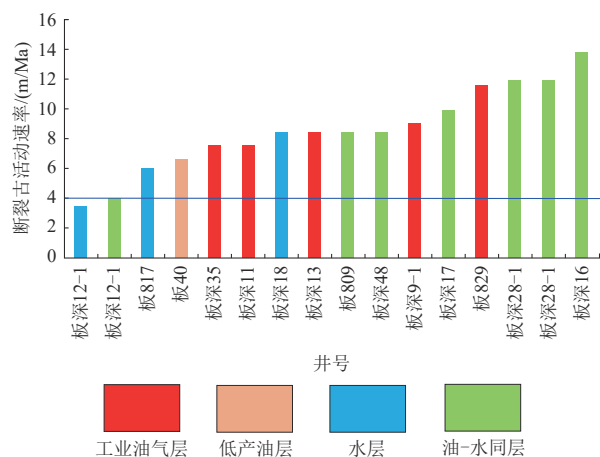


图7 歧口凹陷断裂输导油气所需的最小活动速率厘定

Fig. 7 Determination of the minimum paleo-activity rate required for hydrocarbon migration along faults in the Qikou Sag

(图8),表明整个赵北断裂均为输导油气优势路径。

通过钻井等资料求出研究区沙一下亚段的地层砂地比值,然后做出其平面分布图^[21],基于研究区所在的歧口凹陷中沙一下亚段砂体连通分布所需的最小地

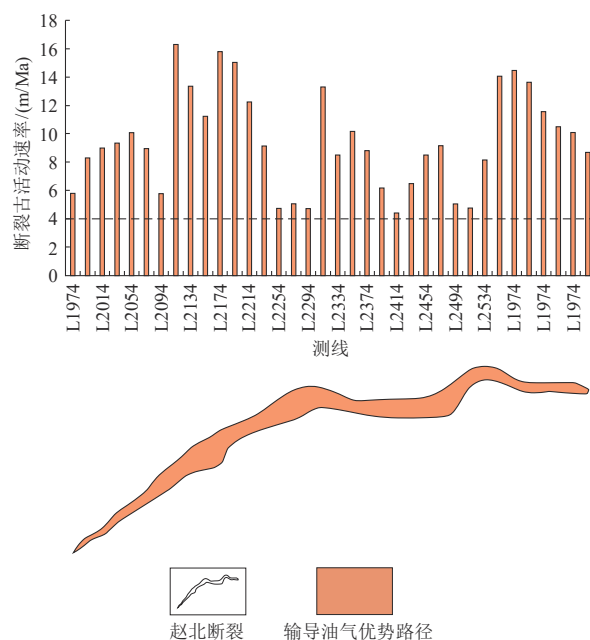


图8 赵北断裂输导油气优势路径厘定

Fig. 8 Determination of the dominant pathway for hydrocarbon migration along the Zhaobei fault

层砂/地比值约为15%(图9)^[22],能够得到研究区的沙一下亚段砂体连通分布区有3处,分别是西部、中部和东部(图10a)。

通过文献^[17]中地层古埋深复原方法恢复明化镇组沉积中后期油气成藏过程中沙一下亚段顶面古埋深,再根据[公式(1)]计算方法,求得沙一下亚段顶面的古油气势能值,古油气势能等值的线法线汇聚线就是研究区沙一下亚段顶面古构造脊的发育位置(图10b),研究区沙一下亚段顶面古构造脊共有4条,其中在研究区的东部分布1条,中部分布1条,其余2条分布在西部。

将上述已确定出的赵北断裂附近沙一下亚段砂体连通分布区和沙一下亚段顶面古构造脊分布叠合,就

能够确定出研究区沙一下亚段内的砂体输导油气优势路径(图10c),研究区存在2条砂体输导油气优势路径,分别分布在中部和西部。这2条砂体输导油气优势路径连接了西北岐南次凹沙三段源岩,向赵北断裂输导油气。位于东部的古构造脊未与北部岐口主凹沙三段源岩连接,因此不能向赵北断裂输导油气,是无效的砂体输导油气优势路径。

将上述研究中已确定出的沙一中亚段区域性泥岩盖层渗漏部位、东二段区域性泥岩盖层渗漏部位、赵北断裂输导油气优势路径及沙一下亚段砂体输导油气优势路径叠合,便能够确定出赵北断裂诱发的沙一下亚段砂体向浅层馆陶组输导油气变径部位,变径部位仅有一处,分布在中部(图11)。

目前在赵北断裂附近馆陶组已发现的油气主要分布在中部,正位于赵北断裂诱发的沙一下亚段砂体向浅层馆陶组输导油气变径部位及其附近。在该部位,赵北断裂将沙一下亚段砂体输导的油气垂向调整到浅层馆陶组,并在馆陶组赵北断裂中部附近聚集成藏。

4 结论

1) 建立了一套将盖层渗漏部位、断裂输导油气优势路径及砂体输导油气优势路径三者叠合,预测断裂诱发砂体输导油气变径部位的方法。

2) 断裂诱发砂体输导油气变径部位越发育,越有利于浅层油气聚集;反之则不利于浅层油气聚集。

3) 赵北断裂诱发的沙一下亚段砂体向浅层馆陶组输导油气变径部位仅有1处,且分布在中部,使用该方法预测的结果与赵北断裂附近浅层馆陶组已发现油

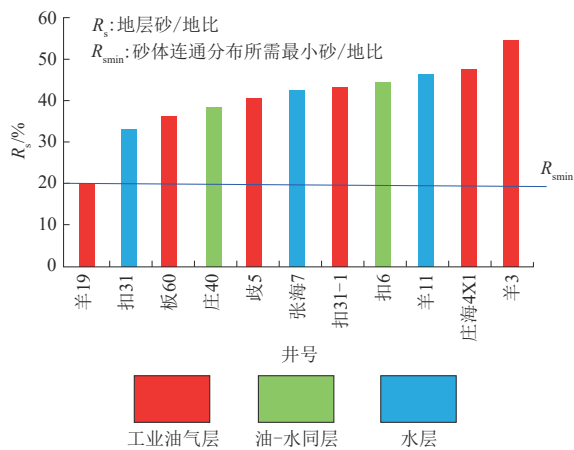


图9 歧口凹陷沙一下亚段砂体连通分布所需的最小地层砂/地比厘定

Fig. 9 Determination of the minimum net-to-gross ratio required for the connected distribution of sand bodies in the lower submember of the 1st member of the Shahejie Formation of the Qikou Sag

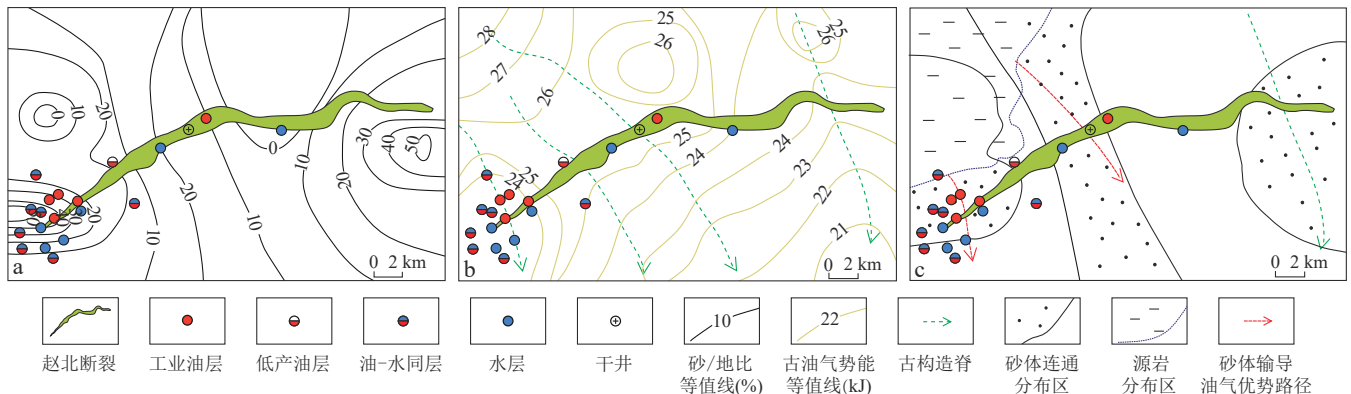


图10 赵北断裂在沙一下亚段内输导油气优势路径厘定

Fig. 10 Determination of the dominant pathways for hydrocarbon migration along the sand carrier beds in the lower submember of the 1st member of the Shahejie Formation

a. 砂/地比分布; b. 顶面古构造脊分布; c. 砂体输导油气优势路径分布

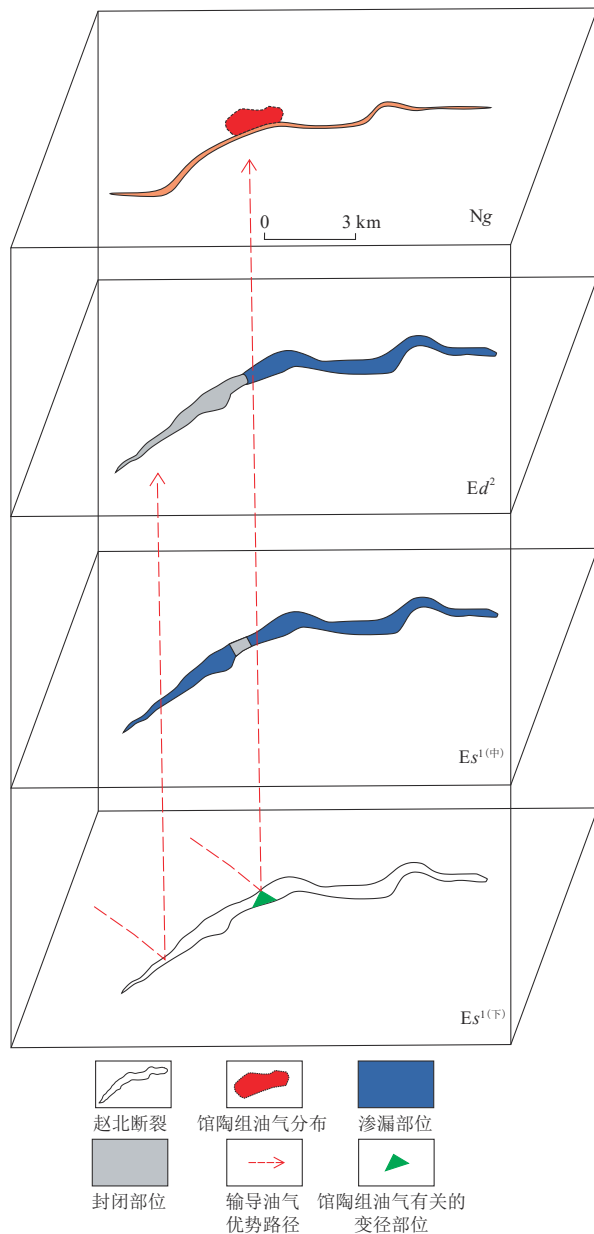


图11 赵北断裂对沙一下亚段砂体输导油气向浅层馆陶组的变径作用部位与馆陶组油气分布之间关系

Fig. 11 Relationship between the hydrocarbon distribution in the Guantao Formation and the Zhaobei fault-induced change of pathways for hydrocarbon migration along the sand carrier beds in the lower submember of the 1st member of the Shahejie Formation where hydrocarbons migrate into the shallow Guantao Formation

气主要分布在中部相吻合,表明该方法用于预测断裂诱发砂体输导油气变径部位是可行的。

参 考 文 献

- [1] 付广,董金梦,彭万涛. 断盖配置渗漏与封闭转换时期的确定方法及其应用[J]. 沉积学报, 2020, 38(4): 868-875.
FU Guang, DONG Jinmeng, PENG Wantao. Determination method and application for the conversion period of fault-caprock configuration

leakage and sealing[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(4): 868-875.

- [2] 鞠俊成. 辽河坳陷西部凹陷潜山油气输导体系特征[J]. 特种油气藏, 2022, 29(4): 55-61.
JU Juncheng. Hydrocarbon Transmission System Characteristics of Buried Hills in West Sag, Liaohe of Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(4): 55-61.
- [3] 沙子萱,于丹,付广. 下生上储式与上生下储式油源断裂油气输导差异[J]. 特种油气藏, 2022, 29(2): 9-15.
SHA Zixuan, YU Dan, FU Guang. Difference in oil and gas transport between lower-source and upper-reservoir and upper-source and lower-reservoir oil source faults[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(2): 9-15.
- [4] 王运增. 敖古拉断裂输导油气有利部位及其对萨葡高油层油气聚集规律的影响[J]. 特种油气藏, 2021, 28(4): 10-15.
WANG Yunzeng. Favorable Hydrocarbon transport sites of Aogula Fault and their influence on hydrocarbon accumulation pattern of Saertu, Putaohua Gaotaizi Reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(4): 10-15.
- [5] 付广,梁木桂,李健如. 油源断裂活动期输导油气有利部位预测方法的改进[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(6): 42-50.
FU Guang, LIANG Mugui, LI Jianru. Improved prediction method of favorable positions for oil and gas transport of active oil-source faults[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(6): 42-50.
- [6] 付广,韩旭. 油气由凹陷区断裂输导向斜坡区砂体输导转换部位预测方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 42-50.
FU Guang, HAN Xu. Methodology for predicting transfer position of oil and gas transmission from fault in depression to sand body in slope area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 42-50.
- [7] 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 faults: An example from middle and shallow strata in Nanpu Depression [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2013, 38(4): 783-791.
- [8] 王耀华,甘军,梁刚,等. 断裂-砂体-潜山复式天然气输导体系及成藏模式: 以琼东南盆地深水为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 319-324.
WANG Yaohua, GAN Jun, LIANG Gang, et al. Composite fault-sand body-buried hill migration systems and accumulation models of natural gas: a case study of the deep-water area in Qiongdongnan Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(3): 319-324.
- [9] 王文广,付广,胡明. 利用地震资料预测断裂发育区泥岩盖层封油气区的方法[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1251-

- 1257.
- WANG Wenguang, FU Guang, HU Ming. Method for predicting oil and gas sealing area of mudstone caprock in fracture development zone by seismic data [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(3): 1251–1257.
- [10] 杨德相, 付广, 孙同文, 等. 油源断裂优势通道输导油气能力综合评价方法及其应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(6): 1678–1686.
- YANG Dexiang, FU Guang, SUN Tongwen, et al. Comprehensive evaluation method and its application of oil carrying capacity through dominant channel of oil source fault [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(6): 1678–1686.
- [11] 姜贵璞, 付广, 孙同文. 利用地震资料确定油源断裂输导油气能力及油气富集的差异性[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(1): 160–166.
- JIANG Guipu, FU Guang, SUN Tongwen. Seismic data is used to determine the transportation oil-gas ability of oil source faults and the difference of oil-gas accumulation [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(1): 160–166.
- [12] 徐田武, 张光斌, 张琛琛, 等. 东濮凹陷马厂油田断裂内部结构特征对油气成藏的意义[J]. *断块油气田*, 2012, 19(6): 692–695.
- XU Tianwu, ZHANG Guangbin, ZHANG Chenchen, et al. Effect of internal structure characteristics of fracture on hydrocarbon accumulation in Machang Oilfield of Dongpu Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2012, 19(6): 692–695.
- [13] 谭开俊, 卫平生, 吕锡敏. 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[J]. *天然气工业*, 2005, 25(10): 24–26, 35.
- TAN Kaijun, WEI Pingsheng, LYU Ximin. Research on quantitative resumption method of stratum paleothickness and its application—Taking Ludong area in Zhunge'er Basin as an example [J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(10): 24–26, 35.
- [14] 谢昭涵, 罗静爽, 刘中亮, 等. 松辽盆地徐家围子断陷的断裂复活演化特征及控藏作用[J]. *地质论评*, 2015, 61(6): 1332–1346.
- XIE Zhaohan, LUO Jingshuang, LIU Zhongliang, et al. Fault re-active and reservoir-controlling of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin [J]. *Geological Review*, 2015, 61(6): 1332–1346.
- [15] 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.
- [16] 付广, 王浩然. 利用地震资料预测油源断裂有利输导油气部位[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(1): 161–168.
- FU Guang, WANG Haoran. Prediction of favorable oil-gas transportation parts of oil-source faults on seismic data [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(1): 161–168.
- [17] 姜振学, 庞雄奇, 黄志龙. 叠合盆地油气运聚期次研究方法及应用[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(4): 22–25.
- JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi, HUANG Zhilong. A method for studying the oil and gas migration stages in superposed basin and its application [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(4): 22–25.
- [18] 付广, 于桐, 梁木桂. 三种主要源储配置油源断裂厘定方法及其应用[J]. *沉积学报*, 2023, 41(3): 909–918.
- FU Guang, YU Tong, LIANG Mugui. Methods of determining oil-source faults in three major source-reservoir configurations and their application [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(3): 909–918.
- [19] 付广, 韩旭, 梁木桂. 油源断裂输导和遮挡配置油气成藏有利部位预测方法及其应用[J]. *地质论评*, 2021, 67(2): 411–419.
- FU Guang, HAN Xu, LIANG Mugui. Prediction method of favorable position of oil source fault transmission and shielding configuration for oil and gas accumulation and its application [J]. *Geological Review*, 2021, 67(2): 411–419.
- [20] 付广, 王宏伟, 韩国猛, 等. 源外斜坡区断裂附近油气聚集有利部位预测方法及其应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1700–1708.
- FU Guang, WANG Hongwei, HAN Guomeng, et al. Prediction method and application of oil and gas accumulation favorable position near fault in slope area outside source [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1700–1708.
- [21] 付广, 沙子萱, 王宏伟, 等. 油源断裂输导油气通道演化形式的研究方法及其应用[J]. *地质科学*, 2022, 57(1): 127–138.
- FU Guang, SHA Zixuan, WANG Hongwei, et al. Research method and application of evolution form of oil and gas passage of oil source fault [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, 57(1): 127–138.
- [22] 付广, 郭贺尧, 韩旭. 断裂不同时期输导油气能力配置有利部位预测方法[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(1): 28–37.
- FU Guang, GUO Heyao, HAN Xu. A prediction method of favorable positions of transporting oil and gas capacity configuration in different periods of faults [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(1): 28–37.

(编辑 张亚雄)