

火山岩区断层封闭性的综合因子评价方法

高长海^{1,2}, 查明^{1,2}, 江汝锋³

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 中海油湛江分公司研究院, 广东湛江 524057)

摘要:基于火山岩区地质条件和断层封闭机制,依据断面正应力法,建立压实成岩断层封闭模式,结合断层面密度差法和断层紧闭指数法,建立岩性对接断层封闭模式。在此基础上,综合考虑断面正应力、断层紧闭指数、断层面密度差以及流体系数等因素,提出火山岩区断层封闭性的综合因子评价方法,并利用该方法评价准噶尔盆地西北缘火山岩区的断层封闭性。结果表明,火山岩区断层封闭性受断层级别的控制,即断层级别越高,综合因子越大,封闭性能越好,所控制的油藏规模越大;反之,断层级别越低,综合因子越小,封闭性能越差,所控制的油藏规模越小。评价结果与实际地质情况具有良好的吻合性,表明火山岩区断层封闭性综合因子评价方法具有较好的适用性。

关键词:断层封闭性; 封闭模式; 综合因子; 定量评价; 火山岩区

中图分类号: TE 122.2 **文献标志码:** A

引用格式:高长海,查明,江汝锋.火山岩区断层封闭性的综合因子评价方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4):1-9.

GAO Changhai, ZHA Ming, JIANG Rufeng. Evaluation method of comprehensive factor of fault sealing in volcanic rock area [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(4):1-9.

Evaluation method of comprehensive factor of fault sealing in volcanic rock area

GAO Changhai^{1,2}, ZHA Ming^{1,2}, JIANG Rufeng³

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3. Research Institute, Zhangjiang Branch of CNOOC, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: Based on geological conditions and fault sealing mechanisms in volcanic rock area, a fault sealing model of compaction diagenesis was established using the method of normal pressure on fault surface, and a fault sealing model of lithology juxtaposition was established based on density difference of fault surface and fault tightness index. An evaluation method of comprehensive factor of fault sealing in volcanic rock area was then carried out after taking normal pressure on fault surface, fault tightness index, density difference of fault surface and fluid index into consideration. The fault sealing in volcanic rock area of Karamay Oilfield is controlled by the fault level as a whole, namely, the better fault sealing leads to better comprehensive factor, and higher fault level, and eventually greater oil reservoir scale. The quantitative evaluation results compare well with the actual geological conditions, which suggests the wide applicability of the proposed method.

Keywords: fault sealing; sealing model; comprehensive factor; quantitative evaluation; volcanic rock area

断层对油气的运移和聚集起着重要的控制作用^[1-2],其核心在于断层封闭性研究。经过国内外学

收稿日期:2016-04-26

基金项目:国家“973”计划项目(2014CB239005);国家科技重大专项(2017ZX05001,2016ZX05006);山东省自然科学基金项目(ZR2013DM016)

作者简介:高长海(1977-),男,讲师,博士,研究方向为油气地质。E-mail:gch260725@163.com。

者多年的探索,断层封闭性研究已形成较系统的理论和方法^[3-10],这些方法所依据的断层封闭机制包括岩性对接封闭、泥岩涂抹封闭、压实封闭和成岩封闭^[11-12],其本质是断层内部或断层与围岩之间存在排替压力差,从而使断层具封闭性。然而,基于碎屑岩所建立起来的断层封闭性评价方法是否也适用于火山岩、碳酸盐岩等特殊岩性区,尚有待探讨和论证。勘探实践表明,火山岩油气藏的形成与断层紧密相关^[13-14]。目前,对于火山岩区断层封闭性的研究还极少,付晓飞等^[15]从断裂变形机制和两盘对接的特征分析了火山岩区断层侧向封闭性,柳成志等^[16]认为火山岩区断层存在岩性对接、泥岩涂抹和成岩胶结等3种封闭机制。火山岩区断层封闭性研究仍处于起步阶段,尚未形成系统的理论体系和建立适用的评价方法,难以满足火山岩油气藏的精细评价要求。前人在准噶尔盆地西北缘(以下简称准西北缘)克拉玛依油田石炭系储层特征、油气成藏

等方面取得了重要成果和认识,但研究主要突出了石炭系顶部不整合对火山岩储层及其成藏的控制作用^[17-18],尚未开展断层封闭性研究。笔者在前人研究成果基础上,基于火山岩区地质条件及断层封闭机制,综合考虑影响火山岩区断层封闭性的诸多因素,建立火山岩区断层封闭性的综合因子评价方法,对于深入认识火山岩油气成藏机制、预测有利区块和指导精细勘探等具有重要意义。

1 区域地质背景

克拉玛依油田位于准西北缘克-百断裂带。准西北缘自晚石炭世以来经历了复杂的构造演化过程^[2],导致石炭系断块不断朝南东方向推覆,从而造成南东低、北西高的断阶状构造格局,同时发育了克拉玛依、南白碱滩、克拉玛依西、北黑油山、白碱滩等不同级别的断层,这些断层相互交织呈网状分布,并与石炭系顶部不整合共同控制了火山岩油藏的分布(图1)。

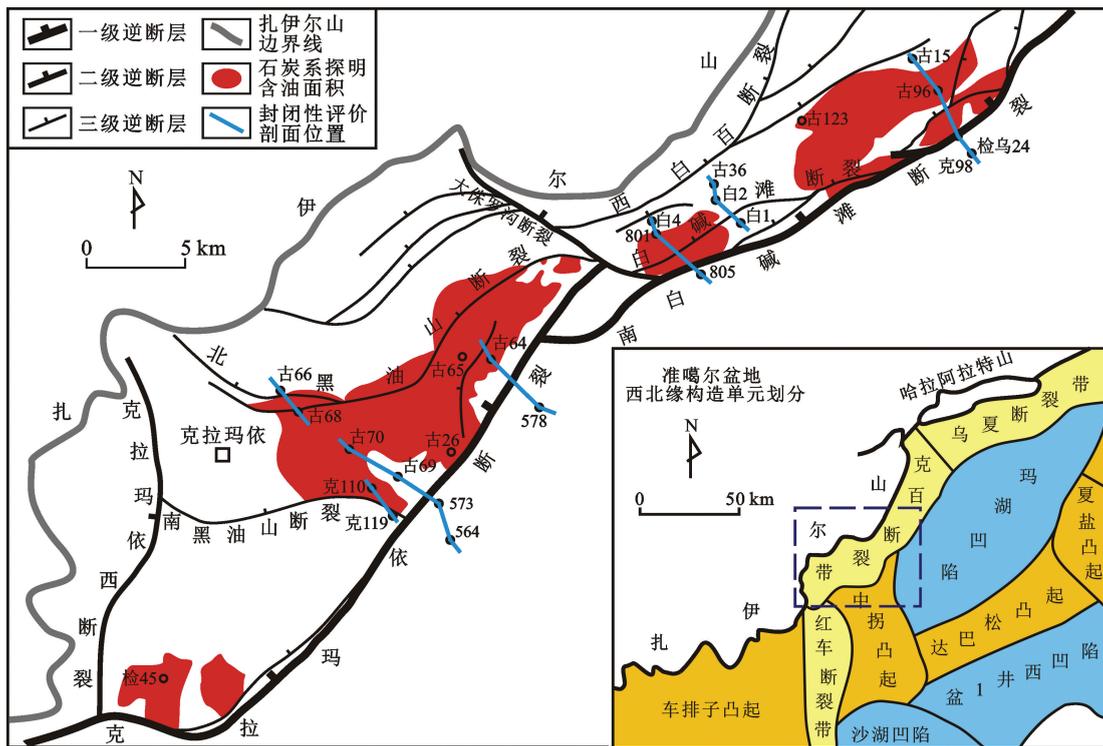


图1 克拉玛依油田石炭系断裂及油藏分布图

Fig.1 Distribution of Carboniferous faults and reservoirs in Karamay Oilfield

2 火山岩区断裂带结构特征

断裂形成过程中,其两盘地层岩石发生破裂并填充在断裂错动拉开的空间中,使断裂两盘呈以“带”接触的具复杂内部结构的三维地质体,可划分为滑动破碎带和诱导裂缝带两个结构单元^[3,19-20]。准西北缘火山岩区主要断裂的垂直断距一般为 180

~ 500 m(南白碱滩断裂石炭系垂直断距可达 1600 m),由于受挤压应力场的控制,这些逆断裂内部结构明显,其中滑动破碎带压实作用强烈,发育断层角砾岩,充填物以火山岩碎屑为主,其次为泥质岩,核部普遍发育断层泥;诱导裂缝带位于滑动破碎带两侧,分为上盘诱导裂缝带和下盘诱导裂缝带,两盘岩石具破碎结构,被裂缝所切割,且多被胶结充

填。由于岩石性质、裂缝发育、成岩作用等因素的差异,滑动破碎带与诱导裂缝带具有不同的测井响应特征:从下盘诱导裂缝带到滑动破碎带再至上盘诱导裂缝带,井径曲线测井值整体呈增大趋势,其中滑动破碎带和下盘诱导裂缝带相对稳定,而上盘诱导裂缝带扩径现象明显;电阻率曲线幅度差逐渐减小,

显示断裂带渗透能力逐渐变差;声波时差曲线测井值和补偿中子曲线测井值均呈增大趋势,其中滑动破碎带相对稳定,诱导裂缝带周波跳跃现象明显;密度曲线测井值则呈减小趋势,其中滑动破碎带和下盘诱导裂缝带相对稳定,而上盘诱导裂缝带周波跳跃现象明显(图2)。

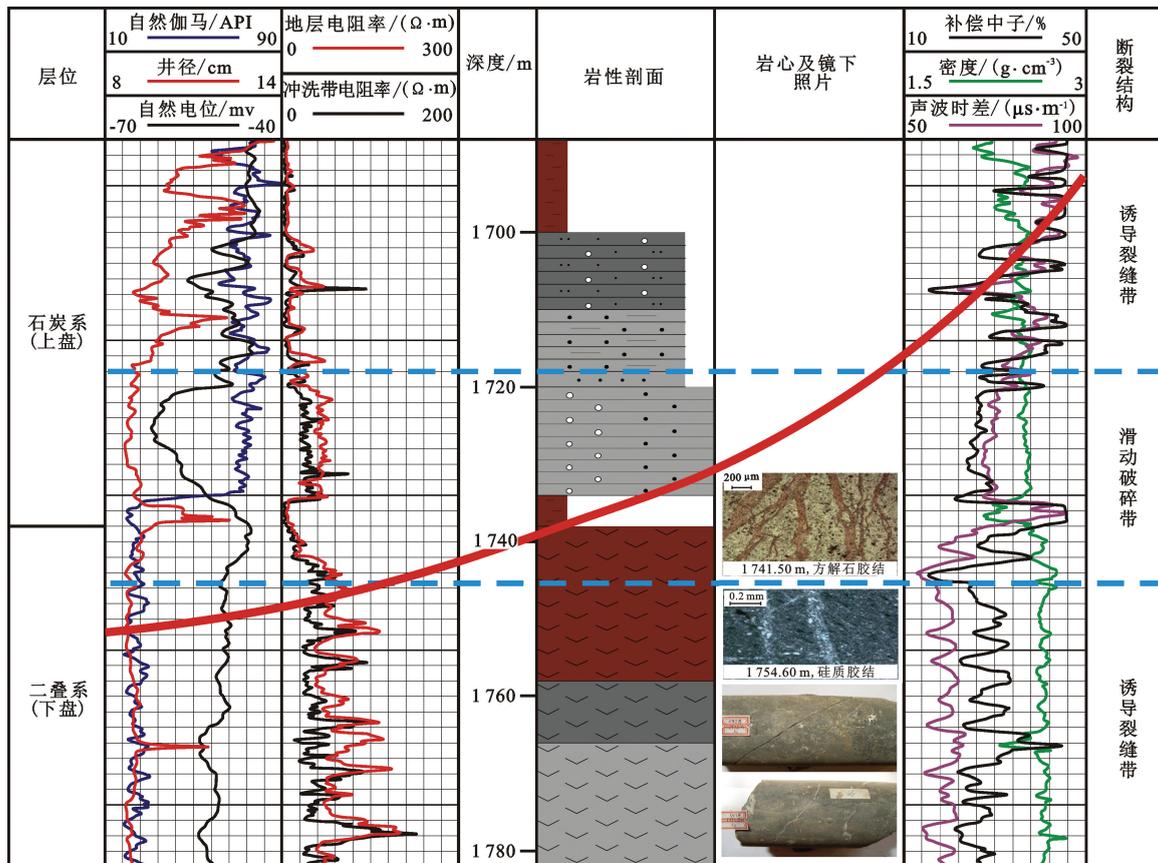


图2 克拉玛依断裂带结构特征(547井)

Fig. 2 Structural characteristics of Karamay fault belt(well 547)

3 火山岩区断层封闭性评价方法

3.1 断层面密度差法

断层的封闭性取决于断裂带物质与围岩之间或断层两盘岩层之间存在排替压力差^[21-23]。研究表明,测井声波时差与岩石排替压力之间具负相关性,利用测井声波时差分析岩石排替压力的本质是断裂带物质与围岩之间或断层两盘岩层之间存在密度差异^[6]。当断层发育断裂带时,断裂带物质主要由围岩碎屑颗粒组成,由于组成物质的差异,断裂带物质与围岩之间存在密度差异,也即存在排替压力差,从而导致断层封闭;当断层不发育断裂带时,断层两盘岩层直接对接,若断层两盘对接岩层的岩性不同,两者之间存在密度差异,也即存在排替压力差,从而导致断层封闭。

基于上述理论基础,本文中提出断层面密度差(D_s)的地质模型,以断层两侧岩层的面密度差表征岩性变化对断层封闭性的影响^[24]。如图3所示,斜面代表断层面(S),两侧发育不同厚度(d)、不同体密度(ρ)的岩层,对应不同的断层倾角(α)。垂直断层面中心作一条高(h),与岩层顶面相交,建立一个体积为 V 、质量为 m 的四棱柱模型,由岩石体密度推导出断层面密度的公式:

$$V = Sh = \frac{dS}{2\cos\alpha} \Rightarrow m = \rho V = \frac{\rho dS}{2\cos\alpha} \Rightarrow \frac{m}{S} = \frac{\rho d}{2\cos\alpha} \quad (1)$$

对于理想地质模型,两侧岩层对应同一个断层面,岩层厚度一致,由公式(1)可建立断层面密度差的公式:

$$D_s = \frac{d}{2\cos\alpha} |\rho_1 - \rho_2| \quad (2)$$

式中, D_s 为断层面密度差, g/cm^2 ; d 为断层两盘岩层厚度, cm ; α 为断层视倾角, ($^\circ$); ρ_1 和 ρ_2 分别为断层两盘岩石体密度, g/cm^3 。 D_s 值越大, 断层封闭性能越好; 反之, 越差。

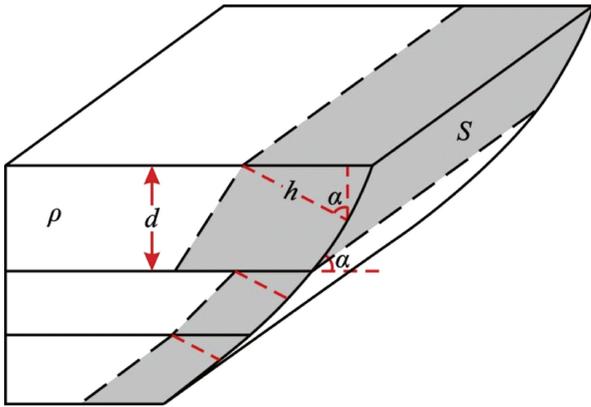


图3 断层面密度差地质模型

Fig. 3 Geological model of density difference of fault surface

公式(2)是基于理想状态的水平地层建立的, 实际上断层产状与地层产状存在断层倾向与地层倾向相反、断层倾向与地层倾向相同的两种配置关系, 因此若断层两侧岩层产状不一致, 则须对公式(2)进行修正:

$$D_s = \frac{d}{2} \left| \frac{\rho_1}{\cos \alpha_1} - \frac{\rho_2}{\cos \alpha_2} \right|. \quad (3)$$

式中, α_1 和 α_2 为断层两盘对应的视倾角, ($^\circ$)。

以观测点计算时, 断层面视为单元面, 岩层厚度 d 取单位厚度(1 cm), 代入公式(3)得

$$D_s = \frac{1}{2} \left| \frac{\rho_1}{\cos \alpha_1} - \frac{\rho_2}{\cos \alpha_2} \right|. \quad (4)$$

断层面密度差法不仅表征了岩性变化, 还表征了断层与岩层的产状关系, 且综合考虑了断层产状、地层产状、岩层的厚度和体密度等因素对断层封闭性的影响。该方法的优点在于公式的推导与勘探实际相符, 且计算所需的地震、测井等资料较易获取, 适用性较好。

3.2 其他适用的评价方法

根据火山岩区断层封闭机制和研究区实际地质情况, 因火山岩-火山岩对接时不发育泥岩, 致使断裂带泥质含量为零, 无法使用断裂带泥质含量法评价断层封闭性; 而测井声波时差法和排替压力差法所需钻遇断层的井资料难以满足定量评价的要求, 且多次折算也降低了评价精度。最终选取断面正应力法和断层紧闭指数法(图4), 结合断层面密度差法, 对火山岩区的断层封闭性进行综合评价。

图4为断面正应力与断层紧闭指数概念模型。图中, P 为断面某点所承受的正应力, MPa ; G 为上覆地层重力, MPa ; σ 为水平主应力, MPa ; H 为断面某点埋深, m ; ρ_r 为上覆地层平均密度, g/cm^3 ; ρ_w 为地层水密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度; θ 为断层倾角, ($^\circ$); β 为水平主应力与断层走向之间的夹角, ($^\circ$); I 为断层紧闭指数; σ_c 为断层岩抗压强度, MPa 。

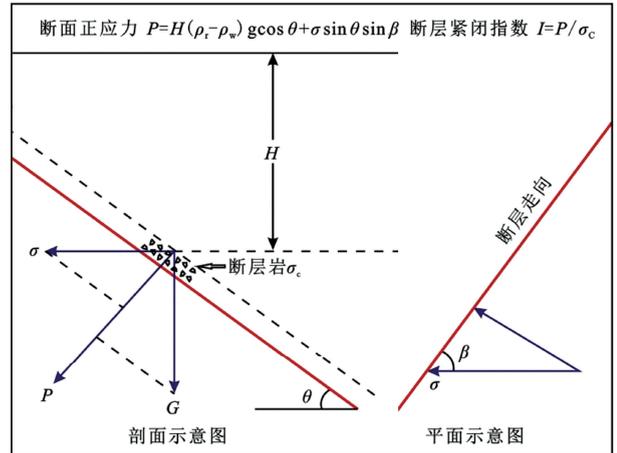


图4 断面正应力与断层紧闭指数概念模型

Fig. 4 Conceptual model of normal pressure on fault surface and fault tightness index

4 火山岩区断层封闭性评价

基于火山岩区地质条件的差异性, 借鉴前人研究成果, 认为火山岩区断层封闭机制主要包括岩性对接封闭和压实成岩封闭。根据克拉玛依油田断层特征及勘探实践, 选取克拉玛依断层中段和北段、南白碱滩断层西段和东段、白碱滩断层、北黑油山断层和南黑油山断层等5个断层的7个剖面进行封闭性评价(剖面位置见图1)。

4.1 压实成岩封闭

断层紧闭程度是影响其封闭性的重要因素, 不仅受控于断面正应力大小, 还影响着断层压实成岩的程度^[7-8]。断层受上覆地层重力和区域主压应力的共同作用发生紧闭, 但仍会留下渗流空间, 当断层所受正应力大于泥岩的变形界限时, 泥岩可填充这些渗流空间而使断层处于封闭^[25]。准西北缘受挤压应力场的影响, 断层所受正应力较大(除南黑油山断层外, 其余均大于22 MPa), 且随埋深增加而增大, 同时表现出高级别断层的封闭性好于低级别断层。

依据断层断面正应力评价结果, 建立了火山岩区压实成岩断层封闭模式(图5)。该模式下的断层封闭性能受控于断面正应力与下降盘泥岩层厚度的配置。随着低级别断层到高级别断层的断面正应力

与下降盘泥岩层厚度逐渐增大,泥岩由塑性变形过渡为脆性充填,使得断层的封闭性能逐渐增强,所封

堵的油藏规模也逐渐增大(图 5)。

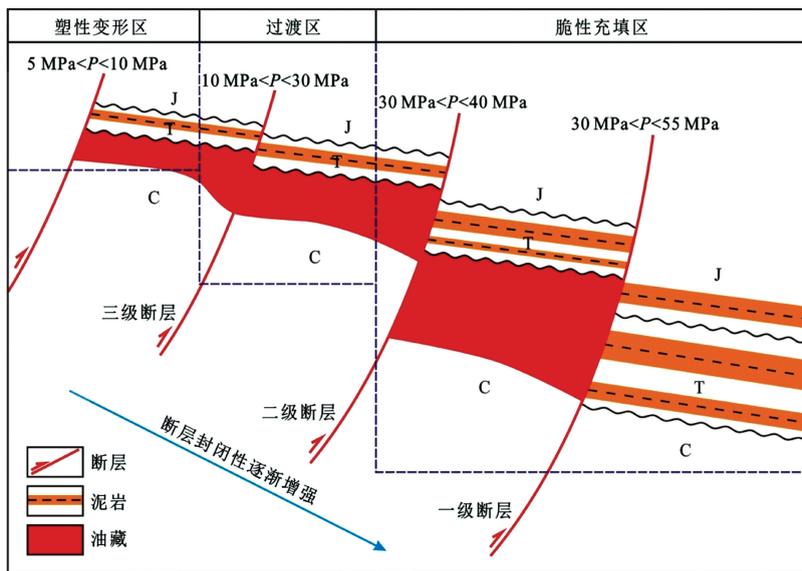


图 5 火山岩区压实成岩断层封闭模式

Fig. 5 Fault sealing model of compaction diagenesis in volcanic zone

4.2 岩性对接封闭

由于断层面密度差与岩石密度相关,断层紧闭指数与岩石抗压强度相关,而岩石的密度和抗压强度均可识别岩性,实际拟合结果也表明断层面密度差与断层紧闭指数显著正相关,因此两者可表征断层两盘岩性变化,用于判识断层两盘岩性对接。

究区断层两盘存在浅部的火山岩-碎屑岩和深部的火山岩-火山岩两种岩性配置,断层面密度差和断层紧闭指数均受控于岩性变化,使得断层面密度差具“分区差异”特征(图 6(a)),湖湾区大于六七九区;而断层紧闭指数则具“分级差异”特征(图 6(b)),高级别断层大于低级别断层。

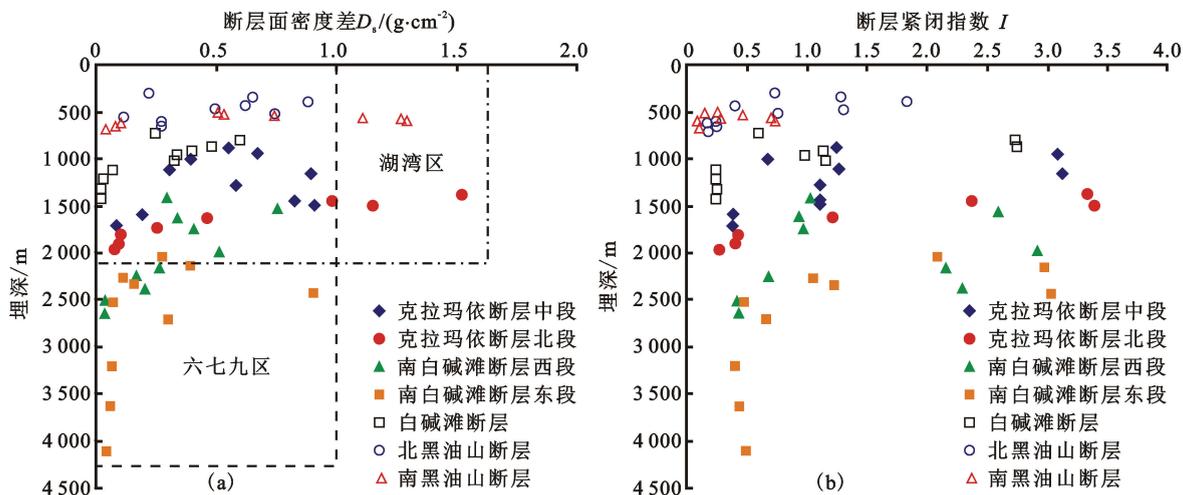


图 6 断层面密度差与断层紧闭指数分布特征

Fig. 6 Distribution features between density difference of fault surface and fault tightness index

根据断层面密度差 (D_s)、断层紧闭指数 (I) 与岩性对接之间的关系,结合含油率统计,可对断层封闭性的差异进行评价:火山岩-泥岩对接时, D_s 为 $0.19 \sim 1.52 \text{ g/cm}^2$,平均值为 0.74 g/cm^2 , I 为 $0.45 \sim 3.39$,平均值为 2.25 ,断层封闭性较好,含油率可达 75% ;火山岩-砂岩对接时, D_s 为 $0.06 \sim 1.11 \text{ g/}$

cm^2 ,平均值为 0.42 g/cm^2 , I 为 $0.13 \sim 1.26$,平均值为 0.83 ,断层封闭性中等,含油率为 59% ;火山岩-火山岩对接时, D_s 为 $0.01 \sim 0.27 \text{ g/cm}^2$,平均值为 0.08 g/cm^2 , I 为 $0.09 \sim 0.50$,平均值为 0.29 ,断层封闭性较差,含油率仅 44% 。由此可知, D_s 和 I 越大,断层两盘含油性越好。

基于上述评价结果,建立了火山岩区岩性对接断层封闭模式(图7)。该模式下的断层封闭性能受控于岩性对接特征和流体作用:火山岩-泥岩对接时,由于三叠系发育泥岩,断裂带泥质充填现象普遍, D_s 、 I 均较大,断层封闭性较好,控制了湖湾区和六七九区上升盘断块油藏的形成;火山岩-火山岩对接时, D_s 、 I 均较小,断层封闭性较差,且受不同流

体作用控制而存在差异。深大断裂是烃碱流体有效的运移通道^[26],受烃碱流体作用, SiO_2 发生溶解并过饱和和沉积,形成的多种硅质矿物胶结充填于断裂带残留的渗流空间,导致断层封闭,控制了六七九区下降盘断块油藏的形成。另外,大气水的淋滤、溶蚀作用会导致埋藏浅、断距小的低级别断层发育更多微裂缝,从而使断层两盘相互连通形成断凸油藏。

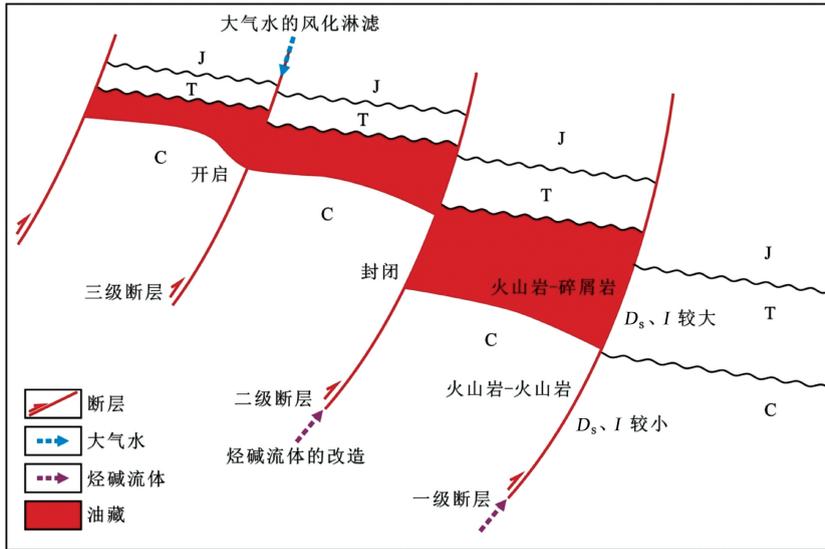


图7 火山岩区岩性对接断层封闭模式图

Fig. 7 Fault sealing model of lithology juxtaposition in volcanic zone

4.3 断层封闭性综合评价

断层封闭性能受断层的性质、倾角、断距、埋深,断层两盘地层的岩性、厚度、对接关系以及成岩作用、断裂带结构、断层活动性等多种因素的综合影响,因此对于断层封闭性须考虑多种因素、采用多种方法进行综合评价。

断层封闭性综合评价的重点在于明确各评价参数所占的权重系数。前人采用的权重系数计算方法通常会根据实际情况进行主观的权重调整,进而导致评价结果的不客观性。本文中基于断层封闭性的影响因素,提出了权重因子的概念,构建了权重因子与影响因素个数之间的函数关系,进而将权重因子转换为权重系数。

权重因子与影响因素个数为单调递增函数关系,函数的值域为0~1,定义域为正整数,计算公式为

$$N_i = 1 - 0.5^{n_i} \quad (5)$$

式中, N_i 为第*i*个评价参数的权重因子; n_i 为第*i*个评价参数所包含的影响因素个数;底数0.5为各影响因素对封闭性评价的有效性,折中取50%。当影响因素很少时, N 趋近于0;当影响因素很多时, N

趋近于1。 N 越大,表明该评价参数考虑的断层封闭性的影响因素越多。

将各评价参数所对应的权重因子加权求和转换,即可得到相应参数的权重系数 M_i ,计算公式为

$$M_i = \frac{N_i}{\sum N_i} \quad (6)$$

为确保评价结果的客观性和准确性,在断面正应力、断层紧闭指数、断层面密度差等评价参数的基础上,引入流体系数(F),结合断层两盘的油水分布(表1),进行断层封闭性的综合评价。

表1 不同油水分布条件下的流体系数

Table 1 Fluid coefficient of different oil-water distribution

流体系数	断层两盘油水分布
$F=1$	仅一盘含油;或两盘均含油,但油水界面不统一
$F=0.5$	两盘均不含油;或两盘均含油,但油水界面不确定
$F=0$	两盘均含油,且油水界面统一

共计考虑了断面正应力、断层紧闭指数、断层面密度差以及流体系数4个参数19个影响断层封闭性的因素,其中断面正应力包含了6个影响因素,断层紧闭指数则在断面正应力基础上引入断裂带物质抗压强度包含了7个影响因素(断裂带物质抗压强

度受断距和断层两盘岩性的控制,因此断层紧闭指数的计算已经考虑了断裂带的断距及充填物性质),断层面密度差包含了4个影响因素,流体系数包含了2个影响因素。将 n 代入公式(5)和(6)即可得到各评价参数的权重系数(表2)。

表2 不同评价参数对应的权重因子及权重系数

Table 2 Weighting factor and coefficient of different evaluation parameters

评价参数	影响因素个数 n	权重因子 N	权重系数 M
断面正应力(P)	6	0.9844	0.2686
断层紧闭指数(I)	7	0.9922	0.2708
断层面密度差(D_s)	4	0.9375	0.2559
流体系数(F)	2	0.7500	0.2047

对断面正应力、断层紧闭指数和断层面密度差进行归一化处理,结合流体系数,依据各评价参数的权重系数进行加权求和,即可得到断层封闭性评价的综合因子(Q),计算公式为

$$Q = M_1 P' + M_2 I' + M_3 DS' + M_4 F \quad (7)$$

式中, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 分别为各评价参数对应的权重系数(表2); P' 、 I' 、 DS' 分别为各评价参数原始数据经归一化处理的数值。

利用综合因子对克拉玛依油田火山岩区的断层封闭性进行了综合评价(图8)。结果表明,断层封闭性与断层级别呈显著正相关,即随着断层级别升高,综合因子变大,断层封闭性变好,且火山岩-碎屑岩对接的断层封闭性好于火山岩-火山岩对接。

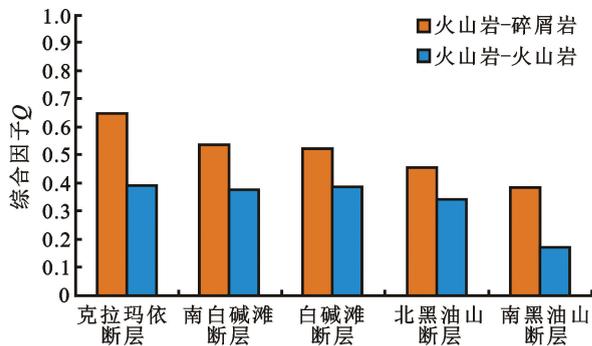


图8 断层封闭性综合评价

Fig. 8 Comprehensive evaluation of fault sealing

依据断层封闭性综合因子大小,结合断层封闭模式,可将火山岩区断层封闭类型划分为深成型和浅成型(表3)。由于断面正应力、下降盘泥岩层厚度、深部烃碱流体改造以及大气水淋滤溶蚀作用等因素的差异,深成型断层具有较好的封闭性,发育较大规模的断块油藏,而浅成型断层具有相对较差的封闭性,发育较小规模的断块油藏

和断凸油藏(图7)。

表3 火山岩区断层封闭类型及其特征

Table 3 Fault sealing types and its characteristics in volcanic zone

断层封闭类型	深成型	浅成型
火-碎对接	$Q > 0.50$	$Q < 0.50$
火-火对接	$Q > 0.35$	$Q < 0.35$
断层封闭机制	断面所受正应力较大;下降盘同沉积泥岩层较厚;断裂带为泥质充填;受深部烃碱流体改造	断面所受正应力较小;下降盘同沉积泥岩层较薄;断裂带以泥质充填为主;少量塑性变形;受大气水淋滤溶蚀作用
典型断层	克拉玛依断层、南白碱滩断层、白碱滩断层	北黑油山断层、南黑油山断层等低级别断层
油藏特征	发育断块油藏,规模较大	发育断块油藏和断凸油藏,规模较小

5 结论

(1)火山岩区断层封闭性主要受断面正应力、断层紧闭指数、断层面密度差和流体系数等4个参数19个因素的综合影响,断层封闭机制以岩性对接封闭和压实成岩封闭为主,发育岩性对接断层封闭模式和压实成岩断层封闭模式。

(2)基于断层封闭性的影响因素,综合断面正应力、断层紧闭指数、断层面密度差以及流体系数等参数,提出了火山岩区断层封闭性的综合因子评价方法。

(3)火山岩区断层封闭性整体上受断层级别的控制,即随着断层级别升高,综合因子变大,断层封闭性变好,控制的断块油藏规模变大;反之,随着断层级别降低,综合因子变小,断层封闭性变差,控制的断块和断凸油藏规模变小。

(4)相比其他断层封闭性评价方法,综合因子法考虑的影响因素更全面,评价结果更可靠,不仅适用于火山岩区,同样适用于其他岩性区,具有较好的适用性和推广性。

参考文献:

- [1] 李克成,蒋有录,万涛,等. 济阳坳陷埕东地区断层输导与油气运移特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5):685-692.
LI Kecheng, JIANG Youlu, WAN Tao, et al. Characteristics of fault translocation and hydrocarbon migration in Chengdong area, Jiyang Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5):685-692.
- [2] 孟庆芬,徐朝晖,徐怀民,等. 准噶尔盆地西北缘百口

- 泉区前陆冲断带撕裂断层特征及控藏作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(5): 18-21.
- MENG Qingfen, XU Zhaohui, XU Huaimin, et al. Characteristics and controlling over reservoir accumulation of tear fault in foreland thrust belt of Baikouquan area in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(5): 18-21.
- [3] KNIPE R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyse fault seals in hydrocarbon reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(2): 187-195.
- [4] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal predication[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81: 897-917.
- [5] 吴孔友, 瞿建华, 王鹤华. 准噶尔盆地大侏罗沟断层走滑特征、形成机制及控藏作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 41-47.
- WU Kongyou, QU Jianhua, WANG Hehua. Strike-slip characteristics, forming mechanisms and controlling reservoirs of Dazhuluogou fault in Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(5): 41-47.
- [6] 付广, 任述民, 赵荣. 利用声波时差资料研究断层垂向封闭性的方法[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(5): 724-730.
- FU Guang, REN Shumin, ZHAO Rong. A method for analysing vertical sealing of fault by acoustilog data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(5): 724-730.
- [7] 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 215-220.
- TONG Hengmao. Quantitative analysis of fault opening and sealing[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(3): 215-220.
- [8] 田辉, 查明, 石新璞, 等. 断层紧闭指数的计算及其地质意义[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(6): 530-532.
- TIAN Hui, ZHA Ming, SHI Xinpu, et al. Calculation of fault tightness index and its significance for fault sealing[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(6): 530-532.
- [9] ZHANG L K, LUO X R, GVASSEUR G. Evaluation of geological factors in characterizing fault connectivity during hydrocarbon migration: application to the Bohai Bay Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(9): 1634-1647.
- [10] 付广, 孟庆芬. 断裂带封闭油气所需泥质含量物理模拟[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(3): 234-237.
- FU Guang, MENG Qingfen. Physical simulation of shale content requirement in fault zone sealing oil and gas[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(3): 234-237.
- [11] 鲁兵, 丁文龙, 刘忠, 等. 断层封闭性研究进展[J]. 地质科技情报, 1998, 17(3): 79-80.
- LU Bing, DING Wenlong, LIU Zhong, et al. Advances of research on fault sealing[J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(3): 79-80.
- [12] 沈传波, 梅廉夫, 汤济广, 等. 含油气盆地断层封闭性研究探讨[J]. 断块油气田, 2002, 9(4): 1-5.
- SHEN Chuanbo, MEI Lianfu, TANG Jiguang, et al. New advances of researches on fault sealing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2002, 9(4): 1-5.
- [13] 肖永军, 徐佑德, 王德喜. 长岭断陷东部火山岩气藏成藏条件及成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 538-543.
- XIAO Yongjun, XU Youde, WANG Dexi. Formation conditions and reservoir-forming patterns of volcanic rocks, eastern Changling Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 538-543.
- [14] 陈树民. 中国东、西部火山岩油气藏运聚成藏机理[J]. 天然气工业, 2015, 35(4): 16-24.
- CHEN Shumin. Hydrocarbon migration and accumulation mechanism of volcanic reservoirs in eastern and western China[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(4): 16-24.
- [15] 付晓飞, 沙威, 于丹, 等. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩内断层侧向封闭性及与天然气成藏[J]. 地质论评, 2010, 56(1): 60-70.
- FU Xiaofei, SHA Wei, YU Dan, et al. Lateral sealing of faults and gas reservoir formation in volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression[J]. Geological Review, 2010, 56(1): 60-70.
- [16] 柳成志, 于海山, 雷海艳, 等. 三塘湖盆地石炭系火山岩中断层封闭机理研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(23): 5517-5523.
- LIU Chengzhi, YU Haishan, LEI Haiyan, et al. Fault sealing mechanism of Carboniferous volcanic rocks in Santanghu Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(23): 5517-5523.
- [17] 邹才能, 侯连华, 陶士振, 等. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1613-1626.
- ZOU Caineng, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(11): 1613-1626.
- [18] 侯连华, 罗霞, 王京红, 等. 火山岩风化壳及油气地质意义: 以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. 石

- 油勘探与开发,2013,40(3):257-265.
- HOU Lianhua, LUO Xia, WANG Jinghong, et al. Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: a case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013,40(3):257-265.
- [19] 付晓飞,温海波,吕延防,等. 勘探早期断层封闭性快速评价方法及应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,2011,41(3):616-621.
- FU Xiaofei, WEN Haibo, LÜ Yanfang, et al. Quick evaluation method and its application of fault seal during early exploration period [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011,41(3):616-621.
- [20] CHESTER F M, EVANS J P, BIEGEL R L. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993,98:771-786.
- [21] 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.
- [22] CAINE J S, EVANS J P, FORSTER C B. Fault zone architecture and permeability structure [J]. *Journal of Geology*, 1996,24:1025-1028.
- [23] 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.
- LÜ 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.
- [24] 江汝锋. 克拉玛依油田石炭系火山岩区断裂特征与油气成藏关系[D]. 青岛: 中国石油大学,2014.
- JIANG Rufeng. The relationship between fault characteristics and petroleum accumulation of Carboniferous volcanic in Karamay Oilfield [D]. Qingdao: China University of Petroleum,2014.
- [25] 陈伟,吴智平,侯峰,等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系[J]. *石油学报*,2010,31(5):774-780.
- CHEN Wei, WU Zhiping, HOU Feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010,31(5):774-780.
- [26] 杜乐天. 烃碱流体地球化学原理:重论热液作用和岩浆作用[M]. 北京:科学出版社,1996.

(编辑 修荣荣)