

引用本文: 丁文龙, 刘天顺, 曹自成, 等. 断裂封闭性研究现状及发展趋势[J]. 石油实验地质, 2024, 46(4): 647–663. DOI: 10.11781/sysydz202404647.

DING Wenlong, LIU Tianshun, CAO Zicheng, et al. Current research status and development trends of fault sealing[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(4): 647–663. DOI: 10.11781/sysydz202404647.

断裂封闭性研究现状及发展趋势

丁文龙^{1,2,3}, 刘天顺^{1,2,3}, 曹自成⁴, 李海英⁴, 韩俊⁴, 黄诚⁴, 王生晖^{1,2,3}

1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京) 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京) 非常规天然气地质评价与开发北京市重点实验室, 北京 100083;

4. 中国石化 西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011

摘要: 断裂控油气作用主要表现在其对油气运移、聚集过程及分布规律的影响, 其实质是断裂封闭性问题。断裂封闭性往往是受多种因素控制的, 不同地区不同层系在不同地质时期的断裂封闭机制与封闭性主控因素差异较大。目前, 断裂封闭性、封闭机理与评价方法还没有形成完整的研究体系, 其评价的精度也有待提高。依据全面系统地调研断裂封闭性方面近年来的研究热点, 归纳总结了断裂封闭机理, 分析了断裂封闭主控因素, 梳理了断裂封闭性评价方法, 讨论了断裂封闭性研究中面临的实际问题, 并提出了未来研究发展趋势。目前, 断裂的封闭机理可以分为垂向和侧向封闭机理, 前者包括断裂面封闭机理和断裂带排替压力差封闭机理, 后者包括砂泥对接封闭机理、泥岩涂抹形成的侧向封闭机理和断裂带高排替压力差封闭机理。断裂发育特征、断裂两盘岩性、应力场环境以及压实、胶结、溶蚀等成岩作用是影响断裂封闭性的主要因素, 不同因素对断裂封闭性的作用方式不同, 断裂在不同位置、不同时期的封闭性有着明显的差别。断裂封闭性评价研究方法可归结为以下 4 类: (1) 传统地质学方法, 包括定性分析和半定量分析; (2) 数学地质方法, 涵盖逻辑信息法、非线性映射分析法、模糊综合评判法、灰色关联分析法等; (3) 构造应力场数值模拟及断裂封闭性相关参数算法; (4) 地球化学方法。碳酸盐岩地层断裂启闭机制与封闭性评价、应力和流体及其耦合作用对断裂封闭性的影响机制、多因素的断裂封闭性综合定量评价、断裂封闭性的时空演化及通源能力评估等是未来断裂封闭性研究的发展方向。

关键词: 断裂封闭性; 断裂封闭机理; 排替压力; 泥岩涂抹; 断裂控油气作用

中图分类号: TE122.32

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz202404647

Current research status and development trends of fault sealing

DING Wenlong^{1,2,3}, LIU Tianshun^{1,2,3}, CAO Zicheng⁴, LI Haiying⁴,

HAN Jun⁴, HUANG Cheng⁴, WANG Shenghui^{1,2,3}

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism of Ministry of Education, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

4. Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China

Abstract: The controlling effect of faults on hydrocarbon pool formation is mainly reflected in their impact on the processes of hydrocarbon migration, accumulation and distribution. Its essence is the problem of fault sealing. Fault sealing is typically influenced by a variety of factors, and the mechanism and the main controlling factors of fault sealing differ significantly across different layers, regions and geological periods. At present, there is no complete research system for the evaluation of fault sealing, and the accuracy of its evaluation needs to be improved. By comprehensively and systematically investigating recent research hotspots in the area of fault sealing,

收稿日期 (Received): 2024-06-05; 修订日期 (Revised): 2024-07-01; 出版日期 (Published): 2024-07-28。

作者简介: 丁文龙 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事石油构造分析与控油气作用研究。E-mail: dingwenlong2006@126.com。

通信作者: 刘天顺 (1996—), 男, 博士生, 从事石油构造分析与控油气作用研究。E-mail: liutianshun2020@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42072173, 42372171) 资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

we summarize the mechanism of fault sealing, analyze the main controlling factors, systematically categorize the evaluation methods, and discuss the practical issues faced in fault sealing research. We also propose the development trends of future research. Fault sealing mechanisms can be divided into vertical and lateral sealing mechanisms. The former includes fault surface sealing and displacement pressure difference sealing within fault zones, while the latter includes sand and mud juxtaposition sealing, lateral sealing formed by shale smearing, and high displacement pressure sealing within fault zones. The main factors affecting fault sealing include fault development characteristics, lithology of the two fault walls, stress field environment, and diagenetic processes such as compaction, cementation, and dissolution. Different factors influence fault sealing in various ways, and fault sealing varies significantly with location and time. The research methods for fault sealing evaluation can be classified into four categories: (1) traditional geological methods: including qualitative and semi-quantitative analyses; (2) mathematical geological methods: including logistic information method, nonlinear mapping analysis, fuzzy comprehensive evaluation, grey correlation analysis, etc.; (3) numerical simulation of the tectonic stress field and calculation of parameters related to fault sealing; and (4) geochemical methods. Future research directions include fault opening and sealing mechanism and sealing evaluation of carbonate rock strata, the impact mechanism of stress and fluid coupling on fault sealing, comprehensive quantitative evaluations of fault sealing with multiple factors, the temporal and spatial evolution of fault sealing, and the assessment of fault connectivity.

Key words: fault sealing; fault sealing mechanism; displacement pressure; mudstone smearing; controlling effect of faults on hydrocarbons

从全球沉积盆地的油气分布来看,超过 90% 的传统油气储量与断裂密切相关,表明断裂在油气的运移、聚集和分布中起着重要作用^[1-8]。在平面上,主要含油气带沿断裂分布;在纵向上,“断裂延伸到哪里,油气就分布到哪里”^[9-11]。断裂控油气作用主要表现在其对油气运移、聚集过程及分布规律的影响^[12-15]。断裂控油气作用研究的核心在于分析断裂的封闭性问题^[1]。断裂封闭性研究起源于 HUBBERT 提出的圈闭理论,早期研究主要集中在理论探讨和形成机理方面^[16]。SMITH 等^[17]在 1966 年系统论述了断裂封闭性问题,他们认为断裂侧向封闭通常由 2 种方式引起:一是断裂两盘相对运动导致不同排替压力的岩性相对置;二是断裂带物质的遮挡作用。

由于断裂可以作为地下油气运移的通道、遮挡或通道—遮挡组合结构,断裂的存在增加了油气钻探、勘探和开发的危险^[18]。为了正确评估断裂到底起通道作用还是作为油气运移遮挡存在,石油工业界和地质学家们对此进行了热烈讨论^[17-27]。随着油气勘探开发技术的不断突破,可获得的地下地质和地球物理资料也日益丰富,包括地震数据、岩心物性数据、岩心的微观结构、岩心的力学性质、测井资料、油气井的生产动态数据等,使得含油气盆地中断裂封闭性的预测评估成为可能。自 20 世纪 50 年代以来,专家学者们一直关注断裂封闭性问题的研究^[1,16,28-43]。尽管相关研究已经有 70 多年

的历史,但由于地质资料和技术手段的限制,目前对断裂封闭性的评价仍停留在定性和半定量阶段,难以实现有效的定量评价。现有的断裂封闭性评价模型和方法都具有一定的局限性和片面性,尽管经历了多次改进,且取得了较好成效,但仍然存在一些缺陷^[44-47]。断裂封闭程度受多种因素影响,不同地区不同层系的断裂封闭机制与封闭性主控因素差异较大,断裂封闭性评价方法还没有形成完整的研究体系,其评价的精度也有待提高^[1,27,48-50]。因此,总结断裂封闭机理、封闭性影响因素、封闭性评价方法,并分析未来研究方向,对于评价通源断裂输导油气的时间和能力、重建油气成藏过程、预测有利油气聚集区、分析油气分布规律、降低油气勘探风险等都具有重要意义。

1 断裂封闭机理与类型

断裂封闭性是指断裂具有的对油气运移的封堵能力。早在 1966 年,SMITH 等^[17]就提出了这一概念,认为断裂封闭性表现为断裂带具有较高的排替压力或者上下盘岩石之间存在排替压力差。1989 年,陈发景^[51]重新定义了断裂的封闭性,指出这一概念是指断裂与地层物性的各向异性相结合,使得油气不能继续运移,从而聚集形成新的物性和压力系统。

WEBER 等^[52]在进行野外地质调查时发现了断裂中的泥岩涂抹作用,并提出其是致使断裂封闭

的重要原因。ENGELDER^[53]研究了碎裂作用与断层泥生成的关系,详细描述了碎裂变形物的组构,并分别通过野外、镜下和实验观察研究了断层泥中石英的生成与变形特点。KNIPE^[54]提出,断裂封闭效应取决于断裂带微组构控制的孔隙度和渗透率,重建了断裂带内部的微观结构演化过程,并对影响断裂内部充填物的封闭性、连通性、稳定性及封闭强度的因素进行了详细分析。GIBSON^[55]研究了特立尼达海岸硅质碎屑岩地层中2个油气田的断裂封闭性,指出砂岩与泥岩对置并不必然导致封闭,断裂封闭主要由断裂带内封闭物形成,并定义了运移期间断裂封闭圈闭的2种渗漏方式。ANTONELLINI等^[56]研究了断裂作用对断裂带物质孔隙度和渗透率的影响及其形成的空间几何形态和变形结构,提出强烈的断裂破碎作用致使变形带内砂岩的孔隙度和渗透率降低。BERG等^[57]基于泥岩剪切带演化过程的研究,认为剪切带通常在单个断裂面附近形成,其封闭能力主要由剪切带造成。鲁兵、丁文龙等^[43]认为异常超压引起的断裂封闭最为可靠,且封闭能力保持时间长。吴李泉等^[58]基于构造力学原理,提出了断裂应力封闭机理。吴孔友等^[59]认为充填、压实和胶结等成岩作用是影响断裂封闭性的主要因素。王建忠等^[31]研究了碳酸盐岩层系断裂封闭机理,认为碳酸盐岩层系中的泥质含量和地应力状态与断裂封闭性密切相关。赵乐强等^[60]对准噶尔盆地西北地区断裂内流体作用对断裂封闭性的影响机制进行了研究。

断裂封闭性在地质空间上表现为2个方面,即断裂的垂向封闭性和侧向封闭性。当储层的排替压力小于与之对置的断裂另一侧岩层的排替压力

时(若无断裂充填),或者小于断裂带本身的排替压力时(若有充填),断裂在侧向上表现为封闭;当储层的排替压力小于上覆盖层中断裂带的排替压力时,断裂在垂向上表现为封闭^[1,61]。因此,本文分别总结了断裂垂向和侧向封闭机理。

1.1 断裂垂向封闭机理

垂向封闭性指的是断裂阻碍流体沿着其面切线方向运移的能力^[41]。断裂在垂向上的封闭主要由断裂带中储层和上覆盖层形成的排替压力差或者断裂带充填物与目的层的排替压力差决定^[62]。基于是否有断裂充填物、充填物类型及胶结沉淀改造作用等,断裂垂向封闭机理可以分为断裂面(无断裂充填物)和断裂带(存在断裂充填物)封闭机理(表1)。

1.2 断裂侧向封闭机理

侧向封闭性是指断裂阻碍油气沿着断裂面法线方向运移至目的层对置盘的能力^[47,61,65],其主要由断裂两盘排替压力差或断裂带物质与目的层对置盘的排替压力差来封闭油气^[43,47]。依据断裂两侧岩性对接关系、泥岩涂抹作用、充填物类型及胶结沉淀改造作用,可分为砂泥对接(无断裂充填物)、泥岩涂抹(无断裂充填物)和断裂带(存在断裂充填物)封闭机理(表2)。

1.3 断裂封闭性类型

断裂的开启性与封堵性对油气的运移、聚集和油气藏的破坏具有重要影响。随着断裂幕式活动的进行,其封闭性表现出周期性的变化^[1]。根据封闭程度,可分为完全封闭、部分开启、部分封闭和完全开启^[68]。根据断裂的结构状态和岩性差异,可分为断面封闭和岩性封闭^[69]。断面封闭型断裂

表1 断裂垂向封闭机理形式及特点

Table 1 Types and characteristics of fault vertical sealing mechanisms

封闭机理形式	封闭机理运作方式
断裂面(无断裂充填物)封闭机理	断裂带内无充填物时,断裂面主要受到应力作用而封闭。断面应力主要是由区域构造应力和上覆地层重力组成。断面应力越大,断裂越紧闭,封闭性越好;反之,开启性越好。需要指出的是,断裂面的不平整会使得断裂面局部(陡角处)在应力作用较强的情况下仍然开启
泥质充填物封闭机理	泥质含量高的充填物颗粒较细、孔渗低、排替压力高;而砂质含量高的充填物颗粒较粗、孔渗高、排替压力低。因此断裂带上部以泥质充填物为主,而下部充填物砂质含量较高时,就会在垂向上形成排替压力差,形成封闭作用。当断裂带上部充填物的砂质含量较高,而下部以泥质充填物为主时,就难以形成封闭作用
断裂带(存在断裂充填物)封闭机理	当流体(大气淡水、地层水、深部热液流体和成烃流体)沿着断裂从深部往浅部运移时,由于物理环境的变化,流体会与断裂面上的物质发生物理化学反应,导致矿物质过饱和而沉淀下来(如CaCO ₃ 沉淀形成方解石,SiO ₂ 沉淀形成石英,烃类流体氧化形成沥青),断裂内部胶结的矿物和形成的固体沥青使得断裂带中岩石孔渗降低,排替压力增大。如果断裂带上部胶结和沥青充填作用严重,而下部弱,则断裂在垂向上形成排替压力差,具有封闭能力
后期成岩封闭机理	

注:据参考文献[1,43,63-64]总结。

表 2 断裂侧向封闭机理形式及特点

Table 2 Types and characteristics of fault lateral sealing mechanisms

封闭机理形式	封闭机理运作方式
砂泥对接封闭机理 (无断裂填充物)	断裂带内无填充物时,目的层与其对置盘的排替压力差决定着断裂侧向封闭的能力。若目的层排替压力小于其对置盘的排替压力,断裂具有侧向封闭性,可以阻止油气进行侧向运移;若目的层排替压力大于其对置盘的排替压力,断裂不具有侧向封闭性,油气可以进行侧向运移。一般而言,当目的层为砂岩时,其孔渗高而排替压力低,而对置盘为泥岩时,其孔渗低而排替压力高,这种情况下泥岩对砂岩可以起到封闭油气的作用
泥岩涂抹封闭机理 (无断裂填充物)	同沉积断裂活动时,区域构造应力和重力等会使得断裂附近的泥岩挤入断裂带的空隙,这样就会在断裂面上形成薄的泥岩涂抹层,且其孔渗能力较围岩中泥岩更差,故而具有较高的排替压力,其侧向封闭能力尤其好。侧向封闭作用主要取决于泥岩涂抹的空间分布连续性。泥岩涂抹的连续性越好,其侧向封闭性越好,反之亦然
断裂带封闭机理 (存在断裂填充物)	泥质填充物 封闭机理
	后期成岩 封闭机理
	若断裂填充物以泥质为主时,目的层砂岩与断裂的泥质填充物形成排替压力差,使得断裂具有侧向封闭性,可以阻止油气进行侧向运移。若断裂填充物以砂质为主时,目的层砂岩与砂质填充物难以形成排替压力差,故断裂侧向封闭性差
	当断裂填充物以砂质为主时,后期的流体与断面物质的物理化学作用,在断裂带内胶结的矿物和形成的固体沥青仍然会使砂质填充物的孔渗降低、排替压力升高,致使目的层与填充物形成排替压力差,从而使断裂具备侧向封闭性,阻止油气进行侧向运移

注:据参考文献[1-2,28,43,66-67]总结。

以断面本身作为遮挡体或通道;岩性封闭型断裂依靠对盘岩层遮挡或提供通道。基于断层岩的岩性、形变环境、发育过程以及相关的胶结作用等因素,可将其分类为解聚带、碎裂岩、层状硅酸盐框架断层岩、泥岩涂抹和胶结封闭^[70]。

2 断裂封闭性影响因素

断裂是一个复杂的三维地质体,其内部结构解剖是研究断裂封闭性和开启性的基础。由于断裂内部结构的复杂性以及油气勘探开发中出现的实际问题,学者们对此进行了大量的研究^[71]。对断裂内部结构的研究通常采用分区分带的方法^[72],总体可以分为二元和三元结构(图 1 和图 2)。从应用角度来看,断裂内部结构可以划分为破碎带和诱导裂缝带^[72-74];依据变形特征,可细分为滑动破碎带和诱导裂缝带^[75],或断层核和破碎带^[76-79];基于几何特征,分为断层核、转换带和破碎带^[80-81]。断层核是指由断裂滑动面、构造透镜体和断裂岩(如断裂泥、断裂角砾岩、碎裂岩和泥岩涂抹)组成的剪切带^[27]。断裂核的形成受到断裂活动强度、应力性质、埋深、围岩和岩性等因素的影响,表现为上述一种或多种断裂岩的组合形式^[78]。破碎带位于断裂核两侧,其裂缝密度大,渗透率较围岩和断层核高^[72,82]。

在正断裂或逆断裂中,常见典型的二元结构和三元结构。而走滑断裂压扭段和拉分段的内部结构与正断裂和逆断裂不同,因为它们通常呈现主干断裂直插基底、向上分叉、撒开的特征,形状类似花朵,形成下部较窄、上部较宽的破碎带(图 3)^[83],

这种特点可能导致走滑断裂带上部较宽的破碎带内部结构与典型的断裂二元结构和三元结构存在差异。有研究发现,走滑断裂平移段内部结构仍然是三元结构(图 2)^[84]。这种类型的断层核发育空腔或被泥质、沥青等充填。滑动破碎带对称分布于断层核两侧,是走滑断裂内部裂缝密度最大的部位;而诱导裂缝带则是介于滑动破碎带和原岩之间的过渡带,主要是由于剪切力而诱导出来的一组或少数几组裂缝或断裂^[84-85]。距离断裂中心越远,裂缝密度越小,充填程度降低,主动盘较被动盘对应位置的裂缝更为发育^[84]。断裂内部不同类型断层岩的变形以及裂缝分布的不均一性,对断裂不同位置封闭性影响很大,因此,断裂内部结构差异性的研究是分析断裂封闭性影响因素的基础。

前人对砂泥岩地层中的正断裂和逆断裂的封闭性影响因素开展了系统分析^[1,21,28,31,43],主要有断裂力学性质、走向、倾角、断距、埋深、形成时期、活动时期、活动强度、断裂产状与地层产状配置关系、断裂密度、断裂组合形式、对置盘岩性、砂泥岩厚度比、泥岩涂抹系数、断裂带充填物性质、断裂带充填物的胶结成岩作用、流体作用、压实作用、溶蚀作用、断裂内部结构等,不同因素对断裂封闭性的作用方式不同(表 3)。

3 断裂封闭性评价方法

关于断裂封闭性,国内外学者提出了众多研究方法^[18,35,42,47,73,91-99]。在断裂封闭性评价方面经历了从单因素到多因素、从定性到半定量评价

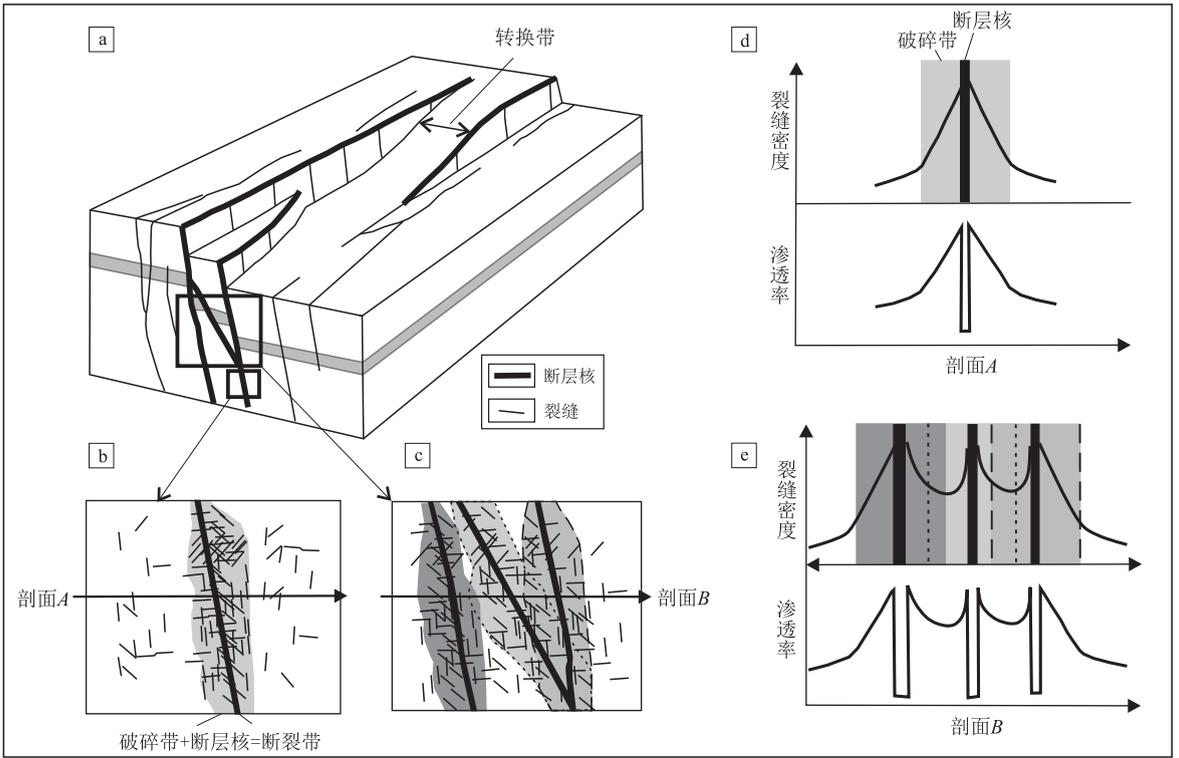


图1 正断裂二元结构与裂缝密度和渗透率关系示意图

据参考文献[86]修改。

Fig.1 Schematic representation of the binary structure of the fault in relation to fracture density and permeability

结构单元	原岩	被动盘 诱导裂缝带	被动盘 滑动裂缝带	核部	主动盘 滑动裂缝带	主动盘 诱导裂缝带	原岩
剖面特征							
岩石学及 缝洞发育特征		岩石裂缝较发育, 充填较少	岩石裂缝较发育,较 主动盘少,可见石英、 方解石充填	空洞 或者 被 沥青 等 充填	岩石裂缝最 发育,后期被 石英、方解石、 泥质及沥青质等 充填	岩石裂缝较 发育,较主动盘 滑动破碎带少, 充填程度低	

图2 典型走滑断裂平移段内部结构

据参考文献[84],有修改。

Fig.2 Internal structure of a simple shear section of a typical strike-slip fault

的研究过程。

BOUVIER 等^[25]利用三维地震断裂切片技术分析了断裂面两侧的对置岩性,提出了“泥岩涂抹潜力(CSP)”概念,用于判别断裂的封闭性能。ALLAN^[24]提出了“断面剖面分析法”来说明与断裂相关的圈闭和运移,前提是断面本身既不封闭也不渗漏,断裂封闭性取决于断裂两侧的岩性及厚度、几何形态和沿走向断距的变化。曹瑞成和陈章明^[35]基于大量封闭性断裂研究,提出了早期探区

断裂封闭性的判别模型——逻辑信息应用法。LINDSAY 等^[100]提出用“泥岩玷污因子(SSF)”判别断裂的封启性。KNOTT^[101]在收集北海油田各种封闭性断裂数据的基础上,采用图示法研究了断裂走向、埋深、断距、连通性、砂泥比率和断裂年代与封闭性的关系,并指出这些经验关系可用于预测类似地区的断裂封闭性。吕延防等^[36]提出了断裂封闭性的非线性映射应用判别方法。FULLJAMES 等^[102]和LEHNER 等^[103]分别提出了泥岩涂抹能力

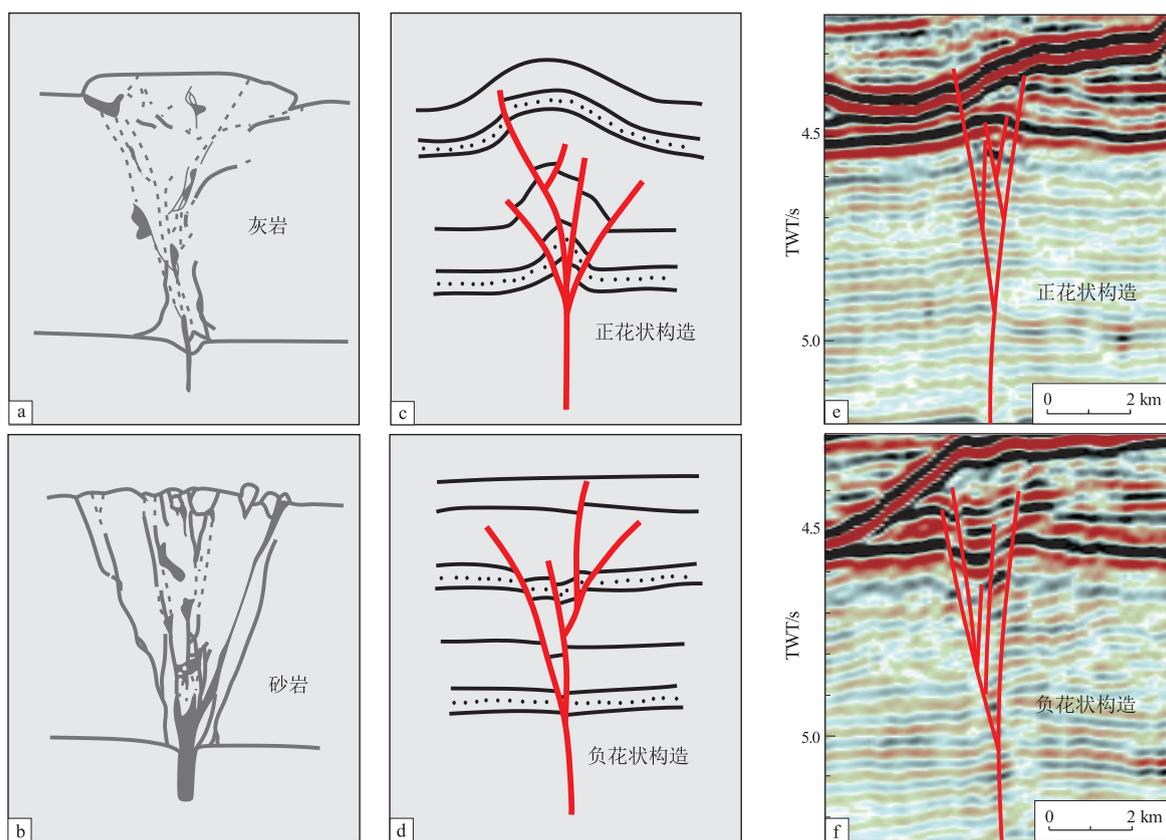


图 3 走滑断裂典型内部结构样式

a-b. 走滑断裂压扭段和张扭段构造变形实验横剖面, 示锥形变形; 实线是有断距的破裂, 虚线是断层泥的痕迹, 实块指失去的物质 (据文献[73]); c-d. 正花状构造(压扭段)和负花状构造(张扭段)示意; e-f. 地震剖面上解释的正花状构造和负花状构造。

Fig.3 Typical internal structural styles of strike-slip faults

(CSP) 和泥岩涂抹因子 (SSF) 的计算方法。KNIFE^[104] 提出了断裂封闭性的“图示分析法”。YIELDING 等^[105] 提出了计算断裂泥岩比率 (SGR) 公式。王朋岩^[106] 利用灰色关联分析法评价断裂的封闭性。侯读杰等^[107] 采用地球化学方法进行断裂封闭性评价。刘玉梅等^[108] 使用模糊法综合评价了垦东断裂带的封闭性。王珂等^[109] 基于地应力与断裂封闭性的影响关系, 提出断裂紧闭指数、封闭系数和剪切指数可以作为评价封闭性的重要参数。马强等^[110] 通过断裂流体锶、碳、氧同位素示踪评估了断裂的垂向封闭性。高长海等^[111] 提出了断裂封闭性的综合因子评价方法。许倩^[112] 和孙永吉^[113] 基于对走滑断裂内部结构的精细解剖, 分析评价了断裂封闭性。李勇等^[114] 利用地球化学实验分析手段和技术, 建立了断裂封闭性演化的地球化学评价方法。

回顾国内外对断裂封闭性评价的研究成果, 考虑到断裂封闭性的主控因素, 过去常采用的方法主要可分为以下 2 大类: (1) 传统地质学方法, 包括定性分析和半定量分析; (2) 数学地质方法, 涵盖

逻辑信息法、非线性映射分析法、断裂两盘砂泥岩对接概率模拟法、模糊综合评判法和灰色关联分析法等^[1] (表 4)。随着技术手段的不断更新和地质资料的逐渐丰富, 从多个角度评价断裂封闭性的方法也不断出现, 主要有构造应力场数值模拟及断裂封闭性相关参数计算法和地球化学等方法。

3.1 传统地质学方法

3.1.1 ALLAN 图

由于地层产状及断距沿断裂走向发生变化, 断裂不同部位地层接触关系不一样, 渗透性储层对接的部位将形成溢出点, 导致油气渗滤。因此, 断块构造并不一定是圈闭, 为了圈出真正的断裂圈闭, 降低断块型构造勘探的风险, ALLAN^[24] 提出了一个作断面图的方法, 即通过高分辨率地震资料及钻井资料, 详细划分断裂上下盘地层, 将断面切割的上盘岩性及下盘岩性精确绘制在一张图上, 分析渗透层与非渗透层在不同部位的接触情况, 从而可圈出真正有效的圈闭部位, 降低油气勘探的风险 (图 4)。

3.1.2 断裂面应力

断裂面的紧密程度通常依据断面受到的正应

表3 断裂封闭性主要影响因素及作用方式
Table 3 Main factors and modes of action influencing fault sealing

序号	影响因素	影响作用分析
1	断裂内部结构	主动盘的开启性一般优于被动盘,主动盘具有纵横向输导的特征,而被动盘通常呈纵横向遮挡,不同部位的封闭性往往存在差异
2	断裂力学性质	张性断裂封闭性通常较差,压性断裂具有较好的封闭性,扭性断裂在垂向上的封闭性最佳
3	断裂走向	当区域水平最大主应力与断裂走向的锐夹角增加时,封闭性变好;夹角越接近0°时,断裂容易开启;夹角越接近90°时,断裂封闭性越好
4	断裂倾角	在伸展盆地中,随着断裂倾角增加,封闭性越差;而在压缩盆地中,随着断裂倾角增加,封闭性越好
5	断距	断距增大可以使断裂岩裂缝增多,有利于断裂泥的形成,因此需要综合考虑断距对封闭性的影响
6	埋深	在伸展盆地中,随着深度增加,封闭性越好;在挤压性盆地中,随着深度增加,封闭性越差
7	断裂形成时期	同沉积断裂由于岩石塑性强,容易形成涂抹层,或者使断裂带的孔隙度和渗透率减小。然而,随着沉积后岩石的固结,其脆性增强,被断裂错断后形成的岩石粒度增大,孔隙度和渗透率也增加。这样的变化容易导致封闭的断裂带重新开启,破坏涂抹层
8	断裂活动时期	按照断裂活动时期,其封闭性由早期到晚期逐渐减弱,表现为早期>长期>晚期
9	断裂活动性	活动的断裂封闭能力差,而静止的断裂封闭能力相对好
10	断裂产状与地层产状配置关系	若地层与断裂产状一致时,断裂封闭流体能力较差;而当断裂与地层产状相反时,断裂封闭流体能力较好
11	断裂组合形式	在相同条件下,地堑型断裂通常比地垒型断裂具有更好的封闭性
12	对置盘岩性	砂岩与砂岩对置时,封闭性较差;而砂岩与泥岩对置时,封闭性则较好
13	砂泥岩厚度比	砂泥比越小,砂岩与泥岩对接的可能性越大,且形成泥岩涂抹层的概率也较高,断裂封闭性越好
14	泥岩涂抹系数	泥岩涂抹层越连续,则断裂封闭能力越好
15	应力作用	断面应力高于岩石的抗压强度时,断面封闭性好;反之,封闭性较差
16	断裂内流体作用	断裂带填充物为砂质时,断裂内的流体与填充物发生后期成岩作用,可能导致沉积物堵塞孔隙;油气的氧化会生成沥青固结,使孔隙度降低
17	断裂带填充物的胶结作用	胶结作用越强,孔隙度和渗透率就越低,差异排替压力就越高,断裂封闭能力越好
18	压实作用	压实作用可使松散的断裂填充物变得更紧密,孔隙闭合,渗透率下降。它还能导致无填充物的断裂断面紧闭,阻止流体在断裂中的运移,提高断裂的封闭性
19	溶蚀作用	当含烃流体通过断裂运移时,烃类脱羧基释放的CO ₂ 溶解于地层水中,同时生成有机酸,使地层水呈酸性,可能对岩石或裂隙中的胶结物产生溶蚀作用,影响断裂的封闭性,增加其输导能力

注:据参考文献[1,21,28,31,43-44,72,87-90]等总结。

表4 断裂封闭性评价的主要研究方法
Table 4 Main research methods for the evaluation of fault sealing

	评价方法	评价因素	量化程度
传统地质学方法	从影响断裂封闭性的主控因素入手,评价断裂的封闭能力或好坏	任何单一因素	定性
	ALLAN图或断裂面构造图	对置盘岩性	半定量
	断裂面压力 泥岩涂抹能力、涂抹因子、断裂泥比率	应力作用 砂泥岩厚度比和泥岩涂抹系数	定量
数学地质方法	逻辑信息法、非线性映取分析法、模糊综合评判法、灰色关联分析法	多种主控因素	定量
构造应力场模拟方法	构造应力场数值模拟及断裂封闭相关参数计算法	应力作用与断裂几何学特征	定量
地球化学方法	流体化学性质差异法 同位素法	胶结作用	定性 定性

注:据参考文献[1,58,89,96,110,114-117]等总结。

力大小来评估^[109]。在正断裂和逆断裂静止时,都会受到区域构造应力和上覆地层重力作用(垂直断裂除外)。断裂面上的正压力(N)由上覆地层对断面的静压力(N_1)和区域主压应力对断面的压力(N_2)之和组成(图5)^[117]。其计算公式

如下:

$$N = N_1 + N_2 = H(\rho_r - \rho_w) \times 0.009876 \cos\alpha + \sigma_1 \sin\alpha \sin\beta \quad (1)$$

式中: N 为断裂面所受的正压力,单位MPa; H 为断

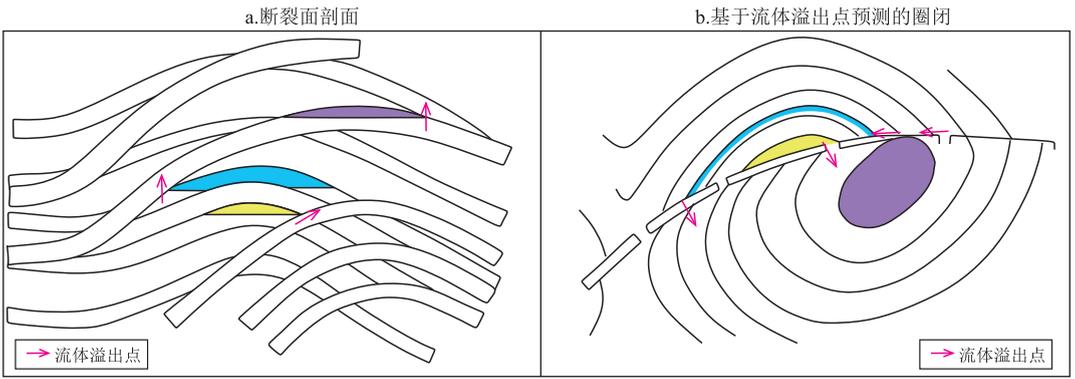


图 4 ALLAN 图解
 据参考文献[24],有修改。
 Fig.4 ALLAN illustration

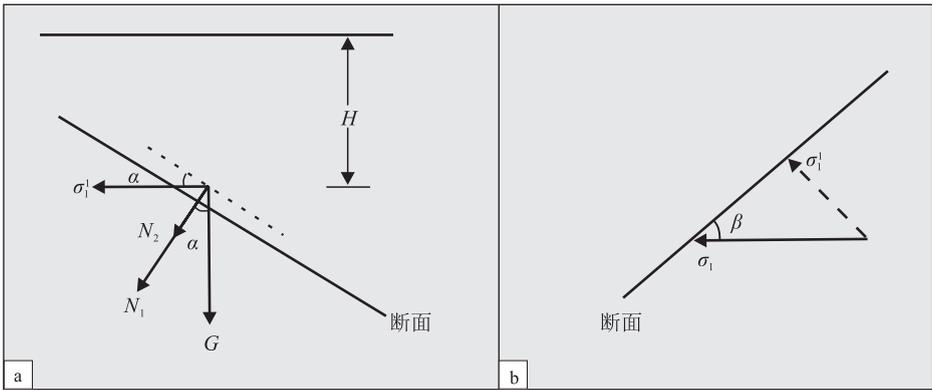


图 5 断裂面受力分析剖面图(a)和平面图(b)
 Fig.5 Cross section (a) and plain view (b) of force analysis on the fault surface

裂埋深,单位 m; ρ_r 、 ρ_w 分别为地层和地层水的密度,单位 g/cm^3 ; α 为断裂面的倾角,单位($^\circ$); σ_1 为区域主压应力,单位 MPa; β 为区域主压应力方向与断裂走向之间的夹角,单位($^\circ$)。

断裂面的紧闭程度主要取决于受到的正应力大小。正应力越大,断面的紧闭程度就越好;反之则越差。

3.1.3 泥岩涂抹能力、涂抹因子和断裂泥比率

根据 1993 年 LINDSAY 等^[100] 的研究,泥岩涂抹指的是断裂活动期间,由于泥岩(包括膏泥岩和盐岩)的塑性较高,在构造挤压应力和重力的作用下,泥岩会被压碎成黏土或发生塑性变形,形成一个由黏土隔层组成的剪切带。这种泥岩涂抹层依靠其自身较高的排替压力来封闭侧向运移的油气。尽管泥岩涂抹能够使断裂在侧向上形成封闭,但在垂向上未必会产生封闭效果。泥岩涂抹的能力、涂抹因子以及断裂泥比率等参数可用于评估断裂的侧向封闭程度(图 6)。相应的计算公式如下:

①泥岩涂抹潜力(CSP):

$$CSP = \sum \frac{(\text{泥岩层厚度})^2}{\text{某点距泥岩距离}} \quad (2)$$

②泥岩涂抹因子(SSF):

$$SSF = \frac{\text{断距}}{\text{泥岩层厚度}} \quad (3)$$

③断裂泥岩比率(SGR):

$$SGR = \frac{\sum \text{泥岩层厚度}}{\text{断距}} \times 100\% \quad (4)$$

或者:

$$SGR = \frac{\sum(\text{单层泥岩厚度} \times \text{层内泥岩比率})}{\text{断距}} \times 100\% \quad (5)$$

式(2)适用于断面剪切性涂抹,而式(3)则适用于压入型涂抹。在处理厚度较大、非均质的碎屑岩层序时,通常会采用式(4)和式(5)^[1]。

3.2 数学地质方法

3.2.1 逻辑信息法

逻辑信息法由曹瑞成和陈章明于 1992 年提出^[35],该方法将影响断裂封闭性的因素转化为二

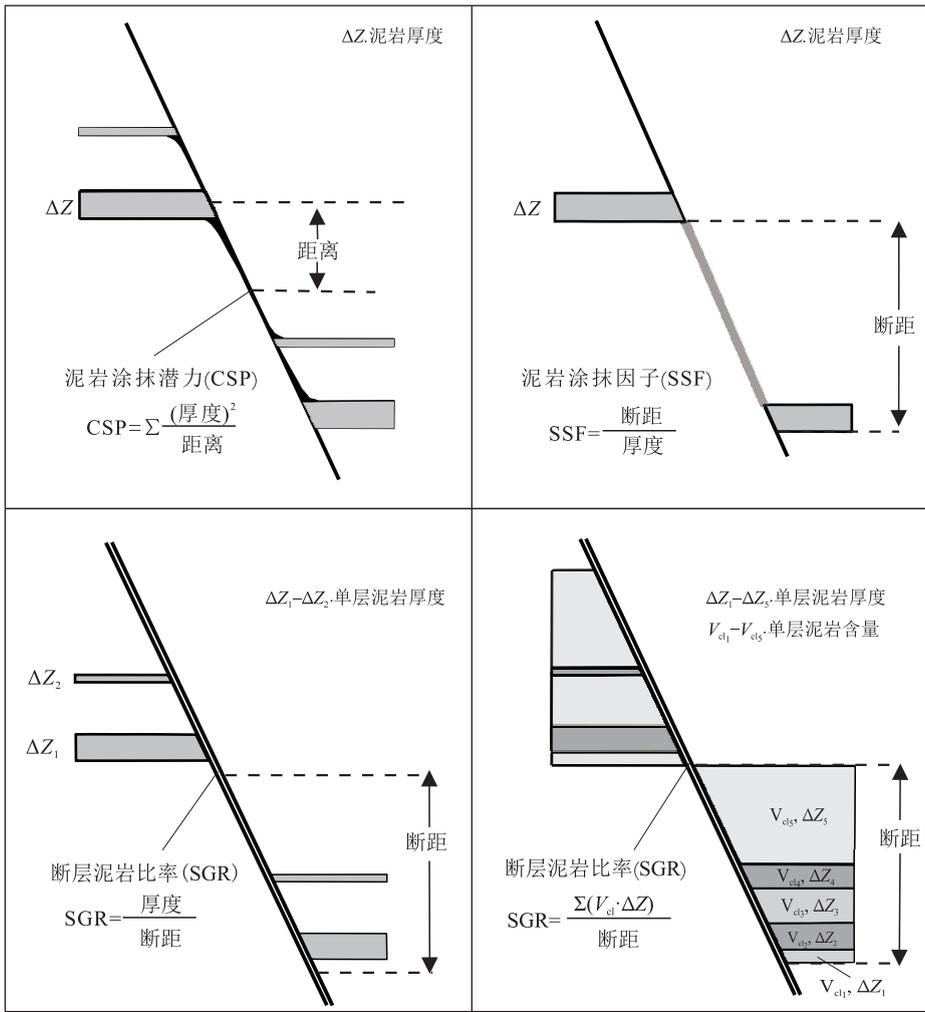


图 6 断裂泥岩涂抹潜力 (CSP)、涂抹因子 (SSF) 和断裂泥岩比率 (SGR) 算法
 据参考文献[105],有修改。

Fig.6 Algorithms for clay smear potential (CSP), shale smear factor (SSF) and shale gouge ratio (SGR)

进制数据。假设相似地质条件下的断裂具有类似的封闭能力,基于对已知封闭性的典型断裂进行逻辑运算,筛选出关键参数并计算其权重,确定各因素对断裂封闭性的贡献;最终建立一个基于这些参数的断裂封闭性判别模型。根据模型要求,对未知封闭性的断裂进行变量选择和赋值,通过计算评估其封闭性。该方法的特点在于将定性数据转化为定量预测,同时充分利用地质工作者的专业知识和经验,因此特别适用于油气盆地勘探的初期阶段。

3.2.2 非线性映射分析法

非线性映射分析法是通过非线性变换将高维图像转换为低维图像,同时尽量保留原始几何关系的数学方法。这使我们能在低维空间中直接观察高维样本的相互关系^[36]。在研究断裂封闭性时,通常采用 Q 型非线性映射分析,其中 Q 型表示使用距离系数矩阵来表示样本点之间的关系。运用这种方法研究断裂封闭性时,首先需要正确确定影

响断裂封闭性的主要因素,并选择一定数量的已知具有或不具有封闭能力的断裂作为参照物;在非线形映射分析的二维平面上,与参照物相近的断裂往往具有类似的封闭性。

3.2.3 模糊综合评判法

该方法将评价对象分解成多个因素,并分别单独评价,得到模糊评判向量;最终,通过模糊变换得到综合评判值^[96,118-119]。这种方法涉及 3 个关键要素,即因素集、评判集和单因素。在地质现象评价中,许多定性指标具有模糊性,若强行量化,可能丢失中介信息,导致评定偏差。而采用模糊综合评判法,则能够模拟人脑处理模糊信息的方式,通过建立评价因素集与评语集之间的模糊关系,有效避免这种损失。

3.2.4 灰色关联分析法

考虑到断裂的封闭能力通常是未知的,因此可以将其视为一个灰色系统。根据灰色系统理论,我

们可以选择断裂封闭性的评价参数和指标作为特征值,通过灰色关联分析的方法,对断裂封闭性进行白化处理,从而实现了对断裂封闭性的定量描述。这种方法不仅可以定量描述和比较断裂系统的发展变化趋势,还可以确定断裂封闭性评价指标与实际数据之间的关联因素和关联程度。基于这些信息,我们可以对断裂的封闭性做出评判^[109]。

3.3 构造应力场模拟方法

该方法是一种定量评价断裂封闭性的方法,其关键是如何获取断面处应力大小和方向。目前,获取现今应力值大小可以通过水力压裂和声发射实验,而应力方向可以根据成像测井诱导缝走向和偶极子声波测井快横波方位确定^[120]。但上述实验和方法仅仅能确定某一口井的现今应力大小和方向,难以获取整个断面处应力大小和方向。而基于有限元法的三维构造应力场数值模拟是一种行之有效的解决方案。在古今构造地质模型建立、三轴岩石力学变形实验与测井动态岩石力学参数计算、声发射古今地应力实验基础上,基于三维地震速度、振幅属性反演得到的高精度岩石力学模型和自适应边界条件的优化,可以获得高精度三维古今构造应力场分布,据此可以计算断面正应力、断裂紧闭指数、断裂开启压力、滑动趋势系数和膨胀系数,来定量评价断裂的封闭性。

①断面正应力(σ_n)计算公式如下:

$$\sigma_n = \sigma_v \cos^2 \theta + \sigma_H \sin^2 \theta \sin^2 \beta + \sigma_h \sin^2 \theta \cos \beta \quad (6)$$

式中: σ_n 为作用在断面的正应力,单位 MPa; σ_H 为局部最大水平主应力,单位 MPa; σ_h 为局部水平最小主应力,单位 MPa; σ_v 为局部垂向主应力,单位 MPa; θ 为断裂倾角,单位($^\circ$); β 为最大水平主应力方向和断裂走向的夹角,单位($^\circ$)。

②断裂紧闭指数(I_n)计算公式如下:

$$I_n = \frac{\sigma_n}{\sigma_p} \quad (7)$$

式中: I_n 为断裂紧闭指数,无量纲; σ_n 为断面正应力,单位 MPa; σ_p 为岩石抗压强度,单位 MPa。

碎屑岩岩石抗压强度可由式(8)求得:

$$\sigma_p = R_C \sigma_M + (1 - R_C) \sigma_S \quad (8)$$

式中: R_C 为泥岩削刮比,无量纲; σ_M 、 σ_S 分别为泥岩、砂岩抗压强度,单位 MPa。

R_C 可由式(9)求得:

$$R_C = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i V_{ish}}{S} \times 100\% \quad (9)$$

式中: Z_i 为第 i 小层的厚度,单位 m; V_{ish} 为第 i 小层的泥岩含量,单位%; S 为断裂断距,单位 m。

当 I_n 大于 1 时,泥岩变形导致断裂裂缝闭合,从而使得断裂呈现封闭状态;当 I_n 介于 0 到 1 之间时,断面正应力对断裂的封闭性影响较小;而当 I_n 小于 0 时,则表示断裂面的正应力为拉张应力,导致断裂的开启^[109]。

③断裂的开启压力可用下式进行计算:

$$P_i = \left(\frac{u}{1-u} H \rho_s g \sin \theta + H \rho_s g \cos \theta - \alpha H \rho_w g \right) \times 10^{-6} + H f \sigma_1 \sin \theta \sin \beta + H f \sigma_3 \sin \theta \cos \beta \quad (10)$$

式中: P_i 为断裂开启压力,单位 MPa; u 为岩石泊松比; H 为断裂埋藏深度,单位 m; g 为重力加速度,单位 N/kg; α 为地层压力系数; ρ_s 为岩石密度,单位 kg/m³; ρ_w 为水的密度,单位 kg/m³; $f \sigma_1$ 、 $f \sigma_3$ 分别为现今最大、最小主应力梯度,单位 MPa/m。断裂开启压力越大,封闭性越好;反之,则开启性越好。

④滑动趋势系数可用下式进行计算:

$$T_s = \frac{\sigma_\tau}{\sigma_n} \quad (11)$$

式中: T_s 为滑动趋势系数,无量纲; σ_τ 为断面剪应力,单位 MPa。当滑动趋势系数大于或者等于 0.6 时,断裂是处于临界应力状态,地下流体能够在这种状态的断裂渗流,即断裂是开启的;当滑动趋势系数小于 0.6 时,断裂是封闭的。滑动趋势系数越大,断裂封闭性越差。

⑤断面膨胀系数同样可反映断面的开启性,计算公式为:

$$T_d = \frac{\sigma_1 - \sigma_n}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (12)$$

式中: T_d 为断面膨胀系数,无量纲; σ_1 、 σ_3 为水平最大、最小主应力,单位 MPa。断面膨胀系数越大,断裂封闭性越差。

3.4 地球化学方法

开启的断裂两盘储集层是连通的,而封闭的断裂两盘储集体中流体是相互孤立的。因此,前人基于断裂两盘的流体是否具有相同的化学性质去判断断裂的封闭性,该方法更为直接有效^[114,116,121]。开启的断裂两侧的流体互通,形成相同的压力系统和油水界面,并且其流体具有相似或相同的化学性质。相反,封闭的断裂使得两侧的流体成为独立的

压力系统,导致油水界面存在差异,并且两侧流体的性质也会有所不同。侯读杰等^[107]根据断裂两侧原油的化学组成指纹差异,证实了涠12-1-5井和涠12-1-6井IV油组中一个小断裂是封闭的;同时,根据原油含氮化合物参数验证了断裂是开启的,可作为油气运移的通道。王力等^[116]根据断裂两侧原油的正构烷烃、甾烷、萜烷分布以及成熟度等地球化学参数的明显差异,认为断裂封闭性较好。马强等^[110]利用断裂流体中的锶、碳、氧同位素分析方法,评价了焦石坝背斜带的断裂垂向封闭性。李勇等^[114]综合利用碳同位素、轻烃、生物标志化合物等地球化学数据,提出了基于地球化学数据的断裂封闭性动态演化评价方法。

4 存在问题与发展趋势

尽管近年来国内外学者对断裂的封闭性进行了系统深入研究,并取得了许多新认识和成果,但要准确评价断裂的封闭性,仍然是一个极具挑战性的难题。这主要是因为断裂带具有非常复杂的地质结构。回顾前人对断裂封闭性的研究历史、封闭机制、主控因素以及评价方法,作者认为在断裂封闭性研究方面仍存在许多有待解决的问题。

(1)目前,断裂封闭性研究主要聚焦于砂泥岩地层中,而对碳酸盐岩地层断裂封闭性研究很少。在以往的研究中,通常侧重于从构造地质学的角度研究,而较少关注流体活动与化学作用机制对断裂封闭性的影响。断裂带是地下流体主要的运移通道,这些流体在循环运移过程中,经常与围岩发生水岩相互作用,不仅会促进断裂带中黏土矿物的形成,还可能导致胶结作用和局部溶解溶蚀,从而在一定程度上影响断裂的封闭性^[59,87]。通过分析古流体的性质、类型以及数量的变化,可以深入研究并追踪石油的运移方向和路径,同时确定油气充注的时间,并揭示断裂在不同时期的开启与封闭状态。与砂泥岩地层不同,碳酸盐岩地层一般呈厚层块状,具有岩性单一、泥质含量低、脆性大、易溶解等特点。因此,对碳酸盐岩断裂封闭性的研究,应加强断裂带多期次流体活动与化学沉淀胶结、溶解溶蚀作用对碳酸盐岩地层断裂封闭性影响机制及其封闭能力评价研究,如断裂带内流体包裹体定温,脉体锶、碳、氧同位素测试,微量元素分析等。

(2)前期断裂封闭性研究多关注砂泥对接、泥岩涂抹、断裂带高排替压力等方面的封闭机理。除此之外,多期次构造应力场演变、断裂性质、断裂产状(走向和倾角)、断裂走向与水平最大主应力夹

角、断裂带内部充填特征等对断裂封闭性的影响显著。若断裂带内泥质含量多,充填程度高,断裂的开启性相对较差;若断裂带内充填严重,且充填物以方解石和硅质等脆性矿物为主时,受后期构造活动和流体活动的影响,脆性充填物会发生二次或多次构造破裂和再溶蚀作用,产生大量开启性好的微裂缝和溶蚀缝洞,致使充填严重的断裂带仍具有较好的开启性。如在塔里木盆地顺北地区超深层奥陶系碳酸盐岩中,充填严重的走滑断裂带内仍获得了高产千吨油气井。因此,在研究断裂封闭性时,需要具体分析不同时期的三维应力场特征,尤其是现今应力场环境和多期流体活动特征。因为它不仅影响古油气藏的油气重新分配,还控制现今油气分布规律及开发过程中的流体驱动路径和方式^[120,122]。

(3)以往断裂封闭性的评价多采用地质学和数学地质方法,方法较为单一,受地质资料获取的限制,往往利用少量信息进行评估。然而,断裂封闭性受断裂发育特征、断裂两盘岩性、应力场环境以及压实、胶结、溶蚀等成岩作用等多种因素共同影响。且以往对断裂封闭性的评价往往是定性—半定量分析,难以准确量化封闭性等级。因此,从多学科、多角度、利用多种新的技术手段(如地质建模、人工智能、大数据)等方面加强断裂封闭性多因素综合定量评价方法研究,将是未来重要发展方向。

(4)断裂的封闭性在时间和空间上具有其独特的演化历史,断裂在不同时期、不同部位具有不同封闭能力,表现出断裂封闭性在时空演化上具有复杂性和不均一性的特点^[69,123]。受多期次构造运动的影响,断裂往往呈现出周期性活动的特点,其封闭性和对油气运移的控制作用也有着明显差别。断裂活动史与断裂封闭性密切相关,断裂的活动期次与油气成藏期的匹配关系直接影响断裂开启性与输导能力。前期对于断裂活动性的研究多基于差异构造变形特征的构造地质学方法进行研究,缺少地球化学和年代学方面的证据约束。因此,应加强断裂活动期次与强度的构造地质(如差异构造变形、断裂和裂缝交切关系等)—地球化学(如锶、碳、氧稳定同位素分析和流体包裹体测温实验)—年代学(如微区原位U-Pb定年和MC-ICP-MS高精度的Sm-Nd测年)综合分析,查明不同时期断裂封闭性及其通源能力的差异性,建立油源断裂开启与封闭演化模式。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

所有作者均参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The manuscript was drafted and revised by all the authors. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 丁文龙, 金文正, 刘维军. 多信息断层封闭性综合评价系统研究及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2012.

DING Wenlong, JIN Wenzheng, LIU Weijun. Study of multi-information comprehensive evaluation system for fault sealing and application[M]. Beijing: Geological Press, 2012.

- [2] 丁文龙, 金之钧, 张义杰, 等. 新疆准噶尔盆地断裂控油气作用机理研究[J]. 地质前缘, 2002, 9(3): 102.

DING Wenlong, JIN Zhijun, ZHANG Yijie, et al. Mechanism of hydrocarbon control by faults in the Junggar Basin, Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(3): 102.

- [3] 郑和荣, 胡宗全, 云露, 等. 中国海相克拉通盆地内部走滑断裂发育特征及控藏作用[J]. 地质前缘, 2022, 29(6): 224-238.

ZHENG Herong, HU Zongquan, YUN Lu, et al. Strike-slip faults in marine cratonic basins in China: development characteristics and controls on hydrocarbon accumulation[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 224-238.

- [4] 张仲培, 徐勤琪, 刘士林, 等. 塔里木盆地巴麦地区东段北东向走滑断裂体系特征及油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 761-769.

ZHANG Zhongpei, XU Qinqi, LIU Shilin, et al. Characteristics of NE strike-slip fault system in the eastern section of Bachu-Maigaiti area, Tarim Basin and its oil-gas geological significance[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 761-769.

- [5] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 335-349.

SONG Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 335-349.

- [6] 刘军, 廖茂辉, 王来源, 等. 顺北油田顺北 4 号断裂带中段断控储集体连通性评价[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(4): 456-464.

LIU Jun, LIAO Maohui, WANG Laiyuan, et al. Static connectivity evaluation on fault-controlled reservoir system in the middle section of Shunbei No.4 fault zone, Shunbei Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(4): 456-464.

- [7] 罗安湘, 刘广林, 刘正鹏, 等. 鄂尔多斯盆地中生界断裂及对油藏的控制研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 43-54.

LUO Anxiang, LIU Guanglin, LIU Zhengpeng, et al. Mesozoic faults and their control on oil reservoirs in Ordos Basin[J]. Journal

of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(4): 43-54.

- [8] 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.

- [9] 陈登超, 杨贵丽, 马立驰, 等. 淮北凹陷走滑断裂体系特征及其控藏作用[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2410-2421.

CHEN Dengchao, YANG Guili, MA Lichi, et al. Characteristics of the strike-slip fault system and their control actions on the hydrocarbon accumulation for Weibei Sag[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(8): 2410-2421.

- [10] 管树巍, 姜华, 鲁雪松, 等. 四川盆地中部走滑断裂系统及其控油气作用[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1542-1557.

GUAN Shuwei, JIANG Hua, LU Xuesong, et al. Strike-slip fault system and its control on oil & gas accumulation in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(11): 1542-1557.

- [11] 肖雷. 断裂输导形成上覆油气藏有利部位预测方法及其应用[J]. 特种油气藏, 2023, 30(1): 22-28.

XIAO Lei. Method for predicting the favorable site of overlying oil and gas reservoir formed by fault conduit and its application[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(1): 22-28.

- [12] 汪洋, 张哨楠, 刘永立. 塔里木盆地塔河油田走滑断裂活动对油气成藏的控制作用: 以托甫 39 断裂带为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 394-401.

WANG Yang, ZHANG Shaonan, LIU Yongli. Controls of strike-slip fault activities on hydrocarbon accumulation in Tahe Oilfield, Tarim Basin: a case study of TP 39 fault zone[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 394-401.

- [13] 陈平, 能源, 吴鲜, 等. 塔里木盆地顺北 5 号走滑断裂带分层分段特征及构造演化[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(1): 33-42.

CHEN Ping, NENG Yuan, WU Xian, et al. Stratification and segmentation characteristics and tectonic evolution of Shunbei No.5 strike-slip fault zone in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(1): 33-42.

- [14] 汪如军, 冯建伟, 李世银, 等. 塔北—塔中隆起奥陶系富油气三角带断裂特征及控藏分析[J]. 特种油气藏, 2023, 30(2): 26-35.

WANG Rujun, FENG Jianwei, LI Shiyin, et al. Analysis on fault characteristics and reservoir control of Ordovician hydrocarbon-rich triangle zone in Tabei-Tazhong Uplift[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(2): 26-35.

- [15] 李海英, 韩俊, 陈平, 等. 塔里木盆地顺北 4 号走滑断裂带变形特征及有利区评价[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(2): 127-135.

LI Haiying, HAN Jun, CHEN Ping, et al. Deformation and favorable area evaluation of Shunbei No.4 strike-slip fault zone in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(2): 127-135.

- [16] HUBBERT M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(8): 1954-2026.

- [17] SMITH W W, BUDD R A, CORNFIELD J. Estimation of radia-

- tion dose-reduction factor for β -mercaptoethylamine by endogenous spleen colony counts [J]. *Radiation Research*, 1966, 27(3):363-368.
- [18] 景紫岩,杨兆平,李国斌,等. 勘探前期断层封闭性三维定量评价及软件研发[J]. *东北石油大学学报*, 2021, 45(4):27-34.
JING Ziyan, YANG Zhaoping, LI Guobin, et al. 3D quantitative evaluation of fault sealing in early exploration stage and software development [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021, 45(4):27-34.
- [19] 王东晔,查明,吴孔友. 有关断层封闭性若干问题的探讨[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(4):513-515.
WANG Dongye, ZHA Ming, WU Kongyou. A discussion on several issues about fault sealing [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(4):513-515.
- [20] 邵燕林,乔禹达,张娜,等. 高陡构造带碳酸盐岩储气库断层封闭性评价:以川东WSC气田为例[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(1):1-8.
SHAO Yanlin, QIAO Yuda, ZHANG Na, et al. Fault sealing evaluation of carbonate gas storage in high-steep structural belt: taking WSC gas field in eastern Sichuan as an example [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2022, 19(1):1-8.
- [21] 付晓飞,李坤,董柔,等. 断层封闭性研究综述[J]. *能源技术与管理*, 2021, 46(3):24-26.
FU Xiaofei, LI Kun, DONG Rou, et al. Literature review on fault sealing [J]. *Energy Technology and Management*, 2021, 46(3):24-26.
- [22] CHU Rong, WANG Yougong, SHI Haitao. Quantitative evaluation of fault sealing capacity and hydrocarbon migration: insight from the Liuzhuang fault in the Bohai Bay Basin, China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2024, 113(2):459-475.
- [23] SU Shengmin, JIANG Youlu, GUO Gang. Diagenesis and lateral sealing types of fault zones in the Lishu Depression, Songliao Basin, NE China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 163:106802.
- [24] ALLAN U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(7):803-811.
- [25] BOUVIER J D, KAARS-SIJPESTEIJN C H, KLUESNER D F, et al. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field, Nigeria [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(11):1397-1414.
- [26] SMITH D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf Coast Salt Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(2):145-72.
- [27] PEI Yangwen, PATON D A, KNIPE R J, et al. A review of fault sealing behavior and its evaluation in siliciclastic rocks [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150:121-138.
- [28] 付晓飞,付广,赵平伟. 断层封闭机理及主要影响因素研究[J]. *天然气地球科学*, 1999, 10(3/4):54-62.
FU Xiaofei, FU Guang, ZHAO Pingwei. Research on the mechanism of fault closure and main influencing factors [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1999, 10(3/4):54-62.
- [29] 王来斌,徐怀民. 断层封闭性的研究进展[J]. *新疆石油学院学报*, 2003, 15(1):11-15.
WANG Laibin, XU Huaimin. Advances of research on fault sealing [J]. *Xinjiang Oil Gas*, 2003, 15(1):11-15.
- [30] 周林帅,张卫海,黄峰,等. 断裂带充填物中泥质质量分数的确定及断层封闭性评价[J]. *断块油气田*, 2010, 17(2):173-176.
ZHOU Linshuai, ZHANG Weihai, HUANG Feng, et al. Determination of shale content in fault filling material and evaluation of fault sealing [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2010, 17(2):173-176.
- [31] 王建忠,向才富,庞雄奇. 碳酸盐岩层系断层封闭机理研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(4):616-624.
WANG Jianzhong, XIANG Caifu, PANG Xiongqi. Fault sealing mechanisms in the carbonate sequence [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(4):616-624.
- [32] 许新明,姜建,陈胜红,等. 珠江口盆地恩平凹陷断层封闭性评价[J]. *现代地质*, 2016, 30(1):122-129.
XU Xinming, JIANG Jian, CHEN Shenghong, et al. Study on the evaluation method of fault sealing and its application: an example of Neogene layer in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Geoscience*, 2016, 30(1):122-129.
- [33] XIE Liujuan, PEI Yangwen, LI Anren, et al. Implications of meso- to micro-scale deformation for fault sealing capacity: insights from the Lenghu5 fold-and-thrust belt, Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 158:336-351.
- [34] YU Wenquan. The quantitative evaluation of fault sealing during the Cenozoic in Gaoyou Depression, Subei Basin [J]. *Geological Journal*, 2022, 57(10):4099-4109.
- [35] 曹瑞成,陈章明. 早期勘探区断层封闭性评价方法[J]. *石油学报*, 1992, 13(1):13-22.
CAO Ruicheng, CHEN Zhangming. A method of estimating of property sealing of a fault in a non mature region [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1992, 13(1):13-22.
- [36] 吕延防,陈章明,陈发景. 非线性映射分析判断断层封闭性[J]. *石油学报*, 1995, 16(2):36-41.
LÜ Yanfeng, CHEN Zhangming, CHEN Fajing. Evaluation of sealing ability of faults using nonlinear mapping analysis [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(2):36-41.
- [37] 刘文碧,周文,李德发. 川西拗陷上三叠统断层封闭性研究[J]. *西南石油学院学报*, 1996, 18(3):12-19.
LIU Wenbi, ZHOU Wen, LI Defa. Study of fault confining of the Early Triassic period in West Sichuan Depression areas [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1996, 18(3):12-19.
- [38] 曹龙,王少鹏,高鹏宇,等. 黄河口凹陷新近系岩性—构造油藏断层封闭性评价[J]. *断块油气田*, 2022, 29(4):502-507.
CAO Long, WANG Shaopeng, GAO Pengyu, et al. Fault sealing of Neogene lithology-structural reservoirs in the Huanghekou Sag [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(4):502-507.
- [39] 刘建党,兰正凯,贾超. 江陵凹陷断层封闭性评价及勘探潜力[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(3):36-42.
LIU Jiandang, LAN Zhengkai, JIA Chao. Fault trap evaluation and exploration potential in Jiangling Sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(3):36-42.
- [40] 孙思尧,范昌育,蒲仁海,等. 西湖凹陷平湖构造带断裂垂向封闭性研究[J]. *断块油气田*, 2022, 29(3):353-359.

- SUN Siyao, FAN Changyu, PU Renhai, et al. Research on vertical sealing of faults in Pinghu structural belt of Xihu Sag [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(3): 353-359.
- [41] 吕延防, 李国会, 王跃文, 等. 断层封闭性的定量研究方法 [J]. *石油学报*, 1996, 17(3): 39-45.
- LÜ Yanfang, LI Guohui, WANG Yuewen, et al. Quantitative analyses in fault sealing properties [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, (3): 39-45.
- [42] 白新华, 罗群. 断层封闭性评价研究 [J]. *大庆石油学院学报*, 1998, 22(1): 91-94.
- BAI Xinhua, LUO Qun. Research of fault seal property [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1998, 22(1): 91-94.
- [43] 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): 76-81.
- LU Bing, DING Wenlong, LIU Zhong, et al. Advances of research on fault sealing [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1998, 17(3): 76-81.
- [44] 张丹凤, 方石, 邱善坤. 断层启性的研究现状与发展方向 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1): 65-80.
- ZHANG Danfeng, FANG Shi, QIU Shankun. Current research states and development directions of fault sealing properties [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 65-80.
- [45] 景紫岩, 李国斌, 付晓飞, 等. 基于砂箱物理模拟的断层封闭有效性评价新方法 [J]. *地质论评*, 2022, 68(1): 348-358.
- JING Ziyang, LI Guobin, FU Xiaofei, et al. New methods for evaluation fault sealing effectiveness based on sand box physical simulation [J]. *Geological Review*, 2022, 68(1): 348-358.
- [46] 李强, 田晓平, 何京, 等. 断层封闭性定量表征及对油气富集的控制作用 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(4): 40-50.
- LI Qiang, TIAN Xiaoping, HE Jing, et al. Quantitative characterization of fault sealing and its control on hydrocarbon accumulation [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2018, 40(4): 40-50.
- [47] 吕延防, 王伟, 胡欣蕾, 等. 断层侧向封闭性定量评价方法 [J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 310-316.
- LÜ Yanfang, WANG Wei, HU Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 310-316.
- [48] 陈龙, 曹永春. 断层封闭性研究进展与发展趋势 [J]. *陕西煤炭*, 2015, 34(2): 38-41.
- CHEN Long, CAO Yongchun. Research progress of fault sealing and its development trend [J]. *Shaanxi Coal*, 2015, 34(2): 38-41.
- [49] 朱海军. 断层封闭性研究现状与展望 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(1): 124-131.
- ZHU Haijun. Present status and prospects of research on fault closure property [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(1): 124-131.
- [50] 张新顺, 王建平, 李亚晶, 等. 断层封闭性研究方法评述 [J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(2): 123-128.
- ZHANG Xinshun, WANG Jianping, LI Yajing, et al. A comment on research methods of fault sealing capacity [J]. *Lithologic reservoirs*, 2013, 25(2): 123-128.
- [51] 陈发景. 盆地构造分析在我国油气普查和勘探中的作用 [J]. *石油与天然气地质*, 1989, 10(3): 247-255.
- CHEN Fajing. The role of basin tectonic analysis in hydrocarbon census and exploration in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 1989, 10(3): 247-255.
- [52] WEBER K J, MANDL G J, PILAAR W F, et al. The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structures [C]// *Proceedings of the Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: OTC, 1978.
- [53] ENGELDER J T. Cataclasis and the generation of fault gouge [J]. *GSA Bulletin*, 1974, 85(10): 1515-1522.
- [54] KNIPE R J. Faulting processes and fault seal [M]// LARSEN R M, BREKKE H, LARSEN B T, et al. *Structural and tectonic modelling and its application to petroleum geology*. Amsterdam: Elsevier, 1992: 325-342.
- [55] GIBSON R G. Fault-zone seals in siliciclastic strata of the Columbus Basin, offshore Trinidad [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(9): 1372-1385.
- [56] ANTONELLINI M A, AYDIN A. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: petrophysical properties [J]. *AAPG*, 1994, 78(3): 355-377.
- [57] BERG R R, AVERY A H. Sealing properties of Tertiary growth faults, Texas Gulf Coast [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(3): 375-392.
- [58] 吴李泉, 曹代勇, 郝健全, 等. 东营凹陷北部陡坡带断层应力封闭研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(3): 414-418.
- WU Liqun, CAO Daiyong, HAO Yinyuan, et al. Characteristics of stress sealing of fault in north zone of Dongying Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(3): 414-418.
- [59] 吴孔友, 李继岩, 崔世凌, 等. 断层成岩封闭及其应用 [J]. *地质力学学报*, 2011, 17(4): 414-418.
- WU Kongyou, LI Jiyan, CUI Shiling, et al. Diagenetic sealing characteristics of faulting zone and its application [J]. *Journal of Geomechanics*, 2011, 17(4): 414-418.
- [60] 赵乐强, 贾凡建, 曹剑, 等. 准噶尔盆地西北地区断层内流体活动过程及对断层启闭性的影响 [J]. *石油实验地质*, 2017, 39(4): 461-466.
- ZHAO Leqiang, JIA Fanjian, CAO Jian, et al. Fluid activity in faults in the northwestern Junggar Basin and its influence on fault opening and sealing [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(4): 461-466.
- [61] 吕延防, 付广, 张云峰. 断层封闭性研究 [J]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- LÜ Yanfang, FU Guang, ZHANG Yunfeng. Study on fault sealing [J]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [62] 黄峰. 高邮凹陷西部地区控油断层封闭性研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008.
- HUANG Feng. Research on faults sealing in western Gaoyou Depression of Subei Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.
- [63] 吴向阳. 苏北复杂断裂带成藏规律研究与目标评价 [D]. 青

- 岛:中国石油大学(华东),2006.
- WU Xiangyang.Reservoir-forming law study and target evaluation of complex fault zones in Subei area [D].Qingdao:China University of Petroleum (East China),2006.
- [64] 王亚民.乌尔逊凹陷断层垂向封闭性时空演化及与油气关系研究[D].大庆:大庆石油大学,2006.
- WANG Yamin.Research on evolution of vertical seal of faults in time and space and relation between them and oil-gas in Wuexun Depression [D].Daqing:Daqing Petroleum University, 2006.
- [65] 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.
- [66] 张吉,张烈辉,杨辉廷,等.断层封闭机理及其封闭性识别方法[J].河南石油,2003,17(3):7-9.
- ZHANG Ji,ZHANG Liehui,YANG Huiting, et al.Identification methods of sealing mechanism and sealing ability of faults [J].Henan Petroleum,2003,17(3):7-9.
- [67] 张加太.断层封闭机理及其油气团聚特性研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2021.
- ZHANG Jiatai.Research on fault sealing mechanism and hydrocarbon migration and accumulation characteristics [D].Qingdao:China University of Petroleum (East China),2021.
- [68] 吕延防,马福建.断层封闭性影响因素及类型划分[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(2):163-166.
- LÜ Yanfang,MA Fujian.Controlling factors and classification of fault seal [J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003,33(2):163-166.
- [69] 徐海霞,赵万优,王长生,等.断层封闭性演化史研究方法及应用[J].断块油气田,2008,15(3):40-42.
- XU Haixia,ZHAO Wanyu,WANG Changsheng, et al.A method for study on evolution history of fault sealing property and its application [J].Fault-Block Oil & Gas Field,2008,15(3):40-42.
- [70] 闻竹,付晓飞,吕延防.断层封闭性评价及断圈含油气预测[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(4):1209-1218.
- WEN Zhu,FU Xiaofei,LÜ Yanfang.Evaluation of fault seal and hydrocarbon potential prediction of fault traps [J].Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(4):1209-1218.
- [71] ISHII E.Far-field stress dependency of the failure mode of damage-zone fractures in fault zones: results from laboratory tests and field observations of siliceous mudstone [J].Journal of Geophysical Research:Solid Earth,2016,121(1):70-91.
- [72] 罗胜元,何生,王浩.断层内部结构及其对封闭性的影响[J].地球科学进展,2012,27(2):154-164.
- LUO Shengyuan,HE Sheng,WANG Hao.Review on fault internal structure and the influence on fault sealing ability [J].Advances in Earth Science,2012,27(2):154-164
- [73] 付晓飞,方德庆,吕延防,等.从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J].地球科学(中国地质大学学报), 2005,30(3):328-336.
- FU Xiaofei,FANG Deqing,LÜ Yanfang, et al.Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones [J].Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2005,30(3):328-336.
- [74] 罗群,黄捍东,王保华,等.低序级断层的成因类型特征与地质意义[J].油气地质与采收率,2007,14(3):19-21.
- LUO Qun,HUANG Handong,WANG Baohua, et al.Genetic types of low-grade faults and their geologic significance [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2007,14(3):19-21.
- [75] 吴智平,陈伟,薛雁,等.断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性[J].地质学报,2010,84(4):570-578.
- WU Zhiping,CHEN Wei,XUE Yan, et al.Structural characteristics of faulting zone and its ability in transporting and sealing oil and gas [J].Acta Geologica Sinica,2010,84(4):570-578.
- [76] SHIPTON Z K,COWIE P A.Damage zone and slip-surface evolution over μm to km scales in high-porosity Navajo sandstone, Utah [J].Journal of Structural Geology, 2001,23(12):1825-1844.
- [77] DE PAOLA N, COLLETTINI C, FAULKNER D R, et al. Fault zone architecture and deformation processes within evaporitic rocks in the upper crust [J].Tectonics, 2008,27(4):341-361.
- [78] 付晓飞,肖建华,孟令东.断裂在纯净砂岩中的变形机制及断裂带内部结构[J].吉林大学学报(地球科学版),2014, 44(1):25-37.
- FU Xiaofei,XIAO Jianhua,MENG Lingdong.Fault deformation mechanisms and internal structure characteristics of fault zone in pure sandstone [J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014,44(1):25-37.
- [79] 贾茹,付晓飞,孟令东,等.断裂及其伴生微构造对不同类型储层的改造机理[J].石油学报,2017,38(3):286-296.
- JIA Ru,FU Xiaofei,MENG Lingdong, et al.Transformation mechanism of fault and its associated microstructures for different kinds of reservoirs [J].Acta Petrolei Sinica,2017,38(3):286-296.
- [80] CHILDS C, MANZOCCHI T, WALSH J J, et al. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations [J].Journal of Structural Geology, 2009,31(2):117-127.
- [81] SCHÖPFER M P J, CHILDS C, WALSH J J, et al. Evolution of the internal structure of fault zones in three-dimensional numerical models of normal faults [J].Tectonophysics, 2016,666:158-163.
- [82] 宋佳佳,孙建孟,王敏,等.断层内部结构研究进展[J].地球物理学进展,2018,33(5):1956-1966.
- SONG Jiajia,SUN Jianmeng,WANG Min, et al.Research progress in the internal structure of the fault [J].Progress in Geophysics, 2018,33(5):1956-1966.
- [83] 王燮培.石油勘探构造分析[M].武汉:中国地质大学出版社,1990.
- WANG Xiepei.Tectonic analysis of petroleum exploration [M].Wuhan:China University of Geosciences Press,1990.
- [84] 张子隆,杨威,王千军,等.走滑断裂不同结构单元输导、运聚特性及其差异控藏模式:以准噶尔盆地乌尔禾沥青矿区为例[J].断块油气田,2023,30(3):424-433.
- ZHANG Zilong,YANG Wei,WANG Qianjun, et al.Hydrocarbon

- transport and migration characteristics of different structural units of strike-slip fault system and their differential control on hydrocarbon accumulation patterns; a case study of bituminous vein area in Wuerhe, Junggar Basin [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(3): 424-433.
- [85] ZHANG Jingkun, CAO Jian, WANG Yan, et al. Origin of giant vein-type bitumen deposits in the northwestern Junggar Basin, NW China; implications for fault-controlled hydrocarbon accumulation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 179: 287-299.
- [86] CHOI J H, EDWARDS P, KO K, et al. Definition and classification of fault damage zones: a review and a new methodological approach [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 152: 70-87.
- [87] 崔殿. 准噶尔盆地克夏断裂带成岩作用对断层输导性能的影响 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
CUI Dian. The affection of diagenesis on fault sealing of Kexia fracture belt in Junggar Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [88] 靳加林, 邓清海, 张继标, 等. 走滑断裂派生裂缝发育规律影响因素探讨 [J]. *地震研究*, 2022, 45(3): 452-459.
JIN Jialin, DENG Qinghai, ZHANG Jibiao, et al. Discussion on influencing factors of the development law of strike-slip-fault derived fractures [J]. *Journal of Seismological Research*, 2022, 45(3): 452-459.
- [89] 周新桂, 孙宝珊, 谭成轩, 等. 现今地应力与断层封闭效应 [J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(5): 127-131.
ZHOU Xingui, SUN Baoshan, TAN Chengxuan, et al. State of current geo stress and effect of fault sealing [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(5): 127-131.
- [90] 赵密福. 断层封闭性研究现状 [J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(3): 333-336.
ZHAO Mifu. A review on fault seal study [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(3): 333-336.
- [91] 付广, 吕延防, 马福建, 等. 断层垂向封闭性综合评价方法及其应用 [J]. *新疆石油地质*, 2003, 24(5): 451-454.
FU Guang, LÜ Yanfang, MA Fujian, et al. Comprehensive evaluation method for vertical sealing of fault and its application [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2003, 24(5): 451-454.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] 任健, 韩芮, 黄振, 等. 渤海海域多期伸展型交汇断层封闭性评价方法 [J]. *高校地质学报*, 2022, 28(4): 623-633.
REN Jian, HAN Rui, HUANG Zhen, et al. Evaluation of sealing properties of multi-stage extensional abutting faults in Bohai Sea [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(4): 623-633.
- [95] 任森林, 刘琳, 徐雷. 断层封闭性研究方法 [J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(5): 101-105.
REN Senlin, LIU Lin, XU Lei. Research methods of fault sealing [J]. *Lithologic reservoirs*, 2011, 23(5): 101-105.
- [96] 孙国强, 张功成, 王琪, 等. 利用模糊综合评价法进行断层封闭性预测 [J]. *断块油气田*, 2011, 18(3): 281-284.
SUN Guoqiang, ZHANG Gongcheng, WANG Qi, et al. Prediction of fault sealing using fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(3): 281-284.
- [97] 王则, 商琳, 龚荣荣, 等. 基于地质力学方法对不同结构断层破碎带封闭性评价: 以渤海湾盆地济阳拗陷车镇凹陷 M 区为例 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(6): 893-900.
WANG Ze, SHANG Lin, GONG Lirong, et al. Sealing performance evaluation of fault fracture zone of different structures based on geomechanical methods; a case study in M area, Chechen Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(6): 893-900.
- [98] 张立宽, 罗晓容, 廖前进, 等. 断层连通概率法定量评价断层的启闭性 [J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(2): 181-190.
ZHANG Likuan, LUO Xiaorong, LIAO Qianjin, et al. Quantitative evaluation of fault sealing property with fault connectivity probabilistic method [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(2): 181-190.
- [99] 王新新, 戴俊生, 李旭航, 等. 多种方法评价断层封闭性: 以金湖凹陷石港断裂带为例 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2013, 33(3): 69-75.
WANG Xinxin, DAI Junsheng, LI Xuhang, et al. Assessment of fault sealing ability; an example from the Shigang fault zone in the Jinhu Depression, northern Jiangsu [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2013, 33(3): 69-75.
- [100] LINDSAY N G, MURPHY F C, WALSH J J, et al. Outcrop studies of shale smears on fault surface [J]. *Special Publication International Association of Sedimentologist*, 1993, 15: 113-123.
- [101] KNOTT S D. Fault seal analysis in the North Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(5): 778-792.
- [102] FULLJAMES J R, ZIJERVELD L J J, FRANSSSEN R C M W. Fault seal processes; systematic analysis of fault seals over geological and production time scales [J]. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 1997, 7: 51-59.
- [103] LEHNER F K, PILAAR W F. On a mechanism of clay smear emplacement in synsedimentary normal faults [C]//AAPG Annual Convention Dallas, Texas: AAPG, 1991.
- [104] KNIPE R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(2): 187-195.
- [105] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(6): 897-917.
- [106] 王朋岩. 利用灰色关联分析法评判断层的封闭性 [J]. *大庆石油学院学报*, 2003, 27(1): 4-6.
WANG Pengyan. Evaluation method of grey relationship analysis of fault sealing [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2003, 27(1): 4-6.
- [107] 侯读杰, 朱俊章, 唐友军, 等. 应用地球化学方法评价断层的封闭性 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2005, 30(1):

- 97-101.
HOU Dujie, ZHU Junzhang, TANG Youjun, et al. Evaluating fault sealing using geochemical techniques [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2005, 30(1): 97-101.
- [108] 刘玉梅, 于兴河, 李胜利. 模糊法综合评价垦东断裂带断层封闭性 [J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2009, 11(2): 11-13.
LIU Yumei, YU Xinghe, LI Shengli. On the comprehensive evaluation of fault sealing of Ken East fracture zone using fuzzy method [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2009, 11(2): 11-13.
- [109] 王珂, 戴俊生. 地应力与断层封闭性之间的定量关系 [J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 74-81.
WANG Ke, DAI Junsheng. A quantitative relationship between the crustal stress and fault sealing ability [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 74-81.
- [110] 马强, 张殿伟, 王贵文, 等. 断层流体锶、碳、氧同位素示踪评价断层垂向封闭性; 以焦石坝背斜带为例 [J]. *沉积学报*, 2017, 35(6): 1205-1216.
MA Qiang, ZHANG Dianwei, WANG Guiwen, et al. Evaluation of vertical sealing of faults by strontium, carbon and oxygen isotope tracing of fault fluid; a case from the anticlinal belt in Jiaoshiba area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(6): 1205-1216.
- [111] 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.
- [112] 许倩. 准中莫—永地区走滑断裂带内部结构及封闭性评价 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
XU Qian. Structural characteristics and sealing assessment of the strike-slip fault zones in Mo—Yong area, central Junggar Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2022.
- [113] 孔永吉. 塔里木盆地顺北地区走滑断裂结构特征及封闭性评价 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
KONG Yongji. Structural characteristics and sealing evaluation of strike-slip faults in the Shunbei area, Tarim Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [114] 李勇, 罗力元, 王剑, 等. 断层封闭性演化地球化学评价方法及其控藏作用; 以准噶尔盆地西北缘红车断裂带为例 [J]. *天然气工业*, 2023, 43(8): 12-25.
LI Yong, LUO Liyuan, WANG Jian, et al. A geochemical evaluation method of fault sealing evolution and its controlling effect on hydrocarbon accumulation; a case study of the Hongche fault zone in the northwest margin of the Junggar Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(8): 12-25.
- [115] 邓铭哲, 蔡芙蓉, 陆建林, 等. 走滑断裂演化程度的表征参数研究 [J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 1007-1015.
DENG Mingzhe, CAI Pengrui, LU Jianlin, et al. Characterization parameters of the evolution degree of strike-slip faults [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(5): 1007-1015.
- [116] 王力, 陈世加, 丁玉盛, 等. 应用地球化学方法评价断层封闭性; 以苏北盆地金湖凹陷坝田地区为例 [J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(2): 209-214.
WANG Li, CHEN Shiga, DING Yusheng, et al. Using geochemical methods to evaluate fault sealing; a case study from Batian area in Jinhu Sag, Subei Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(2): 209-214.
- [117] 吕延防, 王帅. 断层封闭性定量评价 [J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(5): 35-41.
LÜ Yanfang, WANG Shuai. Quantitative evaluation of fault seal [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(5): 35-41.
- [118] 闵伟. 应用模糊综合评价方法评价断层封闭性; 以胜坨油田坨28断块为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2005, 12(3): 39-41.
MIN Wei. Fuzzy comprehensive evaluation method for evaluating sealing property of the faults-taking Tuo 28 fault block in Shengtuo oilfield as example [J]. *Oil & Gas Recovery Technology*, 2005, 12(3): 39-41.
- [119] 李朋, 倪金龙, 杨淞月, 等. 临南洼陷临邑断层封闭性的模糊综合评价 [J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(1): 42-46.
LI Peng, NI Jinlong, YANG Songyue, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of fault sealing in Linnan Depression [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(1): 42-46.
- [120] 王生奥, 韩复兴, 孙章庆, 等. 地应力测量及其对油气运移和断层封堵性影响的发展现状与趋势 [J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(2): 675-688.
WANG Sheng'ao, HAN Fuxing, SUN Zhangqing, et al. Present situation and the development trend of in-situ stress measurement and its effect on hydrocarbon migration and fault block [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(2): 675-688.
- [121] 孙莹. 断层封闭性的地球化学评价方法 [J]. *内蒙古石油化工*, 2013, 39(9): 53-54.
SUN Ying. Geochemical evaluation method of fault sealing [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2013, 39(9): 53-54.
- [122] 王志伟. 新北油田右旋走滑应力场内断层封堵性及其对成藏的控制作用 [J]. *地质科技情报*, 2019, 38(4): 145-152.
WANG Zhiwei. Analysis of fault sealing in the right hand strike-slip stress field of the Xinbei Oilfield and its controlling effect on the reservoir [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(4): 145-152.
- [123] 付广, 袁大伟. 断层垂向封闭性演化的定量研究 [J]. *断块油气田*, 2009, 16(1): 1-5.
FU Guang, YUAN Dawei. Quantitative research for evolution of vertical seal of fault [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2009, 16(1): 1-5.