

文章编号: 0253-9985(2007)02-0181-10

断层连通概率法定量评价断层的启闭性

张立宽¹, 罗晓容¹, 廖前进², 袁淑琴¹, 苏俊青², 肖敦清², 王兆明¹, 于长华²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

(2. 中国石油天然气股份有限公司大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280)

摘要:以大港油田埕北断阶带控烃断层上、下盘储集层内油气存在与否作为判别断层启闭性的指标, 综合考虑多种因素的影响, 提出了一种定量评价断层启闭特征的新方法——断层连通概率法。此法将影响断层启闭性的主要因素归结为泥岩流体压力、断面正应力和泥岩涂抹 3 个代表性参数, 依据其影响断层启闭性的机理构建出一个无量纲的断层启闭系数。在此基础上, 选取横切断层的典型油气藏剖面, 计算断面不同位置处的启闭系数, 根据其上、下两盘储层内是否含油来确定其“开启”或“封闭”性质。通过概率统计分析所建立的断层启闭系数与断层连通概率间的相关关系表明, 当断层启闭系数小于 1.0 时, 断层连通概率为 0; 启闭系数为 1.0~3.5 时, 二者关系可表达为一个二次多项式; 当启闭系数大于 3.5 时, 断层连通概率为 100%。由此在拓扑展开的断层面上勾绘出连通概率等值线, 展现出断层面不同位置处的启闭性特征。

关键词:断层启闭性; 定量; 启闭系数; 连通概率; 埕北断阶带; 大港油田

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Quantitative evaluation of fault sealing property with fault connectivity probabilistic method

Zhang Likuan¹, Luo Xiaorong¹, Liao Qianjin², Yuan Shuqin¹, Su Junqing²,Xiao Dunqing², Wang Zhaoming¹, Yu Changhua²

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

(2. Petroleum Exploration and Development Research Institute of Dagang Oilfield Company Ltd., PetroChina, Tianjin 300280)

Abstract A new quantitative method for evaluating fault sealing properties based on fault connectivity probability is proposed by taking the occurrence of oil and gas in footwall and hangingwall reservoirs of hydrocarbon controlling faults in Chengbei fault step zone of Dagang oilfield as the index of identifying the sealing properties of faults and by taking into consideration many factors that have influence over the properties. Three parameters, i.e. fluid pressure of mudstone, normal stress on fault plane, and clay smear, are regarded as the major factors that influence the sealing properties of faults, and a dimensionless sealing coefficient is defined according to the mechanisms of their influence over the sealing properties of faults. Then typical reservoir profiles crossing faults are selected to calculate sealing coefficients on different parts of the profile and the sealing properties of faults are determined according to the occurrence of oil in the footwall and hangingwall. Furthermore, statistical analysis of the relationship between the sealing coefficients and fault connectivity probability shows that when the coefficient is less than 1.0, the connectivity probability is naught; when the coefficient ranges from 1.0 to 3.5, the relationship between them can be expressed by a quadratic equation; and when the coefficient is more than 3.5, the connectivity probability equals 100%. The connectivity probability contour on a strike projection reveals the sealing properties of different parts on the fault plane.

收稿日期: 2007-02-08

第一作者简介: 张立宽 (1979-), 男, 博士生, 油气成藏动力学

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2006CB202305)

Key words fault sealing property; quantitative sealing coefficient; connectivity probability; Chengbei step-fault zone; Dagang oilfield

油气勘探实践证实, 断层的启闭性往往是控制油气运移和聚集的关键因素^[1]。Smith^[2]基于 Hubbert^[3]的毛细管封闭模型最早系统论述了断层封闭的判别模式; Engelder^[4], Weber^[5], Knipe^[6, 7], Gibson^[8], Antonellini^[9], Berg^[10]等通过野外、镜下和实验观察研究了断层带的物质组成、变形特征、几何特征及断层带内物质的物理和化学变化对断层封闭能力的影响; Allen^[11]提出了通过几何制图识别断面两侧砂、泥岩的配置关系来评价断层侧向封闭性的简单方法。人们目前基本达成共识, 无论断层性质如何, 断层在活动期间多表现为开启状态, 可作为油气垂向和侧向运移的通道^[12, 13]; 而静止期间则往往表现为封闭状态, 对油气起遮挡作用^[14~16]。因而, 用断层“启闭性”来表述断层活动过程中不同部位对流体连通性的贡献应该更为恰当。

但对于断层启闭性的定量表征, 目前仍处于探索阶段。Bouvier^[15], Lindsay^[17], Yielding^[18]等分别利用 CSP (clay smear potential), SSF (shale smear factor), SGR (shale gouge ratio) 来估计断层带内泥岩涂抹的可能性; 并结合三维地震技术, 识别断层切面 (fault plane) 上的砂-泥岩配置、砂-砂配置具有泥岩涂抹以及砂-砂配置但缺少泥岩涂抹, 来分析断层的封闭性。他们的出色工作推进了断层封闭性研究由定性向定量化发展的进程。此外, 国内学者从断层的封闭机制出发, 也提出了如逻辑信息法^[19]、非线性映射法^[20]、断面正压应力法^[21]等多种断层封闭性的评价方法。

随着对断层启闭性研究的不断深入, 在方法和手段上已从单学科和单一手段向多学科、多角度发展^[22]。但在以往的研究中, 无论断层的发育规模和特征如何, 均给予封闭或不封闭的绝对性判断^[23]。事实上, 断层封闭性的影响因素较多, 同一条断层三维空间上的各种参数不断的变化, 导致其在走向上不同位置、剖面上不同深度的开启、封闭性及封闭能力有较大的差异^[24]。因而, 断层的启闭性不能通过只考虑某一因素的简单方法进行描述。换言之, 如何考虑多种因素对断层封闭性产生的影响是该项研究的难题, 需要探寻一种更为合适的表征断层启闭性的标志。

鉴于此, 笔者在前人对断层封闭性研究的基础之上, 以断层上、下盘的储集层内油气聚集与否作为判别断层启闭性的指标, 综合考虑多种因素对断层启闭性的影响, 借助概率统计方法, 提出利用断层连通概率来定量评价断层在三维空间内不同位置启闭性的方法, 并以大港油田埕北断阶带为实例, 对主要控烃断层的启闭性进行了定量研究。

1 断层启闭性的表征

断层在油气的运移过程中是起通道作用还是起封堵作用受多种地质因素的控制, 如断层的走向、埋深、断距、倾角, 错断地层剖面的岩性、力学性质, 断层两侧地层的对接情况, 断层带填充物的物质组成, 构造应力的大小与方向, 流体性质和温压系统等等^[22, 25, 26]。从地质研究可操作性的角度, 需要在这众多的参数中筛选合适的参数来标志地层的启闭特征^[15, 17]。根据前人对断层封闭性的研究, 可将影响断层启闭性的主要因素归纳为以下几个方面。

1.1 泥岩地层流体压力

随着地层内异常流体压力的增加, 地层的岩石力学强度降低^[27], 而且泥岩异常压力释放的速度往往远远小于断层的启闭过程^[28], 往往在泥岩压力明显降低之前, 断层就已重新闭合^[29]。因此, 断层在活动过程中开启的可能性与断裂两侧泥岩内的流体压力应该具有正相关关系。在断层活动与流体压力的耦合过程中, 总是存在着基本的动力学演变历程: 流体压力积累—有效应力降低—岩石强度降低—破裂发生—流体运移—流体压力降低。但由于断层开启的时间相对很短, 其开启时能够释放的压力只是砂岩内的异常压力, 而在泥岩中的压力基本保持不变^[28, 30]。这样在主要油气成藏期距今时间不长的情况下, 可以用现今泥岩内的压力来预测断层的开启状态。

对于持续性沉降的盆地, 泥岩内的地层流体压力 P 可以通过压实曲线用平衡深度法^[31]获得:

$$P = (z - z_e) \rho_b g + \rho_g z \quad (1)$$

式中: z 和 z_e 分别为观察点和平衡深度点的深度; ρ 和 ρ_b 分别为 z 与 z_e 之间孔隙流体和地层的平均密度; g 为重力加速度。

当盆地内曾发生过的抬升剥蚀作用没有得到后期沉积作用的补偿时, 泥岩中压力的估算需要通过盆地模拟方法恢复^[32-33]。

1.2 断面正应力

断面的紧闭程度是影响断层垂向开启与否的关键因素之一。如果断面紧闭, 断层垂向封闭性好, 油气难以沿断面作垂向运移; 否则, 断层开启, 断层可作为油气运移的通道^[34]。断面的紧闭程度通常取决于断面所受正压力的大小, 较大的正压力使得断面两侧地层在断层活动过程中趋于变形, 减小了断层面的孔隙, 甚至导致断层裂缝闭合^[1]。

断面所承受的正应力可以由断层面在地下应力场中的位置来计算 (图 1)。对于任一应力场, 总是可以找到一个剪切应力为 0 的正应力场。在一般盆地条件下, 3 个主应力轴中有一个为垂直方向。断面正应力的大小主要取决于断面的倾角、埋深、走向, 构造应力的大小和方向, 以及地下岩石和流体的密度等因素。对于犁状正断层, 断面的倾角随深度增加而变小, 上覆断层的重力在断层面的分量也变大, 有利于断层封闭; 反之, 则有利于断层开启。

对于任一应力场, 断面正应力的计算公式^[27]为

$$\delta = \sigma_1 \cos^2 \gamma + \sigma_2 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \beta \quad (2)$$

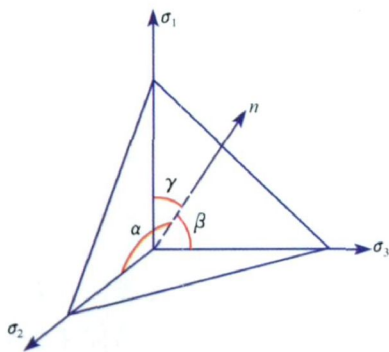


图 1 断面法线与主应力轴的夹角示意图

Fig. 1 Sketch map showing the included angle between normal line of fault plane and principal axis of stress

式中: δ 为断面正应力, MPa; α , β 分别为断面法线方向与 3 个主应力 (σ_1 , σ_2 , σ_3) 方向的夹角。

设式 (2) 中 σ_1 为垂直应力:

$$\sigma_v = \rho_b g z \quad (3)$$

式中: σ_b 为上覆地层的平均密度, g/cm^3 ; σ_v 为主垂直应力, MPa

考虑构造应力对断层启闭性的作用, 式 (2) 中 σ_2 和 σ_3 分别为

$$\sigma_2 = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_v \quad (4)$$

$$\sigma_3 = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_v + \sigma_T \quad (5)$$

式中: ν 为地层的岩石泊松比; σ_T 为构造应力。

1.3 断层带泥岩涂抹因子

泥岩涂抹被认为是一种十分有效的断层封闭方式^[5, 8, 15, 17, 18, 35, 36]。断裂带内的泥质含量越高, 其孔渗性越差, 排替压力越高, 发生油气运移的可能性越小。Bouvier^[15], Lindsay^[17], Yielding^[18] 等根据断层内泥岩分布的规律分别提出了不同的公式来估算断层泥的含量。其中, Yielding 等定义的断层涂抹因子 (SGR, 断层位移段内泥岩厚度之和与断距之比) 更适用于非均质的碎屑岩地层层序。SGR 的计算公式为^[18]

$$SGR = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{L} \times 100\% \quad (6)$$

式中: SGR 为泥岩涂抹因子, %; L 为断层的断距, m; h_i 为被断层错断开的第 i 层泥岩层的厚度, m; n 为被断层错断的泥岩层层数。由上式可知, SGR 既考虑了断层错断地层的岩性, 又考虑了断层的断距, 是反映断裂启闭能力的较为理想的评价参数。

1.4 其他因素

前面我们力图将影响断层在活动过程中启闭性的地质因素归纳于 3 个代表性参数, 但事实上影响断层启闭性的因素太多, 仅仅这 3 个参数不可能完全代表这些因素。然而, 这些地质因素或多或少都与这 3 个参数有关。

1) 断层带的成岩作用。这实际上在断层活动中加以考虑。断层在平静期之所以可以认为是封闭的, 主要是因为断层开启过程中形成的裂

隙、裂缝在一个相对较短的时间内就因化学胶结作用而充填,形成良好的封闭条件^[37]。

2) 断层两盘的砂岩层对接。Allen 等^[24]曾讨论过断层两盘砂、泥岩层的对接问题,这只在二维空间上才有意义(仅对应于两盘地层呈平面状,且倾向相同或相反);大多数地质条件下,地层两盘砂、泥岩互层层系和砂岩层的对接表现为孤立状。

3) 断层的活动性。断层的活动性对其启闭性影响很大,但两者间并非线性关系。在泥岩涂抹因子 SGR 的计算中将其归结为断层两盘相对错开的距离,但这也只是一种判断。实际应用过程中应该结合油气成藏主要期次的划分和油气的分布进行分析。

4) 地层的成岩作用。随着埋藏深度的增加,沉积地层逐渐成岩,其岩石力学强度也随之变化。一般情况下,岩石的强度、脆性均增加。但另一方面,随着地层埋藏深度的增加,不断增加的温度、压力将使得岩石的塑性增强。所以,也应该根据具体的地质条件加以分析。

2 断层连通概率模型的建立

由于断层启闭性的影响因素众多,断层面的形态及因断层两盘相互滑动而造成的断层面的孔隙分布也千变万化。因而笔者认为,单用“封闭”和“开启”这样截然不同的状态来描述断层的启闭特征是不符合实际的。我们这里提出一个断层连通概率的概念,试图建立一个能够综合上述 3 个重要参数的断层启闭系数,利用能够表明断层垂向上连通性的标志,在断层面上逐点分析,统计出不同断层启闭系数值条件下的断层连通概率。

2.1 断层启闭系数

通过上述对断层启闭性表征参数的分析,我们引入一个无量纲数——断层启闭系数——来表征断层面的启闭能力:

$$C = \frac{P}{\delta \cdot SGR} \quad (7)$$

式中: C 为断层启闭系数,无量纲;其他参数的含义及单位同上。

式(7)中断层启闭系数 C 与断裂两侧泥岩层内的流体压力成正比,与断面所承受的正应力成反比,与断层泥岩涂抹因子成反比。一般来说, C

值越大,断层开启的可能性越高。

断层启闭系数只能表明断层上某一点在断层活动期间开启而形成流体连通条件的趋势。相对于研究地区的地质情况,这种趋势有多大,又是如何变化的,需要通过实际资料的统计分析,建立起断层启闭系数与实际流体连通性间的关系。由于将各种因素的影响归纳为 3 个定量评价参数,因而求取的启闭系数值并不能完整描述断层的流体连通性,因此须采用地质统计学的方法来建立两者间的关系。

2.2 断层启闭系数与断层连通性的关系模型

断裂造成地层横向连续性的变差,但也造成纵向上的水动力连通。判断这种连通性的指标应该是流体本身及流体流动过程中所遗留的痕迹。前人利用地层水化学、水同位素、包裹体等流体指标所进行的尝试都具有很大的局限性。在本文的工作中,笔者根据油气勘探程度相对较高的大港油田埕北断阶带的实际油气地质情况,采用钻井中测试的油显示作为判别断层启闭性的标志。

油气的运聚成藏是发生在地质历史时期的一个复杂的动态过程,现今的含油气规律在很大程度上取决于最晚或者最主要聚集期的油气成藏作用。而埕北断阶带在明化镇组下段沉积末期既是研究区最为重要的成藏期,也是最晚的成藏期。因而从统计学上我们认为,可以把钻井测试发现的油气显示作为判断研究区主要成藏期断层启闭性的标志。

为使得对断层启闭性的描述有意义,研究中我们选择两盘钻井相对较多的断层段研究断层连通性。将断层面划分为尽可能小的网格区域(图 2a),称为输导元,通常每个输导元内至少包含一套砂岩输导层。若垂直于断层面切一个过 A, B, C 3 个网格节点的剖面,上、下盘储层内的含油气性必定存在上盘含油气而下盘不含油气,上盘含油气下盘也含油气,上盘不含油气但下盘含油气和上、下盘均不含油气 4 种情况。如图 2b 所示,当上盘含油气而下盘不含油气或油气显示时,表明油气可能未通过点 B 进入下盘储集层,因而可以认为断层在节点 B 处是封闭的;如果下盘含有油气或油气显示,无论上盘是否含油气,我们均可以认为断层在节点 B 处是开启的(图 2c d);而对于上、下盘都不含油气的情况(图 2e),则可能存

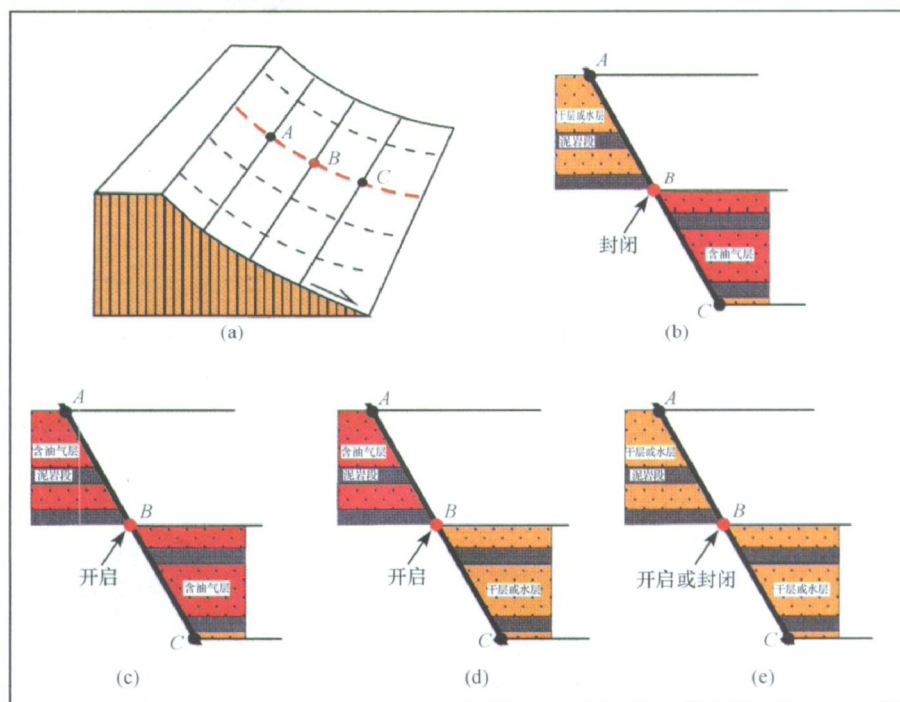


图 2 断层启闭性的判别方法示意图

Fig. 2 Sketch map showing the methods for determining fault sealing properties

在开启或封闭两种可能, 因而不作为我们统计的样本。

由于流体在断层面上的流动至少是二维的, 上、下输导元间的油气运移不是唯一的, 因而对于其间连通性的判断只能以概率形式表示。

3 研究实例

埕北断阶带位于黄骅拗陷中区歧口凹陷向埕宁隆起过渡的斜坡上(图 3), 北起歧东构造带, 南至埕宁隆起北缘, 西到友谊油田, 东接海 4 井油田, 勘探面积约 550 km²。受盆地基底背景及新生代地层内主断层的控制, 它具有缓坡断阶结构特征。钻井揭示, 中、新生代陆相碎屑岩地层自下而上分别为中生界中-下三叠统和中-下侏罗统、古近系沙河街组和东营组、新近系明化镇组和馆陶组及第四系平原组。其中, 中生界、古近系和新近系之间均呈不整合接触^[38]。

油源对比表明^[39], 埕北断阶带以歧口凹陷沙(河街组)三段和沙一段暗色泥质岩为主力供烃源岩; 中生界中-下侏罗统河流相砂体、沙二与沙三段近岸水下扇相和滩坝相砂体、东(营组)三段和东一段发育的三角洲前缘和前三角洲砂体以及新近系河流相砂体均为有利的储集层^[38]; 沙一段中

部、东二段和明(化镇组)下段厚层泥岩发育, 是主要的区域性盖层^[40]。

该区自 20 世纪 60 年代勘探至今, 累计完成二维地震采集约 2 000 km, 构造主体被三维地震满覆盖, 完钻探井 140 余口。经过多年的勘探, 已探明羊二庄、友谊、刘官庄、张东、赵东和海 4 井油田以及歧东、张北、张东东、埕海和关家堡等多个含油气构造(图 3), 具有较高的勘探程度, 目前的资料积累和研究基础比较适合进行断层启闭性的研究工作。

3.1 埕北断阶带断层的特征

受燕山期和喜马拉雅期持续不断的张扭性区域应力场控制, 研究区断裂十分发育, 自北向南发育歧东、张东-海 4 井、赵北、羊二庄和羊二庄南等多条重要的控烃断层(图 3)。地震剖面显示它们均属于古近纪发育、新近纪活动变弱的生长断层, 具有铲状和座椅状两种形态。断层走向以东北或近东西向为主, 总体上近于平行, 并向北部凹陷同倾下掉。这些断层不仅控制了研究区的构造和沉积特征, 也控制着油气的运聚规律^[41]。目前已经发现的油气分布规律明显受断层控制(图 3)。

通过对研究区内主要断层生长指数的统计发现(图 4), 主断层在整个第三纪均不同程度地发

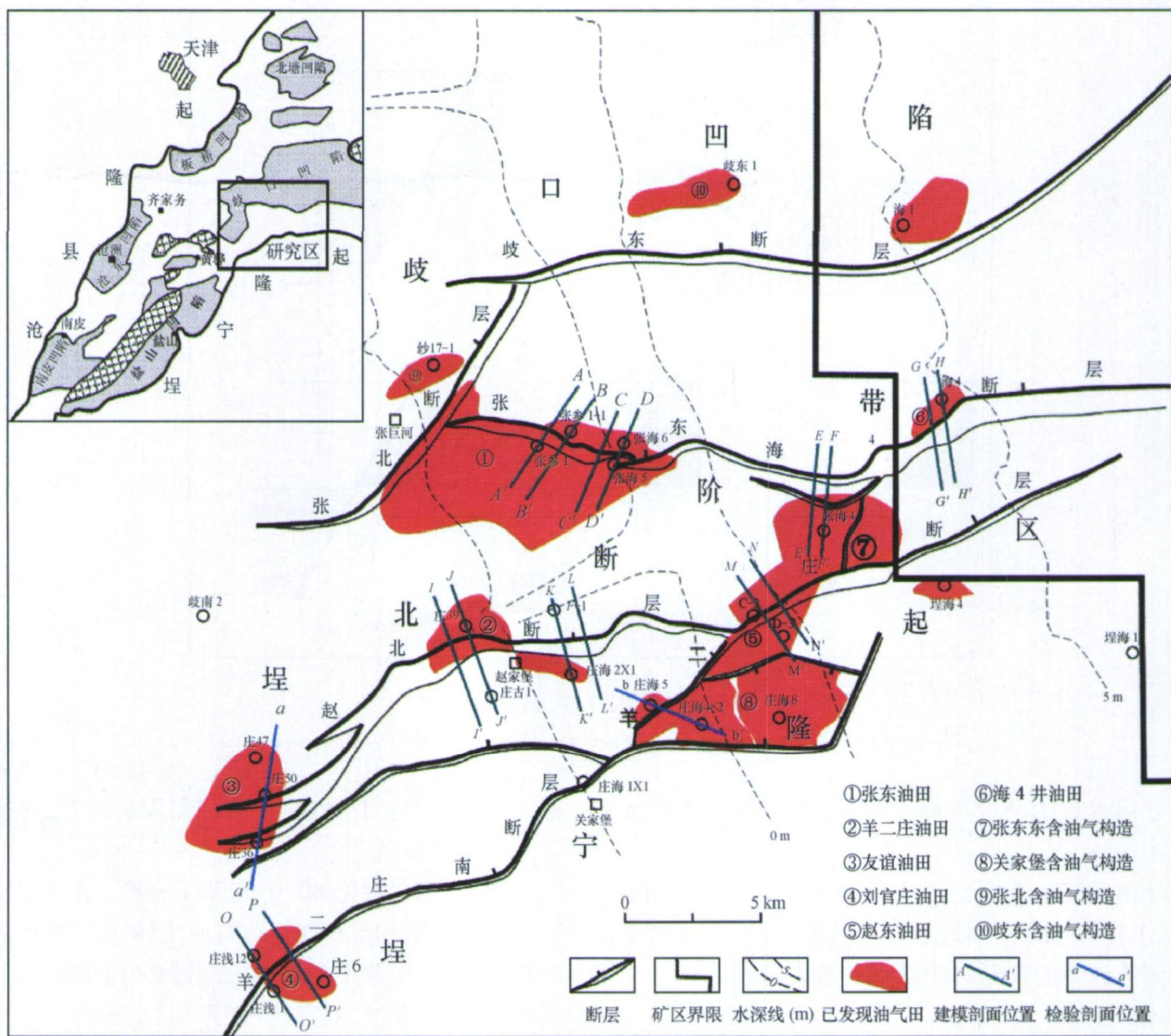


图 3 埕北断阶带位置与构造特征

Fig. 3 Map showing the location and structural characteristics of Chengbei step-fault zone

生活动, 其中有 3 期活动较为强烈, 分别对应于沙河街期、东营期和明化镇组下段沉积末期。烃源岩排烃史模拟研究表明^[40, 42], 埕北断阶带的沙三段主力烃源岩有两个主要的排烃期: 第一期 of 东营组沉积末期 (大约距今 26 Ma), 但该期排烃量较少; 第二期 of 明下段沉积末期 (距今 7 Ma), 是大规模排烃期, 沙一段烃源岩在明下段沉积末期才进入主排烃高峰期。由此可知, 沙河街期的断层活动发生在油气大规模排烃之前, 对本区油气的运移和聚集基本无意义; 东营组沉积末期断层活动时, 尽管沙三段源岩已开始排烃, 但由于排烃规模小, 断层活动对油气的运聚作用有限; 只有明下段沉积末期的断层活动与烃源岩主要排烃高峰期的配置关系好, 故该期是本区最有效的油气运聚期。

3.2 连通概率模型的建立

研究中, 我们选取了埕北断阶带过张东-海 4 井断层、赵北断层、羊二庄断层、羊二庄南断层等主断层现今已发现油气的 8 个典型油气藏进行了解剖。垂直断层走向系统选择 16 条过井地震剖面 (位置见图 3), 求取断面各输导元节点处的埋深、断距、断面倾角、断层走向与最大主应力夹角等参数, 然后综合钻井和地应力测试资料, 计算泥岩涂抹因子、泥岩流体压力和断面正应力。最大压应力大小依据许忠淮等根据水力压裂法对北大港及邻区 50 多口井的计算结果 (图 5)^[43], 最大主压应力方向为 NE70°^[44]。依据式 (7) 求取各节点的启闭系数值, 并按照前述的判别方法定性判断相应的启闭特征。

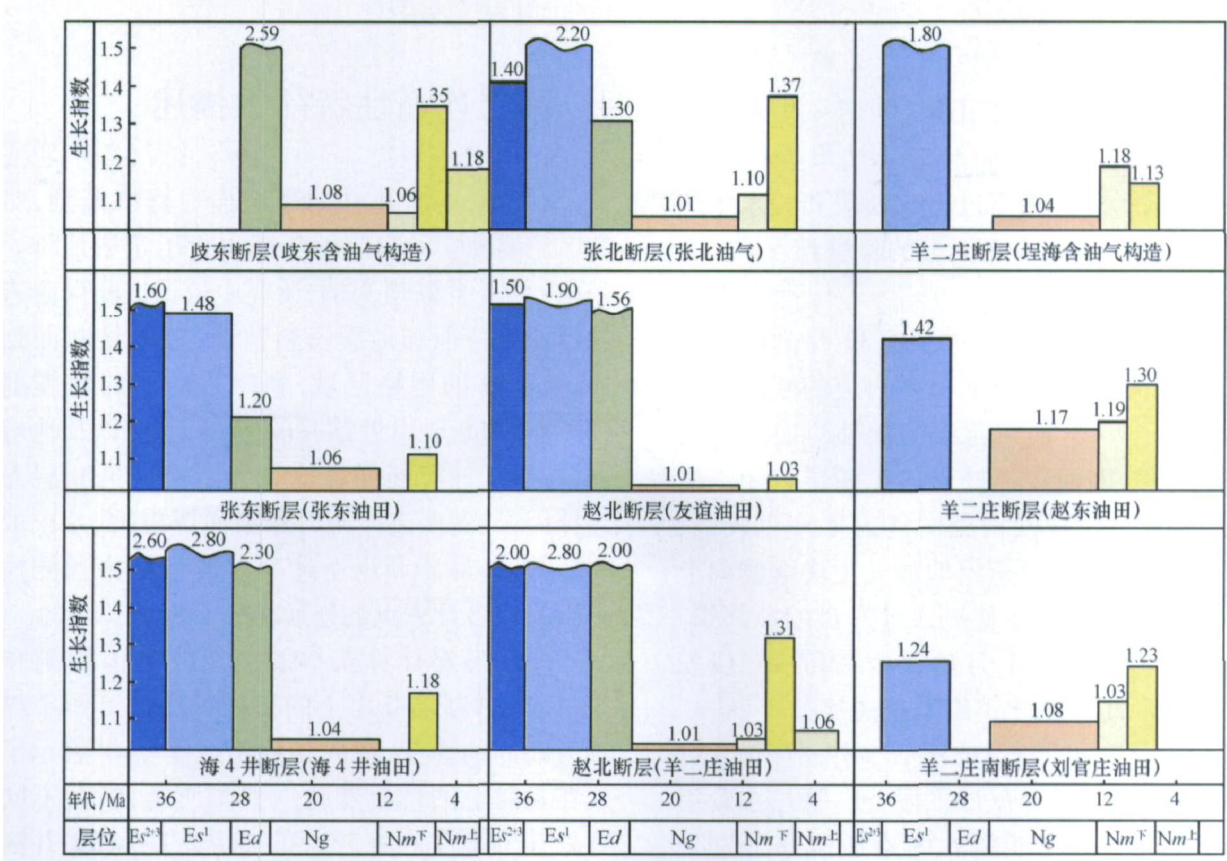


图 4 埕北断阶带主断层生长指数统计

Fig. 4 Statistics showing the growth index of the major faults in Chengbei step-fault zone

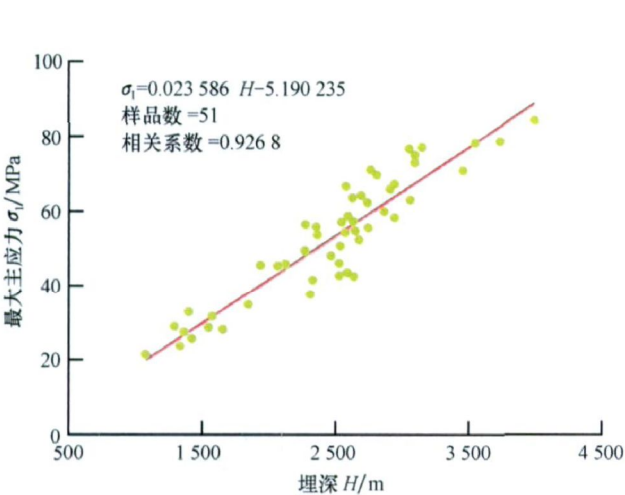


图 5 最大主应力与深度的关系^[43]

Fig. 5 Relation between maximal principal stress and depth

为在所选择的过井地震剖面上对断层流体连通性进行统计, 将启闭系数值划分为 1.0~1.5 1.5~2.0 2.0~2.5 2.5~3.0 3.0~3.5 3.5~4.0 4.0~4.5 4.5~5.0 >5.0 等多个区间, 统计各区间对应的能够确定油气在纵向上流过断层的样本在总样本中所占的百分比, 即可获得断层启闭系数与对应的断层连通概率间的相关关系 (图

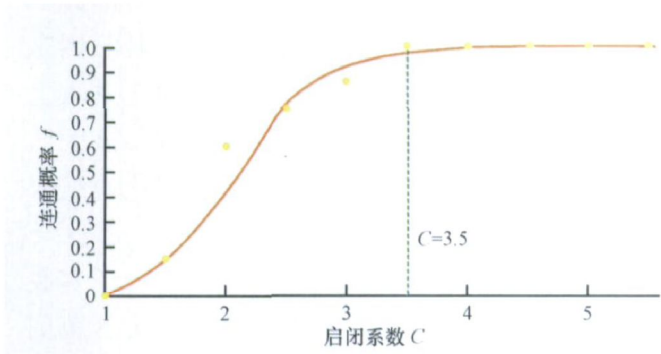


图 6 研究区断层连通概率与断层启闭系数的关系

Fig. 6 Relation between fault connectivity probability and fault sealing coefficient in the study area

6)。由图 6 可见, 两者的相关关系明显: 当启闭系数在 1.0~3.5 时, 二者关系可表达为一个二次多项式; 而当启闭系数大于 3.5 时, 连通概率恒等于 1, 表明启闭系数大于 3.5 时断层都曾开启。

图 6 中所示的统计结果可利用连通概率数学模型表示为

$$f = \begin{cases} 0.1129C^2 + 0.9190C - 0.8565 & (1.0 < C < 3.5) \\ 1 & (C \geq 3.5) \end{cases} \quad (8)$$

式中: f 为断层连通概率; C 为启闭系数。

3.3 模型的检验

为检验模型结果是否正确,利用一些未参与统计分析的过井地震剖面对统计结果进行了检验。图 7 显示了友谊油田过赵北断层和关家堡构造过羊二庄断层的两条剖面上的检验情况(剖面位置见图 3)。

如图 7a 所示,过庄 36 井-庄 32 井剖面在上升盘东营组以下各个输导元节点对应的断面处连通概率均大于 0.40 而东营组断面处对应的连通概率仅为 0.08 因而在该处形成了断层封闭。尽管其上的馆陶组对应断面处的连通概率也较高,但因来自于下降盘沙河街组的油气无法继续向上运移,只能通过断面的运移进入上升盘的沙河组。目前,该地区只在断层上升盘的沙一和沙三段发现了油气,东营组-明化镇组未获油气。

再如在过羊二庄断层的庄海 5 井-庄海 4X1 井剖面上(图 7b),下降盘沙三段、沙一段、东营组输导层单元节点对应断面处的连通概率分别为 0.93、0.91 和 0.55,上升盘沙一段、东营组断面所对应的连通概率为 0.83 和 1.00,而馆陶组和明化镇组对应的连通概率仅为 0.37 和 0.02。由此可认为,断层在馆陶组对应的断面处可能封闭,因东营组砂岩不发育,所以来自下降盘的油气进入上升盘的沙一段储集层运移和聚集。目前,该区已在沙一段获得油气突破,而馆陶组和明化镇组未发现油气。

通过以上两个实际地质剖面的检验,证实我们所建立的断层连通概率模型至少在研究区范围

是可靠的。

4 断层连通性特征的描述

利用前述所建立的断层连通概率模型,对研究区主要断层的启闭性特征进行了定量评价。以张东-海 4 井断层为例,研究中依据该断层附近的储层发育特征和地震资料情况,首先将断面划分成 30×20 的网格区域,利用过断层的地震剖面(30 条)和断层附近钻井的测井、录井以及地应力测试资料,计算断面各输导元节点处的断层泥岩涂抹因子、泥岩流体压力和断面压应力,并求取启闭系数值,最后利用上述断层连通概率预测模型求出断面各计算点的连通概率。

图 8 是将计算获得的连通概率值绘制在张东-海 4 井断层断面上的拓展分布图。图中纵向轴为断面的埋深,横向轴利用地震 CDP 表示了断层在走向上的位置变化。如图所示,断面不同位置处连通概率存在较大的差异。在海 12 井区以西的断层部分,下降盘沙河街组对应断面处的连通概率均较高,一般在 60% 以上,只在张参 1 井和张海 6 井之间处较低,开启性差;上升盘沙一段-东营组对应断面处连通概率极低,可能会形成断层封闭,使得来自于下降盘沙河街组输导层的油气无法继续向上运移,而向其下部连通概率较高的沙二段及沙三段输导层运移,因此该区新近系至今未获得油气发现。海 12 井区及以东地区的断层部分,除下降盘的沙河街组对应断面处连通概率高以外,上升盘沙三段-馆陶组断面处也具

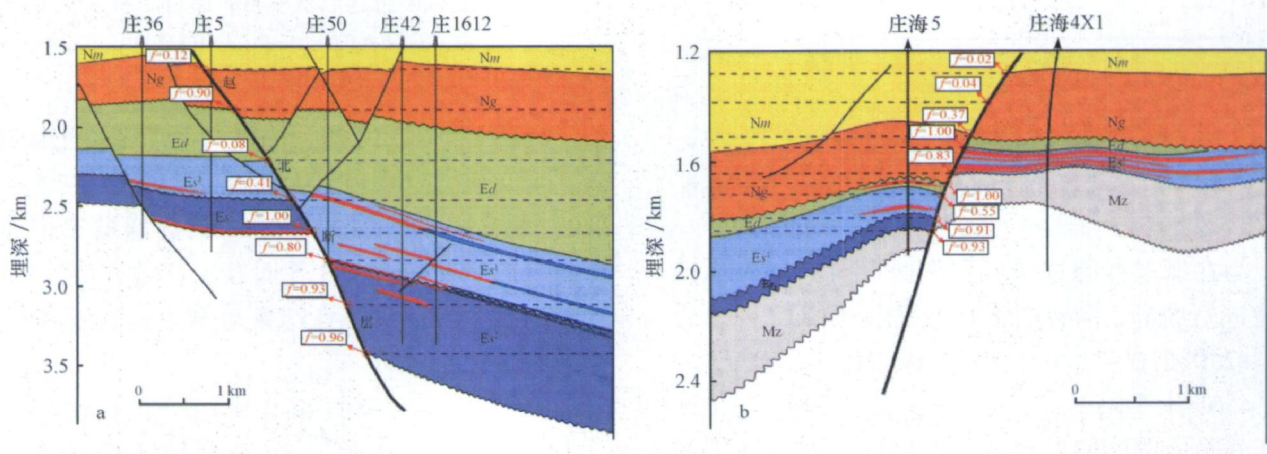


图 7 模型在两个实际油藏地质剖面中的检验

Fig. 7 Test of the model on two actual oil reservoir profiles

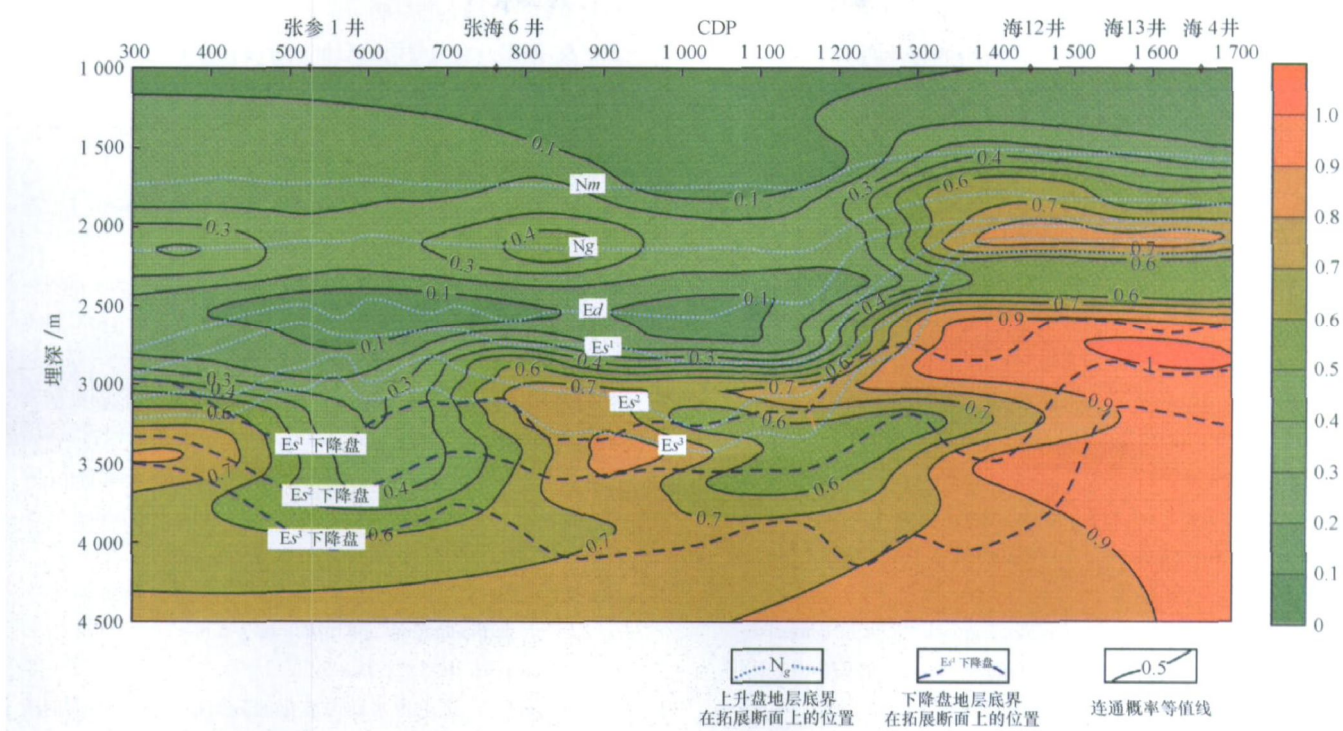


图 8 张东-海 4 井断层连通概率在断层面上的拓展分布

Fig. 8 Distribution of fault connectivity probability on a strike projection of Zhangdong-Hai 4 fault

有较高的连通概率 (> 50%), 开启性较好, 断层可能在明化镇组下段对应断面处封闭, 目前该区已在馆陶组和明化镇组下段发现油气藏。

5 结论与认识

断层的启闭性受到多种因素的影响, 断面不同位置上的封闭性具有较大差异, 仅考虑单一因素来确定断层的开启或封闭往往造成失误。只有建立一种综合考虑多种因素的合适标志才能更为科学地描述断层的启闭特征。以断面不同位置断层上、下盘储层内是否含油气作为判别启闭性的依据, 综合考虑流体压力、断层正应力和泥岩涂抹因素以及其他不确定地质因素对断层启闭性的影响, 提出利用连通概率作为描述断层启闭性的表达形式, 能够较为全面、客观地定量描述断面在三维空间上不同位置处的启闭特征。通过在大港油田埕北断阶带的实际应用, 证实断层连通概率法是一种行之有效的断层启闭性定量评价方法。该方法有效地弥补了目前在输导体系研究中刻画断层输导能力的不足, 为建立油气运聚的复合输导格架提供了依据。

然而在研究工作中我们也发现, 某些计算参

数难以取准, 如缺少钻井地区断层上、下盘地层内的泥岩含量只能依据沉积特征和地震反演结果进行推测, 不同地区和不同深度地应力的大小和方向等, 这在一定程度上影响了断层启闭性预测的精度。此外, 本文所提出的方法是基于我国东部盆地张性断层的特征提出的, 对于压性断层能否适用尚需要进一步研究的检验。

参 考 文 献

- 1 Harding T P, Tuninias A C. Structural interpretation of hydrocarbon traps sealed by basement normal fault blocks at stable flank of fore-deep basins and at rift basins[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73 (7): 812- 840
- 2 Smith D A. Theoretical considerations of sealing and non-sealing faults[J]. AAPG Bulletin, 1966, 50(2): 363- 374
- 3 Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(8): 1 954- 2 026
- 4 Engelder J T. Cataclasis and the generation of fault gouge[J]. Geological Society of American Bulletin, 1979, 85(8): 1 515- 1 522
- 5 Weber K J M and IG, Pilaar W F, et al The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structures[A]. Tenth Annual Offshore Technology Conference Proceedings[C]. 1978, 2 643- 2 653
- 6 Knipe R J. Faulting processes and fault seal[J]. Structure and Tectonic Modeling and Its Application to Petroleum Geology

- 1992 (3): 325–342
- 7 Knipe R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (2): 187–195
 - 8 Gibson R G. Fault-zone seals in siliclastic strata of the Columbus Basin, Offshore Trinidad [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78 (9): 1372–1385
 - 9 Antonellini M, Aydin A. Effect of faulting on fluid in porous sandstones: petrophysical properties [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78 (3): 355–377
 - 10 Berg R R, Alana H A. Sealing properties of Tertiary growth faults, Texas Gulf Coast [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79 (3): 375–393
 - 11 Allen U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73 (7): 803–811
 - 12 Hooper E C D. Fluid migration along growth faults in compacting sediments [J]. Journal of Petroleum Geology, 1991, 14 (2): 161–180
 - 13 Anderson R N, Flemings P, Losh S, et al. Gulf of Mexico growth fault drilled: seen as oil-gas migration pathway [J]. Oil and Gas Journal, 1994, 92 (23): 97–104
 - 14 Fowler W A J. Pressure, hydrocarbon accumulation, and salinities—Chocolate Bayou field, Brazoria County, Texas [J]. Journal of Petroleum Technology, 1970, 22 (2): 411–423
 - 15 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
 - 16 Smith D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf Coast basins [J]. AAPG Bulletin, 1980, 64 (2): 145–172
 - 17 Lindsay N G, Murphy F C, Washh J J, et al. Outcrop studies of shale smear on fault surfaces [J]. International Association of Sedimentologists Special Publication, 1993, 15 (1): 113–123
 - 18 Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal prediction [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (6): 897–917
 - 19 曹瑞成, 陈章明. 早期探区断层封闭评价方法 [J]. 石油学报, 1992, 13 (1): 33–37
 - 20 吕延防, 陈章明. 非线性映射分析判断断层封闭性 [J]. 石油学报, 1995, 16 (2): 36–41
 - 21 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
 - 22 赵密福, 信茎麟, 李亚辉, 等. 断层封闭性的研究进展 [J]. 新疆石油地质, 2001, 22 (3): 258–261
 - 23 吕延防, 李国会, 王跃文. 断层封闭性的定量评价方法 [J]. 石油学报, 1996, 17 (3): 39–43
 - 24 Allen A, Allen J R. Basin analysis: principles and applications [M]. London: Blackwell Scientific Publishing, 1990, 1–259
 - 25 鲁兵, 丁文龙, 刘忠心, 等. 断层封闭性研究进展 [J]. 地质科技情报, 1998, 17 (3): 75–80
 - 26 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
 - 27 Jaeger J C, Cook N G. Fundamentals of rock mechanics [M]. London: Chapman and Hall, 1979, 593
 - 28 罗晓容. 断裂开启与地层中温压瞬态变化的数学模型 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20 (1): 1–6
 - 29 Luo X R, Dong W L, Yang J H, et al. Overpressuring mechanisms in the Yinggehai Basin, South China Sea [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87 (4): 629–645
 - 30 罗晓容, 杨计海, 王振峰. 盆地内渗透性地层超压形成机制及钻前压力预测 [J]. 地质论评, 2000, 46 (1): 22–31
 - 31 Magara K. Compaction and fluid migration [A]. Practical petroleum geology [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978, 1–319
 - 32 Luo X R, Vasseur G. Modelling of pore pressure evolution associated with sedimentation and uplift in sedimentary basins [J]. Basin Research, 1995, 7: 35–52
 - 33 王震亮, 陈荷立. 试论古水动力演化的旋回性与油气的多期次运聚 [J]. 沉积学报, 2002, 20 (2): 339–345
 - 34 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), 33 (2): 163–167
 - 35 Jev B I, Kaars-Sijpesteijn C H, Peters M P A M, et al. Akaso Field, Nigeria: use of integrated 3-D seismic, fault slicing, clay smearing, and RFT pressure data on fault trapping and dynamic leakage [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77 (8): 1389–1404
 - 36 Alexander L L, Handschy J W. Fluid flow in a faulted reservoir system: fault trap analysis for the Block 330 field in Eugene Island, South Addition Offshore Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82: 387–411
 - 37 Ortoleva P J. Basin compartment and seals [A]. AAPG Memoir 61 [C]. 1995, 1–477
 - 38 袁淑琴, 丁新林, 苏俊青, 等. 大港油田滩海区埕北断阶带油气成藏条件研究 [J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26 (S0): 8–9
 - 39 王桂芝, 袁淑琴, 肖莉. 埕北断阶区油源条件与油气运聚分析 [J]. 石油天然气学报, 2006, 28 (3): 200–203
 - 40 于长华, 苏俊青, 袁淑琴, 等. 大港油田埕北断阶区油气富集主控因素分析 [J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26 (4): 88–92
 - 41 李延辉, 梁惠兰, 胡永军, 等. 渤海湾埕北断阶区油气二次运移模式及其对勘探的作用 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2004, 19 (1): 19–23
 - 42 张杰, 邱楠生, 王昕, 等. 黄骀坳陷歧口凹陷热史和油气成藏史 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26 (4): 505–512
 - 43 许忠淮, 吴宣, 齐胜福, 等. 北大港油田及邻区现代构造应力场特征 [J]. 石油勘探与开发, 1996, 23 (6): 78–84
 - 44 万天丰. 中国东部中、新生代板内变形、构造应力场及其应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1993, 103

(编辑 李 军)