

川中地区中侏罗统沙溪庙组断层输导有效性定量评价

刘景东^{1,2},任成刚¹,王小娟³,潘珂³,王少华¹,庞小婷³,关旭³

[1. 深层油气全国重点实验室 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 3. 中国石油西南油气田公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610051]

摘要: 断层输导有效性是中浅层油气成藏和富集的关键因素。开展断层输导有效性评价对四川盆地中部(川中)中浅层油气勘探部署具有重要意义。以川中地区中侏罗统沙溪庙组为例,在断层分布与成因分析的基础上,采用断层活动速率、挤压应力方向和断面正压力等方法,评价了气源断层输导性,研究了断-砂配置及其演化,揭示了断-砂配置对天然气运移及富集差异的控制作用。研究表明:川中地区分别切割上三叠统须家河组和下侏罗统烃源岩的逆断层和正断层,为沙溪庙组的气源断层,其中逆断层受控于不同构造运动期的构造挤压,正断层成因是沙溪庙组沉积早-中期“弱伸展背景下的隆-坳差异沉降”;川中地区龙泉山、角①和简阳①逆断层及正断层在晚燕山期和晚喜马拉雅期具有较好的输导性,受断层规模和下伏气源供给等因素影响,龙泉山断层和角①断层为最重要的输导断层;川中地区气源断层多数表现为早-晚继承型,有利于天然气在不同充注期向有利砂体持续充注,而角①断层为早-晚反转型,早期和晚期的天然气充注方向不同,在断层两侧均可发生天然气充注;气源断层规模、断-砂配置关系及烃源岩生烃强度是天然气富集差异的主控因素。

关键词: 断-砂配置演化;定量评价;断层输导性;天然气运移;沙溪庙组;中侏罗统;中浅层;四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Quantitative assessment of hydrocarbon transport effectiveness along faults in the Middle Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

LIU Jingdong^{1,2}, REN Chenggang¹, WANG Xiaojuan³, PAN Ke³, WANG Shaohua¹, PANG Xiaoting³, GUAN Xu³

[1. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China]

Abstract: The hydrocarbon transport effectiveness along faults is a key factor influencing hydrocarbon accumulation and enrichment in moderately shallow reservoirs. Assessing this factor holds great significance for the emplacement of hydrocarbon exploratory wells in medium-shallow reservoirs in the central Sichuan Basin. This study focuses on the Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin. Following the analysis of fault distributions and origins, we assess the gas transport capacity of source rock-rooted faults, investigate the fault-sand configuration and its evolution, and reveal the controlling effects of fault-sand configuration on the migration and differential enrichment of gas, based on fault activity rates, compressive stress directions, and normal stress on fault plane. The results indicate that the reverse and normal faults cutting through the Upper Triassic Xujiahe Formation and the Lower Jurassic source rocks in the central Sichuan Basin serve as the source rock-rooted faults of the Shaximiao Formation. The reverse faults, among others, are governed by the tectonic compression in different tectonic movement periods, whereas the normal faults are formed due to the differential subsidence with uplifting and sagging in a weak extensional setting during the early to middle sedimentary stages of the Shaximiao Formation. The reverse faults, Longquanshan, Jiao-1, and Jianyang-1, as well as normal faults in the central Sichuan Basin exhibit high transport capacity during the Late Yanshanian and the Late Himalayan. Considering factors such as fault size and the hydrocarbon generation intensity of underlying gas sources, it can be inferred that the Longquanshan and Jiao-1 faults play the most significant role in hydrocarbon transport. The source rock-rooted faults in the central Sichuan Basin are mostly

收稿日期:2024-04-13;修回日期:2024-08-09。

第一作者简介:刘景东(1984—),男,博士、教授,油气地质与勘探。E-mail:liujingdong@upc.edu.cn。

基金项目:中国石油西南油气田公司重大科技专项(2022ZD01-01)。

of the inherited type, conducive to the continuous gas charge into favorable sand bodies in different charging periods. In contrast, the Jiao-1 fault is of the inverted type, exhibiting different gas charge directions in the early and late stages and allowing for natural gas charge on both sides. Major factors governing the differences in natural gas enrichment include the size of source rock-rooted faults, fault-sand configuration, and the hydrocarbon generation intensity of source rocks.

Key words: fault-sand configuration evolution, quantitative assessment, transport capacity of a fault, natural gas migration, Shaximiao Formation, Middle Jurassic, medium-shallow reservoir, Sichuan Basin

引用格式:刘景东,任成刚,王小娟,等. 川中地区中侏罗统沙溪庙组断层输导有效性定量评价[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1705–1719. DOI: 10.11743/ogg20240616.

LIU Jingdong, REN Chenggang, WANG Xiaojuan, et al. Quantitative assessment of hydrocarbon transport effectiveness along faults in the Middle Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1705–1719. DOI: 10.11743/ogg20240616.

作为油气垂向运移的重要通道,断层有利于沟通下伏供烃层系,对中浅层油气藏形成往往起着决定性作用^[1],研究断层输导性有利于揭示中浅层油气藏的形成、改造过程和油气差异富集规律,从而指导油气勘探开发。众多研究表明,断层输导性受断层几何形态、断储配置关系、断层活动期与油气运移期匹配关系等众多因素的影响^[2–10],但不同学者对断层输导性的评价方法和研究结果却存在较大差异。目前常用的断层输导性评价方法有定性和定量两大类,其中定性方法包括断储配置法和岩性组合法等^[11–12],定量评价方法包括断层活动速率法、断面正应力法、排替压力法、断层物质涂抹法、脉体同位素评价法和断裂充填性质分析法等^[13–20]。然而,这些评价方法多从断层单因素角度出发,对断层连接的储层及断–储配置关系考虑不足,而且没有开展多因素如何共同影响断层疏导性的综合评价。

断层输导性评价不仅要是对断层的输导能力开展评价,还应考虑油气沿断层能否进入储层,特别是在有多套储层与断层相连通的情况下,评价不同储层的油气充注能力和规模有何差异十分关键。因此,在对断层自身输导性评价基础上,还要考虑断层与储层的配置关系及其对成藏的控制作用。前人曾从不同角度对断–砂配置类型进行过划分,提出了多种划分方案,如按照断层和两侧的砂体充注特征,分为反向、顺向和“屋脊式”3种类型^[21];根据断层两侧砂体翘倾方向不同划分为上抬–下倾型、下倾–上抬型、下倾–下倾型和上抬–上抬型^[22]。目前关于断–砂配置输导油气能力的研究以定性分析为主^[23–26],也有学者从断砂接触长度、砂体物性和砂体倾角等静态参数出发对油气充注能力开展评价^[27],但总体上对断层输导演化和断–砂配置演化约束下的油气动态充注过程研究不足。

四川盆地川中地区中侏罗统沙溪庙组气藏为下生上储的远源型多河道砂岩气藏,近年来以金秋区块为代表的沙溪庙组累计提交探明储量达十亿立方米,沙

溪庙组也成为四川盆地天然气勘探的重点和热点领域之一^[28]。沙溪庙组天然气以下伏上三叠统须家河组来源为主,其次为下侏罗统自流井组和凉高山组,而断层是沙溪庙组气藏得以形成的关键运移通道^[29–30]。尽管前人对川中地区沙溪庙组天然气成藏要素及宏观运聚特征开展过一定研究^[28–30],但关于输导断层的活动期次和输导性能还认识不清,缺少天然气沿断层向不同砂体的选择性充注差异研究,制约了天然气的勘探开发进程。因此,以川中地区中侏罗统沙溪庙组为例,在断层特征与成因分析基础上,综合定量评价断层输导性,研究气源断层对应的断–砂配置演化类型及其对天然气运移、富集的影响,该成果揭示了四川盆地中浅层天然气的分布与富集规律,对其他类似地区的断层输导性定量评价也具有重要借鉴意义。

1 地质概况

四川盆地构造上属于扬子板块,是在前震旦系基底上发育的震旦纪—中三叠世海相沉积和晚三叠世—第四纪陆相沉积的叠合盆地^[31],盆地周缘被龙门山、米仓山—大巴山、齐岳山和大相岭等山系包围,面积约 $18\times 10^4\text{ km}^2$ 。该盆地经历了震旦纪—晚三叠世卡尼期伸展体制下的被动大陆边缘(海相碳酸盐台地)、晚三叠世诺利期—晚白垩世挤压体制下的复合前陆盆地(陆相碎屑岩盆地)及晚白垩世以后挤压体制下的褶皱隆升改造(构造盆地)三大演化阶段^[32–33]。

川中地区位于四川盆地川中平缓褶皱区,向北过渡到川北低陡褶皱区。受区域构造应力演化影响,川中地区在三叠纪之前以差异升降构造运动为主,之后受到印支、燕山和喜马拉雅等构造运动影响,但由于刚性基底等因素制约,其构造形变相对较弱,形成一系列在燕山期初见雏形、喜马拉雅期最终定型的高低局部构造。研究区西侧紧邻龙泉山断裂带,区内发育NE向和少量近

WE向展布的逆断层,东北部有小型正断层密集分布(图1b)。研究区中新生界陆相层系自下至上包括上三叠统须家河组,下侏罗统自流井组和凉高山组,中侏罗统沙溪庙组和上侏罗统遂宁组、蓬莱镇组(图1c),其中须家河组、自流井组和凉高山组发育细粒沉积,具有有效的烃源岩条件;中侏罗统沙溪庙组为一套巨厚陆相碎屑岩红色地层夹中厚层块状砂岩,自下而上可划分为沙

(沙溪庙组)一段和沙二段,累计地层厚度1 000~1 500 m。沙一段以朵叶状浅水三角洲沉积为主,沙二段以枝状分河道型浅水三角洲沉积为主,二者均发育NE-SW向条带状展布为主的顺河道砂体^[28],纵向上可划分出23个砂组。根据构造和沉积条件等差异,川中地区由北向南包括金秋和简阳两个区块,其中金秋区块沙二段和简阳区块沙一段为重要的天然气勘探层系。金秋区块已发

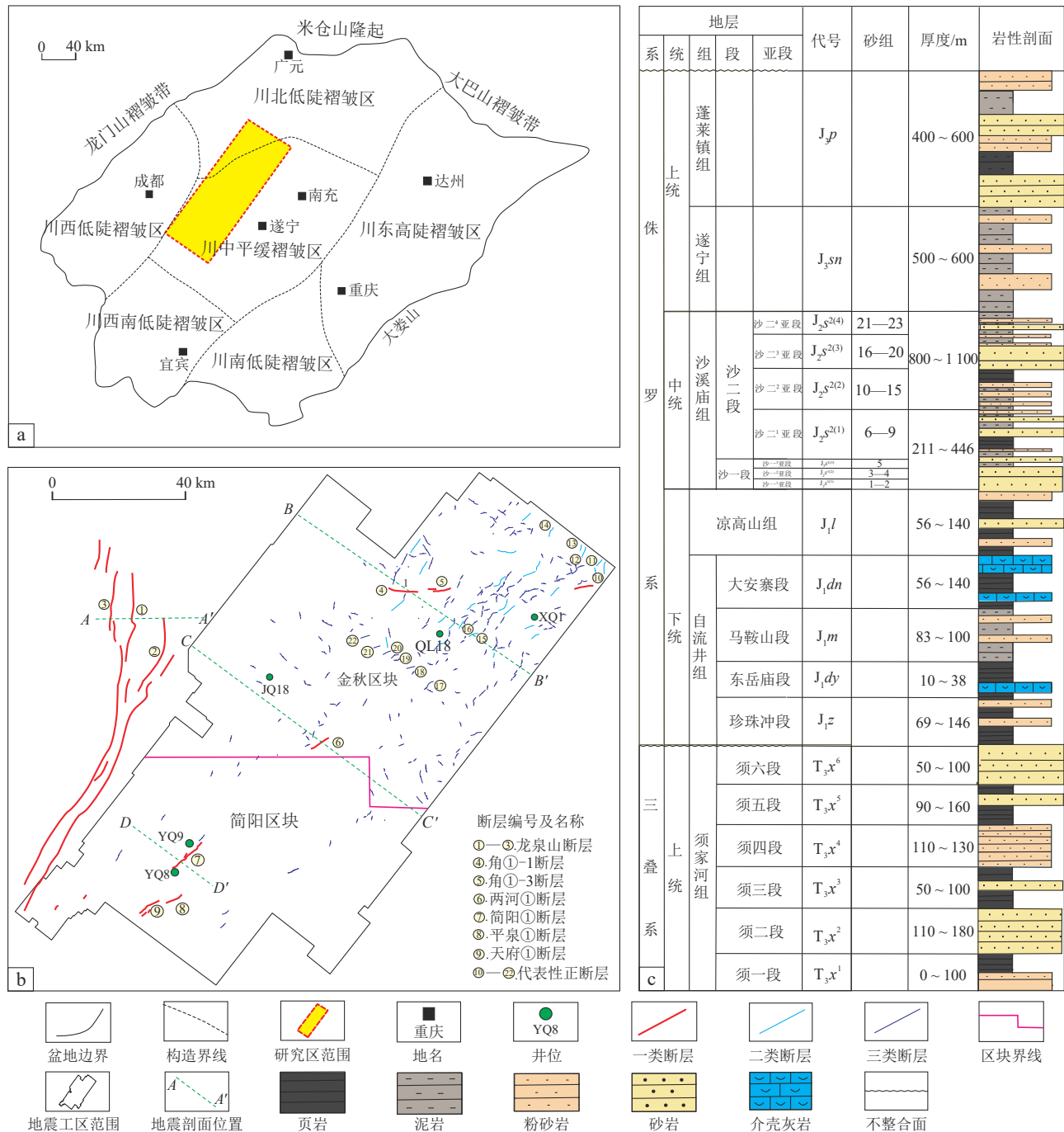


图1 川中地区构造位置(a)、沙溪庙组底界断裂与区块划分(b)及三叠系-侏罗系地层柱状图(c)

Fig. 1 Tectonic location (a), faults at the bottom boundary of the Shaximiao Formation and block division (b), and the Triassic to Jurassic stratigraphic column (c) in the central Sichuan Basin

现天然气主要分布于沙二¹亚段的6—9号砂组;而简阳区块天然气主要分布于沙一段的沙一¹亚段和沙一³亚段,其次为沙一²亚段。

2 断层分布与成因

2.1 断层分布及级别划分

川中地区断层较为复杂,不同性质和不同走向断层的分布与构造层关系密切。构造层是指在同一地区,经历了同一构造运动阶段,具有相同构造发育历史和构造特征的一套地层的总和^[34]。根据陆相层系纵向构造发育差异,以构造变形较弱的下侏罗统自流井组—凉高山组为界,将川中地区陆相层系划分为中—上三叠统和侏罗系—白垩系2套构造层,分别称为下构造层和上构造层。下构造层发育多个褶皱和逆断层(图2a—d),除角①断层及周边褶皱走向为近WE向外,其他多为NE向或NNE向;上构造层以相对宽缓的褶皱和正断层为主(图2a—d),正断层主要为顺构造走向分布。按照断层切割层系及断裂规模,可将川中地区断层划分为一类、二类和三类共3个类别(图1,图2;

表1),其中一类断层均为逆断层,具有断距落差大、延伸长和发育早的特点,向下切割至上三叠统须家河组烃源岩,连通上、下构造层,主要分布于川中地区西部、金秋区块中部和简阳区块西南部,包括龙泉山断层、角①断层、简阳①断层、平泉①断层和两河①断层等(图1b),由西向东断层规模有减小的趋势。二类和三类断层为上构造层中的正断层,在平面上具有断距落差小、延伸距离短和发育时代晚等特点,走向以NE向为主,部分为NS向和WE向,二类和三类断层数量由NE向SW逐渐减少;其中二类断层切割下侏罗统自流井组或凉高山组烃源岩,主要分布于金秋区块东北部,如图1中⑩—⑯等正断层;三类断层多为中侏罗统的内部断层,由金秋区块东北部向西南部规模逐渐减小,切割深度逐渐变小,如图1中⑰—⑳等正断层。

2.2 断层成因

2.2.1 逆断层

川中地区逆断层走向多样,且西部龙泉山断层规模明显强于川中地区,这主要受控于不同期次和不同方向的构造挤压作用。

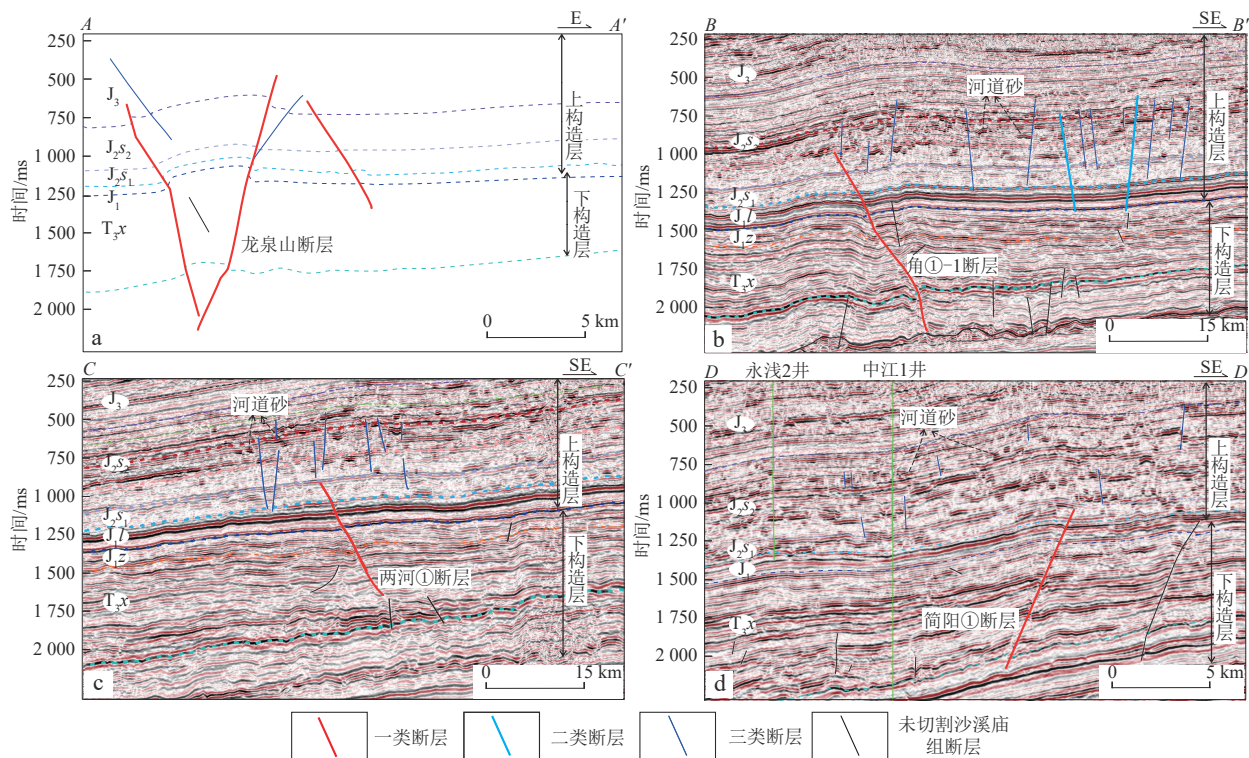


图2 川中地区上三叠统—侏罗系典型剖面

Fig. 2 Typical sections of the Middle Triassic to Jurassic strata in the central Sichuan Basin

a. 过龙泉山断层剖面; b. 过角①-1断层剖面; c. 过两河①断层剖面; d. 过简阳①断层剖面

(J₃为上侏罗统; J₂为中侏罗统; J₁为下侏罗统; J_{2s}¹为沙一段; J_{2s}²为沙二段; J_{1l}为凉高山组; J_{1z}为自流井组; T_{3x}为上三叠统须家河组。)

表 1 川中地区沙溪庙组断层级别划分及分布特征

Table 1 Classification and distribution characteristics of faults in the central Sichuan Basin

断层级别	切割关系	断裂位置	发育特点	分布特点	典型断层
一类断层	切割须家河组烃源岩	连通上、下构造层	断距落差大,延伸距离长、发育早	川中地区西部,金秋区块中部、简阳区块西南部	龙泉山断层、角①断层、两河①断层、简阳①断层等
二类断层	切割下侏罗统自流井组或凉高山组烃源岩	上构造层	断距落差小、延伸距离短、发育晚	金秋区块为主,由NE向SW方向逐渐减少	图 1b 中⑩—⑯等正断层
三类断层	中侏罗统的内部断层				图 1b 中⑰—⑳等正断层

前人区域构造与应力场分析结果表明^[35-36],四川盆地在晚印支期受到秦岭造山带、金沙江断层带和华南陆块等多方向的构造挤压,龙门山及其以西的松潘—甘孜地区发生强烈褶皱并向东逆冲推覆于扬子地台之上,盆地由早期的海相沉积转换成陆相沉积,并发育大规模的前陆盆地,具有由西向东翘升的特点;多方

向受力形成了NW向为主的构造挤压,形成NE向和NNE向逆断层,龙泉山地区被挤压时间早于川中地区,且受限于川中基底特征,导致龙泉山断层的规模较大(图 3a)。

晚燕山期,随着华南陆块的持续向北推进和顺时针旋转,秦岭造山带内部产生了强烈的向南逆冲挤压,

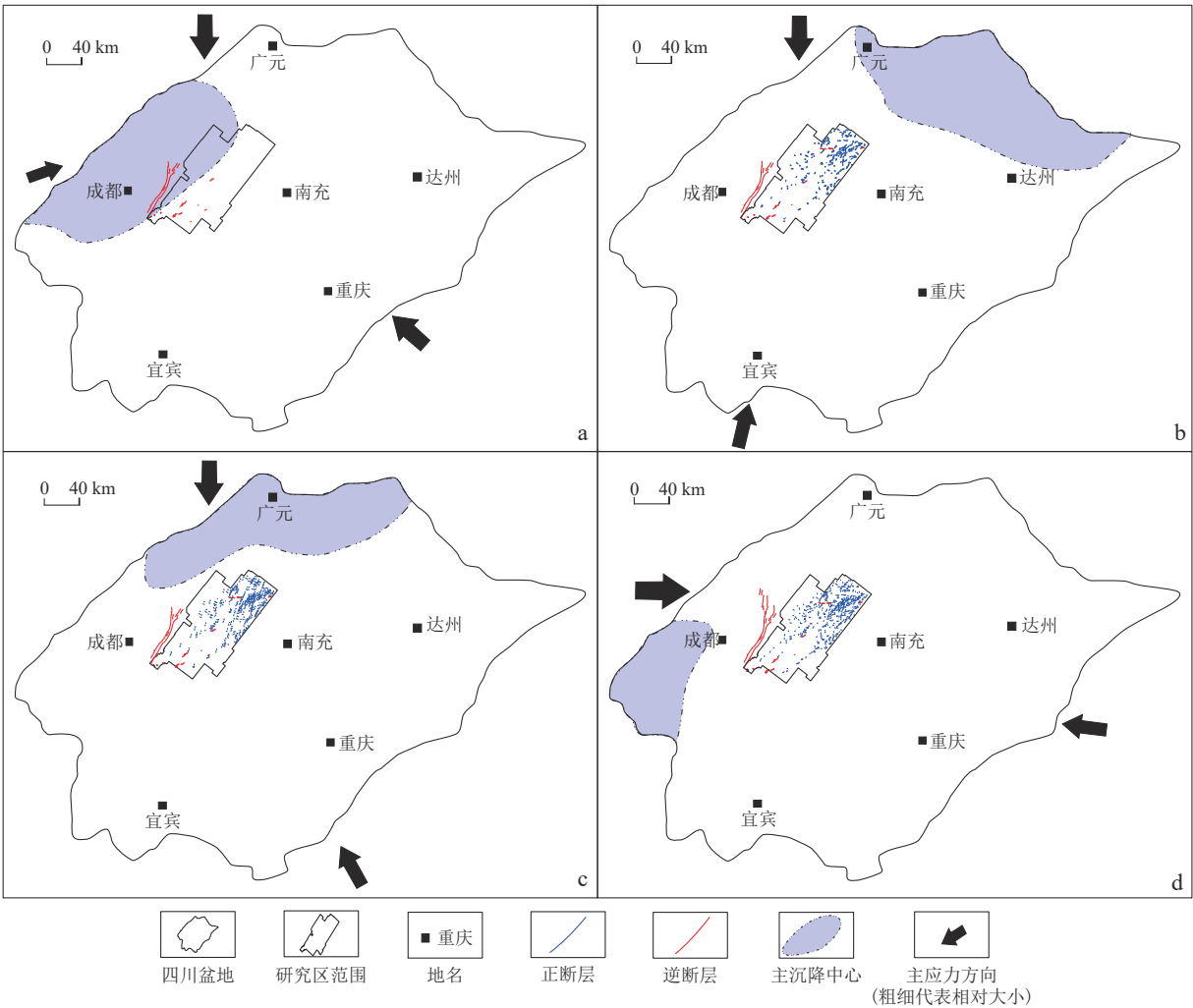


图 3 川中地区晚三叠世以来的构造-沉积演化及断裂发育演化(构造应力和沉积中心据文献[34-35])

Fig. 3 Maps showing the tectonic-sedimentary evolution and fault evolution in the central Sichuan Basin (tectonic stress and depocenters after references [34-35])

a. 晚三叠世;b. 中侏罗世;c. 早白垩世;d. 晚白垩世—第四纪

在大巴山—米仓山方向的构造挤压下,研究区北部金秋等地形成了近WE向或近NNW向的构造,叠加在原来的NE向构造之上。晚侏罗世至早白垩世,主压应力有向NW偏转之势,在龙门山北段和米仓山前缘形成新的前渊,反映龙门山活动进一步加强(图3b,c)。喜马拉雅期,秦岭造山带的构造体制发生了重大转变,长期作用于四川盆地的近NS向挤压消亡,龙门山南段开始活跃,在其前缘形成了新的前渊,整体上处于NW-SE向或近WE向的挤压背景,对已形成的构造加以改造(图3d)。

2.2.2 正断层

研究区的正断层主要发育于沙溪庙组,以沙二段最多,走向多样且多数与构造延伸方向一致;横向上由NE向SW方向,正断层的规模 and 活动强度逐渐减小,活动持续时间逐渐变短,其中在继承性正向构造位置,正断层的分布密度相对较大(图1,图2)。依据研究区正断层发育特征及构造-沉积充填背景,认为“弱伸展背景下的隆-坳差异沉降”是控制研究区沙溪庙组的正断层形成的主要原因。主要证据如下:①根据四川盆地不同时期沉降中心的最大沉降量和沉积速率对比结果,中侏罗世沙溪庙组沉积期的沉降量显著高于其他时期,而研究区在此时期处于川北坳陷强烈沉降区与川中隆起的过渡部位或处于川中隆起部位(图3b,图4),容易产生不同位置差异沉降导致的断裂构造;②从应力分析可见(图4),受差异升降影响,研究区的主应力方向(σ_1)多为垂直方向,而受该时期拉伸导致的早期挤压构造应力释放或卸载影响,最小主应力方

向(σ_3)主要与局部构造走向垂直,从而形成了多数与局部构造走向近于平行分布的正断层;③从NE向SW方向,受北部强烈沉降的影响逐渐减弱,正断层发育的数量逐渐减少,强度也逐渐变弱,并在简阳北部地区逐渐消失(图2)。

结合前人对四川盆地的区域构造研究,李忠权等^[34]认为晚三叠世之后,中、上扬子板块进入了与新特提斯洋发展密切相关的伸展—聚敛旋回,四川盆地在早—中侏罗世属于大型克拉通内坳陷盆地,存在短暂伸展;而且李智武等^[36]也认为川渝地区在中—晚侏罗世属于陆隆伸展阶段。所以,在大型克拉通内坳陷盆地背景下,盆地内部的川中地区可能发生陆隆差异导致的伸展作用,这种陆内弱拉张环境实际上可看作是挤压应力松弛阶段的伸展环境。但这种在俯冲—挤压旋回间的应力松弛派生的张力下所形成的断陷盆地与真正在拉张应力场下形成的断陷盆地不同,不同之处在于前者的形成除了受地壳水平运动的影响外,还受到地壳垂向运动即地壳的均衡调整作用影响。

3 断层输导性定量评价

3.1 断层输导性定量评价方法原理

3.1.1 断层活动性

断层活动速率法是断层活动性定量评价的常用方法之一^[37],具有不受盆地沉降影响,不受上升盘地层缺失限制,以及考虑地层沉积时间等方面的优点(图

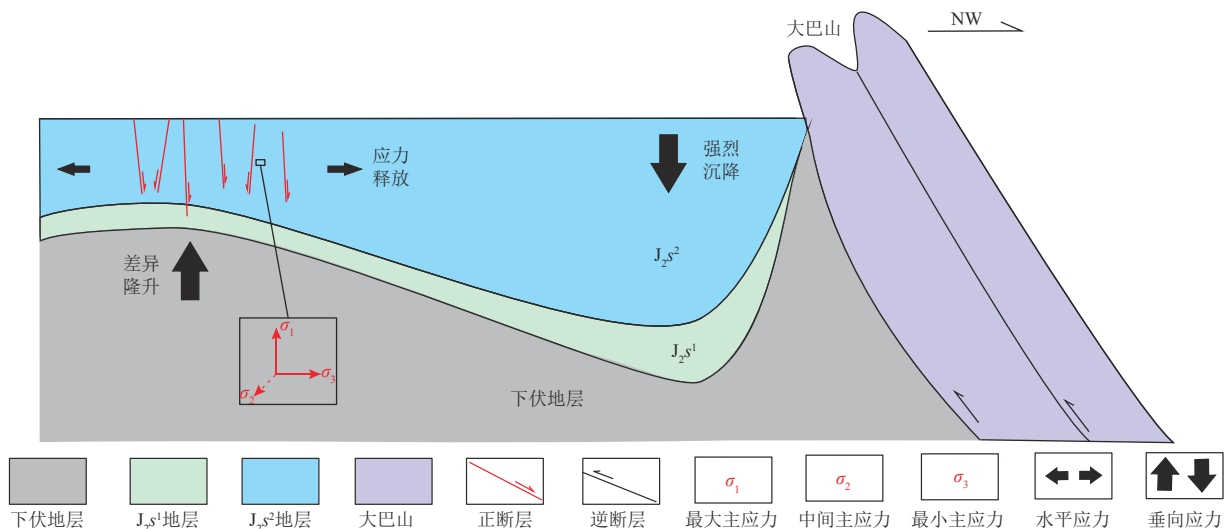


图4 川中地区沙溪庙组正断层成因模式

Fig. 4 Genetic model for normal faults in the Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

5a)。断层活动速率计算公式为:

$$V_f = D/T \quad (1)$$

式中: V_f 为断层活动速率, m/Ma; D 为断层古落差(可通过地震解释资料获取), m; T 为断层活动时间, Ma。

3.1.2 断面正压力法

一般认为断层在活动期具有流体输导性, 而当断层停止活动时则不具有输导性。然而, 如果断层在静止期时断裂带仍有空腔或连通孔隙存在, 其同样具有输导性。有学者通过地质观察和模拟实验分析, 指出断面正压力是影响断层垂向封闭性的重要因素(图5c)^[38-39], 并建立了相应的计算公式来求取断面正压力(图5b):

$$p = H \times (\rho_r - \rho_w) \times g \times \cos\alpha \quad (2)$$

式中: p 为断面正压力, MPa; H 为断面埋藏深度, m; ρ_r 为上覆地层平均密度, g/cm³; ρ_w 为地层水密度, 取 1.01 g/cm³; g 为重力加速度, 取值 9.8 m/s²; α 为断层倾角, (°)。

3.1.3 区域主压应力方向与断层走向关系

当最大主压应力方向与断层走向近于垂直时, 断

层带内充填物的磨碎和压实程度高, 封闭性较好, 断层带内充填物的渗透率低, 有利于油气的聚集; 当最大主压应力方向与断层走向近于平行时, 断层带内的充填物松散程度高、渗透率高、输导性好, 有利于油气的运移。结合前人关于区域主压应力方向与断层走向的夹角大小对油气输导能力影响的认识^[40-41], 在定量统计不同断层对应的二者夹角大小基础上, 将断层输导性能划分为3种情况, 其中夹角 0°~30°为输导性好, 30°~60°为输导性中等, 60°~90°为输导性差(图5c)。

3.2 评价结果

3.2.1 断层活动速率

通常情况下, 关键成藏期断层活动速率越大, 输导油气能力越强。通过对川中地区不同级别断层的活动速率进行计算, 发现断层在印支期—早燕山期开始发育, 一类、二类和三类断层在该时期的活动速率依次降低(图6), 反映了断层规模逐渐减小, 但该时期上三叠统和下侏罗统烃源岩未进入大量生气阶段, 难以起到大量输导油气的作用。晚燕山期和晚喜马拉雅期, 川中地区发生较强烈的构造运动, 各级断层发生活化, 结

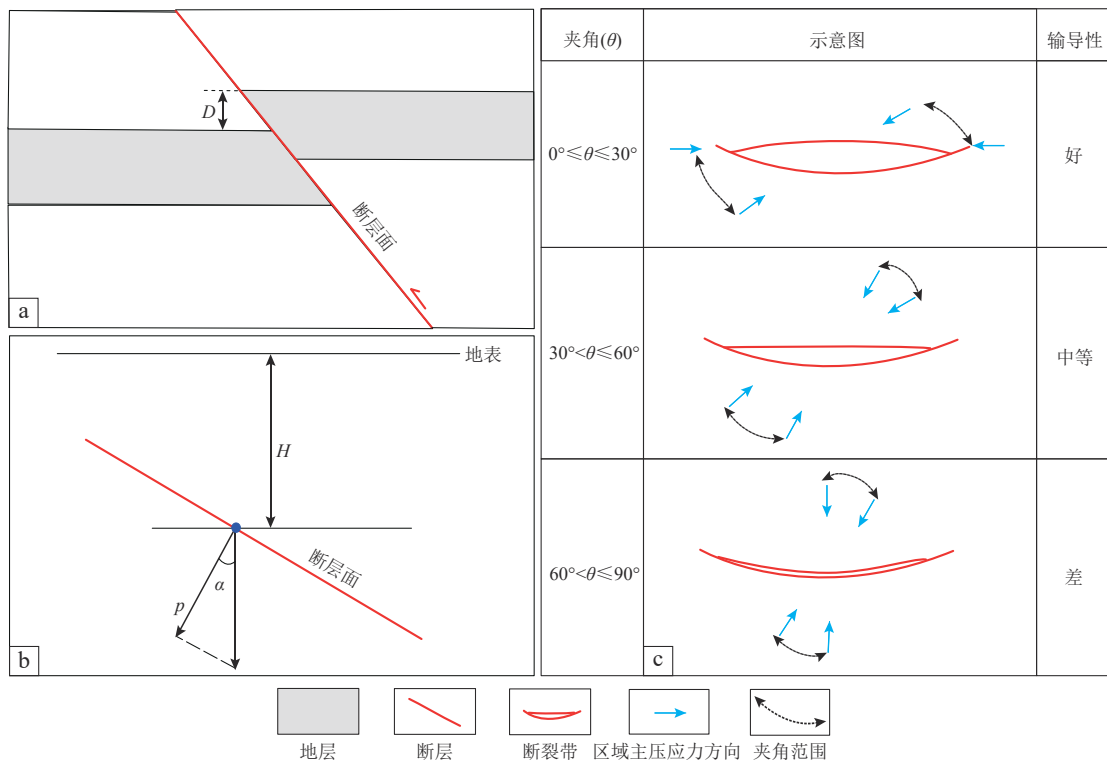


图5 川中地区沙溪庙组断层输导性计算方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing the calculation of the transport capacity of faults in the central Sichuan Basin

a. 断层活动速率计算的关键参数; b. 断面正压力计算的关键参数; c. 区域主压应力方向与断层走向关系

(图中 D 为断层古落差, m; H 为断面埋藏深度, m; p 为断面正压力, MPa; α 为断层倾角, (°); θ 为区域主压应力方向与断层走向之间的夹角, (°).)

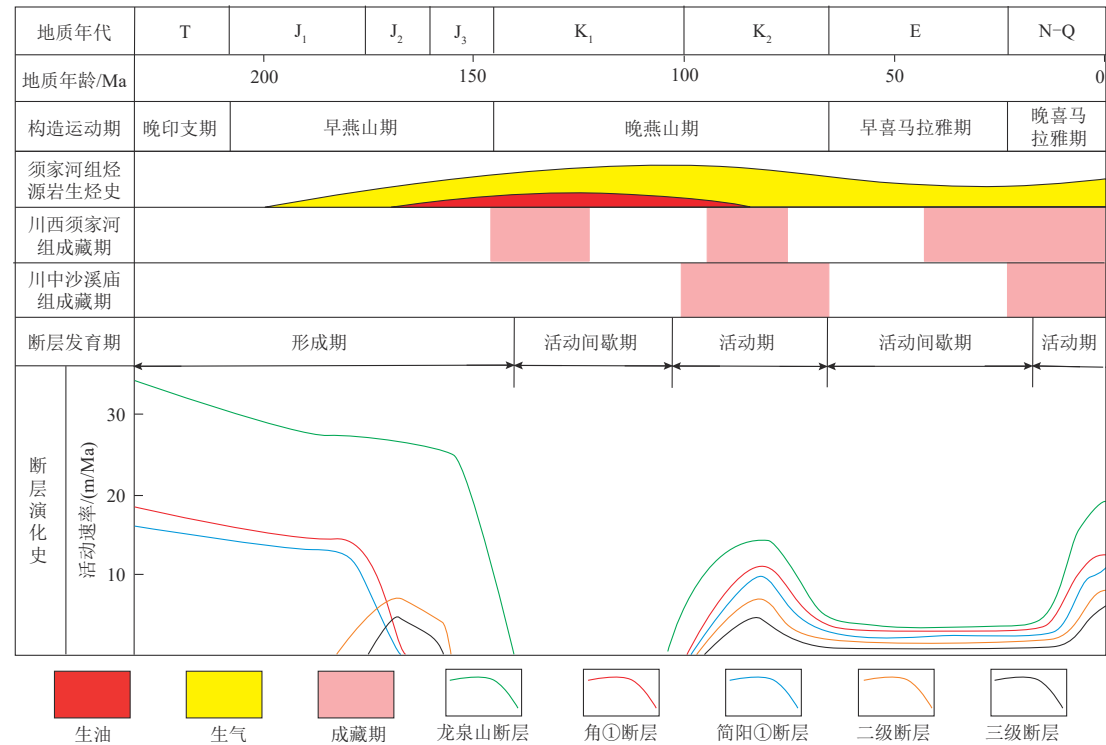


图6 川中地区沙溪庙组不同级别断层的活动速率演化及其与油气成藏关系示意图(烃源岩、成藏期参考文献[30, 40-41])

Fig. 6 Schematic diagram showing the activity rate evolution of faults of different grades and their relationship with the hydrocarbon accumulation in the central Sichuan Basin (source rocks and hydrocarbon accumulation periods after references [30, 40-41])

合不同级别断层规模差异,认为一类、二类和三类断层在构造运动期的活化程度逐渐降低。

根据川西—川中地区须家河组烃源岩热演化和沙溪庙组天然气成藏期分析结果^[30, 42-43],可知须家河组烃源岩主要生烃期为中—晚侏罗世和白垩纪,须家河组成藏期为晚侏罗世末期—早白垩世和晚白垩世,古近纪晚期至今为主要调整期,这为上部沙溪庙组成藏提供了很好的物质基础;沙溪庙组天然气成藏期晚于须家河组,为早白垩世末期—晚白垩世和中新世末期至今,成藏期与晚燕山期和晚喜马拉雅期断裂活动具有很好的时间匹配关系(图6)。其中,一类断层为研究区的逆断层,活动强度大,连通了上三叠统须家河组烃源岩与中侏罗统沙溪庙组储层,为主要输导通道断层;二类和三类断层为正断层,活动强度中等或较低,部分断层连通下侏罗统烃源岩,起到垂向输导通道的作用,而多数断层则主要对天然气运移起调节作用,影响着天然气的垂向分布。

3.2.2 断面正压力

断层埋藏越浅、倾角越大,断面所受的压应力就越小,断层就越有可能具有开启性^[38-39]。一般认为如果断层面两侧地层的泥地比(泥质岩厚度与地层总厚度

的比值)大于50%,则当 p (断面正压力) <5.5 MPa时,断层为开启状态;当 $5.5 \leq p < 7.5$ MPa时,断层处于半开半闭状态;当 $p \geq 7.5$ MPa时,断层为封闭状态。川中地区沙溪庙组地层为泥质岩夹河道砂岩沉积为主,断移地层的泥/地比大于50%,适用于上述评价标准。各主要断层的断面正压力计算结果表明,川中金秋区块的角①断层和简阳区块的简阳①、平泉①等断层,在沙溪庙组沙二¹亚段及其以下层段,现今受到的断面正压力普遍大于7.5 MPa,已发现的主力砂组多处于断面封闭范围内(图7a, b)。对于金秋区块的正断层,计算的断面正压力多数小于5.5 MPa,处于开启状态,而且沙二¹亚段的主力砂组也位于该深度范围内,所以断层具有输导作用(图7c, d)。由于现今埋深是多期构造抬升剥蚀后的最终状态,为最浅埋深阶段,所以自早白垩世以来,金秋和简阳区块的逆断层在断层静止期一直处于封闭状态;对于正断层,根据目前的断面正压力与埋深之间的关系,判断在1 600 m深度以深区域,断层可能处于半封闭—封闭状态,所以早白垩世以来,随着地层抬升和埋深变浅,正断层经历了从封闭到开启的演化过程。

3.2.3 区域主压应力方向与断层走向关系

区域主压应力方向与断层走向的夹角会影响断面

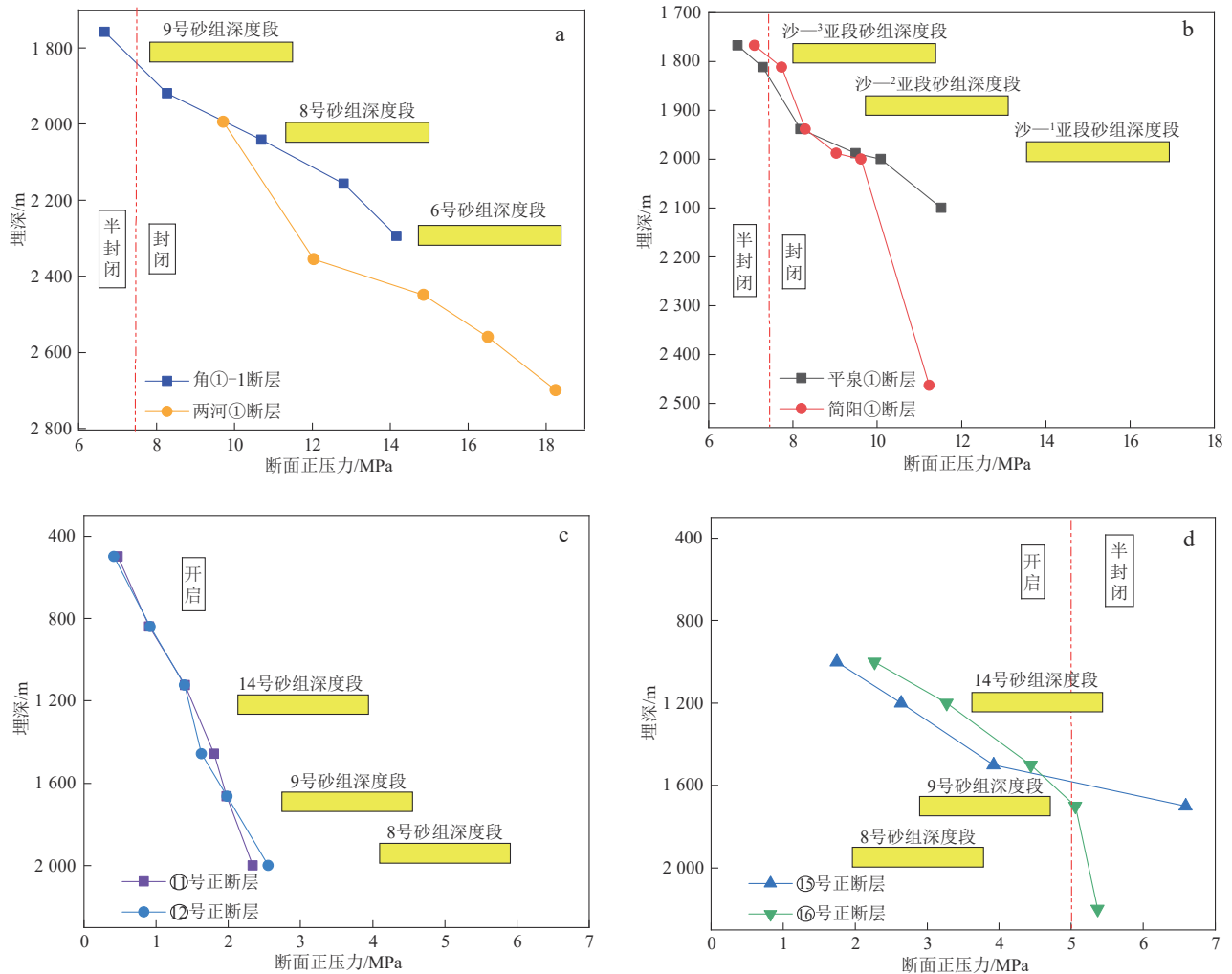


图7 川中地区沙溪庙组主要断层的断面正压力及输导性分析

Fig. 7 Diagrams showing the normal stress on fault plane and transport capacity of major faults in the central Sichuan Basin

a, b. 一类断层; c, d. 二类断层

(黄色区域对应深度范围代表砂组所在深度段。)

开启程度^[40-41],一般二者夹角越小,断层开启程度越高,断层输导能力越强。四川盆地的多期次构造运动对应不同方向的区域挤压应力,需要分时期讨论区域挤压应力对断层输导性的影响。统计对比(图8)认为,川中地区西翼的龙泉山断层主体以及简阳区块的简阳①、平泉①和天府①断层走向以NE向为主,而晚印支期和晚燕山期区域应力方向以NW为主,与上述断层具有一定夹角,对天然气输导相对不利;但龙泉山断层北段为近NS向,有利于天然气输导;早燕山期的区域应力方向存在由NE向NS方向转变,早期有利于天然气输导,但晚期相对不利;而早、晚喜马拉雅期以近WE向的区域挤压应力为主,与断层夹角变小,有利于天然气输导。金秋区块的角①断层为近WE向展布,晚印支期、早燕山期和晚燕山期区域应力与断层走向存在一定夹角,对天然气输导相对不利;而早、晚喜

马拉雅期与角①断层近于平行,有利于天然气输导。对于研究区的正断层,走向多样但以NE向为主,与简阳区块逆断层的输导特征具有相似性。

定量统计结果(图9)表明,断层在晚印支期和早燕山期的输导性较差,而且这些时期也不是烃源岩的主要生烃期,不能成为主要的油气输导时期;晚燕山期的龙泉山断层输导性好、角①断层和NE向正断层输导性中等,其他逆断层输导性较差;喜马拉雅期各断层均具有中等或好的输导能力,其中角①断层、平泉①断层和天府①断层输导性好,龙泉山断层、简阳①断层和NE向正断层输导性中等。可见,不同时期断层输导能力的强弱顺序依次为早、晚喜马拉雅期>晚燕山期>早燕山期和晚印支期。根据成藏期特征,判断晚燕山期和晚喜马拉雅期为断层的主要输导时期,总体上龙泉山断层和角①断层的输导性能最好。

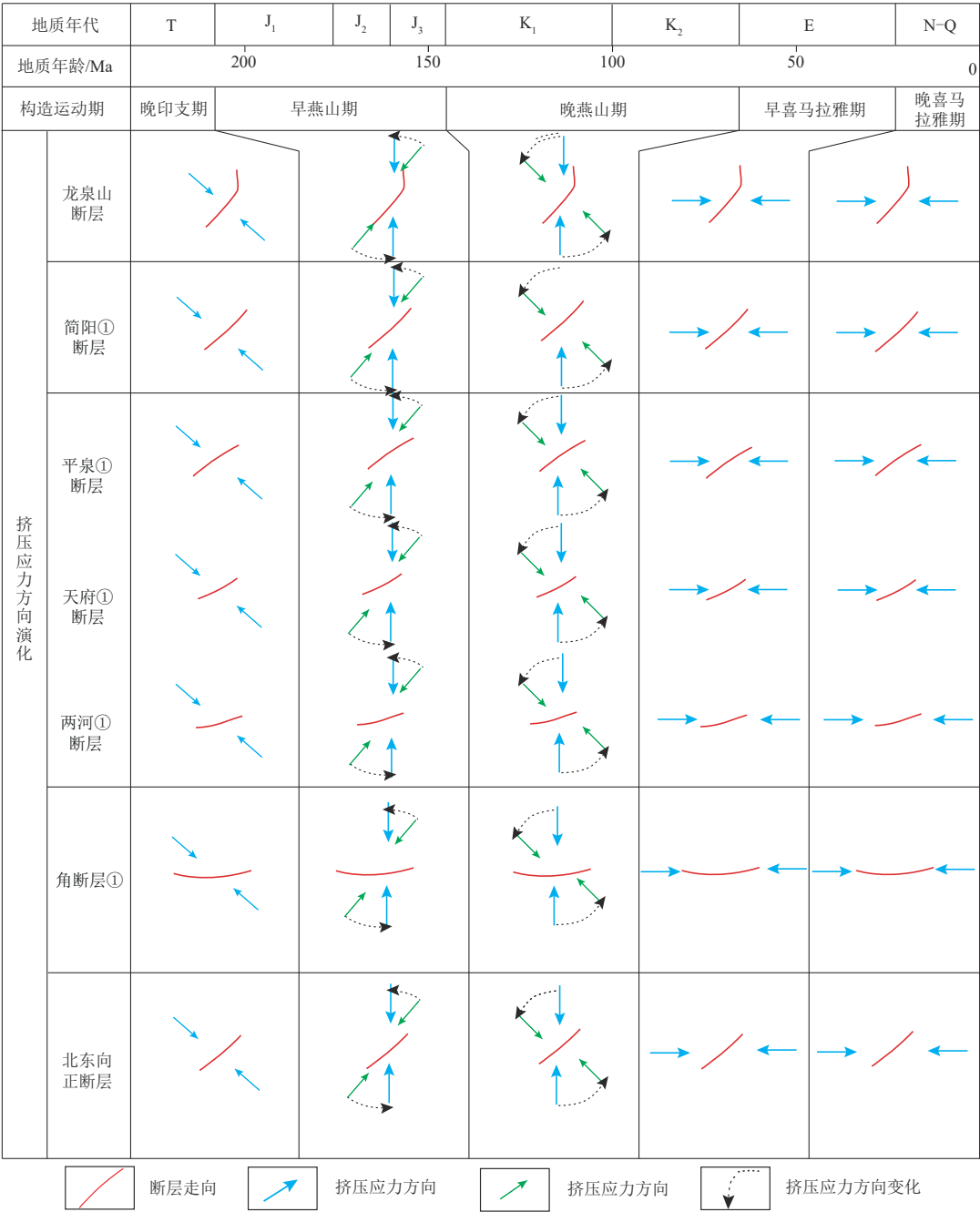


图8 川中地区沙溪庙组构造挤压应力方向与断层走向关系对比图

Fig. 8 Comparison of the relationship between the tectonic compressive stress direction and fault strike in the central Sichuan Basin

3.3 不同方法评价结果综合分析

综合对比可知(表2),川中地区西翼的龙泉山断层和区内的角①、简阳①等逆断层以及正断层在晚喜马拉雅期和晚燕山期均具有较好的输导性,能够起到沟通下伏须家河组和下侏罗统来源气源的作用,从断层规模和下伏气源供给等因素来看,龙泉山断层和角①断层为研究区最重要的气源断层。而在断层活动间歇期,逆断层基本上处于垂向封闭状态,而正断层在晚

喜马拉雅期埋藏较浅时,起到垂向输导或调节天然气运聚的作用。

4 断-砂配置对天然气运移的影响

4.1 断-砂配置类型

对于已知气源断层,断-砂配置关系对天然气向砂体充注具有重要意义,不同的断-砂配置类型往往决定

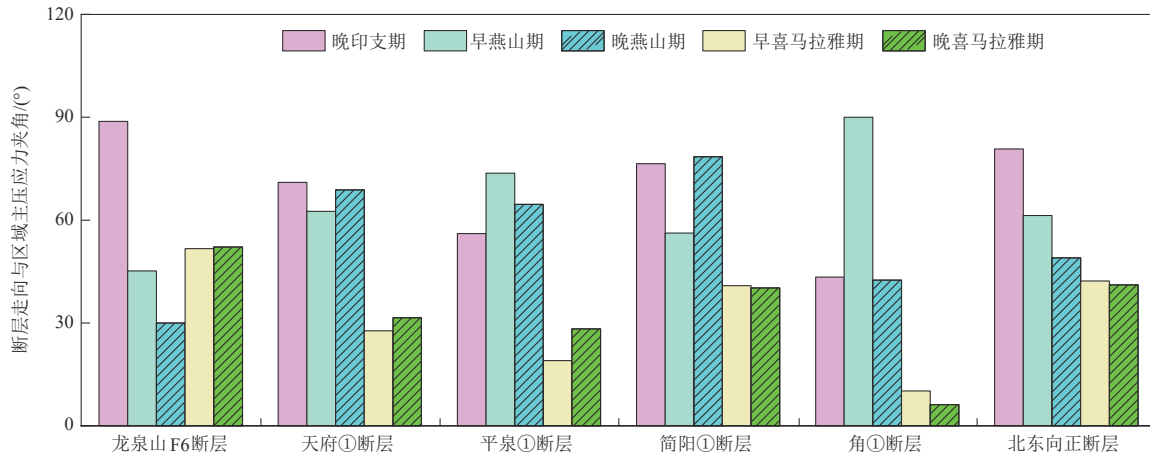


图9 川中地区沙溪庙组区域主压应力方向与断层走向夹角对比柱状图

Fig. 9 Comparison of angles between the regional principal compressive stress direction and fault strike in the central Sichuan Basin

表2 川中地区沙溪庙组断层输导性评价综合对比

Table 2 Comprehensive comparison of the fault transport capacity assessment in the central Sichuan Basin

输导性评价方法	评价结果	综合评价结果
断层活动性	龙泉山断层活动强度最大;角①、两河①、简阳①和平泉①断层活动强度中等;二类 and 三类正断层活动性低	最有利的输导断层:龙泉山断层和角①断层;其次是两河①、简阳①、平泉①断层以及NE向正断层
断层区域主压应力方向与断层走向关系	晚燕山期:龙泉山断层输导性好,角①断层中等,其他逆断层较差;晚喜马拉雅期:角①和平泉①断层输导性好,龙泉山、简阳①断层和NE向正断层中等	
断面正压力	逆断层基本上处于垂向封闭状态;正断层基本上处于垂向开启状态	

天然气的优势充注方向。一般与断层相连通的砂体在远离断层方向为上倾时,有利于天然气沿断层向砂体充注,而且砂体形态越陡,天然气向其充注的优势越明显。通过建立川中地区一类气源断层对应的沙溪庙组断-砂配置关系,并恢复早白垩世以来关键期的断-砂配置,提出研究区存在早-晚继承型(I型)和早-晚反转型(II型)两种断-砂配置演化,其中早-晚继承型根据不同时期的砂体形态变化,进一步划分为砂体保持亚型(I₁)、砂体变缓亚型(I₂)和砂体变陡亚型(I₃)(图10)。

4.2 断-砂配置对天然气运移和富集的影响

川中地区龙泉山、角①、简阳①和平泉①等气源断层的规模及下伏烃源岩生烃强度存在差异,这些断层与沙溪庙组砂体构成的断-砂配置类型对天然气运聚的控制作用也不尽相同。龙泉山断层规模大,而且处于下伏须家河组烃源岩生烃强度高值区(图11),断裂对天然气的输导作用最强,同时龙泉山断层对应的断-砂配置属于早-晚继承型,断层东翼的砂体为十分有利的天然气充注区。

对于其他断层,下伏烃源岩生烃强度普遍介于 $20 \times 10^8 \sim 40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,生烃条件造成这些断层的输导能力差异性较小,断-砂配置类型及断-砂要素发育差异是影响断-砂配置输导性差异的主要原因。其中角①断层对应断-砂配置演化类型为早-晚反转型,早期北高南低、晚期北低南高,导致天然气在早、晚充注期分别具有向北优势充注和向南优势充注的特点,其连通的河道砂体在断层两侧均有一定规模天然气聚集,如角①断层所在的八角场及其周边地区沙二₁亚段的6—8号等砂组,在断层两侧均有天然气成藏。区内的简阳①和两河①等多数断层的断-砂配置均为早-晚继承型,受晚期抬升剥蚀厚度差异影响,不同断层连通的砂体形态存在差异性变化,如简阳①断层对应砂体保持亚型、两河①断层对应砂体变陡亚型,这些断-砂配置演化造成天然气在断层一侧能够保持优势充注,砂体形态的不同仅造成充注速率的变化。可见,研究区气源断层对应的不同断-砂配置关系及烃源岩生烃强度等因素控制着研究区天然气运移方向,并造成天然气富集规模由西向东整体变小(图11)。

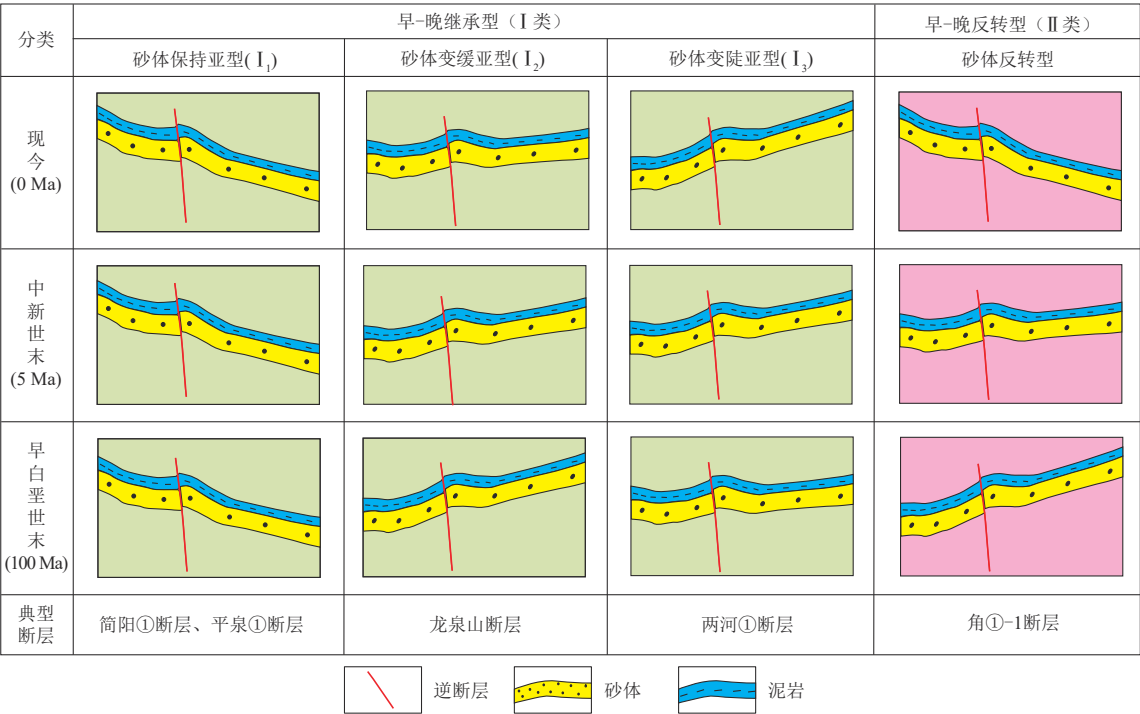


图 10 川中地区早白垩世(100 Ma)以来的沙溪庙组断-砂配置演化分类

Fig. 10 Classification of fault-sand configuration evolution in the central Sichuan Basin since the Early Cretaceous (100 Ma)

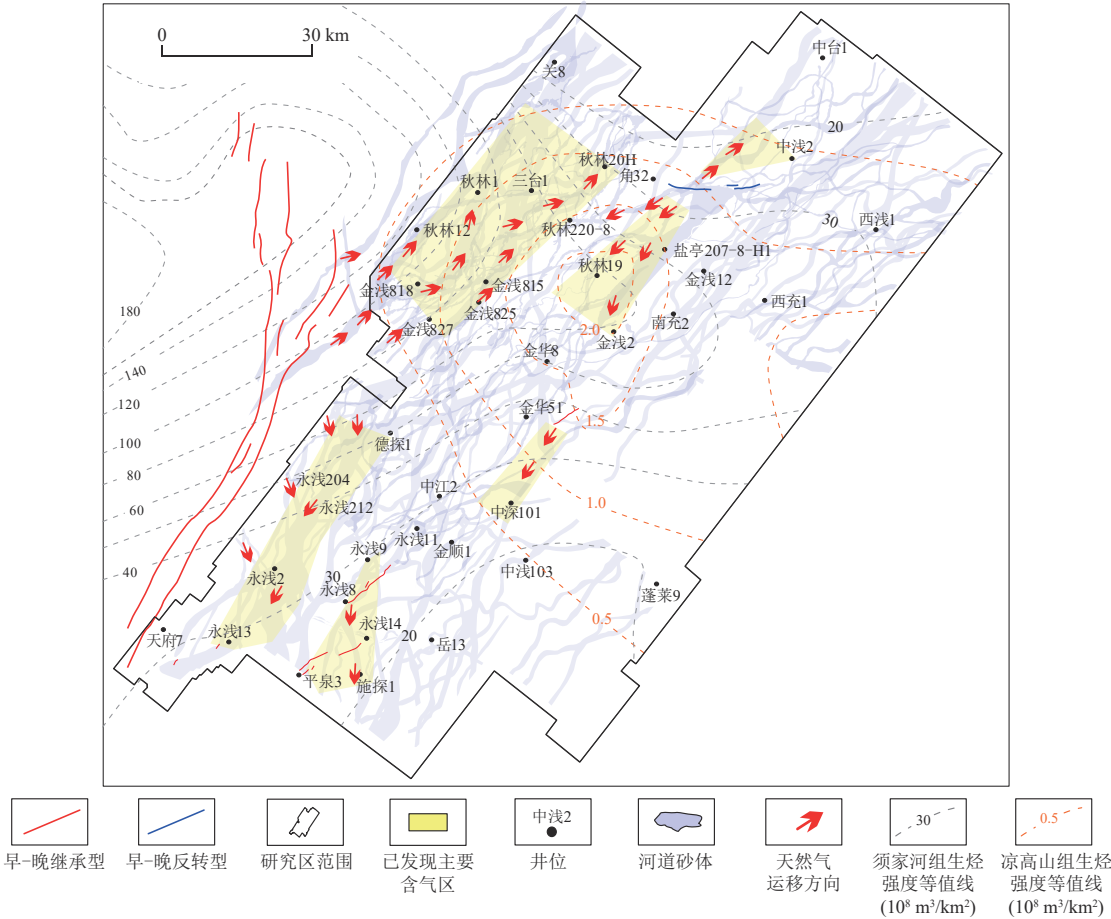


图 11 川中地区沙溪庙组断-砂配置演化类型与天然气分布关系

Fig. 11 Relationship between the types of fault-sand configuration evolution and natural gas distribution in the central Sichuan Basin

5 结论

1) 川中地区陆相层系以下侏罗统为界,划分为中-上三叠统和侏罗系-白垩系2套构造层,其中下构造层广泛发育挤压褶皱和逆断层,上构造层以宽缓褶皱和正断层为主,分别切割须家河组和下侏罗统烃源岩的逆断层和正断层,为沙溪庙组的气源断层。

2) 逆断层主要受控于晚三叠世NW-SE向、晚侏罗世一早白垩世近NS向和晚白垩世至今近WE向的构造挤压;正断层为沙溪庙组沉积早-中期“弱伸展背景下的隆-坳差异沉降”成因。

3) 通过断裂活动期和静止期的输导性对比评价,认为川中地区龙泉山、角①和简阳①等逆断层以及正断层在晚燕山期和晚喜马拉雅期具有较好的输导性,受断层规模和下伏气源供给等因素的影响,龙泉山和角①断层为最重要输导断层;断层活动间歇期,逆断层处于垂向封闭状态,而正断层在晚期埋藏较浅时以开启为主。

4) 川中地区气源断层与沙溪庙组河道砂体的断-砂配置演化存在早-晚继承型和早-晚反转型两大类,其中多数断层表现为早-晚继承型,有利于天然气在不同充注期向有利砂体持续充注,而角①断层为早-晚反转型,早期和晚期的天然气充注方向不同,在断层两侧均可发生天然气充注。

参 考 文 献

- [1] 石秀娟,李继红,刘克奇. 断层在东辛浅层油气成藏中的作用[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(2): 27-31.
SHI Xiujuan, LI Jihong, LIU Keqi. Effects of faults on petroleum accumulation in Dongxin shallow layer[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(2): 27-31.
- [2] SMITH D A. Theoretical considerations of sealing and non-sealing faults[J]. AAPG Bulletin, 1966, 50(2): 363-374.
- [3] SMITH D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf Coast salt basin[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(2): 145-172.
- [4] 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]//Offshore Technology Conference, Houston, 1978. Houston: OTC, 1978: OTC-3356-MS.
- [5] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [6] KNIPE R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(2): 187-195.
- [7] LOSH S, EGLINTON L, SCHOELL M, et al. Vertical and lateral

fluid flow related to a large growth fault, South Eugene Island Block 330 Field, offshore Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(2): 244-276.

- [8] 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, LYU 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.
- [9] 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.
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.
- [10] 付广,李佳静,于桐. 油源断裂输导油气时期厘定方法的改进及其应用——以渤海湾盆地歧口凹陷南大港断裂为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1481-1488.
FU Guang, LI Jiajing, YU Tong. Improvement of method for timing of hydrocarbon migration along source rock-rooted faults and its application: A case of the South Dagang fault in Qikou Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1481-1488.
- [11] ALLAN U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(7): 803-811.
- [12] 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.
LYU Yanfang, WANG Wei, HU Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 310-316.
- [13] 赵密福,李阳,李东旭. 泥岩涂抹定量研究[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 60-64.
ZHAO Mifu, LI Yang, LI Dongxu. Quantitative study of shale smear[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 60-64.
- [14] 曹龙,秦润森,周立业,等. 复杂断块油田内部低次级断层封闭性定量研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 81-90.
CAO Long, QIN Runsen, ZHOU Liye, et al. A prediction quantitative study on the sealing of secondary fault in complex fault block reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(1): 81-90.
- [15] 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, LYU 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.

- [16] 付晓飞, 吴桐, 吕延防, 等. 油气藏盖层封闭性研究现状及未来发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 454-471.
FU Xiaofei, WU Tong, LYU Yanfang, et al. Research status and development trend of the reservoir caprock sealing properties[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 454-471.
- [17] 王龙, 孙福亭, 何娟, 等. 海上复杂断块油田断层封闭性综合评价——以PL油田为例[J]. 断块油气田, 2017, 24(6): 760-765.
WANG Long, SUN Futing, HE Juan, et al. Integrative evaluation of fault sealing property for complex offshore block oilfield: Taking PL Oilfield as an example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(6): 760-765.
- [18] JONES R M, HILLIS R R. An integrated, quantitative approach to assessing fault-seal risk[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(3): 507-524.
- [19] 胡文革. 塔里木盆地顺北地区不同断裂带油气充注能力表征研究与实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 528-541.
HU Wenge. Study and practice of characterizing hydrocarbon charging capacity of different fault zones, Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 528-541.
- [20] 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.
LYU Yanfang, MA Fujian. Controlling factors and classification of fault seal[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(2): 163-166.
- [21] 潘中华, 吴笑荷, 孙耀庭, 等. 埕岛东斜坡馆上段断-砂输导能力定量评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(6): 38-45.
PAN Zhonghua, WU Xiaohe, SUN Yaoting, et al. Quantitative evaluation of fault-sandstone transport capacity of upper member of Guantao Formation in Chengdao east slope[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(6): 38-45.
- [22] 薛永安, 邓运华, 余宏忠. 渤海海域近期油气勘探进展与创新认识[J]. 中国石油勘探, 2008, 13(4): 1-7.
XUE Yongan, DENG Yunhua, YU Hongzhong. Progress and new knowledge of exploration for oil and gas in Bohai Sea area in recent years[J]. China Petroleum Exploration, 2008, 13(4): 1-7.
- [23] 雷裕红, 罗晓容, 潘坚, 等. 大庆油田西部地区姚一段油气成藏动力学过程模拟[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 204-210.
LEI Yuhong, LUO Xiaorong, PAN Jian, et al. Simulation on hydrocarbon migration and accumulation dynamics of the first member of Yaojia Formation in the west of Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 204-210.
- [24] 张卫海, 刘景新, 吴智平, 等. 辽河东部凹陷北部古近系输导体系及其对油气运移的影响[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(5): 19-22.
ZHANG Weihai, LIU Jingxin, WU Zhiping, et al. Paleogene passage system in the northern part of Liaohe eastern depression and its effect on hydrocarbon migration[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2005, 29(5): 19-22.
- [25] 康永尚, 曾联波, 张义杰, 等. 中国西部盆地台盆区高角度断层的成因及控油气作用分析[J]. 地球科学, 2005, 30(4): 459-466.
KANG Yongshang, ZENG Lianbo, ZHANG Yijie, et al. Formation mechanism of high-obliquity faults in platform areas of Chinese western basins and their control on petroleum migration and occurrence[J]. Earth Science, 2005, 30(4): 459-466.
- [26] 杨智, 何生, 王锦喜, 等. 断层泥比率(SCR)及其在断层侧向封闭性评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 347-351.
YANG Zhi, HE Sheng, WANG Jinxi, et al. Shale gouge ratio and its application in the fault seal estimation across the faulted zone[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 347-351.
- [27] 付广, 孙同文, 吕延防. 南堡凹陷断-砂配置侧向输导油气能力评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 79-87.
FU Guang, SUN Tongwen, LYU Yanfang. An evaluation method of oil-gas lateral transporting ability of fault-sandstone configuration in Nanpu Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 79-87.
- [28] 杨跃明, 王小娟, 陈双玲, 等. 四川盆地中部地区侏罗系沙溪庙组沉积体系演化及砂体发育特征[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 12-24.
YANG Yueming, WANG Xiaojuan, CHEN Shuangling, et al. Sedimentary system evolution and sandbody development characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 12-24.
- [29] 杨春龙, 苏楠, 芮宇润, 等. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组致密气成藏条件及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 98-109.
YANG Chunlong, SU Nan, RUI Yurun, et al. Gas accumulation conditions and exploration potential of tight gas reservoir of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 98-109.
- [30] 张本健, 潘珂, 吴长江, 等. 四川盆地金秋气田侏罗系沙溪庙组多期砂组天然气复合成藏机理及模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 51-61.
ZHANG Benjian, PAN Ke, WU Changjiang, et al. Compound gas accumulation mechanism and model of Jurassic Shaximiao Formation multi-stage sandstone formations in Jinjia Gas Field of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 51-61.
- [31] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589-606.
HE Dengfa, LI Desheng, ZHANG Guowei, et al. Formation and

- evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China [J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(3): 589-606.
- [32] 邓宾. 四川盆地中—新生代盆—山结构与油气分布[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- DENG Bin. Meso-Cenozoic architecture of basin-mountain system in the Sichuan Basin and its gas distribution [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [33] 胡全, 杜伟, 朱彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组细粒沉积的层序地层与岩相特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1024-1038.
- HU Zongquan, DU Wei, ZHU Tong, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies characteristics of fine-grained deposits of Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and on its periphery [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1024-1038.
- [34] 杨超, 陈清华. 济阳坳陷构造演化及其构造层的划分[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(2): 9-12, 22.
- YANG Chao, CHEN Qinghua. Tectonic evolution and tectono-stratigraphic classification of Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2): 9-12, 22.
- [35] 李忠权, 麻成斗, 应丹琳, 等. 川渝地区构造动力学演化与盆地—盆山耦合构造分析[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 631-640.
- LI Zhongquan, MA Chengdou, YING Danlin, et al. Tectonic dynamic evolution and analysis of basin-range coupling and basin-mountain coupling in Sichuan-Chongqing region, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 631-640.
- [36] 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 川西坳陷复合—联合构造及其对油气的控制[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 538-551.
- LI Zhiwu, LIU Shugen, CHEN Hongde, et al. Structural superimposition and conjunction and its effects on hydrocarbon accumulation in the western Sichuan Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 538-551.
- [37] 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性[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.
- [38] 付广, 王朋岩, 孙洪斌. 断层垂向封闭模式及研究方法[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(1): 8-11, 86.
- FU Guang, WANG Pengyan, SUN Hongbin. Fault vertical closure mode and research method [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(1): 8-11, 86.
- [39] 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.
- LYU 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.
- [40] 马新民, 刘池洋, 罗金海, 等. 基于地层变形的古构造应力场恢复及区域断裂封堵性评价方法[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 524-530.
- MA Xinmin, LIU Chiyang, LUO Jinhai, et al. Method of restoration on paleo-tectonic stress fields direction based on stratum deformation [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 524-530.
- [41] 万天丰, 王明明, 殷秀兰, 等. 渤海湾地区不同方向断裂带的封闭性[J]. 现代地质, 2004, 18(2): 157-163.
- WAN Tianfeng, WANG Mingming, YIN Xiulan, et al. Sealing properties of different direction faults in the Bohai Bay area [J]. Geoscience, 2004, 18(2): 157-163.
- [42] 李勇, 陈世加, 路俊刚, 等. 近源间互式煤系致密砂岩气成藏主控因素——以川中地区须家河组天然气为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(6): 798-808.
- LI Yong, CHEN Shijia, LU Jungang, et al. Main controlling factors of near-source and interbedded-accumulation tight sandstone gas from coal-bearing strata: A case study from natural gas of Xujiahe Formation, central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(6): 798-808.
- [43] 杨玉祥, 李延钧, 张文济, 等. 四川盆地泸州西部须家河组天然气成藏期次[J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 19-22.
- YANG Yuxiang, LI Yanjun, ZHANG Wenji, et al. The timing of gas accumulation in the Xujiahe Formation of western Luzhou, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(1): 19-22.

(编辑 孙川翔)